ISSN 2223–2966

СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 10 2025 (ОКТЯБРЬ)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал издается с 2011 года.

Редакция:

Главный редактор
А.В. Царегородцев

Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин

Верстка
М.А. Комарова

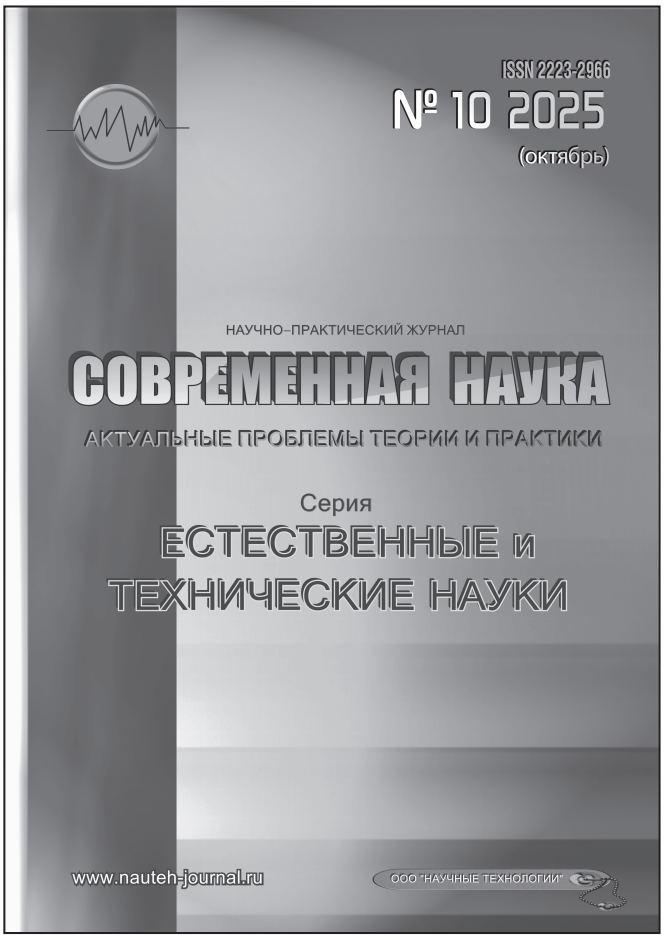
Подписной индекс издания
в каталоге агентства «Пресса России» — 80016

В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции.

Научно-практический журнал

Scientific and practical journal

(ВАК — 1.1.2, 1.5.х, 2.3.х, 3.1.х)



В НОМЕРЕ:

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ, ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ, КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

Издатель:
Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва, Волгоградский пр-т, 116-1-10
Тел/факс: 8(495) 142-8681

E-mail: redaktor@nauteh.ru
http: //www.nauteh-journal.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере массовых коммуникаций,
связи и охраны культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-44912 от 04.05.2011 г.

Авторы статей несут полную ответственность
за точность приведенных сведений, данных и дат.

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука:
Актуальные проблемы теории и практики» обязательна.

Журнал отпечатан в типографии
ООО «КОПИ-ПРИНТ» тел./факс: (495) 973-8296

Подписано в печать 13.10.2025 г. Формат 84х108 1/16
Печать цифровая Заказ № 0000 Тираж 2000 экз.

ISSN 2223-2966

© Журнал Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные и Технические науки»

Редакционный совет

Атаев Алевдин Рашитханович — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Безруких Марьям Моисеевна — д.б.н., профессор, Институт возрастной физиологии РАО

Бекетов Сергей Валериевич — д.б.н., ФГБНУ НИИ Пушного звероводства и кролиководства имени В.А. Афанасьева

Белых Владимир Иванович — Д.м.н., доцент, Алтайский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации

Грачев Николай Николаевич — доктор высшей ступени в области технических наук (DoctorHabilitatus), профессор, Московский государственный институт электроники и математики НИУ ВШЭ (технический университет)

Гусева Анна Ивановна — д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Зубкова Валентина Михайловна — д.б.н., профессор, Российский государственный социальный университет

Каллаев Нажмудин Омаркадиевич — д.м.н., профессор, Дагестанский государственный медицинский университет

Квасов Андрей Иванович — д.т.н., профессор, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева

Корнеев Андрей Мастиславович — д.т.н., профессор, Липецкий государственный технический университет

Корягина Наталья Александровна — д.м.н., доцент, Пермский государственный медицинский университет им. ак. Е.А.Вагнера Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кравец Бронислава Борисовна — д.м.н., профессор, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Министерства здравоохранения Российской Федерации

Кулик Сергей Дмитриевич — д.т.н., доцент, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Матвеев Всеволод Борисович — д.м.н., профессор, ФГБУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина, член-корреспондент РАН

Миндлин Юрий Борисович — к.э.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Надежкин Сергей Михайлович — д.б.н., профессор, Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии

Овезов Алексей Мурадович — д.м.н., доцент, ГБУЗ МО Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского

Олейникова Светлана Александровна — д.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет

Рахимов Ильгизар Ильясович — д.б.н., профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ромашкова Оксана Николаевна — д.т.н., профессор, Московский городской педагогический университет

Симаков Юрий Георгиевич — д.б.н., профессор, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского (ПКУ)

Симоненков Алексей Павлович — д.м.н., профессор, независимый эксперт

Трапезов Олег Васильевич — д.б.н., в.н.с., ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»

Федорова Оксана Ивановна — д.б.н., доцент, Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И. Скрябина

Харитонов Михаил Анатольевич — д.м.н., профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова

Царегородцев Анатолий Валерьевич — д.т.н., профессор, Московский государственный лингвистический университет redaktor3@nauteh.ru

СОДЕРЖАНИЕ
CONTENTS

Общая биология

Информатика, вычислительная техника и управление

Клиническая медицина

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.07

КОМПЛЕКСНОЕ БИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ПРИДОРОЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДА МУРМАНСКА

OVERALL BIOSTUDY OF ROADSIDE SOILS CONDITION OF MURMANSK

A. Garbul
E. Garbul
E. Makarevich
M. Litvinova
E. Kozhukhova

Summary. During the research, informative biological indicators of the condition of the soil were identified: biological activity, respiratory rate, phytotoxicity, total microbial number and percentage of soil bacilli. When studying the experimental plots, the dependence of the values of the above indicators on the distance from the source of pollution was revealed. With increasing distance from the highway, biological activity, respiratory rate, total microbial number, and percentage of soil bacilli in the soil increase, and phytotoxicity and acidity decrease. Using regression analysis methods, a strong dependence of biochemical indicators on microbiological ones was revealed. It was established that the relationship between biochemical and microbiological indicators of the soil is maintained regardless of the season.

Keywords: roadside area, soil pollution, phytotoxicity, biochemical properties of soil, soil microbiome.

Гарбуль Анна Викторовна
кандидат биологических наук, доцент,
Мурманский арктический университет
anna.cucumaria@yandex.ru
Гарбуль Евгений Алексеевич
научный сотрудник, Мурманский морской биологический институт Российская академия наук
garbul@mmbi.info
Макаревич Елена Викторовна
кандидат биологических наук,
зав. кафедрой микробиологии и биохимии,
Мурманский арктический университет
makarevichev@mauniver.ru
Литвинова Марина Юрьевна
кандидат биологических наук, доцент,
Мурманский арктический университет
litvinovamyu@mauniver.ru
Кожухова Екатерина Вячеславовна
старший преподаватель,
Мурманский арктический университет
kozhukhovaev@mauniver.ru

Аннотация. В ходе исследований выявлены информативные биологические показатели состояния почвы: биологическая активность, интенсивность дыхания, фитотоксичность, общее микробное число и доля почвенных бацилл. При изучении опытных участков выявлена зависимость значений вышеперечисленных показателей от удалённости источника загрязнения. По мере удаления от автодороги биологическая активность, интенсивность дыхания, общее микробное число и доля почвенных бацилл в почве увеличиваются, а фитотоксичность и кислотность уменьшаются. Методами регрессионного анализа выявлена сильная зависимость биохимических показателей от микробиологических. Установлено, что связь между биохимическими и микробиологическими показателями почвы сохраняется вне зависимости от времени года.

Ключевые слова: придорожная территория, загрязнённая почва, фитотоксичность, биохимические свойства почвы, почвенная микробиом.

Введение

Техногенное загрязнение окружающей среды имеет значимое влияние на состояние почв и влечёт за собой сокращение биоразнообразия растений, макро- и микроорганизмов, что в свою очередь негативно сказывается на биологической активности почвы и её способности к биоремедиации.

Транспортно-дорожный комплекс является мощнейшим источником загрязнения природной среды, характеризующимся высокими значениями концентрации поллютантов и широкой распространённостью. Подавление микробиома почвы приводит к снижению в ней интенсивности дыхания и уменьшению ферментативной активности. В дальнейшем происходит накопление неразложившегося органического вещества и исключение азота из круговорота веществ. Негативное влияние техногенного загрязнения на биологическую активность почвы пропорционально уровню транспортных выбросов и удаленности от их источника [1].

Транспортная нагрузка на город Мурманск увеличивается с каждым годом, что диктует необходимость разработки объективных методов контроля над загрязнением окружающей среды, при этом особое внимание необходимо уделять зонам придорожных полос, как территориям максимальной техногенной нагрузки. Анализ литературных источников показал отсутствие данных по комплексным биологическим исследованиям почв придорожных зон города Мурманска.

Цель работы — провести исследования состояния почв придорожных территорий г. Мурманска в различные сезоны года с использованием биохимических и микробиологических методов анализа.

Задачи исследования:

1) оценить микробиологические и биохимические показатели почвы, проведя количественную и качественную оценку состава почвенного микробиома;
2) определить фитотоксичность опытных образцов почвы;
3) установить взаимосвязь количественных и структурных характеристик почвенного микробиоценоза с биохимическими показателями (биологической активностью, интенсивностью дыхания и токсичностью почвенных участков).

Материалы и методы

Объектом исследования являлись почвенные образцы, отобранные на участке автодороги «Р–21» с координатами 68.877404 N, 33.109719 E. Данный участок находится в черте города, единственный источник загрязнения — автодорога.

Почвенные образцы отбирались с пяти участков от дороги: 0 м — обочина (№ 1), 10 м (№ 2), 20 м (№ 3), 50 м (№ 4) и 100 м (№ 5). Отбор проб осуществляется согласно ГОСТ Р 58595–2019. С каждого участка для параллельных опытов брались по три пробы [2]. Сбор проб осуществлялся с апреля по декабрь 2024 года. Для диагностики состояния почв оценивали вышеперечисленные биохимические параметры [3, 4, 5, 6, 7] и микробиологические показатели: общее микробное число (ОМЧ), а также долю почвенных бацилл в общей численности микроорганизмов [8, 9, 10, 11, 12].

Результаты работы обработаны статистически с применением регрессионного анализа. Оценка связи биохимических параметров с микробиологическими показателями осуществлялась по шкале Дворецкого по значению коэффициента детерминации (R^2): $R^2 < 0,3$ — слабая связь, $R^2 = 0,31–0,5$ — умеренная связь, $R^2 = 0,51–0,7$ — значительная связь, $R^2 = 0,71–0,9$ — тесная связь, $R^2 > 0,9$ — очень тесная связь [13, 14].

Результаты и обсуждение

При изучении качественного состава микробиоценоза почвенных образцов на всех исследуемых участках преобладали микромицеты, а также встречались бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Clostridium*. В незначительном количестве обнаруживались бактерии родов *Proteus* и *Enterococcus*.

Общее количество почвенных микроорганизмов даёт представление о степени загрязнения почвы и интенсивности протекания процессов и самоочищения. Нами была отмечена прямая зависимость между показателем общего микробного числа и удалённостью участка отбора проб от источника антропогенного загрязнения. На 5-м экспериментальном участке общее содержание микроорганизмов достигает максимальных значений: зимой — $2,01\times10^5$ КОЕ/г, а летом — $4,52\times10^5$ КОЕ/г (Рисунок 1).

Установлено, что в зимний период ОМЧ имело минимальные значения, весной и осенью данный показатель был ниже, чем в летний период. Численность и активность почвенных микроорганизмов связаны со скоростью протекания микробиологических процессов в почве. При удалении от источника загрязнения общая численность почвенных микроорганизмов исследуемых участков возрастала.

Число почвенных бацилл и их доля в ОМЧ является индикатором степени минерализации органического субстрата. В чистых почвах число бацилл относительно общего микробного числа достигает 20–50 %, а в загрязнённых — не превышает 20%. Наши исследования показали (Рисунок 2), что почвы участков № 4 и № 5 можно отнести к условно чистым, поскольку количество почвенных бацилл составляло 33 и 43 % соответственно, почву участка № 3 — относительно чистой, доля почвенных бацилл достигала 25 %, а почвы участков № 1 и № 2 — загрязнёнными, так как количество почвенных бацилл достигло значений в 17 и 21 % соответственно.

О биологической активности почвы судили по интенсивности дыхания и ферментной активности. Ферментную активность определяли по скорости разложения мочевины (экспресс-метод). По мере удаления от автодороги увеличивается ферментная активность, а время необходимое на разложение мочевины уменьшается (Таблица 1).

Минимальные показатели биологической активности регистрировались на всех опытных участках в зимнее время, а максимальные — летом. Скорость разложения мочевины на участке № 5, более чем в 2 раза превышает скорость разложения мочевины на участке № 1, который находится в непосредственной близости

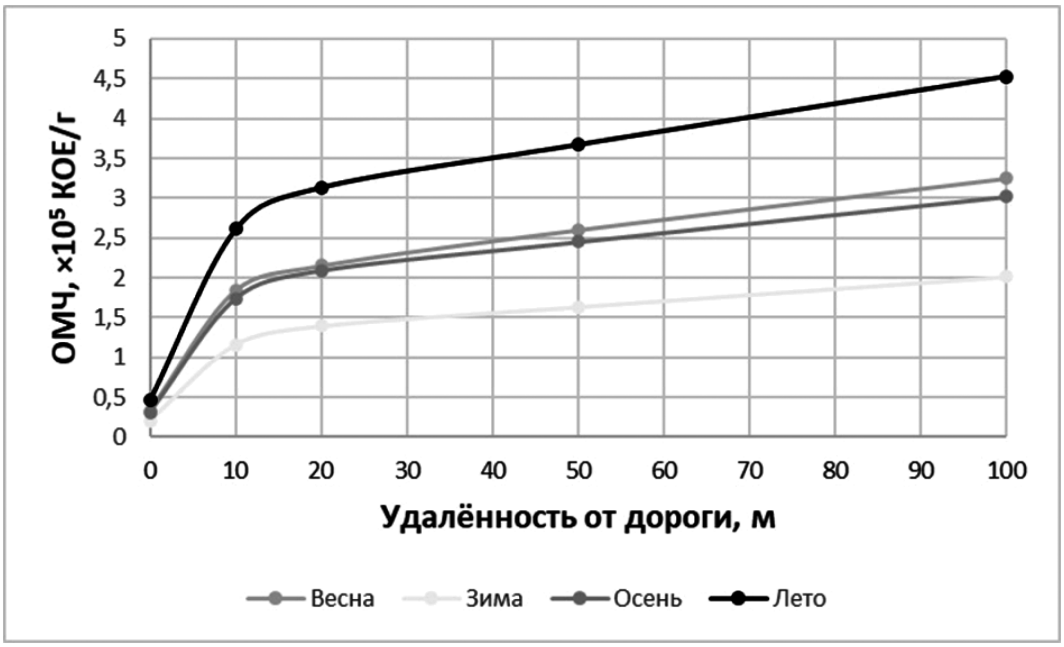


Рис. 1. Общее микробное число в почве опытных участков

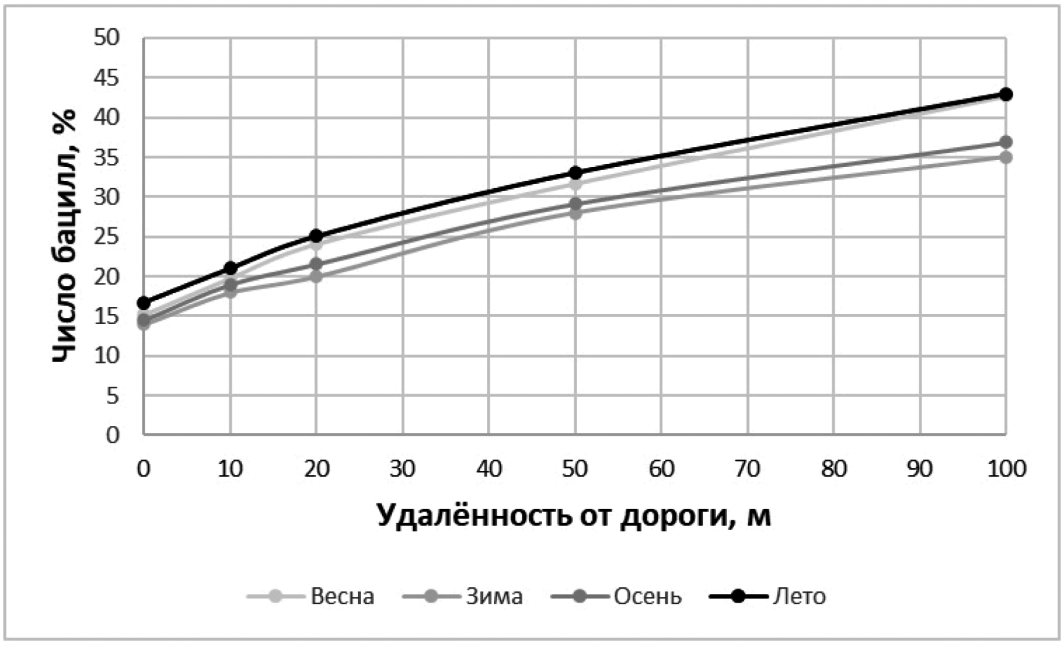


Рис. 2. Доля почвенных бацилл в составе микробиоценозов опытных образцов почвы

от источника загрязнения. Биологическая активность почв опытных участков увеличивается пропорционально увеличению расстояния от автодороги.

Интенсивность выделения углекислого газа даёт достоверную информацию о самоочищающей способности антропогенно нарушенных почв [13]. О биологических процессах судят по почвенному дыханию, чем активнее в почве протекают микробиологические процессы, тем больше выделяется углекислого газа. В литературных источниках отмечено, что содержание кислорода и углекислого газа в почве изменяется по сезонам. Аналогичные данные получены и в настоящем исследовании. Эмиссия CO_2 всех исследуемых почвенных образцов максимальна в летний период, а минимальна — зимой. Весной и осенью этот показатель газообмена имеет сходные значения. Во все периоды измерений количество выделившегося диоксида углерода увеличивается при удалении от автодороги. Интенсивность дыхания почвы опытных образцов увеличивается пропорционально удалению от источника загрязнения. За 24 часа из 10 г почвы с участка № 1 выделилось 2,4–5,4 мг CO_2, с участка № 2 — 4,64–10,44 мг, с участка № 3 — 4,96–11,16 мг, с участка № 4 — 6,81–15,33, а с участка № 5 — 9,66–21,75 мг. Общая тенденция наблюдается во все периоды измерений: количество выделившегося угле-

Таблица 1.
Результаты опытов по определению биологической активности почвы на опытных участках

№ участка	Удалённость от дороги, м	Среднее время разложения мочевины, ч	Относительная погрешность $\delta_{y/x}$, %
Весна			
1	0	17,92	0,12
2	10	15,74	0,16
3	20	13,05	0,10
4	50	11,32	0,17
5	100	9,01	0,12
Лето			
1	0	11,95	0,08
2	10	10,49	0,16
3	20	8,70	0,10
4	50	7,55	0,20
5	100	6,01	0,08
Осень			
1	0	26,88	0,08
2	10	23,61	0,14
3	20	19,58	0,10
4	50	16,98	0,07
5	100	13,52	0,06
Зима			
1	0	26,88	0,12
2	10	23,61	0,07
3	20	19,58	0,00
4	50	16,98	0,13
5	100	13,52	0,06

кислого газа на условно незагрязнённом участке № 5 примерно в 4 раза превышает количество выделившегося углекислого газа на участке № 1, находящемся в непосредственной близости от источника загрязнения (Рисунок 3).

Токсичность почвы определяли по реакции кресс-салата (*Lepidium sativum*). В ходе опыта фиксировали всхожесть и энергию прорастания семян. Почвы, которые сдерживают прорастание семян, развитие проростков и корней на 20% и более считаются фитотоксичными. В зависимости от сезона сбора образцов почвы, за трое суток на почве с участка № 1 проросло 14–16 семян из 50, с участка № 2 — 19–21, с участка № 3 — 25–27, с участка № 4 — 28–30, а с участка № 5 — 37–38.

В настоящей работе также определяли актуальную и потенциальную кислотность почвенных образцов (Рисунок 4). Результаты потенциального измерения pH почвы оценивали по стандартным шкалам [13].

Определение актуальной кислотности позволило установить, что во все исследуемые сезоны pH на участке № 1 составляет от 4,0 до 4,1, на участках №№ 2–5 — от 4,6 до 4,9. Кислотность почв колеблется от сильнокислых до кислых, чем ближе к источнику загрязнения, тем больше кислотность исследуемых участков. Повышение кислотности почвы на придорожных участках свидетельствует о возможном поступлении загрязняющих веществ в почву. Потенциальная кислотность почв независимо от сезона на изученных участках больше (pH <4), чем актуальная, что соответствует норме, поэтому потребность почвы в известковании увеличивается по мере приближения к источнику загрязнения.

В различные сезоны энергия прорастания семян и их всхожесть, при удалении от автодороги, увеличиваются более чем в 2 и 1,5 раза соответственно, а токсичность почв уменьшается. На участке № 1, который находится непосредственно близко к источнику загрязнения, доля всхожести семян имеет самые низкие значения (52–53 %). Можно предположить, что почва на данном участке является среднетоксичной. Почва с участков, удалённых от автодороги на расстояниях 10, 20 и 50 м имеет слабое загрязнение, всхожесть семян составляет 63–84 %, а почва, собранная с участка № 5 является нетоксичной, так как имеет самые высокие показатели всхожести — более 90 %.

Наши исследования показали, что определение фитотоксичности почвы по реакции биологических объектов является показательным и эффективным методом изучения загрязнённых почв. Расчеты демонстрируют обратно пропорциональную связь между ОМЧ, долей почвенных бацилл и биологической активностью, токсичностью почв. Полученные коэффициенты детерминации означают тесную связь между исследуемыми показателями (Таблицы 2, 3).

Биологическая активность почвы зависела от ОМЧ в почве и содержания почвенных бацилл в образце. В свою очередь выявлен характерный отклик микробиологических показателей на уровень токсичности почвы, выражаемый в снижении общей численности микроорганизмов и доли бацилл в образцах загрязнённых почв.

Прямо пропорциональная связь установлена между ОМЧ, долей почвенных бацилл и интенсивностью ды-

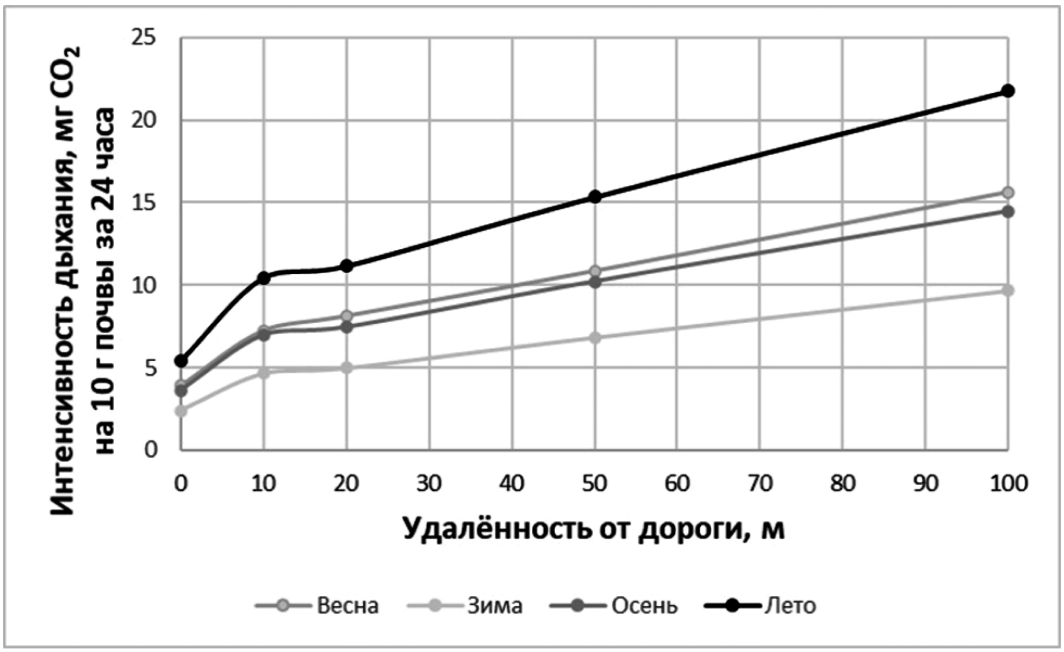


Рис. 3. Интенсивность дыхания почвы за сутки на опытных участках

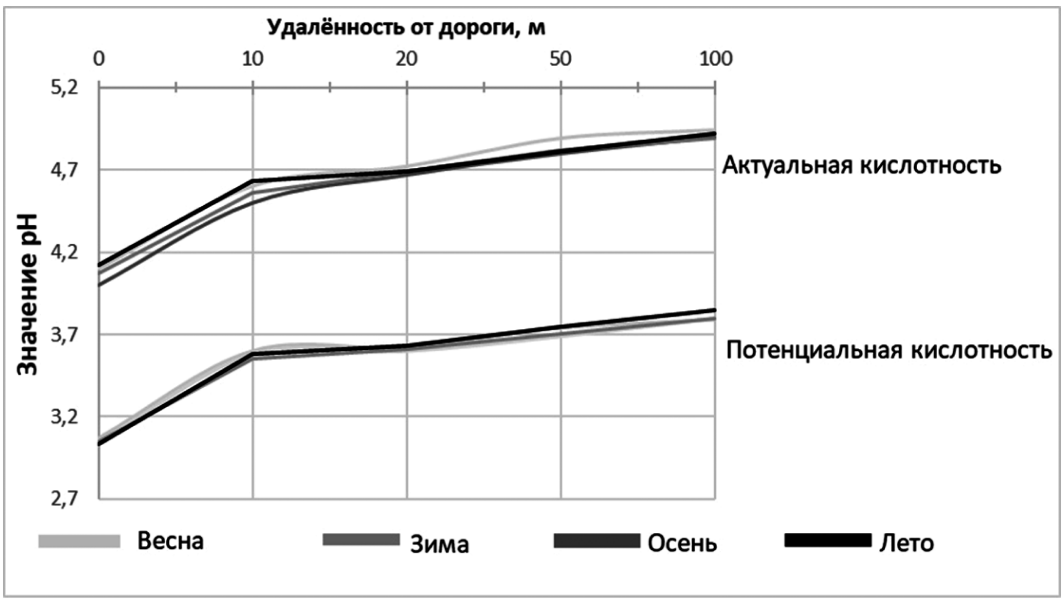


Рис. 4. Кислотно-щелочные свойства почвы опытных участков

хания почв. Полученные коэффициенты детерминации означали тесную связь между исследуемыми показателями (Таблица 4). Разница в полученных коэффициентах в пределах погрешности позволяет предположить, что связь между ОМЧ, содержанием почвенных бацилл и биохимическими показателями почвы сохраняется вне зависимости от времени года.

По сезонам года разница между исследованиями незначительна и не превышает погрешности, что подтверждает достоверность измерений (Таблицы 2–4).

Таким образом, комплекс биохимических и микробиологических показателей биологической активности почв может быть использован для диагностики состояния её загрязнения при условии сравнения с соответствующими фоновыми почвами. Предложенные биохимические и микробиологические методы отличаются высокой информативностью, при этом не требуют значительных экономических затрат и специального оборудования.

Выводы

На основании проведённых исследований можно сделать следующие *выводы*:

1. В почве, исследованных участков, преобладали микромицеты, встречались бактерии родов *Bacillus*, *Pseudomonas* и *Clostridium*, в единичных

Таблица 2.

Зависимость биологической активности почв от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x}$, %
Общее микробное число				
1	Весна	$y = -2{,}10x + 13{,}08$	–0,94	5,10
2	Лето	$y = -2{,}30x + 17{,}08$	–0,95	5,40
3	Осень	$y = -2{,}03x + 12{,}94$	–0,95	6,20
4	Зима	$y = -2{,}24x + 14{,}85$	–0,94	4,9
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = -0{,}35x + 15{,}02$	–0,86	3,09
2	Лето	$y = -0{,}30x + 16{,}81$	–0,88	2,32
3	Осень	$y = -0{,}34x + 19{,}80$	–0,89	3,07
4	Зима	$y = -0{,}31x + 14{,}23$	–0,89	3,11

Таблица 3.

Зависимость токсичности почв от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x}$, %
Общее микробное число				
1	Весна	$y = -0{,}07x + 3{,}76$	0,89	4,30
2	Лето	$y = -0{,}07x + 5{,}41$	0,88	4,15
3	Осень	$y = -0{,}06x + 3{,}87$	0,89	4,25
4	Зима	$y = -0{,}07x + 4{,}15$	0,88	4,19
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = -0{,}59x + 38{,}98$	–0,99	4,29
2	Лето	$y = -0{,}50x + 46{,}06$	–0,97	4,19
3	Осень	$y = -0{,}53x + 45{,}86$	–0,98	4,14
4	Зима	$y = -0{,}56x + 41{,}89$	–0,97	4,21

Таблица 4.

Зависимость интенсивности дыхания почвы от микробиологических показателей

№ п/п	Сезон	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2_{x,y}$	Относительная погрешность $\delta_{y/x}$, %
Общее микробное число				
1	Весна	$y = 3{,}59x + 1{,}51$	0,94	3,45
2	Лето	$y = 3{,}59x + 1{,}40$	0,94	3,92
3	Осень	$y = 3{,}49x + 0{,}80$	0,94	4,70
4	Зима	$y = 3{,}53x + 1{,}23$	0,94	3,55
Доля почвенных бацилл				
1	Весна	$y = 0{,}46x - 2{,}49$	–0,97	3,59
2	Лето	$y = 0{,}47x - 3{,}24$	–0,97	3,87
3	Осень	$y = 0{,}48x - 1{,}62$	–0,97	4,12
4	Зима	$y = 0{,}47x - 1{,}40$	–0,97	3,74

количествах обнаруживаются бактерии родов *Proteus* и *Enterococcus*.

2. По мере удаления от источника загрязнения общее микробное число и доля почвенных бацилл в почве возрастала.
3. Биологическая активность, интенсивность дыхания почв опытных участков увеличивалась пропорционально удалённости от автодороги, а фитотоксичность и кислотность уменьшались.
4. Между общим микробным числом, долей почвенных бацилл и выбранными для исследования биохимическими параметрами (биологической активностью, интенсивностью дыхания и токсичностью почвенных участков) прослеживается тесная связь — 86–98% их изменчивости зависела от микробиологических показателей.

Связь между биохимическими и микробиологическими показателями почвы сохранялась вне зависимости от времени года, что подтверждено статистически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горовцов А.В., Показатели структуры микробиоценоза почв г. Ростов-на-Дону как инструмент мониторинга состояния антропогенно-преобразованных почв // Научный журнал КубГАУ. — №89(05). — 2013. — С. 1–13.
2. ГОСТ Р 58595–2019 Почвы. Отбор проб.
3. Звягинцев Д.Г. Биология почв. — 2005. — 445 с.
4. Казеев К.Ш. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. — 2003. — 216 с.
5. Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Методы определения ферментативной активности почв. — 2021. — 176 с.
6. Никулина А.Р., Сачкова Е.Д., Бубнова Л.В. Определение биологической активности почв в целях поддержания равновесия урбоэкосистемы // Известия БГУ. — 2020. — № 4. — С. 586–592.
7. Сорокин А.Е., Савич В.И. Мохаммади Ш. Колесник А.И. Агроэкологическая оценка депонирования CO_2 почвами сухостепной зоны // Плодородие. — 2021. — № 2. — С. 65–67.
8. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. — 1991. — С. 144–145.
9. МУК 4.2.3695–21 Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы.
10. Добровольская Т.Г. Структура бактериальных сообществ почв. — 2002. — 282 с.
11. Зенова Г.М., Степанова А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А. Практикум по биологии почв. — 2002. — 120 с.
12. Инешина Е.Г., Гомбоева С.В. Почвенные микроорганизмы. Прокариоты, выделение, учет и идентификация. — 2007. — 147 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). — 2011. — 351 с.
14. Мешалкина Ю.Л., Самсонова В.П. Математическая статистика в почвоведении: Практикум. — 2008. — 84 с.

© Гарбуль Анна Викторовна (anna.cucumaria@yandex.ru); Гарбуль Евгений Алексеевич (garbul@mmbi.info);
Макаревич Елена Викторовна (makarevichev@mauniver.ru); Литвинова Марина Юрьевна (litvinovamyu@mauniver.ru);
Кожухова Екатерина Вячеславовна (kozhukhovaev@mauniver.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.21

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЬНОВИРИОННОГО АНТИГЕНА ВИРУСА ЗАПАДНОГО НИЛА

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF VARIOUS METHODS OF OBTAINING WEST NILE VIRUS WHOLE VIRION ANTIGEN

E. Korol
T. Kuznetsova
N. Teteryatnikova
T. Sharov

Summary. The article is devoted to the evaluation of the efficiency of different methods for isolation and concentration of the whole virion of West Nile fever virus.
The aim of the work was to find the optimal method for obtaining the whole virion antigen of West Nile fever virus. *Methods*. The objects of the study were collection strains of West Nile fever virus, as well as fractions isolated from the virus-containing fluid. The virus strains cultivated in Vero cells were disinfected, then the cell components and virions were separated by ultracentrifugation, precipitation, and chromatography. The analysis of the preparations was carried out using polyacrylamide gel electrophoresis and ELISA. *Results*. Five samples of material presumably containing the virus were isolated and analyzed. It was determined that a single band in the region of 65 kDa on the electrophoregram most likely corresponds to the whole virion antigen of West Nile fever virus. It was shown that the method of ion-exchange chromatography with the sorbent «CHT Type I» turned out to be optimal for solving the problem, since it allowed the most effective concentration and purification of the whole-virion antigen of WNV.

Keywords: West Nile virus, chromatography, ultracentrifugation, antigen.

Король Екатерина Васильевна
Научный сотрудник,
ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора
katherina.korol@mail.ru
Кузнецова Татьяна Владимировна
Научный сотрудник,
ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора
tanechka.kuzneczova.89@mail.ru
Тетерятникова Наталья Николаевна
Научный сотрудник,
ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора
nataliatet@bk.ru
Шаров Тимур Николаевич
Кандидат медицинских наук,
старший научный сотрудник,
ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора
timursharov@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена оценке эффективности различных способов выделения и концентрирования цельного вириона вируса лихорадки Западного Нила.
Целью работы был поиск оптимального метода получения цельновирионного антигена вируса лихорадки Западного Нила. *Методы*. Объектами исследования служили коллекционные штаммы вируса лихорадки Западного Нила, а также фракции, выделенные из вируссодержащей жидкости. Штаммы вируса, культивируемые в клетках линии Vero, обеззараживали, затем компоненты клеток и вирионы разделяли методами ультрацентрифугирования, преципитации и хроматографии. Анализ препаратов проводили с помощью электрофореза в полиакриламидном геле и реакции ИФА. *Результаты*. Выделено и проанализировано 5 проб материала, предположительно содержащих вирус. Определено, что одиночная полоса в районе 65 кДа на электрофореграмме вероятнее всего соответствует цельновирионному антигену вируса лихорадки Западного Нила. Показано, что метод ионообменной хроматографии с сорбентом «CHT Type I» оказался оптимальным для решения поставленной задачи, так как позволил наиболее эффективно сконцентрировать и очистить цельновирионный антиген ВЗН.

Ключевые слова: вирус Западного Нила, хроматография, ультрацентрифугирование, антиген.

Введение

В последние годы широкое распространение имеют заболевания вирусной этиологии. Для южных территорий РФ особую актуальность приобрели арбовирусные трансмиссивные инфекции, в частности лихорадка Западного Нила [1]. По данным ВОЗ, тяжелые формы лихорадки Западного Нила (ЛЗН), характеризующиеся, прежде всего, острым интоксикационным синдромом с поражением центральной нервной системы, несут серьезную эпидемическую угрозу для населения, в связи с чем не вызывает сомнений необходимость постоянного мониторинга за ЛЗН, изучения естественного коллективного иммунитета, тщательной работы по выявлению заболевших.

В отличие от рекомбинантных вирусных белков, цельновирионный антиген может быть выделен только из зараженных вирусом клеточных линий, и очистка вирусных частиц от компонентов клеток — достаточно сложная и трудоёмкая задача [2]. Представляется актуальной разработка и оптимизация методологических подходов получения высокоочищенного цельновирионного антигена вируса Западного Нила. При этом особенно важно сохранение диагностически значимых эпитопов и иммунологической активности выделенного антигена с целью его использования для иммунизации линейных мышей Balb/c при получении моноклональных антител, а также в качестве положительного контроля в тест-системах.

Также следует отметить, что не существует какого-либо наиболее эффективного метода очистки нативного цельновирионного антигена, в зависимости от поставленной цели применяют различные комбинированные методы и подходы [3,4]. Целью данного исследования было определить оптимальный способ получения цельновирионного антигена вируса лихорадки Западного Нила.

Материалы и методы

На начальном этапе работы использовали штамм вируса Западного Нила «Volgograd_601/18» из коллекции ФКУЗ Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт Роспотребнадзора. Вирус культивировали в клетках линии Vero. Для инактивации во флакон с культуральной средой, содержащей вирус, добавляли мертиолат натрия в конечной концентрации 0,01 % и в последующем прогревали в течение 30 минут при 56 °С. Разрушение мембран клеток Vero осуществляли троекратной процедурой замораживания и оттаивания. Клеточный дебрис осаждали центрифугированием при 4000 g в течение 10 минут. Концентрирование и очистку вирусной фракции проводили несколькими способами: переосаждением трихлоруксусной кислотой и раствором полиэтиленгликоля (ПЭГ-6000), ультрацентрифугированием в ступенчатом градиенте сахарозы в течение 4 часов. Кроме того, осуществляли хроматографическое разделение вируссодержащей жидкости (ВСЖ) методами ионообменной хроматографии («DEAE-сефароза А-25», керамический гидроксиапатит «CHT Type I») на хроматографе среднего давления «Akta Explorer 10». Фракции дополнительно концентрировали методом ультрафильтрации с использованием фильтра PM-10. Иммунологическую активность выделенных вирусных фракций определяли с помощью иммуноферментного анализа с сыворотками больных лихорадкой Западного Нила, а также со специфичными к ВЗН моноклональными антителами.

Результаты

Анализировались пробы материала, предположительно содержащие вирус: элюат с хроматографических колонок, фракция сахарозы с границы 20 %–60 % градиента, а также растворы белков после переосаждения трихлоруксусной кислотой и с помощью ПЭГ-6000 (Рисунок 1).

Как видно, из рисунка 1, препараты ВСЖ после различных методик выделения и очистки цельновирионного антигена ВЗН существенно отличались по составу. Множество полос на дорожке 2 соответствует эукариотическим белкам клеток Vero и компонентам среды DMEM. Следует отметить, что не заражённые клетки этой линии на электрофореграмме выглядят идентично. Это можно объяснить схожестью электрофоретической подвижности компонентов клеток Vero и вириона ВЗН, что делает метод электрофореза малопригодным как для препаративного получения вириона ВЗН, так и для определения наличия или отсутствия репликации вируса в данной клеточной линии. Электрофореграмма элюатов после ионообменной хроматографии содержала полосу в районе 60–66 кДа, более отчётливо выраженную по сравнению с изначальной клеточной взвесью. Электрофорез вирусной фракции в растворе градиента сахарозы продемонстрировал наличие нескольких очень слабовыраженных полос с молекулярной массой от 25 до 66 кДа. Пробы после переосаждения трихлоруксусной кислотой и ПЭГ-600 состояли из множества визуально отчётливых полос с молекулярными массами в районе от 20 до 100 кДа, присутствующих также и в исходной взвеси клеток Vero с вирусом.

Результаты иммуноферментного анализа с сыворотками больных лихорадкой Западного Нила, а также со специфичными к ВЗН моноклональными антителами показали, что высокой иммунологической активностью обладали только препараты, содержащие фракцию с молекулярной массой 66 кДа, после хроматографической очистки (оптическая плотность фракций составляла

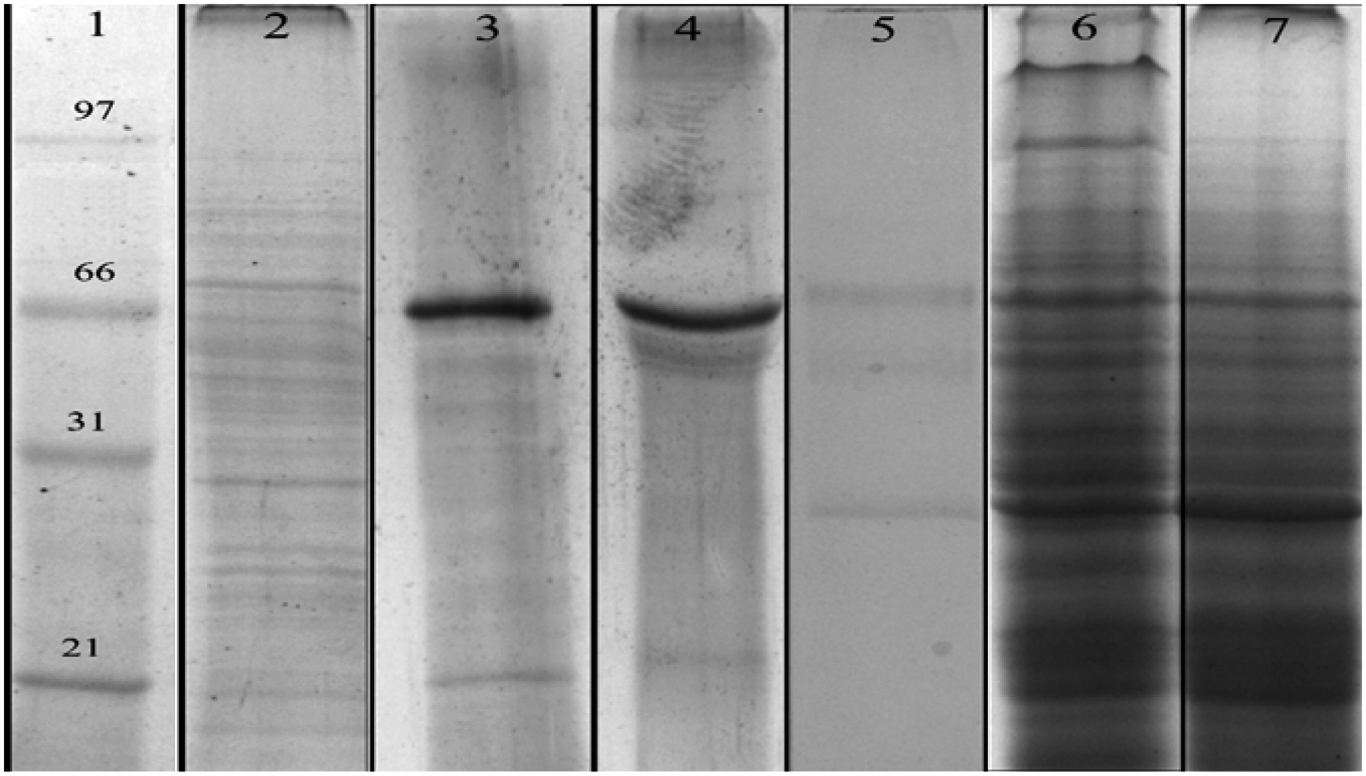


Рис. 1. Картина распределения фракций различной молекулярной массы

Дорожка 1 — маркеры молекулярной массы. 2 — гомогенизат общеклеточных белков клеток Vero, зараженных ВЗН, полученный в результате обработки ультразвуком. 3 — элюат после хроматографии с «DEAE-сефарозой А-25». 4 — элюат после хроматографии с «СНТ-1». 5 — фракция сахарозы после ультрацентрифугирования. 6 — препарат ВСЖ после осаждения трихлоруксусной кислотой. 7 — препарат ВСЖ после осаждения ПЭГ-6000. Гель окрашен нитратом серебра

1,20–1,28 в сравнении с оптической плотностью положительного контроля 1,25). Фракции после переосаждения трихлоруксусной кислотой и ПЭГ-6000 не взаимодействовали с содержащими антитела к ВЗН сыворотками, что по всей видимости, означает их принадлежность к эукариотическим белкам из клеток Vero (оптическая плотность фракции составляла 0,07 в сравнении с плотностью положительного контроля 1,25). В свою очередь, фракции, сконцентрированные методом ультрацентрифугирования, показали лишь незначительную активность, не достигающую границы положительного результата (оптическая плотность фракции составляла 0,28 в сравнении с плотностью положительного контроля 1,25).

Заключение

Использование метода ультрацентрифугирования в градиенте плотности достаточно часто описывается в российской или зарубежной литературе [5]. Однако в данном случае концентрация вирионов ВЗН в полученном препарате очень мала, что требует применения дополнительных методик концентрирования и избавления от материала градиента. Использование методик переосаждения позволяет значительно сконцентрировать не только вирион ВЗН, но и белки клеток Vero, а также компоненты среды DMEM и входящей в её состав эмбриональной телячьей сыворотки. Этим объясняется отсутствие у полученных переосаждением фракций специфической активности в реакции ИФА, даже при наличии на электрофореграмме этих препаратов полос характерных препаратов, обладающих специфичной иммунологической активностью. Метод ионообменной хроматографии оказался оптимальным для решения поставленной задачи, так как позволил наиболее эффективно сконцентрировать и очистить цельновирионный антиген ВЗН от компонентов питательной среды и клеток линии Vero в один этап, что было подтверждено наличием у выделенных вирусных фракций специфической иммунологической активности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путинцева Е.В., Удовиченко С.К., Никитин Д.Н., Бородай Н.В., Колоскова А.Ю., Антонов А.С., Бондарева О.С., Топорков А.В. Лихорадка Западного Нила в Российской Федерации в 2024 г., прогноз на 2025 г. Проблемы особо опасных инфекций. 2025;(1):84–95. https://doi.org/10.21055/0370-1069-2025-1-84-95.
2. Pan Y., Yan J., Zhang Y., Lin J., Liang Z., Sun J. Centrifugation-Based Purification Protocol Optimization Enhances Structural Preservation of Nucleopolyhedrovirus Budded Virion Envelopes. Insects. 2025 Apr 17;16(4):424. doi: 10.3390/insects16040424.
3. Zhang F., Luo J., Teng M., Xing G., Guo J., Zhang Y. Purification of cell-derived Japanese encephalitis virus by dual-mode chromatography. Biotechnol Appl Biochem. 2021 Jun;68(3):547–553. doi: 10.1002/bab.1960. Epub 2020 Jun 11.
4. Hirst J., Hutchinson E. Purification of Influenza Virions. Methods Mol Biol. 2025:2890:27–51. doi: 10.1007/978-1-0716-4326-6_2.
5. Kim H., Yi J., Yu J., Park J., Jang S. A Simple and Effective Method to Concentrate Hepatitis C Virus: Aqueous Two-Phase System Allows Highly Efficient Enrichment of Enveloped Viruses. Viruses 2022, 14(9), 1987; https://doi.org/10.3390/v14091987.

© Король Екатерина Васильевна (katherina.korol@mail.ru); Кузнецова Татьяна Владимировна (tanechka.kuzneczova.89@mail.ru);
Тетерятникова Наталья Николаевна (nataliatet@bk.ru); Шаров Тимур Николаевич (timursharov@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.24

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ГРУППЕ ФТОРХИНОЛОНОВ НА РИЗОСФЕРУ И ФИЛЛОСФЕРУ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Монтина Ирина Михайловна
Кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, «Омский государственный педагогический университет»
imontina@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние антибактериальных препаратов, относящихся к группе фторхинолонов на ризосферу и филлосферу растительных организмов. Фторхинолоны попадают в почву с навозом и осадками сточных вод, где они накапливаются и оказывают неблагоприятное воздействие на микробиоту. Распространение разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина ведет к появлению антибиотико-резистентных бактерий и генов, что вызывает снижение эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных и влияет на микробиоту высших растений. Показано, что растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы и филлосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений. Отмечается, что при всасывании почвенного раствора с фторхинолонами, они легко всасываются и быстро накапливаются сначала в корнях растений, а затем переносятся к надземной части растения, где накапливаются. Причем древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов, подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы и филлосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ.

Ключевые слова: антибактериальные препараты, фторхинолоны, ризосфера растений, филлосфера растений, ципрофлоксацин, антибиотикорезистентные бактерии и гены, микробиота высших растений.

STUDY OF THE EFFECT OF ANTIBACTERIAL DRUGS BELONGING TO THE GROUP OF FLUOROQUINOLONES ON THE RHIZOSPHERE AND PHYLLOSPHERE OF PLANT ORGANISMS

I. Montina

Summary. The article examines the effect of antibacterial drugs belonging to the group of fluoroquinolones on the rhizosphere and phyllosphere of plant organisms. Fluoroquinolones enter the soil with manure and sewage sludge, where they accumulate and have an adverse effect on the microbiota. The spread of various types of antibiotics, and especially ciprofloxacin, leads to the emergence of antibiotic-resistant bacteria and genes, which causes a decrease in the effectiveness of antibiotics as agents for the treatment of human and animal diseases and affects the microbiota of higher plants. It has been shown that plants not only directly affect the transport of antibiotics in the soil, absorbing and accumulating them, but also depend on antibiotics themselves, which affect the microorganisms of the rhizosphere and phyllosphere, enzymes and root secretions, causing the migration of antibiotics. The antibiotic ciprofloxacin, significantly altering the mechanisms of photosynthesis and respiration, causes toxic effects in plants. It is noted that when a soil solution with fluoroquinolones is absorbed, they are easily absorbed and quickly accumulate first in the roots of plants, and then transferred to the aboveground part of the plant, where they accumulate. Moreover, woody plants have a better ability to absorb antibiotics, because they have a higher absorption potential. Fluoroquinolones can cause resistance in soil microorganisms, inhibit cellular protein synthesis, and subsequently affect cell proliferation. Ciprofloxacin inhibits the formation of tRNA, which blocks the process of protein synthesis. In addition, antibiotics can alter the structure of the microbial community of the rhizosphere and phyllosphere by interfering with the energy metabolism of microorganisms and the metabolic system.

Keywords: antibacterial drugs, fluoroquinolones, plant rhizosphere, plant phyllosphere, ciprofloxacin, antibiotic-resistant bacteria and genes, microbiota of higher plants.

Производство различных видов антибиотиков с каждым годом увеличивается. Связано это с их широким применением как в медицине, так в сельском хозяйстве, где особенно много их применяют в животноводстве. Однако только 10–30 % этих антибиотиков усваиваются животными, а остальное количество попадает в экосистемы через экскременты, что приводит к значительному загрязнению почвы и воды [1,2]. Сегодня остатки антибиотиков различных групп, включая сульфаниламиды, макролиды, фторхинолоны и тетра-

циклины, обнаруживаются в различных средах в концентрациях, варьирующихся от нанограммов до микрограммов на литр или килограмм [3,4].

Сегодня, одной из самых важных групп антибактериальных средств, используемых в медицине и ветеринарии, являются фторхинолоны (ФХ). Эти препараты попадают в почву из-за растущей практики внесения навоза и осадка сточных вод на сельскохозяйственные поля, где они могут накапливаться и оказывать неблагоприятное воздействие на микробиоту. Остаточные концентрации фторхинолонов в почве варьируются от нескольких мкг до г/кг$^{-1}$ и соответствуют концентрациям пестицидов [5].

Одним из наиболее широко используемых в мире фторхинолоновых антибиотиков является ципрофлоксацин. Он широко применяется в терапии человека и в животноводстве [6]. Последствиями распространения разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина в почве уделяется большое внимание, т.к. отмечается появление антибиотикорезистентных бактерий и генов [7], так называемым резистом [8], что ведет к снижению эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных. Особенно серьезную озабоченность в последние годы вызывает негативное действие антибиотиков не столько на природные микробиомы, сколько на представителей других трофических уровней в экосистеме, и в первую очередь, на высшие растения [9, 10].

Антибиотики, получаемые химическим путем из метаболитов растений, животных или микроорганизмов, особенно бактерий, становятся все более распространенными в системах почва-микроорганизм-растение, причем и в домашних условиях, и в быту, создавая значительную угрозу для окружающей среды и здоровья человека [11].

Попадая в почву, все антибиотики, независимо от их строения, подвергаются процессам адсорбции, миграции и разложения и это имеет решающее значение для экологического равновесия. Воздействие антибиотиков на окружающую среду зависит от связывания с почвой, адсорбционных свойств и скорости разложения, которые, в свою очередь, зависят от влажности, кислотности, структуры и температуры почвы [12]. Однако всесторонние исследования факторов, вызывающих деградацию антибиотиков остаются ограниченными [13].

Способность растений поглощать, переносить и разлагать антибиотики является очень одним из самых важных направлений изучения снижения уровня антибиотиков в окружающей среде. Растительные организмы являются первичными продуцентами органической материи и преднамеренно или непреднамеренно подвергаются воздействию химических токсикантов и в дальнейшем служат звеном их передачи по пищевым цепочкам. Все растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков [14]. Микроорганизмы ризосферы существенно влияют на динамику антибиотиков, а также изменяют характеристики почвы и разнообразие микроорганизмов, что влияет на поведение антибиотиков в системах почва-микроорганизм-растение [15], что особенно важно в системе ризосферы растений.

Влияние антибиотиков на растения в почвенно-растительных системах проявляется не только в опосредованном воздействии через микроорганизмы ризосферы, но и также во влиянии на филлосферу, которое может выражаться в прямом подавлении роста растений. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений [16]. Известное водное растение ряска *Lemna minor* L. способно поглощать ципрофлоксацин, что сказывается на изменении оксидантной активности ряски [17]. При этом наблюдается 50%-ное подавление ростовых тестфункций ряски, которые, однако, различаются в разных условиях. Исследования *L. minor* в течение 7 суток показали, что токсичной концентрацией ципрофлоксацина может быть концентрация от 0,203 мг/л [18] до 3,75 мг/л [17].

Так, при воздействии сульфонамида наблюдалось угнетение проростков у растений чечевицы (*Lens culinaris*), риса (*Oryza sativa*) и капусты (*Brassica campestris*) [19].

Поглощение растениями антибиотиков существенно влияет на физические, химические и биологические реакции препаратов, попадающих в почву, что приводит к их полному поглощению и преобразованию в растительном организме. Однако это поглощение значительно зависит от вида растений и часто является определяющим фактором [20].

На эффективность усвоения растениями антибиотиков в значительной степени влияют такие факторы, как количество и длина листьев, а также характеристики корней. Учеными было выявлено, что окситетрациклин (безрецептурный препарат) накапливается в большей степени в проводящей системе, чем в листьях, что связано с видоспецифичностью усвоения [21]. Однако исследования показывают, что большинство антибиотиков обладают более высокой концентрацией в корнях, а не в листьях и стеблях, но при этом корневая система действует как канал для переноса в надземный органы и ткани растений различных классов антибиотиков. Следовательно, чем более развита корневая система у растения, тем активнее идет всех транспорт веществ и,

в том числе антибиотиков. Например, в плодах томатов и других видов видах пасленовых, накапливается больше антибиотиков, чем в листовых овощах. Связано это с более развитой корневой системой пасленовых. Было обнаружено, что коэффициент накопления антибиотиков, показатель, используемый для сравнения способности различных овощей накапливать антибиотики из почвы, колеблется от 6,20 до 8,44 для пасленовых и от 1,47 до 1,58 для листовых овощей [22].

На усвоение антибиотиков корнями растений значительно влияет молекулярная масса препарата. Антибиотики, растворенные в почвенной воде, активно всасываются растениями. В соответствии с особенностями всасывания антибиотики можно разделить на три класса: 1) антибиотики с высокой липофильностью, которые в основном адсорбируются липидами корней и, как правило, не транспортируются в растение, оставаясь в ризосфере; 2) антибиотики блокируются за пределами корней растений и не попадают в ризосферу; 3) антибиотики попадают в растение при всасывании через корневую систему и переносятся по проводящей системе по растению, попадая в стебли, листья и плоды и накапливаясь там [23].

Исследования показали, что при всасывании почвенного раствора с начальной концентрация фторхинолонов в воде 1 000 мкг/л, они легко всасываются и быстро накапливаются в корнях растения *Eichhornia crassipes* в концентрации 1 645,2 мкг/г. Но растение обладает способностью переносить антибиотики от корней к надземной части растения, причем средний коэффициент биоконцентрации в листьях равен 0,34 [24].

После длительного орошения томатов водами, содержащими антибиотики, обнаружено, что коэффициент биоконцентрации варьировался от 0,178 до 6,441 [25].

Антибиотики с низкой молекулярной массой проявляют более высокую подвижность в различных тканях растения, чем антибиотики высокой молекулярной массы. Тетрациклин и хлорамфеникол накапливают больше всего в плодах, за ними следуют стебли и листья, с наименьшим распределением в корнях [25]. Высокая концентрация макролидов препятствует их усвоению многими растениями. Липофильные антибиотики эритромицин, рокситромицин и азитромицин поглощаются корнями в следовых количествах. Концентрация гемифлоксацина более высокая в наружном слое корнеплодов (8,5 мкг/кг), чем во внутреннем (2,8 мкг/кг) [27].

Древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Это было подтверждено с помощью количественного анализа на примере исследований *Rhizophora stylosa* Griff. и *Avicennia marina* (Forssk.). Эти растения накапливают 366,6 мкг/кг и 1 306,3 мкг/кг фторхинолонов соответственно за счет поглощения корнями. Прямое поглощение древесными растениями из ризосферы является основным фактором, препятствующим миграции и трансформации антибиотиков. Например, было обнаружено, что содержание фторхинолонов в ризосфере *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco и *Kandelia candel* (L.) Druce примерно в два раза превышает содержание их в почве без ризосферы. Таким образом, ризосфера способствовала миграции антибиотиков к корням древесных растений для поглощения и разложения.

Было установлено, что по отношению к общей массе антибиотиков, накопленных в растениях (1,66 мг), содержание антибиотиков в различных частях персика (*Amygdalus persica* L.) значительно отличается. Процент накопления антибиотиков следующий: корни — 0,031 %> стебель — 0,021 %> листья — 0,013 %> плоды — 0,007 % [28].

Многие молекулы антибиотиков состоят из неполярного ядра в сочетании с полярными функциональными группами. Многие антибиотики являются амфифильными или амфотерными и легко ионизируются. Однако физико-химические свойства соединений из разных структурных классов сильно различаются. Воздействие на почвенные организмы может быть самым разным, хотя все антибиотики обладают высокой биологической активностью. Отсутствие воздействия может быть отчасти связано с отсутствием подходящих методов тестирования. Тем не менее, часто наблюдаются эффекты, связанные с дозой и сроком хранения в почве. Особенно это связано с почвенными микроорганизмами, т.к. это может привести к значительному изменению микробного сообщества.

Из-за антибиотического эффекта фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов. Кроме того, применение таких антибиотиков в основном приводит к образованию резистентных микроорганизмов в организме, который лечат этими препаратами. В дальнейшем эти резистентные микроорганизмы попадают непосредственно в почву с заражёнными экскрементами. Если патогены уже резистентны или приобретают в результате переноса генов резистентность от комменсальных микроорганизмов, то люди и животные подвергаются риску заражения инфекциями, которые невозможно вылечить с помощью любых известных препаратов. Многие сохраняют свои свойства даже при длительном нахождении в биосистемах [14].

Исследования показали, что даже при выдержке биокультуры с антибиотиками на открытом воздухе в течение года, в нёй были обнаружены достаточно высокие концентрации ципрофлоксацина, энрофлоксацина и те-

трациклина, что показывает ограниченную эффективность удаления антибиотиков во время выдержки и, следовательно, на медленное разложение антибиотиков в таких условиях. В ходе различных исследований было установлено, что ципрофлоксацин, основной метаболит энрофлоксацина, и тетрациклины хорошо адсорбируются почвой и длительно сохраняются в ней, и в даже в очень низких концентрациях способны подавлять активность естественных микроорганизмов. Скорость деградации таких препаратов значительно варьируется и зависит от различных факторов, таких как температура, структура, содержание органического углерода и активность микроорганизмов [5].

Различные органы растений, могут усваивать разные виды антибиотиков. Поэтому растения с хорошо развитыми корнями и надземной частью обладают большим коэффициентом накопления антибиотиков. Особенно важны в этом процессе корни. Однако в зоне корневых систем растений находится огромное количество ризосферных микроорганизмов, а также ферментов, влияющих на антибиотики. Антибиотики вызывают изменения в микробном сообществе ризосферы и филлосферы, а также связанных с ними ферментами [29].

Взаимодействие между ферментами ризосферы и антибиотиками может идти в нескольких различных направлениях. Антибиотики могут подвергаться биоаккумуляции, биосорбции, биодеградации или биотрансформации под действием почвенных и ризосферных микроорганизмов, которые обладают способностью поглощать, использовать и преобразовывать антибиотики в почвенной среде. Исследования показали, что виды, способные участвовать в миграции и трансформации антибиотиков, представлены в основном актиномицетами. Однако все ризосферные и филлосферные микроорганизмы, независимо от их количества важны для роста и развития растений [30].

Антибиотики значительно влияют на рост и метаболизм микроорганизмов и структуру микрофлоры. Антибиотики могут снижать активность микроорганизмов за счет нескольких механизмов, включая нарушение функции белков, ингибирование синтеза нуклеиновых кислот, изменение внутренней микрофлоры, а также нарушение энергетического метаболизма микроорганизмов и системы обмена веществ [31].

Существуют некоторые микроорганизмы ризосферы, которые адаптируются к антибиотическому стрессу, что позволяет им стать доминирующими штаммами, участвующими в разложении антибиотиков и стимулирующими рост определенных групп микроорганизмов. Кроме того, антибиотики могут воздействовать на ферменты растений или микроорганизмов, что приводит к усилению или ингибированию определенных ферментативных реакций, происходящих в зоне корневой системы. Ризосферные микроорганизмы являются высокочувствительными к антибиотикам, даже в низких концентрациях. Некоторые антибиотики подавляют структуру и функцию клеточной стенки и клеточной мембраны ризосферных микроорганизмов. Некоторые антибиотики вредят ризосферным микроорганизмам, препятствуя синтезу и экспрессии нуклеиновых кислот и белков [31].

Как правило, наиболее чувствительными являются микроорганизмы, подобные патогенам, против которых созданы антибиотики. Антибиотики широкого спектра действия (например, тетрациклины, фторхинолоны) могут подавлять очень широкий спектр природных бактерий. Это вызывает снижение микробного разнообразия и нарушает равномерность распределения видов микроорганизмов. Краткосрочные исследования часто обнаруживают снижение количества грамположительных бактерий (если антибиотик является β-лактамом или макролидом) или грамотрицательных (для хинолонов) по сравнению с необработанными контрольными образцами [32]. Популяции грибов, особенно плесневых могут резко увеличиваться, в условиях, когда под действием антибиотиков идет подавление их бактериальных конкурентов. Исследования показали, что в обработанной антибиотиками почве, наблюдается активный рост грибной биомассы. Связано это с тем, что снижается количество бактерий, которые обычно сдерживают рост грибов [33].

Фторхинолоны могут подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Стрептомицин и безрецептурные препараты влияют на синтез белка, нарушая функцию рибосом. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ. Обнаружено, что высокие концентрации антибиотиков приводят к снижению активности микроорганизмов, неспособности микроорганизмов адаптироваться к стрессу, вызванному антибиотиками, и снижению биомассы и разнообразия. Антибиотики могут вызывать изменение качества ризосферных экссудатов или приводить к нестабильности их состава [34].

Таким образом, человечество сегодня применяет в медицине и ветеринарии огромное количество антибактериальных средств, и среди них наиболее используемые фторхинолоны. Эти препараты попадают в почву на сельскохозяйственные поля с навозом и осадками сточных вод, где они накапливаются и оказывают неблагоприятное воздействие на микробиоту. Распространение разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина ведет к появлению антибиотикорезистентных

бактерий и генов, что вызывает снижению эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных и влияет на микробиоту высших растений. Воздействие антибиотиков на окружающую среду зависит от связывания с почвой, адсорбционных свойств и скорости разложения, которые, в свою очередь, зависят от влажности, кислотности, структуры и температуры почвы. Растения способны поглощать, переносить и разлагать антибиотики является очень одним из самых важных направлений изучения снижения уровня антибиотиков в окружающей среде. Однако все растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы и филлосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков. Микроорганизмы ризосферы существенно влияют на динамику антибиотиков, а также изменяют характеристики почвы и разнообразие микроорганизмов, что влияет на поведение антибиотиков в системах почва-микроорганизм-растение. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений. На усвоение антибиотиков корнями растений значительно влияет молекулярная масса препарата. Антибиотики, растворенные в почвенной воде, активно всасываются растениями. Исследования показали, что при всасывании почвенного раствора с фторхинолонами, они легко всасываются и быстро накапливаются сначала в корнях растений, а затем переносятся к надземной части растения, где накапливаются. Причем древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов. Антибиотики значительно влияют на рост и метаболизм микроорганизмов и структуру микрофлоры. Антибиотики могут снижать активность микроорганизмов за счет нескольких механизмов, включая нарушение функции белков, ингибирование синтеза нуклеиновых кислот, изменение внутренней микрофлоры, а также нарушение энергетического метаболизма микроорганизмов и системы обмена веществ. Фторхинолоны могут подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы и филлосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ. Обнаружено, что высокие концентрации антибиотиков приводят к снижению активности микроорганизмов, неспособности микроорганизмов адаптироваться к стрессу, вызванному антибиотиками, и снижению биомассы и разнообразия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Massé D.I., Cata Saady N.M., Gilbert Y. (2014): Potential of biological processes to eliminate antibiotics in livestock manure: an overview. Animals, 4: 146–163
2. Ngigi A.N., Ok Y.S., Thiele-Bruhn S. (2019): Biochar-mediated sorption of antibiotics in pig manure. Journal of Hazardous Materials, 364: 663–670
3. Cheng J.H., Zhang H.J., Wang W., Zhang Y.Y., Chen Y.Z. (2011): Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China. Soil Science, 176: 652–660.
4. Zhao X.D., Qiao Q.Q., Qin X.R., Li X.J., Li Y.T. (2023): Characteristics of antibiotics contamination in soil of China in recent fifteen years and the bioremediation technology: a review. Environmental Science, 44: 4059–4076.
5. Picó Y., Andreu V. Fluoroquinolones in soil—risks and challenges. Anal Bioanal Chem 387, 1287–1299 (2007). https://doi.org/10.1007/s00216-006-0843-1
6. Antonelli R., Malpass G.R.P., da Silva M.G.C., Vieira M.G.A. Adsorption of ciprofl oxacin onto thermally modifi ed bentonite clay: experimental design, characterization, and adsorbent regeneration // J. Environ. Chem. Eng. — 2020. — V. 8. — P. 104553. doi: 10.1016/j. jece.2020.104553.
7. Zhang M., Zuo J., Yu X., Shi X., Chen L., Li Z. Quantifi cation of multi-antibiotic resistant opportunistic pathogenic bacteria in bioaerosols in and around a pharmaceutical wastewater treatment plant // J. Environ. Sci. — 2018. — V. 72. — P. 53–63. DOI: 10.1016/j.jes.2017.12.011.
8. Кожевин П.А., Виноградова К.А., Булгакова В.Г. Почвенная антибиотическая резистома // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2013. — № 2. — С. 3–10.
9. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век, Техносферная безопасность. — 2021. — Т. 6. — № 3. — С. 251–265.
10. Стимулирующий фитоэффект Fe_3O_4-активированного угля при комбинированном загрязнении почвы антибиотиком ципрофлоксацином и медью / А.А. Дзеранов, Г.С.К. Самбрано, А.Д. Батаков [и др.] // Проблемы агрохимии и экологии. — 2023. — № 4. — С. 27–35. — DOI 10.26178/AE.2023.49.37.006. — EDN YUODSI.
11. Liu B.Y., Liu W.Q., Nie X.P., Guan C., Yang Y.F., Wang Z.H., Liao W. (2011): Growth response and toxic effects of three antibiotics on Selenastrum capricornutum evaluated by photosynthetic rate and chlorophyll biosynthesis. Journal of Environmental Sciences, 23: 1558–1563
12. Wang J.H., Wang L.J., Zhu L.S., Wang J., Xing B.S. (2022): Antibiotic resistance in agricultural soils: source, fate, mechanism, and attenuation strategy. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52: 847–889.
13. Zhang Y. (2022): Impacts of Long-term Application of Manure on the Accumulation and Migration of Antibiotic Resistance Genes in Purple Soils with Different pH. Chongqing, Southwest University.
14. Chen J.Y., Liu D.Y., Zhao Y., Sun X.H. (2021): Research progress on the synergistic effects between plant active ingredients and antibiotics to reduce drug re-sistance of bacteria. Natural Product Research and Development, 33: 1063–1071.

15. Xiao Z.F., Han R.X., Su J.Q., Zhu Z., Zhao Y., Chen Q.L., Zhao J.Y., Li G., Zhu Y.G. (2023): Application of earthworm and silicon can alleviate antibiotic resistance in soil-Chinese cabbage sys— tem with ARGs contamination. Environmental Pollution, 319: 120900
16. Gomes M.P., Gonçalves C.A., de Brito J.C.M., Souza A.M., da Silva Cruz F.V., Bicalho E.M., Figueredo C.C., Garcia Q.S. Ciprofl oxacin induces oxidative stress in duckweed (Lemna minor L.): Implications for energy metabolism and antibioticuptake ability // J. Hazard. Mater. — 2017. — V. 328. — P. 140–149. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.01.005
17. Nunes B., Veiga V., Frankenbach S., Serôdio J., Pinto G. Evaluation of physiological changes induced by the fl uoroquinolone antibiotic ciprofl oxacin in the freshwater macrophyte species Lemna minor and Lemna gibba // Environ. Toxicol. Pharmacol. — 2019. — P. 103242. doi: 10.1016/j.etap.2019.103242.
18. Robinson A.A., Belden J.B., Lydy M.J. Toxicity of fl uroquinolone antibiotics to aquatic organisms // Environ. Toxicol. Chem. — 2005. — V. 24. — P. 423–430. doi: 10.1897/04-210r.1. 11. Cheong M.S., Seo K.H., Chohra H., Yoon Y.E., Choe H., Kantharaj V., Lee Y.B. Infl uence of sulfonamide contamination derived from veterinary antibiotics on plant growth and development // Antibiotics. — 2020. — V. 9, No. 8. — P. 456. doi:10.3390/antibiotics9080456.
19. Cheong M.S., Seo K.H., Chohra H., Yoon Y.E., Choe H., Kantharaj V., Lee Y.B. Infl uence of sulfonamide contamination derived from veterinary antibiotics on plant growth and development // Antibiotics. — 2020. — V. 9, No. 8. — P. 456. doi:10.3390/antibiotics9080456.
20. Tadić Đ., Bleda Hernandez M.J., Cerqueira F., Matamoros V., Piña B., Bayona J.M. (2021): Occurrence and human health risk assessment of antibiotics and their metabolites in vegetablesgrown in field-scale agricultural systems. Journal of Hazardous Materials, 401: 123424.
21. Matamoros V., Escolà Casas M., Mansilla S., Tadić Đ., Cañameras N., Carazo N., Portugal J., Piña B., Díez S., Bayona J.M. (2022): Occurrence ofantibioticsin lettuce (*Lactuca sativa* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.) following gorganic soil fertilisationunder plot-scale conditions: crop and human health implications. Journal of Hazardous Materials, 436: 129044.
22. Hu J.Z., Zhang X., Wang Y.Q., Xu J.M., Lu H.B., Ye C.B., Liu X.H., Chen Z.B., Lu S.Y. (2022): Responses of plants and rhizosphere microorganisms in constructed wetlands under sulfamethoxazole stress. Journal of Environmental Engineering Technology, 12: 1474–1483.
23. Boonsaner M., Hawker D.W. (2010): Accumulation of oxytetracycline and norfloxacin from saline soil by soybeans. Science of the TotalEnvironment,408:1731–1737
24. Yan Y., Pengmao Y.Z., Xu X.G., Zhang L.M., Wang G.X., Qiu J., Chen L.A. (2020): Migration of antibiotic ciprofloxacinduring phytoremediation of contaminated water and identificationof transformation products. Aquatic Toxicology (Amsterdam, Netherlands), 219: 105374.
25. Christou A., Karaolia P., Hapeshi E.H., Michael C., Fatta-Kassinos D. (2017): Long-term wastewater irrigation of vegetables in real agricultural systems: concentra-tion of pharmaceuticals in soil, uptake and bioaccumulation in tomato fruits and human health risk assessment. Water Research, 109: 24–34.
26. Pan M., Chu L.M. (2017): Transferofantibiotics from wastewater or animal manure to soil and edible crops. Environmental Pollution, 231: 829–83.
27. Boxall A.B.A., Johnson P., Smith E.J., Sinclair C.J., Stutt E., Levy L.S. (2006): Uptake of veterinary medicines from soils into plants. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54: 2288–2297.
28. Zhao F., Chen L., Yen H., Sun L., Li S., Li M., FengQ., Yang L. (2020): Multimedia mass balance approach to characterizing the transport potential of antibiotics in soil plant systems following manure application. Journal of Hazardous Materials, 393: 1223636
29. Kumar A., Dubey A. (2020): Rhizosphere microbiome: engineering bacterial competitiveness for enhancing crop production. Journal of Advanced Research, 24: 337–352.
30. Zhan F.D., Lu Y.G., Guan G.J., Tang Y.J., Zhang Y.C., Huang J.G. (2005): Community structure of microorgansms and their dynamics in the rhizosphere of fluecured tobacco. Acta Pedologica Sinica, 3: 488–494.
31. Zhang B., Chen L., Jin S., Guo Q.Z., Hou J. (2022): The influence of plants on the migration and transformation of nitrogen in plantsoil systems: a review. Journal of Soil Science and Plant Nutri-tion, 22: 4084–4102.
32. Chuikov Yu.S., Chuikova L.Yu., Mustakova M.R. Geoecological Features of the Territory and Communal Ser ices (Astrakhan) // Astrakhan Bulletin of En ironmental Education. 2023. № 1 (73). Pp. 106–125.
33. Чуйков Ю.С. Антибиотики и их роль в природных и антропогенных экосистемах / Ю.С. Чуйков, Л.Ю. Чуйкова // Астраханский вестник экологического образования. — 2025. — № 2(86). — С. 82–106. — DOI 10.36698/2304–5957-2025-2-82-106. — EDN MPNFFH.
34. Liu X.W., Fang F., Li L.L., Deng C.X., Hu S.H., Yu Z.M. (2022): Preliminary study on antibiotic resistance genes and bacterial communities on two types of micro-plastics under sulfamethoxazole stress. Asian Journal of Ecotoxicology, 17: 200–210.

© Монтина Ирина Михайловна (imontina@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.30

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОГО БИОПРОДУКТА ДЛЯ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ, ОБОГАЩЕННОГО КОМПЛЕКСОМ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Польских Светлана Валерьевна
кандидат биологических наук,
Воронежский Государственный аграрный университет имени Императора Петра I
future29@yandex.ru
Грызлов Валерий Александрович
Воронежский Государственный Аграрный университет имени Императора Петра I

Аннотация. *Актуальность*: В условиях глобального роста неинфекционных заболеваний, дефицита микронутриентов и дисбиоза кишечника возрастает потребность в научно обоснованных, технологически совершенных средствах профилактического питания. Молочная сыворотка, ранее рассматривавшаяся как вторичное сырье, сегодня признана уникальной функциональной основой благодаря высокому содержанию биоактивных пептидов, минералов и пребиотических углеводов.
Объект: Технологические процессы и решения, применяемые при создании комбинированных (симбиотических) продуктов на основе молочной сыворотки.
Предмет: Методы оптимизации, направленные на повышение стабильности биологически активных веществ (БАВ), обеспечение высокой выживаемости пробиотических штаммов, улучшение органолептических и реологических характеристик, а также усиление синергетического профилактического действия компонентов.
Научная новизна обзора: Впервые систематизированы и критически проанализированы все ключевые направления технологической оптимизации за последние 5 лет (2019–2024), включая инновационные методы инкапсуляции, поэтапного внесения ингредиентов, применения защитных матриц и адаптивных ферментационных режимов. Предложена интегральная модель оптимизированного технологического цикла.
Основные выводы: Анализ показал, что успех современных биопродуктов на сывороточной основе определяется не отдельными компонентами, а системным подходом к технологии. Наиболее эффективными являются: 1) деминерализация и ультрафильтрация сыворотки как подготовительный этап; 2) инкапсуляция термо- и pH-нестабильных БАВ; 3) применение пребиотиков (ГОС, инулин) в качестве трофической поддержки пробиотиков; 4) внесение пробиотиков до ферментации, а БАВ — после охлаждения; 5) использование натуральных маскирующих агентов для улучшения вкуса. Эти подходы позволяют создавать продукты с доказанной in vitro и in vivo эффективностью, стабильностью >28 дней и высокой потребительской привлекательностью.

Ключевые слова: молочная сыворотка, профилактическое питание, комбинированный биопродукт, технологическая оптимизация, симбиотик, инкапсуляция, выживаемость пробиотиков, галактоолигосахариды, биологически активные вещества, органолептические свойства.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY FOR COMBINED BIOPRODUCTS FOR PREVENTIVE NUTRITION BASED ON MILK WHEY ENRICHED WITH A COMPLEX OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

S. Polskikh
V. Gryzlov

Summary. *Relevance*: In the context of global increases in non-communicable diseases, micronutrient deficiencies, and intestinal dysbiosis, there is a growing need for scientifically substantiated and technologically advanced preventive nutrition solutions. Whey, previously regarded as a secondary by-product, is now recognized as a unique functional base due to its high content of bioactive peptides, minerals, and prebiotic carbohydrates.
Object: Technological processes and solutions employed in the development of combined (synbiotic) products based on whey.
Subject: Optimization methods aimed at enhancing the stability of bioactive compounds (BACs), ensuring high viability of probiotic strains, improving organoleptic and rheological properties, and strengthening the synergistic preventive effect of components.
Scientific novelty of the review: For the first time, all key directions of technological optimization over the past five years (2019–2024) have been systematically organized and critically analyzed, including innovative encapsulation techniques, staged ingredient addition, application of protective matrices, and adaptive fermentation regimes. An integrated model of an optimized technological cycle is proposed.
Main conclusions: The analysis demonstrates that the success of modern whey-based bioproducts depends not on individual components but on a systemic technological approach. The most effective strategies include: 1) demineralization and ultrafiltration of whey as preparatory steps; 2) encapsulation of thermo0 and pH-unstable BACs; 3) application of prebiotics (GOS, inulin) to provide trophic support for probiotics; 4) addition of probiotics prior to fermentation and BACs after cooling; 5) use of natural flavor-masking agents to improve taste. These approaches enable the creation of products with proven in vitro and in vivo efficacy, stability exceeding 28 days, and high consumer appeal.

Keywords: whey, preventive nutrition, combined bioproduct, technological optimization, synbiotic, encapsulation, probiotic viability, galactooligosaccharides, bioactive compounds, organoleptic properties.

Введение

Современное общество сталкивается с растущей нагрузкой на здоровье, обусловленной урбанизацией, снижением физической активности, стрессами и несбалансированным питанием. На сегодняшний день отмечается беспрецедентный рост хронических неинфекционных заболеваний (ХНИЗ), включая ожирение, сахарный диабет 2 типа, сердечно-сосудистые патологии и аутоиммунные расстройства. По данным ВОЗ, на долю ХНИЗ приходится более 70 % всех смертей в мире [1]. Одним из ключевых факторов, способствующих этому тренду, является несбалансированное питание, характеризующееся избытком простых углеводов и насыщенных жиров, и дефицитом пищевых волокон, витаминов, минералов и биоактивных соединений. В этих условиях возрастает роль профилактического питания — системы, направленной не только на удовлетворение базовых энергетических потребностей, но и на активное поддержание гомеостаза, иммунитета, микробиоценоза кишечника и метаболических функций организма. Профилактическое питание становится неотъемлемой частью концепции «персонализированного здравоохранения», где питание рассматривается как основной инструмент управления здоровьем. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является разработка функциональных продуктов на основе молочного сырья, в частности — молочной сыворотки, которая в последние годы претерпела трансформацию от отхода производства до высокоценного функционального ингредиента [2,3].

Молочная сыворотка — это жидкая фракция, остающаяся после свертывания казеина при производстве сыра или творога. Исторически она рассматривалась как низкокачественный побочный продукт, часто утилизируемый или используемый в качестве корма для животных. Такой подход был не только экономически неэффективен, но и создавал серьезные экологические проблемы из-за высокой БПК (биохимической потребности в кислороде) сточных вод [3,4]. Однако, последние два десятилетия ознаменовались кардинальной переоценкой потенциала сыворотки. Современные исследования показали, что в 1 литре сыворотки содержится до 55 % всех сухих веществ исходного молока, включая: Белки (0,6–0,8 %): β-лактоглобулин (50–55 %), α-лактальбумин (20–25 %), иммуноглобулины (10–15 %), бычий сывороточный альбумин (5–10 %), лактоферрин (1–2 %) [5]. Эти белки не только обладают высокой биологической ценностью, но и являются источником биоактивных пептидов с антигипертензивным, антиоксидантным, иммуномодулирующим и антимикробным действием [6]. Лактоза (4,5–5,0 %): является естественным пребиотиком, стимулирующим рост бифидобактерий и лактобацилл в толстом кишечнике [7]. Минеральные вещества: кальций, магний, фосфор, цинк, селен — в легкоусвояемой форме, связанной с лактозой и пептидами [8]. Витамины группы В: В2 (рибофлавин), В5 (пантотеновая кислота), В12 (кобаламин) — критически важны для энергетического обмена и функционирования нервной системы [9]. Таким образом, сыворотка представляет собой уникальную, сбалансированную по составу матрицу, идеально подходящую для создания продуктов профилактического питания.

Глобальный рынок функциональных продуктов питания демонстрирует устойчивый рост. По данным Grand View Research, его объем в 2023 году составил $220 млрд, а к 2027 году прогнозируется достижение отметки в $275 млрд, что соответствует среднегодовому темпу роста 7,8 % [10]. Наиболее динамично растущим сегментом являются продукты, направленные на поддержку здоровья кишечника и иммунитета — именно те функции, которые наиболее эффективно может выполнять сывороточный симбиотик. В России рынок также активно развивается. Согласно отчету «Агропит» (2024), объем переработки молочной сыворотки в сегменте функциональных продуктов увеличился на 32 % за период 2020–2023 гг. [11]. К 2025 году ожидается рост до 40 %, что обусловлено: повышенным вниманием населения к своему здоровью после пандемии COVID-19, ростом осведомленности о роли микробиоты кишечника, увеличением числа людей, страдающих непереносимостью лактозы или казеина, для которых сывороточные продукты могут стать альтернативой, поддержкой со стороны государства программ по импортозамещению и развитию глубокой переработки сельхозсырья.

Несмотря на очевидный потенциал, создание эффективных комбинированных биопродуктов на основе сыворотки сопряжено с рядом сложных технологических задач: нестабильность БАВ в кислой среде кисломолочных продуктов, снижение жизнеспособности пробиотиков при хранении, органолептические недостатки (горечь, водянистость, неоднородная текстура) и отсутствие стандартизированных подходов к дозированию комплексов БАВ.

Целью настоящего обзора является систематизация и анализ современных (за последние 5 лет) научных достижений и технологических решений, направленных на оптимизацию производства комбинированных биопродуктов на основе глубоко переработанной молочной сыворотки, обогащённых комплексами биологически активных веществ, для целей профилактического питания.

Материалы и методы

Настоящий обзор основан на анализе научных публикаций, опубликованных в рецензируемых журналах за период с 2019 по 2024 год. Поиск литературы осущест-

влялся в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, а также в российских научных электронных библиотеках (eLibrary.ru, CyberLeninka).

В обзор были включены исследования, посвященные:

- Разработке и оптимизации технологий производства комбинированных (симбиотических) продуктов на основе молочной сыворотки;
- Методам повышения стабильности и биодоступности БАВ (витаминов, минералов, фитоэкстрактов, пептидов) в сывороточной матрице;
- Стратегиям обеспечения высокой выживаемости пробиотических микроорганизмов в течение срока хранения;
- Подходам к улучшению органолептических свойств (вкус, текстура, аромат) обогащенных сывороточных продуктов;
- Оценке синергетического эффекта компонентов in vitro и in vivo.

Исследования, посвященные исключительно сырой сыворотке, кормовым добавкам или продуктам без комбинированного (мультикомпонентного) состава, из обзора исключались. Анализ проводился по принципу систематизации технологических решений по ключевым проблемным блокам.

Результаты исследования

Анализ литературы последних пяти лет позволил выделить несколько ключевых направлений оптимизации технологий, которые успешно решают стоящие перед отраслью задачи. Сводная информация по основным стратегиям представлена в Таблице 1.

Оптимизация основы: подготовка сыворотки. Исследования показывают, что качество исходной сыворотки критически важно. Применение деминерализации (электродиализ, ионный обмен) позволяет снизить осмотическое давление, что положительно сказывается на жизнеспособности пробиотиков при хранении [12]. Ультрафильтрация для концентрирования белковой фракции (до 80–90 % в сухом веществе) создает структурную основу продукта, улучшая его текстуру и снижая водянистость. При этом важно контролировать степень гидролиза белков, так как избыточный гидролиз, хотя и улучшает растворимость, может усиливать горечь [13].

Стабилизация биологически активных веществ. Одним из главных прорывов стало широкое внедрение технологий инкапсуляции. Для защиты чувствительных к pH, свету и температуре компонентов (витамины, полифенолы, фитоэкстракты) используются различные матрицы: модифицированный крахмал, мальтодекстрин, камеди (гуаровая, ксантановая), а также липосомы и наноэмульсии. Например, инкапсуляция экстракта куркумы или имбиря в крахмальную матрицу методом распылительной сушки позволила снизить потери активных веществ (куркуминоидов, гингеролов) до 5–10 % за 30 дней хранения, в то время как в свободной форме потери достигали 40–60 % [14, 15]. Витамины (особенно D3 и группы B) и минералы (железо, цинк) также успешно стабилизируются путем хелатирования или микрокапсулирования, что предотвращает их взаимодействие с другими компонентами и окисление [9, 16].

Таблица 1.
Ключевые технологические стратегии оптимизации сывороточных биопродуктов и их эффект

Проблема/ цель	Технологическая стратегия	Конкретные методы/ ингредиенты	Ожидаемый эффект/ результат
Подготовка основы	Деминерализация	Электродиализ, ионный обмен	Снижение осмотического давления, улучшение выживаемости пробиотиков
	Концентрирование белков	Ультрафильтрация	Улучшение текстуры, снижение водянистости
Стабилизация БАВ	Инкапсуляция	Модифицированный крахмал, мальтодекстрин, липосомы	Снижение потерь активных веществ до 5–10 % за 30 дней хранения
	Хелатирование / Микрокапсулирование	Для витаминов (D3, B) и минералов (Fe, Zn)	Предотвращение окисления и нежелательных взаимодействий
Выживаемость пробиотиков	Использование пребиотиков	ГОС (3 %), инулин, лактулоза	Увеличение выживаемости пробиотиков в 30 раз (на 1.5 порядка)
	Поэтапное внесение	Пробиотики — до ферментации, БАВ — после охлаждения	Защита пробиотиков от конкуренции и агрессивной среды
Органолептика	Маскирование горечи	Натуральные ароматизаторы, подсластители (стевиозид), ГОС	Улучшение вкусовых качеств, повышение потребительской привлекательности
	Оптимизация текстуры	Гидроколлоиды (пектин, агар)	Получение густой, однородной, нежной текстуры

Обеспечение выживаемости пробиотиков. Выживаемость пробиотиков — критический показатель, определяющий эффективность продукта. Минимальный порог для пробиотического эффекта — 10^8–10^9 КОЕ/г в момент

потребления [17]. Основные стратегии поддержания жизнеспособности, складываются из следующих моментов. Использование пребиотиков, их внесение в продукт создает «пищевой резерв» для пробиотиков на этапе хранения. Галактоолигосахариды (ГОС): считаются «золотым стандартом». Исследование показало, что добавление 3 % ГОС увеличило выживаемость B. lactis BB-12 на 1.5 порядка (в 30 раз) по сравнению с контролем через 28 дней [18]. Фруктоолигосахариды (ФОС) и инулин: также эффективны, но могут вызывать повышенное газообразование у чувствительных людей при высоких дозах [19]. Лактулоза: менее распространена, но обладает высокой пребиотической активностью [20]. Важным технологическим приемом является *поэтапное внесение*: пробиотики вносятся на стадии ферментации, а пребиотики и инкапсулированные БАВ — *после* охлаждения готового продукта. Это защищает пробиотики от конкуренции с заквасочными культурами и от агрессивной среды во время активного сквашивания [12]. Также эффективно применение защитных сред (например, на основе трегалозы или сывороточных белков) для лиофилизированных культур.

Коррекция органолептических и физико-химических свойств. Создание вкусного и привлекательного продукта — залог его коммерческого успеха. Основные проблемы и решения: устранение горечи (причины гидрофобные пептиды от гидролиза белков, некоторые БАВ экстракты полыни, кожуры цитрусовых), пути решения проблемы маскирование вкуса: использование натуральных ароматизаторов (ваниль, какао, ягодные пюре) и подсластителей (стевиозид, монкфрут, эритрит), также для маскировки горечи допустимо использования ГОС обладающих приятным, мягким сладковатым вкусом [21]. Оптимизация реологических свойств достигается за счет применения гидроколлоидов: пектин, агар, в минимальных концентрациях, что позволяет получить густую, но не вязкую и однородную текстуру без ощущения «резиновости». Для стабилизации цвета и аромата допустимо использование непрозрачной упаковки (алюминиевые стаканчики, многослойные пленки).

Подтверждение синергетического эффекта и биологической эффективности. Современные исследования все чаще включают этап *in vitro* оценки на моделях кишечной микробиоты. Модели кишечной микробиоты (SHIME, TIM-2): позволяют оценить влияние продукта на состав микробиоты и метаболизм (синтез короткоцепочечных жирных кислот (КЦЖК)). Исследование показало, что симбиотик на основе сыворотки, ГОС и L. rhamnosus GG увеличил концентрацию бутирата на 40 % и долю бифидобактерий на 35 % по сравнению с контролем. Результаты показывают, что комбинированные продукты на основе сыворотки, содержащие пробиотики, пребиотики и фитокомпоненты, вызывают более значимое увеличение популяции бифидо- и лактобактерий и синтеза КЦЖК, чем продукты с отдельными компонентами [22]. Это подтверждает наличие синергии и усиление профилактического действия.

Обсуждение

Проведенный обзор литературы за 2019–2024 гг. демонстрирует, что технология производства комбинированных биопродуктов на основе молочной сыворотки прошла этап интенсивной оптимизации. На смену эмпирическому подходу приходят научно обоснованные, стандартизированные решения, решающие конкретные технологические проблемы.

Главная тенденция последних лет — переход от простого обогащения к интеллектуальному конструированию продукта. Это означает не просто добавление полезных ингредиентов, а тщательный подбор их форм (например, инкапсулированных), оптимизацию последовательности технологических операций (поэтапное внесение) и создание синергетических комбинаций, где каждый компонент усиливает действие другого. Подход, описанный в работах (Полянского К.К, 2022 г., Sánchez, B, 2021 г.), где инкапсуляция защищает БАВ, а пребиотик поддерживает пробиотик, является ярким примером такой системной оптимизации.

Важным достижением является решение проблемы органолептики. Ранние версии функциональных сывороточных продуктов часто отвергались потребителями из-за неприятного вкуса. Современные технологии позволяют создавать продукты, которые не только полезны, но и вкусны, что является ключевым фактором для их коммерческого успеха [21]. Это смещает фокус с чисто технологических характеристик на потребительские.

Следует отметить, что большинство исследований пока ограничиваются *in vitro* и модельными экспериментами. Хотя они убедительно демонстрируют механизм действия и стабильность формулы, для полного подтверждения профилактической эффективности необходимы рандомизированные контролируемые клинические испытания на людях. Лишь единичные работы за последние пять лет вышли на этот уровень, что указывает на перспективное направление для будущих исследований.

Несмотря на значительный прогресс, в области оптимизации сывороточных биопродуктов остаются нерешенные вопросы:

— персонализация, разработка продуктов под конкретные группы потребителей (пожилые, спортсмены, люди с непереносимостью лактозы) с индивидуально подобранными штаммами пробиотиков и комплексами БАВ [23],
— новые матрицы для инкапсуляции: исследование биоразлагаемых и функциональных матриц, на-

пример, на основе белков насекомых или микроводорослей, которые сами по себе являются источниками нутриентов,
— »умные» системы доставки: создание систем, высвобождающих БАВ не в желудке, а целенаправленно в кишечнике, под действием ферментов или pH,
— крупномасштабные клинические испытания: проведение рандомизированных, плацебо-контролируемых исследований для получения доказательной базы уровня «золотого стандарта»,
— цифровизация и Industry 4.0: внедрение систем искусственного интеллекта для управления процессами ферментации и прогнозирования срока годности на основе данных о выживаемости пробиотиков.

Оптимизация технологии не только улучшает качество продукта, но и имеет важные экономические и экологические последствия. Глубокая переработка сыворотки повышает ее стоимость в 5–10 раз по сравнению с использованием в качестве корма. Создание высокомаржинальных функциональных продуктов открывает новые рынки для молочных предприятий [11]. Утилизация сыворотки — серьезная экологическая проблема. Ее переработка в ценные продукты питания снижает нагрузку на окружающую среду и соответствует принципам циркулярной экономики [4].

Таким образом, оптимизация технологии — это не единичное действие, а комплексный процесс, включающий подготовку сырья, защиту активных компонентов, поддержку пробиотиков и улучшение потребительских свойств. Современные научные разработки предоставляют технологу мощный инструментарий для создания эффективных, стабильных и востребованных продуктов профилактического питания на основе такого ценного, но ранее недооцененного сырья, как молочная сыворотка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Всемирная организация здравоохранения. Статистика по хроническим неинфекционным заболеваниям // WHO, 2020–2023.
2. Антипова Т.А. и др. Разработка состава и технологии сухих напитков на основе молочной сыворотки. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 3. С. 242–248. DOI: https://doi.org/10.21443/1560— 9278-2023-26-3-242-248.
3. Козлов А.Б. и др. Функциональные молочные продукты в России: современное состояние и перспективы // Российский журнал пищевых технологий. — 2021. — Т. 12(4). — С. 45–58.
4. Kuznetsova T. Экологические аспекты переработки молочной сыворотки // Экология и производство, 2019.
5. Паладий И.В.; Врабие Е.Г.; Спринчан К.Г.; Болога М.К. Молочная сыворотка: обзор работ. Часть 1. Классификация, состав, свойства, производные, применение. Электронная обработка материалов. 2021, 57(1), 52–69. Doi: 10.5281/zenodo.4456698.
6. Guha S., Sharma H., Deshwal G.K. et al. A comprehensive review on bioactive peptides derived from milk and milk products of minor dairy species. Food Prod Process and Nutr 3, 2 (2021). https://doi.org/10.1186/s43014-020-00045-7.
7. Zanutto-Elgui M.R., Vieira J.C.S., do Prado D.Z., Buzalaf M.A.R., Padilha P., Elgui de Oliveira D., & Fleuri L.F. (2019). Production of milk peptides with antimicrobial and antioxidant properties through fungal proteases. Food Chemistry, 278, 823–831 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.119.
8. Minj S., Anand S. Developing a dairy-based health formulation by combining the bioactive properties of whey protein hydrolysates and probiotic organisms. Journal of Dairy Science. 2019;102.
9. Коденцова В.М., Саркисян В.А., Воробьева В.М., Воробьева И.С., Кочеткова А.А., Рисник Д.В. Обогащение пищевых продуктов витамином D: международный опыт и новые тенденции // Пищевая промышленность. 2019 № 9.
10. Grand View Research. Functional Food Market Report 2023-2027. — 2023.
11. Аналитический отчет «Агропит». (2024). Рынок функциональных молочных продуктов в России.
12. Воробьева О.А., Ших Е.В., Дроздов В.Н., Ших Н.В. Результаты применения комбинированного пробиотика (Lactobacillus rhamnosus GG и Bifidobacterium animalis spp. lactis BB-12) у детей с гастроинтестинальными и кожными проявлениями пищевой аллергии // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 3. С. 79–86. DOI: https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-3-79-86.
13. Ewert J., Claaßen W., Stressler T., Fischer L. An innovative two-step enzymatic membrane bioreactor approach for the continuous production of antioxidative casein hydrolysates with reduced bitterness. Biochemical Engineering Journal. 2019;150. https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107261.
14. Sanchez B., et al. Microencapsulation of Curcumin and Ginger Extracts to Improve Stability // Food Hydrocolloids, 2021.
15. Mohite D., Waghmare R.B. (2020) Encapsulation Techniques for De-livery of Bioactive Compounds in Milk and Dairy Products— A Review. J. Dairy Res Tech 3: 017
16. Balji Yuriy. (2019). Современные аспекты контроля качества и безопасности пищевых продуктов: Монография Modern aspects of quality control and food safety: Monograph.
17. Ивашкин В.Т., Маев И.В., Абдулганиева Д.И., Алексеенко С.А., Горелов А.В., Захарова И.Н., Зольникова О.Ю., Ивашкина Н.Ю., Корочанская Н.В., Маммаев С.Н., Полуэктова Е.А., Трухманов А.С., Усенко Д.В., Успенский Ю.П., Цуканов В.В., Шифрин О.С., Бережная И.В., Ивашкин К.В., Лапина Т.Л., Масленников Р.В., Николаева С.В., Сугян Н.Г., Ульянин А.И. Практические рекомендации Научного сообщества по содействию клиническому изучению микробиома человека (НСОИМ) и Российской гастроэнтерологической ассоциации (РГА) по применению пробиотиков, пребиотиков, синбиотиков и обогащенных ими функциональных пищевых продуктов для лечения и профилактики заболеваний гастроэнтерологического профиля у детей и взрослых. Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. 2021;31(2):65–91. https://doi.org/10.22416/1382-4376-2021-31-2-65-91.

18. Maraz Anna & Kovács Zoltán & Benjamins Eric & Pázmándi Melinda. (2022). Recent developments in microbial production of high-purity galacto-oligosaccharides. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 38. 10.1007/s11274-022-03279-4.
19. Fuhren J., Schwalbe M., Boekhorst J. et al. Dietary calcium phosphate strongly impacts gut microbiome changes elicited by inulin and galacto-oligosaccharides consumption. Microbiome 9, 218 (2021). https://doi.org/10.1186/s40168-021-01148-0.
20. Рябцева С.А., Храмцов А.Г., Будкевич Р.О., Анисимов Г.С., Чукло А.О., Шпак М.А. Физиологические эффекты, механизмы действия и применение лактулозы // Вопросы питания. 2020. Т. 89, № 2. С. 5–20. DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10012.
21. Белоусова Т.И. (2023). Влияние органолептических свойств на потребительское восприятие функциональных продуктов. Пищевая промышленность, (7), 22–25.
22. Шевелёва С.А., Маркова Ю.М. Безопасность и функциональный потенциал пробиотиков и пребиотиков, используемых в детском питании. Трудный пациент. 2022; 20 (1): 22–38. doi: 10.224412/2074–1005-2022-1-22-38.
23. Facioni M.S., Raspini B., Pivari, F. et al. Nutritional management of lactose intolerance: the importance of diet and food labelling. J Transl Med 18, 260 (2020). https://doi.org/10.1186/s12967-020-02429-2.

© Польских Светлана Валерьевна (future29@yandex.ru); Грызлов Валерий Александрович
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.31

ИСТОРИЯ ФКУЗ «АЛТАЙСКАЯ ПРОТИВОЧУМНАЯ СТАНЦИЯ» РОСПОТРЕБНАДЗОРА[1]

Рождественский Евгений Николаевич
Директор, ФКУЗ «Алтайская противочумная станция» Роспотребнадзора, г. Горно-Алтайск
altai-chuma@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлена хронология создания, становления и развитие Федерального казенного учреждения здравоохранения «Алтайская противочумная станция» Роспотребнадзора. Отражен опыт предшествующих поколений и представлены основные достижения на современном этапе. Особое уделено внимание практическим достижениям, которые сыграли важную роль в борьбе с особо опасными инфекциями. Статья показывает важность и значимость работы противочумной станции, которая обеспечивает санитарно-эпидемиологическое благополучие населения Российской Федерации, а также предупреждение возникновения и распространения чумы и других особо опасных, природно-очаговых и зоонозных инфекционных заболеваний на курирующих территориях Республики Алтай и Алтайского Края.

Ключевые слова: история, чума, противочумная станция, эпидемиологический надзор, природный очаг, эндемичная территория.

THE HISTORY OF THE FEDERAL STATE INSTITUTION «ALTAI ANTI-PLAGUE STATION» OF ROSPOTREBNADZOR[2]

E. Rozhdestvensky

Summary. This article presents the chronology of the creation, formation, and development of the Federal state-owned healthcare institution Altai Anti-Plague Station of Rospotrebnadzor. The experience of previous generations is reflected and the main achievements at the present stage are presented. Special attention is paid to practical achievements that have played an important role in the fight against particularly dangerous infections. The article shows the importance and significance of the anti-plague station, which ensures the sanitary and epidemiological well-being of the population of the Russian Federation, as well as the prevention of the occurrence and spread of plague and other particularly dangerous, natural focal and zoonotic infectious diseases in the supervising territories of the Altai Republic and the Altai Territory.

Keywords: history, plague, anti-plague station, epidemiological surveillance, natural outbreak, endemic territory.

Во второй половине сороковых годов XX века в Монгольской Народной Республике наблюдалось ухудшение эпидемиологической обстановки по чуме, с 1944-1954 гг. наблюдались вспышки заболевания чумой среди людей (13 вспышек), в том числе Бух-Муренская вспышка легочной чумы в местности Хату в 1946 году, приблизительно располагавшаяся в 130 км от границы Кош-Агачского аймака Горно-Алтайской автономной области. Сотрудники Иркутского научно-исследовательского противочумного института Сибири и Дальнего Востока, прежде всего, Н.В. Некипелов (заведующий зоологического отдела) и Н.Д. Алтарева (директор института), учли специфику ландшафта и сформировавшиеся подобия флоры и фауны Монголии в Северо-Западной части и в Юго-Восточной части Алтая, следовательно, допустили вероятность образования природного очага чумы и на территории Горно-Алтайской автономной области в Кош-Агачском районе.

В Юго-Восточном Алтае это послужило основой для углубленного изучения эпизоотической обстановке. В Кош-Агачском аймаке с 1950 по 1952 год Иркутским противочумным институтом, проведены экспедиции, где проводились лабораторные исследования полевого материала на чуму. Результатом экспедиций стало доказательство потенциала существования природного очага чумы на Алтае в Юго-Восточной части, что послужило основанием приказа Министерства здравоохранения СССР от 8 мая 1953 года о создании филиала Иркутского противочумного института в г. Горно-Алтайске. Главная задача подразделения заключалась в поисках очага чумы на Алтае в Кош-Агачском районе. 22 мая 1953 года Горно-Алтайским исполкомом областного Совета народных депутатов был принят план по ликвидации потенциальных вспышек чумы, а с 6 июня по 30 августа в Кош-Агачском районе из состава нового подразделения был сформирован эпидотряд.

[1] Статья подготовлена при грантовой поддержке EMSI. Проект FZWG-2024–0021 «Социальные технологии иммунизации молодёжи приграничных регионов и новых территорий России в условиях цивилизационных противоречий», выполняемый в рамках научных проектов в области социально-политических наук.

[2] The article was prepared with Grant support of the EMSI. The FZWG-2024-0021 project "Social technol-ogies of immunization of youth of border regions and new territories of Russia in conditions of civilizational contradictions", carried out within the framework of scientific projects in the field of social political sciences.

На сопредельных районах государственной границы Монгольской Народной Республики отделение принимало активное участие в обнаружении возбудителя чумы. Собственными силами отделения были выставлены эпидемиологические отряды в Баян-Ульгийский аймак в 1958–1960 годах. Более 60 штаммов чумного микроба было изолировано на монгольской территории около границ СССР.

Основная задача отделения на Советской территории — это выявление природного очага чумы, Успешная реализация поставленной задачи была осуществлена в 1961 году. В период с июня по август в нижней части долины р Уландрык из различных объектов, таких как: блохи и разнообразные виды мелких млекопитающих было выделено 10 штаммов чумного микроба. За счет этого энзоотичность по чуме была обнаружена на Алтае в Юго-Восточном районе.

В Горном Алтае после выявления природного очага чумы стояли задачи: в пространственном изучении, выяснения биоценотической структуры очага, изучения особенностей биологии и экологии носителей, переносчиков, свойств возбудителя, разработки методов подавления эпизоотической активности.

Тем самым был установлен вопрос об организации экспериментальных лабораторных и полевых работ. По причине возросшего круга задач и увеличением объёма работ, приказом Министерства здравоохранения СССР № 684 от 22 ноября 1965 года с 1 января 1966 года Горно-Алтайское отделение Иркутского научно-исследовательского противочумного института Сибири и Дальнего Востока было преобразовано в Горно-Алтайскую противочумную лабораторию МЗ СССР.

В январе 1972 года введен в эксплуатацию новый комплекс противочумной лаборатории в Горно-Алтайске.

Противочумная лаборатория во главе врача В.А. Климова обновила статус в 1974 году в марте, она была переименована в Горно-Алтайскую противочумную станцию. В 1984 году руководителем станции стал Е.П. Михайлов, который до этого работал заведующим бактериологической лабораторией (рис. 1). С 1985 года Горно-Алтайская противочумная станция меняет название на «Алтайская противочумная станция».

В 1983–1990 годах так же продолжалось обследование территории Монгольской Народной Республики: на 16 из 35 обследованных участков были обнаружены эпизоотии чумы.

На данный момент Горно-Алтайский высокогорный природный очаг чумы является наиболее активным из расположенных на территории Российской Федерации. За всё время работы стации было изолировано 2551 штамм возбудителя чумы.

5–6 октября 2023 года на основании приказа Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) № 303 от 22.05.2023 года была проведена Научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы эпидемиологического надзора за чумой и другими опасными инфекционными болезнями,

Рис. 1. Е.П. Михайлов — ветеран Государственной санитарно-эпидемиологической службы России, Заслуженный врач Российской Федерации, Отличник Здравоохранения РФ (1984–2019), в лаборатории за просмотром чашек Петри (1980 г.)

посвященная 70–летию ФКУЗ «Алтайская противочумная станция» Роспотребнадзора».

Впервые в Республике Алтай организовано столь масштабное мероприятие, в котором участвовали 132 специалиста из 13 субъектов Российской Федерации и одной зарубежной страны (специалисты из Монголии). Конференция объединила научных и практикующих специалистов, работников Роспотребнадзора, практического здравоохранения и преподавателей высших учебных заведений. На конференции обсуждались вопросы эпидемиологического надзора за чумой и другими опасными инфекционными болезнями; профессиональной подготовки специалистов в области медицинской микробиологии; внедрения инновационных технологий; коллегиально были обсуждены проблемы и пути их решения.

На выставочной площадке конференции были организованы стенды с историческими фотографиями сотрудников станции и рабочими моментами за период с 1953 по 2023 годы.

По итогам конференции был выпущен сборник материалов (ISBN 978-5-93809-099-6) и направлен участникам конференции и заинтересованным учреждениям для применения в практической деятельности.

Основными задачами, стоящими перед организацией, на данный момент, являются: проведение эпидемиологического надзора за чумой и комплекса санитарно-профилактических противочумных мероприятий в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге чумы в Кош-Агачском районе Республики Алтай; оказание консультативно-методической и практической помощи органам здравоохранения Республики Алтай и Алтайского края в осуществлении эпидемиологического надзора за чумой, туляремией, сибирской язвой, холерой, COVID-19, лептоспирозами, иерсиниозами, бруцеллезом, листериозом, лихорадкой Ку, геморрагической лихорадкой с почечным синдромом, клещевым энцефалитом, клещевым боррелиозом, ГАЧ, МЭЧ, лихорадкой Западного Нила; проведение лабораторных исследований клинического материала на Крым-Конго геморрагическую лихорадку, лихорадку Деньге, оспу обезьян, высокопатогенный грипп и другие ООИ и ПОИ.

Деятельность образовательного направления, заключается в организации на базе станции обучения специалистов различных органов здравоохранения, для получения навыков в области диагностики ООИ. Кроме того, проводятся тематические ознакомительные занятия в учебных заведениях Республики Алтай и Алтайского края.

В круг задач, стоящих перед учреждением, входит научно-исследовательская деятельность, которая взаимосвязана с реализацией новых методов диагностики и профилактики ООИ и ПОИ.

Начиная с 2012 года в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге чумы, помимо *Yersinia pestis altaica,* обнаруживаются штаммы основного подвида чумного микроба (*Yersinia pestis pestis)*. Таким образом, наблюдается совместная циркуляция двух подвидов чумного микроба. Аналогичная обстановка происходит в природных очагах туляремии Республики Алтай и Алтайского края: помимо *F. tularensis* subsp. *holarctica*, в них циркулирует генетически обособленная подгруппа среднеазиатского подвида, *F. tularensis* subsp. *mediasiatica*. В обоих случаях подвиды имеют разное эпидимиологическое значение. Всё это, вызывает необходимость определения подвидовой принадлежности выделенных штаммов и ПЦР результатов, для правильной оценки эпидемической ситуации. Для этой цели, совместно с Государственным научным центром прикладной микробиологии и биотехнологии (ФБУН ГНЦ ПМБ), были разработаны системы праймеров для mismatch amplification mutation assay или MELT-MAMA ПЦР анализа, которые, в настоящее время, успешно применяются в работе станции. Разработанные системы позволяют в короткие сроки успешно проводить подвидовую диагностику *Yersinia pestis* и *Francisella tularensis* в условиях сочетанной циркуляции возбудителей в природных очагах.

Соблюдения требований биологической безопасности на станции контролируется по утвержденному плану, комиссией станции, состоящей из 3-х человек, назначенных приказом директора. Каждый из членов комиссии отвечает за раздел работы, определённый функциональными обязанностями. Комиссия осуществляет проверку соблюдения требований биологической безопасности два раза в год. Инструктаж персонала проводится по вопросам биологической безопасности по работе с ПБА I–II групп. Ежегодно с работниками лаборатории организуются занятия по безопасной работе с микроорганизмами I–II групп патогенности (опасности) с последующей проверкой знаний. По ликвидации аварий при работе с ПБА проводятся плановые тренировочные занятия не менее раза в год. Один раз в 2 года проводится сдача зачёта на знание требований биобезопасности при работе с ПБА I–IV групп опасности.

В лаборатории сформирована коллекция живых культур для осуществления проверки диагностических питательных сред. Эталонные штаммы относятся к III группе патогенности и являются вакцинными штаммами, стабильно утратившими способность вызывать заболевание у людей и лабораторных животных и неспособные реверсировать в вирулентное состояние. В соответствии с приказом Роспотребнадзора от 01.12.2017 №1116 «О совершенствовании системы мониторинга, лабораторной диагностики инфекционных и паразитарных болезней

и индикации ПБА в Российской Федерации» п. 1.10, ежегодно, выделенные в процессе работы чумного микроба передаются в Референс-центр по мониторингу за чумой и другими особо опасными бактериальными инфекционными болезнями ФКУН «Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб» Роспотребнадзора; изолированные штаммы возбудителей туляремийного микроба, передаются в Референс-центр по мониторингу за туляремией ФБУН «ГНЦ прикладной микробиологии и биотехнологии» Роспотребнадзора для дальнейшего углубленного изучения и их депонирования.

Внедрение современных цифровых технологий позволило расширить методические подходы выполнения задач по обеспечению эпидемиологического благополучия населения. Внедрение в практику ГИС-технологий позволило определить современные границы циркуляции возбудителей чумы, сибирской язвы, туляремии, клещевых инфекций, выявить участки с высоким риском инфицирования на курируемых территориях. Для целей оздоровления очага чумы была составлена «Интерактивная карта по управлению оздоровительными мероприятиями в Горно-Алтайском высокогорном очаге чумы».

В рамках мероприятий по оздоровлению Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы специалистами противочумной станции и региональных учреждений Роспотребнадзора проводятся дезинфекционные мероприятия в объемах, обеспечивающих подавление эпизоотий чумы в поселениях сурка.

Исходя из полученных эпидемиологических данных, сохранение эпизоотической активности в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге чумы, вызывает необходимость своевременного проведения в плановом порядке вакцинации и ревакцинации постоянно проживающего на территории очага и временного прибывающего населения на эндемичную территорию в период активизации основного носителя чумы. В рамках неспецифической профилактики проводится комплекс мер, включающий интенсификацию эпизоотологического мониторинга в очаге, который направлен на обследование участков высокого риска инфицирования человека чумой и оказания пристального внимания вопросу выявления изменений границ распространения серого сурка, определению численности зверька и его блох, а также состоянию популяций и численности монгольской пищухи, длиннохвостого суслика, синантропных грызунов и их блох. Параллельно с мерами по осуществлению неспецифической профилактики, с 2014 года, в плановом порядке и по эпидемическим показаниям, проводится профилактическая вакцинация населения Кош-Агачского района чумной вакциной. Учитывая особенности формирования иммунного ответа на введение живой противочумной вакцины и необходимость достижения максимальной напряженности специфического иммунитета к эпидемически опасному сезону года, вакцинацию проводили в апреле-мае, завершая ее к концу первой декады июня. Для обеспечения максимальной иммунизацией касаемо профилактики чумы населения Кош-Агачского района было издано Постановление Главного санитарного врача Республики Алтай, в соответствии с которым вакцинации подлежали все жители.

Ежегодный охват вакцинацией населения района составляет 96 %. Добиться таких результатов удалось благодаря значительной организационно-разъяснительной работе и осуществление иммунизации в три этапа. На первом этапе вакцинируются жители районного центра и близлежащих поселков, на втором — отдаленных и труднодоступных поселений, на третьем, завершающем — студенты, учащиеся, прибывающие на каникулы, лица, имевшие временные медицинские отводы, и другие категории граждан.

На территории Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы с февраля по июль так же проводится ежегодная вакцинация 409 верблюдов. Все животные привиты против чумы живой сухой вакциной «Кэмел-ПРО Р.С.». Специалистами станции ежегодно проводятся иммунологические исследования среди вакцинированных верблюдов территории Кош-Агачского района, для оценки иммунного статуса и эффективности проведенной вакцинации. В целях предотвращения заражения животных кровососущими эктопаразитами в феврале и июне верблюды обрабатываются системным инсекто-акарицидным средством. При выявлении эпизоотических участков выпас животных прекращается, все верблюды отгоняются за границы эпизоотии. Ветеринарные специалисты постоянно контролируют физиологическое состояния верблюдов, ведут разъяснительно-информационную работу с животноводами о мерах профилактики заболеваний чумой при уходе за животными.

Ежегодно при сотрудничестве с БУ «Комитет ветеринарии с Госветинспекцией Кош-Агачской районной станции по борьбе с болезнями животных» специалисты Алтайской ПЧС обучают от 60 до 80 ветеринарных работников. Обучение проводится в форме бесед, лекций, семинарских и тренировочных занятий. Все образовательные мероприятия организуются с привлечением сотрудников ветеринарной службы. Тесное сотрудничество с ветеринарами и зоотехниками обеспечило эпизоотологическое благополучие сельскохозяйственных животных на очаговой территории. При проведении профилактических работ самыми радикальными мерами являются дезинсекция и дератизация. Высокая эпизоотическая активность и эпидемические осложнения определяли тактику, содержание, объемы и дислокацию работ. Главное внимание акцентировалось на истребле-

ние переносчиков возбудителя чумы. В зависимости от обстановки, ежегодно, объемы полевой дезинсекции варьируется от 18,4 до 43,5 км^2, поселковой дезинсекции — от 6,6 до 75,2 тыс. м^2. При этом создаются защитные (барьерные) зоны радиусом до 500 м вокруг всех зимних и летних стоянок животноводов, расположенных на эпизоотических участках. Эффективность полевых обработок с помощью пиретроидных дустов составляла в среднем 96,7 %, в населенных пунктах приближалась к 100 % (при учетах на клеевые листы и по результатам очеса синантропных зверьков). При барьерной обработке в окрестности стоянок животноводов численность норовых блох снизилась в 20–40 раз. При этом, пулецидный эффект устойчиво сохранялся в течение 3 месяцев (сроки наблюдений). Дезинсекция в строениях проводится влажным методом, в помещениях незаселенных стоянок животноводов — дустами.

Таким образом, благодаря сотрудничеству всех заинтересованных служб и ведомств удается максимально эффективно проводить комплекс организационных, противоэпидемических и профилактических мероприятий в Кош-Агачском районе, что позволяет не допустить формирования антропогенного очага чумы и вывоза ее за пределы энзоотичной территории. Разработанный Комплексный план позволил на территории Республики Алтай существенно снизить риск инфицирования чумой местного населения и обеспечить эпидемиологическое благополучие. На основании прогноза эпизоотической активности Горно-Алтайского высокогорного очага чумы на ближайшие годы и с учетом новых данных о развитии эпизоотий чумы в южной (монгольской) части Сайлюгемского очага можно ожидать сохранение эпидемиологической напряженности по чуме. Тем самым, необходимо дальнейшее совершенствование эпидемиологического надзора за этой опасной инфекцией и проведение всего комплекса мероприятий, направленных на обеспечение эпидемиологического благополучия населения в регионе и за его пределами.

В практику станции в 2022 году было внедрено полногеномное секвенирование для осуществления мониторинга природных очагов ООИ, эпидемиологических расследований, геномной паспортизации и определения филогенетических связей штаммов микроорганизмов.

В 2022 году было проведено секвенирование 15 изолятов полученных из образцов особо опасных и природно-очаговых инфекций: это образцы *Yersinia enterocolitica* (4 изолята) — для подтверждения результатов эпидемиологического расследования; *Yersinia pestis* (2 изолята); *Francisella tularensis* (8 изолятов); Covid-19 (1 изолят) — полученные в рамках мониторинга очагов ООИ. Культуры *Yersinia pestis* были выделены из остатков стола хищной птицы. Культуры *Francisella tularensis* были выделены из эктопаразитов видов *Haemaphysalis concinna* (2 образца) и *Dermacentor silvarum* (5 образцов), а также из ила. Возбудитель иерсиниоза был выделен из смывов с полок овощехранилища, из свеклы и полёвки обыкновенной (*Microtus arvalis*). Кроме того, из клинического материала были получены образцы Covid-19 и *Yersinia enterocolitica*.

В 2023 году проведено полногеномное секвенирование культур: *Francisella tularensis* (10 изолятов), выделенных из эктопаразитов видов *Haemaphysalis concinna* (2) и *Dermacentor silvarum* (8). Так же, было проведено полногеномное секвенирование 38 штаммов *Yersinia pestis* — 18 были получены на Российской территории Сайлюгемского очага, из которых 4 были выделены от длиннохвостых сусликов (*Urocitellus undulatus*), 14 от сурков (*Marmota baibacina*) и 20 культур на Монгольской части Сайлюгемского очага выделены исключительно от сурков, в основном из остатков стола хищных птиц (18). Полногеномное секвенирование проводилось на приборе «MinION Mk 1B» («Oxford Nanopore Technologies», Соединённое Королевство Великобритании и Северной Ирландии). Использование полногеномного секвенирования позволило максимально точно генотипировать выделенные в ходе работы в 2022–2023 годах штаммы ООИ и ПОИ, и подтвердить результаты эпидемиологического расследования вспышки иерсиниоза.

Постоянно в практику станции внедряются современные методы лабораторных исследований, развитие и переоснащение материально-технической и лабораторной базы. В 2017 году было возобновлено совместное со специалистами Монголии эпизоотологическое обследование монгольской части Сайлюгемского природного очага чумы (рис. 2).

В рамках программы «Санитарный щит» в 2024–2025 годах планируется строительство нового шестиэтажного административно-лабораторного корпуса третьего уровня биологической безопасности (BSL-3), который позволит усовершенствовать имеющиеся и внедрить новые подходы обеспечения благополучия населения (рис. 3).

Противочумная станция обеспечена высокотехнологичным оборудованием, квалифицированными кадрами, как и всегда на протяжении многих лет проводит активную работу, которая направлена на улучшение санитарно-эпидемиологической обстановки в Российской Федерации.

Тем самым достижения на современном этаже, как и на этапе образования противочумной станции, позволяют сохранять богатый опыт практических исследований.

Рис. 2. Российская группа эпидотряда (2021 г.)

Рис. 3. Визуализация проекта административно-лабораторного корпуса

ЛИТЕРАТУРА

1. Балахонов С.В., Корзун В.М., Вержуцкий Д.Б., Михайлов Е.П., Рождественский Е.Н., Денисов А.В. Первый случай выделения Yersinia pestis subsp. pestis в Алтайском горном при родном очаге чумы. Сообщение 2: Вероятные пути и механизмы заноса возбудителя чумы основного подвида на территорию очага // Пробл. особо опасных инфекций. — 2013б. — Вып. 2 (116). — С. 5–10.
2. Балахонов С.В., Корзун В.М., Вержуцкий Д.Б., Чипанин Е.В., Михайлов Е.П., Денисов А.В., Глушков Э.А., Акимова И.С. Особенности эпизоотической активности горных природных очагов чумы Сибири вXXIв.//Национальные приоритеты России. — 2014а. — № 3 (13). — С. 7–10.
3. Балахонов С.В., Корзун В.М., Денисов А.В., Рождественский Е.Н., Базарова Г.Х., Чипанин Е.В., Мищенко А.И., Санаров П.П., Шефер В.В., Холин А.В. Распространение Yersinia pestis ssp. pestis в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге чумы на новые территории: Основные тенденции и следствия // Инфекционные болезни в сов ременном мире: Эволюция, текущие и будущие угрозы: сб. тр. XIII Ежегодного Всероссийского Конгресса по инфекционным болезням им. акад. В.И. Покровского, Москва, 24–26 мая 2021 года. — М.: Мед. маркетинговое агентство, 2021а. — С. 176–177.

4. Балахонов С.В., Корзун В.М., Денисов А.В., Ярыгина М.Б., Рождественский Е.Н., Базарова Г.Х., Цогбадрах Н., Отгонбаяр Д., Цэрэнноров Д., Уржих Ч. Особенности эпизоотического процесса, вызванного возбудителем чумы основного подвида, в трансграничном Сайлюгемском природном очаге чумы // Нац. приоритеты России. — 2021б. — №3 (42). — С. 108–111.
5. Ерошенко Г.А., Краснов Я.М., Носов Н.Ю., Куклева Л.М., Никифоров К.А., Оглодин Е.Г., Кутырев В.В. Совершенствование подвидовой классификации Yersinia pestis на основе данных полногеномного секвенирования штаммов из России и сопредельных государств // Пробл. особо опасных инфекций. — 2015. — Вып. 4. — С. 58–64. DOI: 10.21055/0370-1069-2015-4-58-64
6. Кутырев В.В., Попова А.Ю., Ежлова Е.Б., Демина Ю.В., Пакскина Н.Д., Щучинов Л.В., Михайлов Е.П., Мищенко А.И., Рождественский Е.Н., Базарова Г.Х., Денисов А.В., Шарова И.Н., Попов Н.В., Кузнецов А.А. Заболевание человека чумой в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге в 2014 г. Сообщение 1: Эпидемиологические и эпизоотологические особенности проявлений чумы в Горно-Алтайском высокогорном (Сайлюгемском) природном очаге чумы // Пробл. особо опасных инфекций. — 2014а. — Вып. 4. — С. 9–16.
7. Кутырев В.В., Попова А.Ю., Ежлова Е.Б., Демина Ю.В., Пакскина Н.Д., Шарова И.Н., Мищенко А.И., Рождественский Е.Н, Базарова Г.Х., Михайлов Е.П., Ерошенко Г.А., Краснов Я.М., Куклева Л.М., Черкасов А.В., Оглодин Е.Г., Куклев В.Е., Одиноков Г.Н., Щербакова С.А., Балахонов С.В., Афанасьев М.В., Витязева С.А., Шестопалов М.Ю., Климов В.Т. Заболевание человека чумой в Горно-Алтайском высокогорном природном очаге в 2014 г. Сообщение 2: Особенности лабораторной диагностики и моле кулярно-генетическая характеристика выделенных штаммов // Пробл. особо опасных ин фекций. — 2014б. — Вып. 4. — С. 43–51.
8. Николаев Н.И. Чума (клиника, диагностика, лечение и профилактика). — М.: Медицина, 1968. — 240 с.
9. Онищенко Г.Г., Кутырев В.В., Кривуля С.Д., Федоров Ю.М. Стратегия борьбы с инфекционными болезнями и санитарная охрана территорий в современных условиях // Пробл. особо опасных инфекций. — 2006. — № 2. — С. 5–9.
10. Организация и проведение эпидемиологического надзора в природных очагах чумы на территории Российской Федерации (методические указания, МУ 3.1.3.2355-08). — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2009. — 103 с.
11. Попова А.Ю., Кутырев В.В., Балахонов С.В., Ежлова Е.Б., Демина Ю.В., Пакски на Н.Д., Щучинов Л.В., Попов Н.В., Косилко С.А., Дубровина В.И., Корзун В.М., Михай лов Е.П., Мищенко А.И., Денисов А.В., Рождественский Е.Н., Бугоркова С.А., Ерошен ко Г.А., Краснов Я.М., Топорков В.П., Слудский А.А., Раздорский А.С., Матросов А.Н., Поршаков А.М., Лопатин А.А., Щербакова С.А. Координация мероприятий противочумных учреждений Роспотребнадзора по оздоровлению Горно-Алтайского высокогорного природного очага чумы в 2016 г. // Пробл. особо опасных инфекций. — 2016. — Вып. 4. — С. 5–10.
12. Природная очаговость чумы в Монгольской Народной Республике: Материалы сов.-монг. симп. по природной очаговости чумы в МНР. — Иркутск, 1988. — 80 с.
13. Рождественский Е.Н., Базарова Г.Х., Михайлов Е.П. Применение метода ПЦР в лабораторной диагностике высокогорного природного очага чумы на современном этапе // Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия: современные вызовы и пути их решения: Материалы науч.-практ. конф. — Горно-Алтайск, 2017. — С. 109–111.
14. Саржинский В.А. Фауна и распределение млекопитающих в хребте Сайлюгем (Алтай) // Тез. 3-го Всесоюз. совещ. по зоогеогр. суши. — Ташкент, 1963б.
15. Тимофеева Л.А., Логачев А.И. Yersinia pestis ulegeica — новый подвид чумного микроба, выявленный в МНР // Эпидемиология и профилактика особо опасных инфекций в МНР и СССР: Материалы 3-й Междунар. монг.-сов. науч. конф. — Улан-Батор, 1978. — С. 64–67.
16. Цэрэнноров Д., Отгонбаяр Д., Ганболд Д., Ганхуяг Ц., Нямсурен М. Современная ситуация по чуме в Монголии (2004–2013) // Материалы юбилейной международной научно-практической конференции Уральской противочумной станции 1914–2014 годы. — Уральск, 2014. — С. 265–267.
17. Черкасский Б.Л. Справочник по особо опасным инфекциям. — М.: Медицина, 1996. — 160 с.
18. Эйгер Я.Б. История и современное состояние вопроса о бубонной чуме. — СПб.: Изд. журн. «Практическая медицина», 1897. — 74 с.

© Рождественский Евгений Николаевич (altai-chuma@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.35

СУБСТРАТ, НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ, КАК ФАКТОР СРЕДЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЫРАЩИВАНИЯ ВЕШЕНКИ И РАССАДЫ ТОМАТА И ОГУРЦА

SUBSTRATE BASED ON PLANT WASTE, AS AN ENVIRONMENTAL FACTOR IN OYSTER MUSHROOM GROWING TECHNOLOGIES AND TOMATO AND CUCUMBER SEEDLINGS

S. Sashenkova
Yu. Koryagin
N. Koryagina
N. Chekaev

Summary. The article presents the results of two years of research on the use of plant waste (wheat straw, sunflower husks, hemp stalks, and sawdust) as a substrate for growing oyster mushroom fruiting bodies, followed by the use of the spent substrate as part of the soil for growing tomato and cucumber seedlings. The composite substrate consisting of a mixture of straw and husks increased the growth rate of the mycelium and the yield of oyster mushrooms. The appearance of fruiting bodies was observed 5–7 days earlier than on substrates of a different composition. The biological efficiency of using such a substrate with mycelium was 27 %. The processed mushroom substrate in the composition of soil (OGP) 80 % + peat — 10 % + river sand — 10 % proved to be optimal for growing seedlings of the Yamal tomato variety and the Teshcha cucumber. The germination rate, the speed of seedling growth, the thinning of the crops, and the yield of seedlings in this variant were the best.

Keywords: plant waste, mushroom production waste, oyster mushrooms, tomato seedlings, cucumber seedlings.

Сашенкова Светлана Анатольевна
Кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВПО Пензенский государственный аграрный университет
sashenkova.s.a@pgau.ru
Корягин Юрий Викторович
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВПО Пензенский государственный аграрный университет
koryagin.y.v@pgau.ru
Корягина Наталья Викторовна
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВПО Пензенский государственный аграрный университет
koryagina.n.v@pgau.ru
Чекаев Николай Петрович
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВПО Пензенский государственный аграрный университет
chekaev.n.p@pgau.ru

Аннотация. В статье приведены результаты двухлетних исследований по использованию растительных отходов (пшеничной соломы, лузги подсолнечника, костры безалкалоидных сортов конопли и опилок) в качестве субстрата для получения плодовых тел вешенки устричной с последующим использованием отработанного субстрата в составе грунта для получения рассады томата и огурца. Композитный субстрата из смеси соломы и лузги способствовал увеличению скорости роста мицелия и урожайности вешенки. Появление зачатков плодовых тел отмечалось на 5–7 дней раньше, чем на субстратах иного состава. Биологическая эффективность использования такого субстрата мицелием составляла 27 %. Отработанный грибной субстрат в составе почвогрунта (ОГП) 80 % + торф — 10 % + речной песок — 10 % оказался оптимальным для выращивания рассады томата сорта Ямал и огурца Теща. Всхожесть, скорость роста проростков, изреженность посевов и выход рассады в этом варианте были наилучшими.

Ключевые слова: растительные отходы, отходы грибного производства, вешенка, рассада томата, рассада огурца.

Одно из основных направлений деятельности в области рационального природопользования — снижение загрязнения окружающей среды и ресурсосбережение. По данным Минсельхоза России [1] в АПК ежегодно генерируется более 770 млн т отходов, среди них — сельскохозяйственные отходы, к которым относятся органические отходы отраслей растениеводства, животноводства и перерабатывающей промышленности.

Наиболее перспективной технологией утилизации растительных отходов является их биоконверсия, когда отходы одного производства становятся сырьем для другого. При этом используются живые организмы от бактерий и дрожжей до калифорнийских червей, которые разлагают растительные остатки и образуют биогумус, широко использующийся в тепличном хозяйстве [2].

Конверсия растительных отходов базидиальными грибами обладает многими преимуществами. Прежде

всего, это их способность активно разлагать лигноцеллюлозные комплексы, которые становятся доступными для дрожжей, плесневых грибов и бактерий лишь после обработки сильными кислотами, что требует значительных затрат [3]. Кроме того, вешенка и другие виды культивируемых грибов успешно используется для получения пищевых (плодовые тела) и кормовых продуктов путем обогащения малоценных грубых растительных отходов грибным белком и легкоусвояемыми углеводами [4].

В экономическом развитии современного сельского хозяйства важную роль играет сочетание различных отраслей и направлений производства [5]. Овощеводство, задачей которого является обеспечивающее население в течение всего года качественными огурцами и томатами не является исключением. Например, имеется большое количество работ, связанных с использованием пустующих площадей теплицы для выращивания съедобных грибов, прежде всего вешенки [6, 7]. Таким образом, компост на основе отходов грибоводства для выращивания рассады овощных культур мог бы послужить примером технологий замкнутого цикла, снижающих затраты на производство.

Субстрат, использующийся для выращивания посадочного материала овощных, плодовых культур и грибов, является одним из главных факторов лимитирующим жизнедеятельность живых организмов в искусственных условиях среды. От его качества и состава зависит урожайность, продолжительность вегетационного периода и, в конечном счете, число культурооборотов в теплице, которое определяет её эффективность [6].

В настоящее время на рынке присутствует огромный ассортимент грунтов для выращивания рассады овощных культур, еще больше рецептов приготовления грунта своими руками можно найти на страницах Интернета. При этом не всегда рекламируемые составы приводят к ожидаемым результатам, как в промышленном, так и личном приусадебном производстве рассады. При этом затраты на грунт составляют значительную часть расходов [8]. Поэтому широко используются в качестве грунта для выращивания рассады компосты, полученные путем конверсии органических отходов микроорганизмами, грибами, калифорнийскими червями и т.п. [2, 3]

Большое разнообразие растительных отходов способствует разработке большого числа рецептов субстрата для выращивания вешенки [7]. При этом классическим считается субстрат из пшеничной соломы. Сегодня в грибном производстве чаще используют композитные субстраты с добавлением лузги подсолнечника, опилок и других растительных отходов. Однако, как и в случае с грунтом для выращивания рассады, урожайность грибов на таких субстратах значительно варьирует. Поэтому поиску путей оптимизации состава субстрата для выращивания грибов посвящено большое количество исследований [4, 6, 7, 9].

Учитывая выше сказанное, целью наших исследований стало изучение влияния состава субстрата на рост и развитие вешенки устричной и рассады томата и огурца для разработки технологии замкнутого цикла конверсии растительных отходов в тепличном хозяйстве.

Исследования проводились с использованием лабораторной базы и теплицы ФГБОУ ВО Пензенского ГАУ в 2023–2025 гг. Использовался штамм вешенки устричной НК-35 (Duna НК-35) — один из самых удачных и распространенных гибридов вешенки, использующийся для промышленного культивирования, томат сорта Ямал и огурец сорта Тёща.

Ультраскороспелый низкорослый сорт томата Ямал предназначен для открытого грунта с продолжительным периодом плодоношения, высокой устойчивостью к недостаточной освещенности и хорошими вкусовыми качествами плодов. Гибрид огурца Теща F1 холодостойкий, обладает комплексной устойчивостью к основным заболеваниям (мучнистая роса, толерантен к пероноспорозу), предназначен для выращивания в пленочных теплицах.

В качестве органических субстратов для выращивания вешенки использовали: пшеничную солому, лузгу подсолнечника, костру безалкалоидных сортов конопли, опилки лиственных пород и их композиты, которые готовили по общепринятым методикам [7, 10]. Для получения плодовых тел грибов использовали культивационные пакеты, в которые помещали по 1 кг сырья в сухом весе. Культивирование проводили на стеллажах по интенсивной технологии. Повторность опыта шестикратная. После получения урожая грибов (2 волны), субстрат использовали в качестве компонента рассадного грунта для овощных культур.

Отработанный субстрат, частично разложенный мицелием вешенки, смешивали и использовали для приготовления рассадного грунта. Отходы грибного производства по содержанию углерода примерно соответствуют навозу. В связи с этим доза внесения в опыте рассчитывалась, согласно существующих рекомендаций [11], и составляла 20–90 % от общего состава рассадного грунта, т.е. контрольного варианта, в котором вместо отходов грибного производства (ОГП), вносили перегной.

Для выращивания рассады растений огурца и томата был заложен вегетационный опыт согласно следующей схеме: 1. Перегной — 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 % (Контроль); 2. Отходы грибного производства (ОГП) 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 %;

3. Отходы грибного производства (ОГП) 40 % + торф — 50 % + речной песок — 10 %; 4. Отходы грибного производства (ОГП) 60 % + торф — 30 % + речной песок — 10 %; 5. Отходы грибного производства (ОГП) 80 % + торф — 10 % + речной песок — 10 %; 6. Отходы грибного производства (ОГП) 90 % + торф — 10 %.

Исследуемый почвогрунт каждого варианта насыпали в сосуды объемом 500 мл в шестикратной повторности, а затем в них высевались семена томата сорта Ямал и огурца сорта Теща. В ходе эксперимента проводили наблюдения за особенностями роста и развития рассады.

Математическая обработка результатов исследований проведена методом дисперсионного анализа по Доспехову Б.А. [12], также использовали компьютерную обработку данных на IBM PC/AT-486.

Перед проведением эксперимента с целью уничтожения частиц грибниц и спор возбудителей болезней на внутренней поверхности стекла теплиц, после тщательной промывки, проводили опрыскивание 2 % раствором формалина. Семена огурца и томата перед посевом протравливали комбинированными препаратами для подавления возбудителей болезней, находящихся на их поверхности или в их оболочке.

Сроки обрастания, появления зачатков плодовых тел и урожайность вешенки представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Влияние состава субстрата на плодоношения вешенки (урожайность в г/с 1 кг субстрата НСР05-6,55)

Показатель	Подсолнечная лузга + солома	Костра	Костра+ опилки	Подсолнечная лузга	Солома
Полное обрастание блока, сутки	9±0,83	11±0,53	14±1,23	15±1,12	11±0,76
Появление зачатков плодовых тел, сутки	15±0,98	21±1,14	16±1,33	23±1,51	22±0,94
Урожайность, г с 1 блока	161,06	148,96	144,56	87,84	108,2
Биологическая эффективность использования субстрата, %	27	24	24	15	18

Полное обрастание культивационных мешков мицелием вешенки за 2 года исследований отмечалось на 9–15 сутки после инокуляции субстрата. Необходимо отметить, что полное обрастание композитного субстрата из соломы и подсолнечной лузги происходило раньше, уже на 9 сутки с начала культивирования. Мешки с кострой и соломой обрастали примерно одинаково, а рост на субстрате с добавлением опилок шел несколько медленнее, но был сопоставим с ростом на подсолнечной лузге.

На однокомпонентных органических субстратах образование зачатков плодовых тел для вешенки было отмечено на 21–23 сутки культивирования, тогда как на композитных субстратах на 15–16 сутки. Можно предположить, что композитные субстраты, имея более разнообразный состав по питательным элементам и, вероятно иную плотность и условия аэрации, обеспечивали оптимальный рост мицелия, что обусловило появление зачатков плодовых тел в более ранние сроки.

Наибольшая урожайность вешенки устричной отмечена на композитном субстрате из подсолнечной лузги и соломы. На соломе (контроль) и подсолнечной лузге урожайность была существенно ниже. Добавление опилок к костре не оказало существенного влияния на урожайность вешенки, показатели на этих вариантах оказались сопоставимыми.

Биологическая эффективность использования мицелием композиционного субстрата из подсолнечной лузги и соломенной резки составила 27 %, что больше отмечаемых в литературе 20–25 %. Достаточно высоким этот показатель был для субстратов из конопляной костры — 24 %, а на подсолнечной лузге и соломе он составил всего 15 и 18 %, что указывает на низкую эффективность использования питательных веществ этих субстратов. Существенные отличия от литературных данных на этих вариантах, вероятно, обусловлены тем, что в эксперименте при подготовке субстрата в контрольных вариантах мы не использовали добавки азотных удобрений или куриного помета, предусмотренных в стандартных технологиях промышленного культивирования вешенки.

В эксперименте отмечено две волны плодоношения, которые регистрируются в производственных условиях. Сростки плодовых тел в первую волну плодоношения были существенно больше, чем во вторую.

Наши исследования по эффективности применение отходов грибного производства в качестве компонента рассадного грунта показали, что всходы растений томата и огурца во всех вариантах появились практически одновременно, но их появление было очень неравномерным. Лучшие показатели были на почвогрунте следующего состава (ОГП) 80 % + торф 10 % + речной песок 10 %. На этом варианте массовые всходы у растений томата появлялись на шестой день после посева (80 %), у огурца — на третий день (78 %).

Наименьшее количество всходов было отмечено на почвогрунте при соотношении (ОГП) 20 % + торф 70 % + речной песок 10 %. У растений томата на первый день учета (на шестой день после посева) — 35 %, а у растений огурца на первый день учета (на третий день после посева) — 45 %, а в контрольном варианте взошло 20 и 15 % семян соответственно.

Динамика роста растений томата и огурца в начальный период развития в зависимости от состава рассадного грунта представлена в таблице 2. Если скорость роста растений томата в контрольном варианте составила 0,62 см/сутки, соответственно, то на почвогрунте в вариантах 4 и 5 она была 0,78 см/сутки. Необходимо отметить, что скорость роста растений томата во всех вариантах опыта была значительно выше контроля. Проростки огурца на грунте с добавлением отходов грибного производства имели меньшую высоту по сравнению с контролем на исследуемых фонах (табл. 2). При этом скорость роста в контрольном варианте составила 0,68 см/сутки, а наибольшая скорость роста 0.75 см/сутки регистрировалась на почвогрунте 5 варианта, так же как для растений томата.

Период вегетации и продолжительность его отдельных фаз у рассады томата и огурца, так же, как и у других видов растений, не является постоянной, а меняется в зависимости от условий питания растений. Все применяемые почвогрунты в наших исследованиях 2024 года способствовали сокращению вегетационного периода от появления всходов до высадки рассады в грунт у томата на 3–5 дней и у огурца на 3–4 дня по сравнению с контролем. Вегетационный период рассады растений томата в 2025 году от появления всходов до высадки рассады в грунт в зависимости от почвогруната колебался от 32 до 38 дней, что на 4–9 дней меньше по сравнению с контрольным вариантом, где применяли почвогрунт без отходов грибного производства. Для рассады растений огурца сорта Тёща в этом вегетационном периоде на грунтах с добавлением отходов грибного производства сокращение вегетационного периода до высадки растений в грунт было на 2–6 дней меньше по сравнению с контролем.

Наблюдения за ростом рассады растений томата и огурца показали, что нарастание вегетативной массы шло наиболее интенсивно от фазы первого листа до начала высадки рассады в грунт. Изреженность посевов томата колеблется в зависимости в период исследований в пределах 0,9–7,3 %, у посевов огурца от 1,2 до 8,1 %. Наибольшая изреженность, как для томата, так и для огурца наблюдается на варианте с применением почвогрунта без включения отходов грибного производства (контроль). Соответственно на этом варианте выход рассады растений томата и огурца ниже, чем на вариантах, где использовали почвогрунт в состав которого входили отходы грибного производство (табл. 3).

При использовании отходов грибного производства в качестве компонента грунта улучшаются биометрические показатели роста и развития рассады томата (высота и диаметр стебля, количество сформировавшихся

Таблица 2.

Динамика роста растений томата и огурца в начальный период развития, см, (НСР05 (по фактору состава грунта) — 0,213 ед.)

Вариант опыта	Дни после посева									
	Томат сорта Ямал					Огурец сорта Теща				
	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,1	1,6	3,1	3,3	3,5	2,6	3,2	4,1	5,0	5,3
2	1,3	1,9	2,2	2,9	3,8	2,5	3,1	4,0	4,9	5,1
3	1,4	2,1	2,4	3,2	4,3	2,4	3,0	3,9	4,8	5,1
4	1,6	2,4	2,9	3,8	4,7	2,1	2,6	3,5	4,4	4,9
5	1,7	2,5	3,1	4,1	4,8	1,6	2,3	3,3	4,0	4,6
6	1,7	2,6	3,1	4,0	4,7	1,9	2,4	3,1	4,1	4,8

1. Перегной — 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 % (контроль); 2. Отходы грибного производства (ОГП) 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 %; 3. Отходы грибного производства (ОГП) 40 % + торф — 50 % + речной песок — 10 %; 4. Отходы грибного производства (ОГП) 60 % + торф — 30 % + речной песок — 10 %; 5. Отходы грибного производства (ОГП) 80 % + торф — 10 % + речной песок — 10 %; 6. Отходы грибного производства (ОГП) 90 % + торф — 10 %.

Таблица 3.

Биологическая стойкость рассады растений томата и огурца (в среднем за период исследования)

Вариант опыта	Вегетационный период, дни	Всхожесть, %		Густота стояния растений, тыс. шт./га		Изреженность, %
		лабораторная	полевая	в фазу всходов	перед высадкой рассады	
Томат сорта Ямал						
1	41	99,6	77,0	38,500	35,688	7,3
2	38	99,6	86,0	43,000	41,238	4,1
3	36	99,6	93,5	46,750	45,091	3,5
4	35	99,6	96,0	48,000	46,344	3,4
5	32	99,6	97,5	48,750	47,507	2,6
6	34	99,6	96,5	48,250	46,851	2,9
Огурец сорта Теща						
1	40	99,6	81,0	56,700	52,083	8,1
2	38	99,6	94,0	65,800	62,347	5,2
3	37	99,6	95,5	66,850	63,475	5,0
4	37	99,6	96	67,200	63,907	4,9
5	34	99,6	96,5	67,550	64,646	4,3
6	36	99,6	96	67,200	64,177	4,5

1. Перегной — 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 % (контроль); 2. Отходы грибного производства (ОГП) 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 %; 3. Отходы грибного производства (ОГП) 40 % + торф — 50 % + речной песок — 10 %; 4. Отходы грибного производства (ОГП) 60 % + торф — 30 % + речной песок — 10 %; 5. Отходы грибного производства (ОГП) 80 % + торф — 10 % + речной песок — 10 %; 6. Отходы грибного производства (ОГП) 90 % + торф — 10 %.

на растении листьев и цветочных кистей) и огурца (длина стебля и подсемядольного колена и их диаметр, а также диаметр нижних листьев).

Рассада томата в возрасте 30–32 дней (при высоте стебля — 16,2–16,9 см, с его диаметром — 1,0–1,1 см и пятью листьями, с двумя сформировавшихся на растении цветочными кистями) и огурца 29–38 дней (длина стебля — 29,9–34,2 см, длина подсемядольного колена — 4,4–5,3 см, диаметр стебля — 1,2–1,4 и нижних листьев 21,8–26,8 см) была выращена на почвогрунте следующего соотношения (ОГП) 80 % + торф 10 % + речной песок 10 %).

Мы проанализировали возможный выход рассады томата и огурца с использованием грунта 5 варианта, имевшего наилучшие показатели, результаты представлены в таблице 4.

В период исследований при использовании отходов грибного производства в качестве компонента почвогрунта для выращивания рассады растений томата сорта Ямал и огурца сорта Тёща получена прибавка по количеству рассады овощных культур к контролю.

Таблица 4.

Влияние отходов грибного производства на выход рассады томата и огурца (в среднем за период исследования)

Культура	Вариант опыта	Выход рассады, тыс. шт./га	Отклонение от контроля, %
Томат сорта Ямал	1	35,688	–
	5	47,507	33,1
Огурец сорта Теща	1	52,083	–
	5	64,646	24,1

1. Перегной — 20 % + торф — 70 % + речной песок — 10 % (контроль); 5. Отходы грибного производства (ОГП) 80 % + торф — 10 % + речной песок — 10 %.

Таким образом, при использовании отходов грибного производства в качестве компонента рассадного грунта можно получить качественную рассаду томата сорта Ямал и огурца сорта Тёща.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования технологии замкнутого цикла конверсии растительных отходов в условиях защищенного грунта при сочетании грибоводства и овощеводства.

При этом существенное внимание следует уделить подбору органического субстрата, от питательности и плотности которого зависит как скорость роста мицелия вешенки, так и её урожайность. Наибольшую скорость роста в эксперименте мицелий показал на смеси подсолнечной лузги и соломы, и костры с опилками.

При использовании композитных субстратов не только возрастает скорость роста, но улучшается качество мицелия. Он становится более плотным. Культивационные мешки с композитными субстратами штамм вешенки обрастал на 6–8 суток быстрее, при этом биологическая эффективность их использования мицелием была выше. Наибольшие показатели имел субстрат из подсолнечной лузги и соломы — 27 %, что больше отмечаемых в литературе 25 %.

Применение отходов грибного производства в составе почвогрунта на рассадной культуре огурца и томата существенно повлияло на скорость наступления фенологических фаз. Период от всходов до высадки рассады растений огурца и томата уменьшился на 3–5 дней по сравнению с контрольным вариантом. При этом увеличивался процент всхожести овощных культур в среднем по вариантам опыта на 9–25 % у томата и 13–15,5 % у огурца.

Наиболее динамично рассада развивалась на почвогрунте следующего соотношения (ОГП) 80 % + торф 10 % + речной песок 10 %, где средняя скорость прироста рассады в сутки составила 0,78 см/сутки у томата и 0,75 см/сутки у огурца. Однако, высота проростков огурца на вариантах с добавлением отходов грибного производства оказалась меньше, чем в контроле. Этот же вариант состава рассадного грунта оказался оптимальным по показателям выхода рассады.

В целом использование отходов грибного производства как компонента рассадного грунта показало хорошие результаты по густоте стояния и изреженности посевов томата и огурца. Во всех вариантах с ОГП эти показатели были лучше по сравнению с контролем.

ЛИТЕРАТУРА

1. РБК: Исследования рынков [Электронный ресурс]: URL:https://marketing.rbc.ru/author/52/ (дата обращения: 22.09.2025).
2. Кулешова А. Биогумус для рассады: характеристики и применение. [Электронный ресурс] // eТеплица.ру: сайт. URL: https://eteplica.ru/udobrenie-i-podkorm/biogumus-dlya-rassady-xarakteristiki-i-primenenie. html (дата обращения 2.09.2025).
3. Иванов А.И., Гришин Г.Е., Ильина Г.В. Эколого-экономическая эффективность использования отхода грибного производства в растениеводстве // Нива Поволжья. 2012. — №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-othoda-gribnogo-proizvodstva-v-rastenievodstve (дата обращения: 10.09.2025).
4. Федоров Ф.В. Грибы / Ф.В. Федоров. — М.: Россия, 1994.-с.366.
5. Агибалов А.В., Масик А.В. Тенденции развития овощеводства в России // Экономические науки, 2024. — №8 (237). — С. 63–71. DOI: 10.14451/1.237.63
6. Литвинов С.С. Перспективы развития овощеводства и грибоводства в защищенного грунта Российской Федерации / С.С. Литвинов //Картофель и овощи. — №5. — 2011.— С. 6–9.
7. Иванов А.И. Грибоводство: учебное пособие / А.И. Иванов — Пенза: РИО ПГАУ, 2019. — 205 с.
8. Ветрова Л.Н., Бухвостов Ю.В. Калькуляция себестоимости овощей защищенного грунта // Все для бухгалтера. 2007. — №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kalkulyatsiya-sebestoimosti-ovoschey-zaschischennogo-grunta (дата обращения: 10.09.2025).
9. Афанасьев В.И. Об экономической эффективности грибоводства в России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. — М.: ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ, 2020. — №8. — С. 99–103.
10. Девочкина Н.Л., Мукиенко С.В., Селиванов В.Г., Рубцов А.А. Инновационные технологии и технические средства для промышленного производства культивируемых грибов: практ. пособ. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. — 80 с.
11. Краткий справочник агронома / под общ. ред. Т.Б. Лебедевой. — Пенза: РИО-ПГСХА. — 2002. — 370 с.
12. Глаз Н.В. и др. Состав субстрата как важнейший фактор повышения эффективности выращивания растений в контейнерной культуре / Н.В. Глаз, Л.В. Уфимцева, Д.Ю. Нохрин, Ф.М. Гасымов, А.А. Васильев, Н.А. Давыдова // Агрохимический вестник. 2021. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sostav-substrata-kak-vazhneyshiy-faktor-povysheniya-effektivnosti-vyraschivaniya-rasteniy-v-konteynernoy-kulture (дата обращения: 18.09.2025).
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов — М.: Агропромиздат. 1985.-351 с.

© Сашенкова Светлана Анатольевна (sashenkova.s.a@pgau.ru); Корягин Юрий Викторович (koryagin.y.v@pgau.ru);
Корягина Наталья Викторовна (koryagina.n.v@pgau.ru); Чекаев Николай Петрович (chekaev.n.p@pgau.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.01

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ТОРГОВОЙ ЛОГИСТИКОЙ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ И ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

INTELLIGENT MONITORING AND MANAGEMENT OF INTERNATIONAL TRADE LOGISTICS BASED ON BIG DATA AND COMPUTER VISION TECHNOLOGIES

A. Aberyasev

Summary. Artificial intelligence technologies are bringing enormous changes to logistics and supply chains, reducing paperwork, and speeding up and simplifying decision-making processes. This article explores the potential of big data and computer vision for implementing an intelligent monitoring and management system for international trade logistics. The article presents a diagram of a digital platform consisting of four interconnected levels that combines the technologies under consideration into a single framework. An algorithm for using the platform to improve the efficiency of cross-border warehousing and delivery processes is also formalised.

Keywords: logistics, transport, warehousing, monitoring, goods, flows, data analysis.

Аберясев Александр Николаевич
Аспирант, ФГБОУ ВО Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова
saberyasev1@gmail.com

Аннотация. Технологии искусственного интеллекта привносят колоссальные изменения в логистику и цепочки поставок, позволяя снизить объемы бумажной работы, а также ускорить и упростить процессы принятия решений. Статья посвящена изучению возможностей применения больших данных и компьютерного зрения для реализации системы интеллектуального мониторинга и управления международной торговой логистикой. В статье представлена схема цифровой платформы, состоящая их четырех взаимосвязанных уровней, которая объединяет в единый контур рассматриваемые технологии. Также формализован алгоритм ее использования для повышения эффективности управления трансграничными процессами складирования и доставки грузов.

Ключевые слова: логистика, транспорт, складирование, наблюдение, товары, потоки, анализ данных.

В последнее десятилетие большие данные охватили значительную часть отраслей. В условиях глобализации международная торговля и логистика, являющиеся жизненно важными сферами мировой экономики, испытывают существенное влияние этой новой информационной технологии. Трансграничные торговые операции генерируют огромные объемы данных, поскольку каждую минуту по всему миру создаются десятки тысяч бумажных документов и цифровых записей из различных источников, таких как таможни, судоходные компании, пограничные службы, склады, распределительные логистические узлы, портовые терминалы, верфи и т.д. [1]. Соответственно анализируя данные в режиме реального времени, компании могут предвидеть задержки, выявлять неэффективность и выбирать более оптимальные маршруты транспортировки.

Объем рынка больших данных в международной логистике в 2024 году оценивался в 63,66 млрд долларов. Ожидается, что этот показатель вырастет до 100,0 млрд долларов к 2032 году, а среднегодовой темп роста в период с 2025 по 2032 год составит более 21,5 % (см. рис. 1). Одним из наиболее значимых факторов роста больших данных в глобальных логистических цепочках является растущий спрос на аналитику в режиме реального времени. Компании стремятся повысить операционную эффективность и быстрее реагировать на сбои в цепочке поставок.

Оптимальным дополнением к технологии больших данных являются инструменты машинного зрения, которые используя геопространственное отслеживание, позволяют регистрировать перемещения и отклонения грузов в реальном времени, а также обмениваться трансграничной электронной информацией в цифровом виде, предлагая более безопасный, эффективный, быстрый и экономичный способ сбора данных [2].

Таким образом, используя такие инновационные решения, как большие данные и компьютерное зрение, предприятия могут более эффективно управлять международными логистическими потоками, повышать результативность контроля, сокращать затраты, улучшать качество обслуживания, способствовать цифровизации

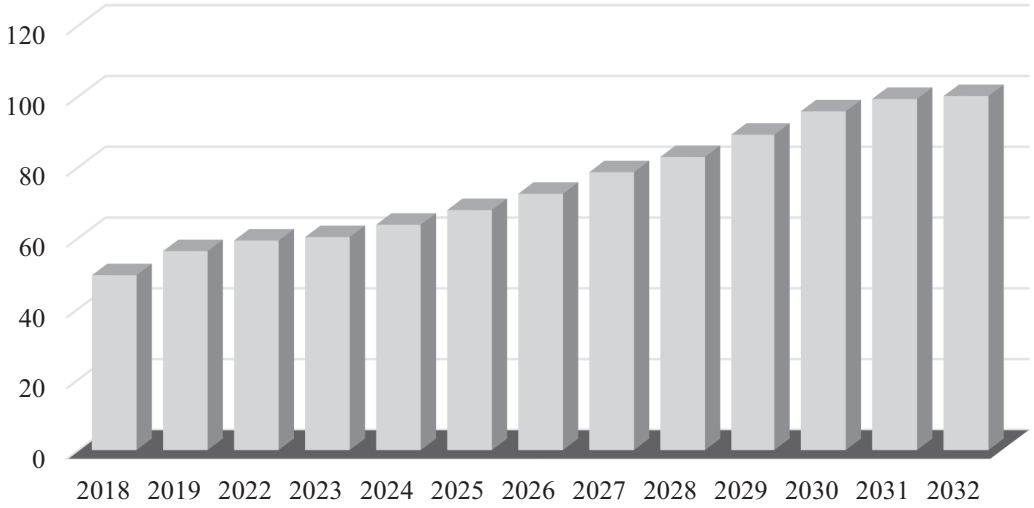


Рис. 1. Объемы рынка больших данных в международной логистике, млрд дол. (по данным Statista https://www.statista.com/)

и интеллектуализации торговых отношений в целом. С учетом изложенного тема данной статьи является актуальной, теоретически и практически значимой.

Разработке концептуальных и аналитических моделей, а также алгоритмов для конкретных задач планирования цепочек поставок в глобальном масштабе на основе больших данных посвятили свои труды Воронина О.В., Кантарович А.А., Бабалакова С., Аллакулиев И., Joshua P. Meltzer, Yuqian Zhang, Anna Nagurney, Irene Garcés, Achim Vogt.

Над усовершенствованием метода автоматизированного управления логистикой и распределением транспортных потоков на основе технологии позиционирования и компьютерного зрения трудятся Комендантов К.И., Горбунов Я.Е., Паламарчук В.Р., Комзалов В.И., Liang Wu, Jianhua Zhou, Honglei Tang, Hanjie Xiao.

Возможности имплементации Интернета вещей и больших данных для анализа поступающей со складов информации и генерации упреждающих сигналов тревоги, включая такие события, как несоблюдение процедур, описывают Азаров В.Н., Чекмарев А.В., Акинин М.Ю., Долганюк С.И., Романов Н.В., Krzysztof Beck, Karen Jackson.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что широкий спектр различных вопросов нашел свое отражение в современной литературе, однако появление новых решений и инноваций, связанных с искусственным интеллектом, переопределяет необходимость постоянного обновления и актуализации уже имеющихся решений и наработок. Так, например, в уточнении и дальнейшем развитии нуждается модель складской логистики, которая позволит определять характеристики взаимодействия между физическими и цифровыми структурами (интеллектуальное киберфизическое помещение), параметры модульности для адаптации к внешним условиям, требования к децентрализации периферийных устройств, что даст возможность анализировать данные в режиме реального времени, сравнивая их с контрольными показателями.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении возможностей реализации интеллектуального мониторинга и управления международной торговой логистикой на основе больших данных и технологий компьютерного зрения.

Международная торговая логистика на базе больших данных и технологий компьютерного зрения может использовать различные датчики Интернета вещей для получения широкого спектра бизнес-сведений о выполнении операций в любое время. Зачастую это структурированная и неструктурированная информация, к числу которой относится текст, аудио, изображения, цифровые данные, видео и др. [3]. Платформенная технология выполняет вычисления, а затем отображает результаты, объединяя их в интерактивное динамическое представление. Это позволяет менеджерам полагаться на более точные и понятные многомерные данные для быстрого принятия обоснованных и своевременных управленческих решений.

В таблице 1 более детально представлены возможности рассматриваемых технологий в логистике.

Рассмотрим более детально некоторые практические аспекты использования описываемых технологий.

Платформа интеллектуального мониторинга и управления международной торговой логистикой на основе больших данных и технологий компьютерного зрения, по мнению автора, может рассматриваться как сочета-

Таблица 1.

Возможности интеллектуального мониторинга и управления международной торговой логистикой на основе больших данных (BD) и компьютерного зрения (CV) (составлено автором)

Сфера применения	Технологии	Возможности	Преимущества	Ограничения / вызовы
Прогнозирование спроса и оптимизация маршрутов	BD (машинное обучение, предиктивная аналитика)	Анализ исторических данных о поставках, сезонных колебаниях и внешнеэкономических факторах	Снижение издержек на транспортировку, повышение точности планирования	Требуется доступ к большим объемам достоверных данных
Мониторинг транспортных средств и грузов	CV (распознавание объектов, видеоаналитика)	Отслеживание состояния контейнеров, контроль загрузки/разгрузки	Автоматизация контроля, сокращение времени операций	Высокая стоимость внедрения и необходимость качественного видеопотока
Обеспечение безопасности и предотвращение мошенничества	CV (распознавание лиц, номерных знаков), BD (анализ аномалий)	Проверка водителей, контроль доступа, выявление подозрительных операций	Снижение рисков контрабанды и краж, повышение прозрачности процессов	Конфиденциальность персональных данных, юридические ограничения
Управление складскими процессами	CV (обнаружение объектов, отслеживание движения товаров), BD (IoT-данные сенсоров)	Автоматизированный учет, анализ скорости перемещения товаров	Снижение ошибок при инвентаризации, повышение производительности склада	Ограничения в точности CV при плохом освещении, высокие требования к инфраструктуре
Интеллектуальное принятие решений в логистике	BD (гибридные аналитические модели), интеграция с ERP и SCM системами	Рекомендации по выбору маршрутов, перевозчиков и логистических стратегий	Повышение эффективности управления, адаптивность к внешним изменениям	Сложность интеграции с существующими корпоративными системами

ние необходимого программного обеспечения и базовых аппаратных систем. С помощью передовых алгоритмов интеллектуального анализа процесс обработки заказов становится проще и быстрее, а состояние товаров можно отслеживать в любое время и в любом месте с помощью Интернета вещей [4].

Для разработки программного и аппаратного обеспечения платформы визуализации больших данных в логистике необходимо создать платформу управления информационными потоками на основе технологии блокчейн. Также следует установить контроль полномочий, внедрить системы кибербезопасности и четко формализовать процесс обращения контейнерных заказов. Архитектуру системы визуального управления представляется целесообразным разделить на уровень восприятия, сетевой уровень, прикладной уровень и уровень отображения, как показано на рисунке 2.

Охарактеризуем выделенные на рис. 2 уровни более детально.

Уровень восприятия расположен внизу и включает в себя подуровень сбора логистической информации и подуровень совместной сети. Подуровень сбора информации представлен фронтальными QR-кодами и считывающими устройствами, также он содержит RFID-метки, камеры, GPS, датчики, терминалы M2M, оборудование для сбора информации и такие системы, как сенсорные шлюзы. Подуровень совместной сети в основном объединяет инструменты и средства для стандартизированной обработки, вызова и передачи собранных данных, включая их передачу и промежуточное программное обеспечение.

Сетевой уровень представляет собой инструмент и интегрированную среду для сбора, хранения и управления сенсорной информацией. Он в основном реализуется с помощью беспроводных сетей, Интернета, частных сетевых ресурсов отрасли и сетей мобильной связи [5].

Прикладной уровень объединяет платформу приложений и IoT-подуровень. Подуровень приложений выполняет такие функции, как обмен информацией, облачные вычисления и поддержка сервисов. Это сервис интеграции информации, который включает в себя распределенные и гетерогенные приложения [6]. Посредством единого портала осуществляется объединение информационных ресурсов, что создает интегрированную среду для доступа и вычислений, а также поддерживает широкий спектр сервисов для IoT-приложений.

Уровень отображения — это самый верхний уровень, он в основном размещает информацию прикладных систем на различных типах общедоступных терминалов, включая системы с большими экранами, информационные порталы, мобильные устройства, ПК-терминалы и т.д.

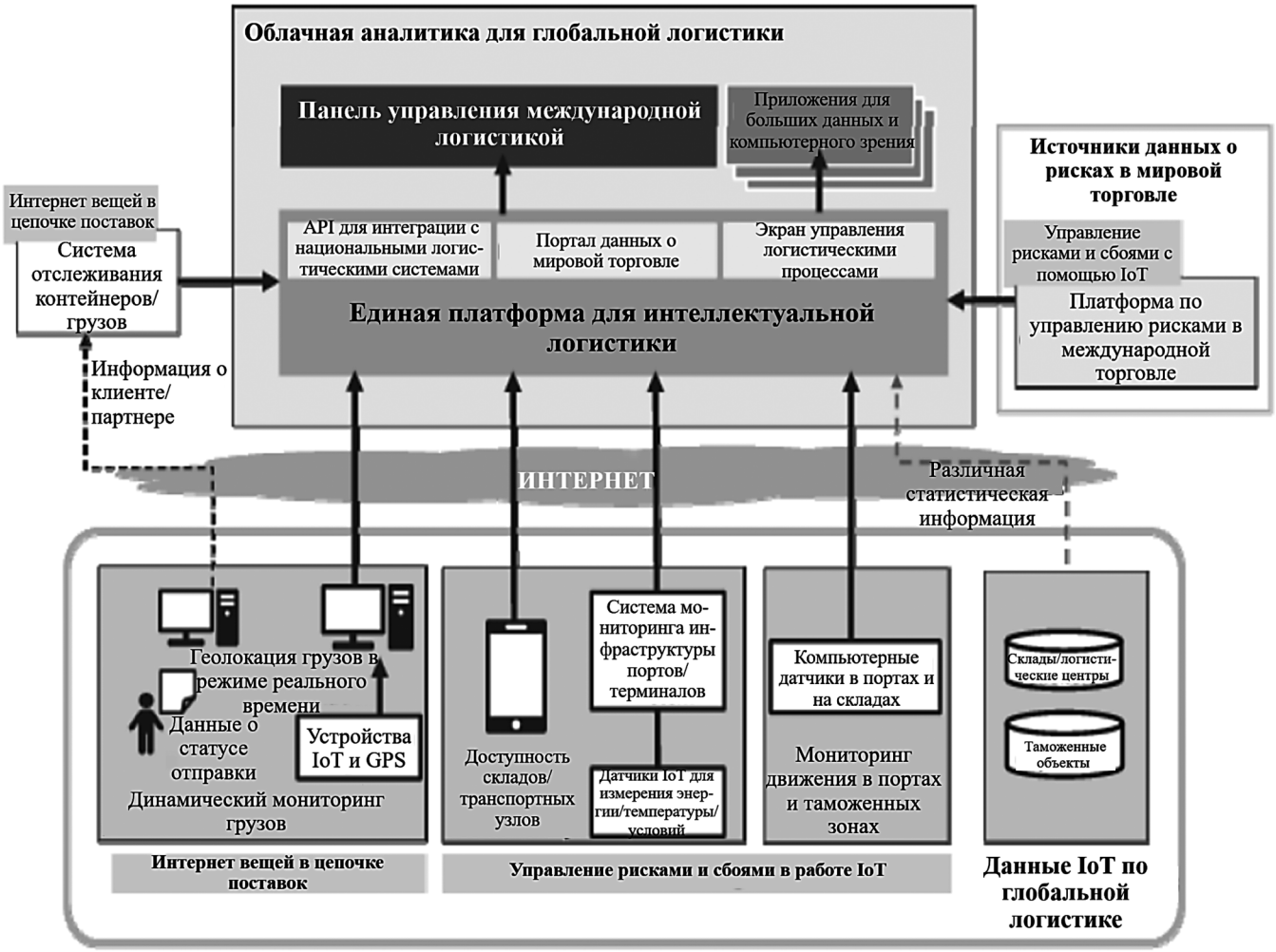


Рис. 2. Визуализированная структура платформы интеллектуального мониторинга и управления международной торговой логистикой

Таким образом, благодаря информационной платформе, все звенья логистики отображаются на различных уровнях с помощью трехмерной виртуальной реальности, графиков, изображений, диаграмм и т.д. Это позволяет более оперативно обмениваться информацией в режиме реального времени.

На следующем этапе исследования представляется целесообразным описать алгоритм работы предложенной цифровой платформы.

Этап 1. Сбор данных. Для получения информации о логистических потоках, движении товаров, состоянии складских запасов, а также о местоположении, температуре и статусе доставки груза в режиме реального используются различные датчики, системы глобального позиционирования, радиочастотная идентификация и другие технологии.

Этап 2. Хранение и обработка данных. Полученные от устройств компьютерного зрения и датчиков Интернета вещей данные загружаются на платформу и хранятся там. Технология обработки больших данных используется для очистки, интеграции и обработки массивов информации, обеспечивая возможности их дальнейшего анализа, сравнения и оценки [7].

Этап 3. Мониторинг в реальном времени. С помощью компьютерного зрения осуществляется видеонаблюдение и распознавание изображений, что позволяет проводить мониторинг процесса погрузки и разгрузки товаров, а также оценивать состояние транспортных средств в режиме реального времени. Благодаря использованию интеллектуальных алгоритмов можно обеспечить обнаружение аномалий и выдачу предупреждающих сообщений, что гарантирует безопасность и бесперебойность транспортировки и складирования грузов.

Этап 4. Анализ данных и прогнозирование. Инструменты и технологии анализа больших данных могут использоваться для изучения основных закономерностей и тенденций функционирования логистических цепочек. Это позволяет прогнозировать спрос, опти-

мизировать транспортные маршруты, выявлять риски и повышать точность и эффективность управленческих решений.

Этап 5. Интеллектуальное принятие решений. Предложенная цифровая платформа может послужить основой для построения интеллектуальной системы принятия решений, которая будет помогать менеджерам управлять логистическими цепочками в трансграничном масштабе и вовремя реагировать на чрезвычайные ситуации. При этом целесообразно использовать машинное обучение, искусственный интеллект и другие технологии для постоянной оптимизации моделей принятия решений и повышения их обосновании и точности.

Этап 6. Создание отчетов и визуализация. Система позволяет создавать различные отчеты и графики, дает возможность визуального представления логистических процессов.

Таким образом, подводя итоги, отметим, что анализ больших данных и компьютерное зрение революционизируют наблюдение и управление международной торговой логистикой, внедряя новые способы получения и обработки данных, а также улучшая всю цепочку поставок. В статье представлена схема цифровой платформы интеллектуального мониторинга и детализирован алгоритм ее работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван И. Барьеры и перспективы применения искусственного интеллекта в сфере международной торговли // Прогрессивная экономика. 2023. № 3. С. 40–53.
2. Полуботко А.А. Некоторые аспекты логистического менеджмента в развитии оптовых предприятий в современных условиях // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2024. № 4 (234). С. 80–89.
3. Guohua Lian Management System Blockchain-Based Secure and Trusted Distributed International Trade Big Data // Mobile Information Systems. 2022. Volume 20, Issue 13. P. 33–39.
4. GuoHua Lian Research on Credit Algorithm of International Trade Enterprises Based on Blockchain // Mathematical Problems in Engineering. 2022. Volume 7, Issue 11. P. 46–52.
5. Корчагина Д.А. Разработка алгоритма применения искусственного интеллекта для построения прогнозов продаж в международной онлайн-торговле // РИСК. 2024. № 4. С. 193–198.
6. Hao Qiuxia, Hou Yujie The Application of Internet of Things Data Analysis in the Development of International Trade // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Volume 7, Issue 13. P. 178–184.
7. Yue Wang International Trade Transportation Cost Based on Internet of Things-Assisted Wireless Network Virtualization // Wireless Communications and Mobile Computing. 2022. Volume 19. P. 127–134.

© Аберясев Александр Николаевич (saberyasev1@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.02

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПО ПРОБЛЕМЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ANALYSIS OF PUBLICATION ACTIVITY ON THE PROBLEM OF IMPLEMENTING MACHINE LEARNING METHODS IN CLINICAL RESEARCH

A. Alekseev

Summary. The article presents an analysis of the research community's activity in using machine learning in clinical research. The main keywords were identified, and their clustering and analysis of the relationship between key terms were conducted. Using the capabilities of information systems such as Lens.org and VOSviewer, an extensive analysis of scientific publications was performed. The research methodology is based on analytical methods, including analysis and synthesis. A systems approach was applied for the structural analysis of researcher activity in the field of machine learning applications in clinical research. The problem of applying machine learning in clinical research remains generally understudied, which hinders its widespread adoption due to a limited understanding of the functional capabilities and potential of this technology in the field. The results of this study can be useful for scientists and practicing physicians interested in using machine learning to improve the quality and efficiency of clinical research.

Keywords: heatmaps, clinical research, information technology, deep learning.

Алексеев Антон Викторович
Аспирант, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, г. Москва
alxvanton@gmail.com

Аннотация. В статье проведён анализ активности мирового сообщества исследователей по использованию машинного обучения в клинических исследованиях. Были определены основные ключевые слова, проведена их кластеризация и анализ взаимосвязи основных терминов. Используя инструменты информационных систем, такие как Lens.org и VOSviewer, был выполнен обширный анализ научных публикаций. Методология исследования основана на аналитических методах, включая методы анализа и синтеза. Системный подход, был применен для структурного анализа активности исследователей в области использования машинного обучения в клинических исследованиях. Проблема применения машинного обучения в клинических исследованиях в целом остаётся недостаточно исследованной, что мешает её широкому применению из-за ограниченного понимания функциональных возможностей и потенциала этой технологии в сфере клинических исследований. Результаты данного исследования могут быть полезны для учёных и практикующих врачей, заинтересованных в использовании машинного обучения для улучшения качества и эффективности клинических исследований.

Ключевые слова: тепловые карты, клинические исследования, информационные технологии, глубокое обучение.

Введение

В целом, изучение научных публикаций выявило два основных тренда — рост числа работ по применению нейросетей в клинике и изменение способов их использования. Актуальность текущего исследования заключается в том, что оно основано на статьях, ключевые слова в которых, посвящены использованию автоматизированной диагностики и автоматизации прогнозов относительно эффективности лечения с использованием алгоритмов машинного обучения. Практическая значимость данных направлений очевидна, поскольку они становятся все более широко используемыми в клинической практике, а это подтверждает и рост числа публикаций на эти темы. Особые надежды исследователи связывают с машинным обучением, так как его алгоритмы могут существенно повысить точность медицинских прогнозов. Для проведения анализа индекса научной активности исследователей в этой области важно выбрать ключевые слова для получения системного представления о существующей литературе.

Одна из задач современной клинической практики — это построение помощи пациентам, основываясь на индивидуальном подборе средств и методов [1]. А именно методы машинного обучения способны предоставить эффективные решения в этой области [2].

Также считается, что экспертные системы предназначены для замены экспертов, когда решение проблем из-за их недостаточного количества, недостаточной эффективности в решении проблемы или в опасных условиях (вредных) условиях [3].

Методология

Для анализа публикационной активности были выбраны следующие ключевые термины: «машинное об-

учение в клинических исследованиях», «использование нейронных сетей в медицине» и «цифровые технологии в клинических науках». Проведенный анализ по указанным терминам позволяет оценить интерес научного сообщества к использованию машинного обучения в клинических исследованиях и уровень развития соответствующих научных направлений в мировом контексте.

Для сбора и анализа данных был использован функционал системы Lens.org [4], предоставляющей доступ к глобальным научным публикациям с индексацией цитирования. Этот веб-сервис дал возможность проанализировать статистику и динамику научных работ по выбранным ключевым словам и выражениям, а также определить периоды возрастания интереса к данной проблематике и текущий уровень активности исследований в этой области.

С целью наглядного представления доминирующих научных направлений и выявления паттернов сотрудничества в публикационной деятельности был задействован аналитический инструмент VOSviewer[5]. Результаты анализа с помощью этого инструмента позволили создать карты взаимосвязей между ключевыми терминами, авторами и публикациями, что дало возможность определить основные тенденции и направления исследований в данной области. Созданные с использованием инструмента VOSviewer библиометрические карты обеспечивают визуализацию количества научных статей в зависимости от различных параметров, таких как страны происхождения, авторские имена, хронологические рамки и наличие связей между исследователями, публикациями и ключевыми словами [6].

Использование указанных методов позволило получить обоснованную картину библеометрического анализ научной активности профессионального сообщества по проблеме использования машинного обучения в клинических исследованиях и определить актуальные направления исследований в данной области.

Результаты

Данный обзор научных статей позволяет выявить две основные тенденции. Во-первых, к количеству работ по нейросетям в клинике за последний период времени можно отметить устойчивый рост. Во-вторых, характеризуется какими-то общими чертами развитие методов применения нейросетей, что можно выделить, ориентируясь на анализ современных публикаций. Одно из самых примечательных направлений — автоматизированное машинное обучение для постановки диагнозов и определения эффективности терапии, это направление становится все более интересным в плане применения в реальной клинике, что отражено на увеличивающемся количестве публикаций

Кроме того, отмечается рост исследований, связанных с применением нейросетевых технологий для анализа медицинских изображений, включая снимки МРТ, компьютерную томографию и рентгенограммы, что подтверждает их значительный потенциал в области клинической практики [7,8,9].

Для анализа публикационной активности по данной проблеме были выбраны ключевые слова, такие как «машинное обучение», «клинические исследования», «использование искусственного интеллекта в медицине». Эти термины были использованы для поиска и анализа научных публикаций в базе данных. После сбора данных проведен анализ, направленный на выявление кластеров тематически связанных ключевых слов и терминов.

Каждый кластер был сопоставлен с определенным аспектом использования машинного обучения в клинических исследованиях. Например, один из кластеров был связан с применением машинного обучения для диагностики и лечения заболеваний, в то время как другой кластер отражал использование алгоритмов машинного обучения для анализа медицинских изображений.

Для анализа временной динамики публикаций был использован метод распределения ключевых слов по годам исследования. Это позволило выявить изменения в интересах научного сообщества со временем и выявить актуальные направления исследований в области применения машинного обучения в клинической практике.

Дополнительно, для визуализации результатов использовалась программа VOSviewer, позволяющая создавать тепловые карты. Это позволило более наглядно представить результаты анализа и сделать выводы о развитии и актуальности исследуемой проблемы в научном сообществе (Рисунок 1).

Анализ данного рисунка позволяет выделить несколько кластеров, которые можно условно обозначить как «Covid-19» (серый), «Применение новейших технологий» (темно-серый), «Устройства ввода» (светло-серый) и «Методы» (черные кластеры). Интерпретация кластеров основана на встречающихся в них ключевых словах, однако, следует отметить, что данное разделение довольно условно, поскольку и кластеры, и термины взаимосвязаны.

Особенностью кластера «Применение новейших технологий» является его «технический» уклон в привязке к принятию решений в клинических исследованиях. В рамках него, в частности, освещаются темы построения модели исследования, определения эффективности лекарственного препарата, обеспечения безопасности и удобства использования технологий, особенно в контексте исследуемого препарата.

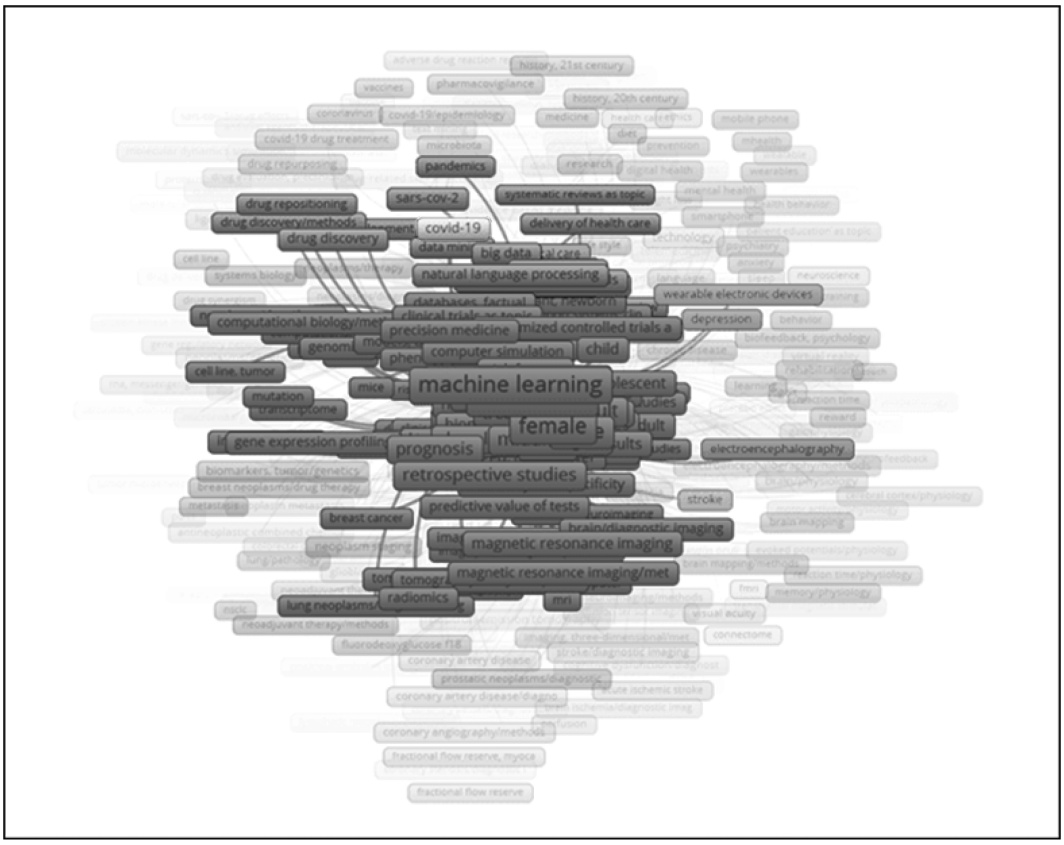


Рис. 1. Тематическая карта исследований, построенная по ключевым терминам, «Machine learning in Clinical Trials»

Причем, если добавить временную шкалу на данные кластеры, то можно увидеть, что такие термины, как «machine learning», «retrospective studies», относящиеся к терминам машинного обучения, используются в более актуальных статьях, нежели термины, относящиеся к области клинических исследований (Рисунок 2). Что говорит о том, что только недавно исследователи всего мира заинтересовались применении систем машинного обучения в разрезе клинических исследований.

Далее проведем анализ, по ключевым словам, «Artificial intelligence in Clinical trials with teacher». Чтобы убедиться, что данная тема действительно заинтересовала мировое сообщество. На представленном рисунке отображены ключевые слова с различной окраской, отражающей годы их публикации. Анализ данных позволяет сделать вывод о том, что в начальные периоды времени научных изысканий ключевые слова «drug discovery» и «computer simulation» преобладали в научной литературе. Однако, в последующие годы наблюдается значительное увеличение упоминаний таких терминов как «Artificial Intelligent» и «Machine Learning», что свидетельствует о повышенной актуальности темы исследования.

Это позволяет провести анализ динамики и изменений в интересах исследователей с течением времени. Например, ранние публикации могут содержать ключевые слова, связанные с основами исследования, в то время как более поздние работы акцентируют внимание на современных методах и технологиях, таких как искусственный интеллект и машинное обучение. Это свидетельствует о постоянной эволюции в области клинических исследований и адаптации новейших технологий для решения актуальных задач.

Для определения актуальности исследования по проблеме применения машинного обучения в клинических исследованиях был проведен анализ научной литературы с использованием ключевых слов, фокусирующихся на применении систем машинного обучения при проведении клинических исследований. Одним из таких ключевых слов было сочетание терминов «Machine learning in Clinical Trials».

С использованием программного обеспечения VOSviewer и базы данных Lens.Org был произведен поиск научных публикаций, содержащих указанные ключевые слова. Результаты поиска охватили 10,368 публикаций, в которых встречаются данные термины. Для визуализации совпадений и взаимосвязей между терминами была построена визуальная карта, исключая из анализа наиболее распространенные слова.

Полученные результаты показали плотную структуру взаимосвязей, где крупный кластер, связанный с обучением, был тесно связан с кластером компьютерных

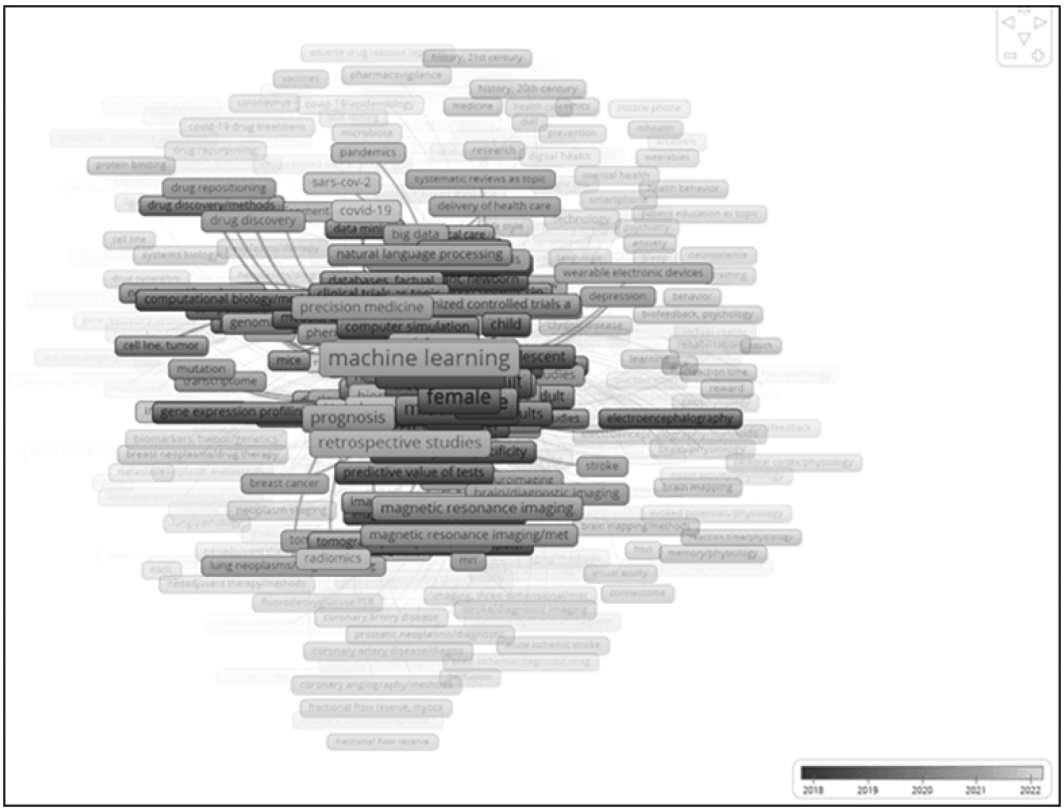


Рис. 2. Тематическая карта исследований, построенная по ключевым терминам, «Machine learning in Clinical Trials» по годам

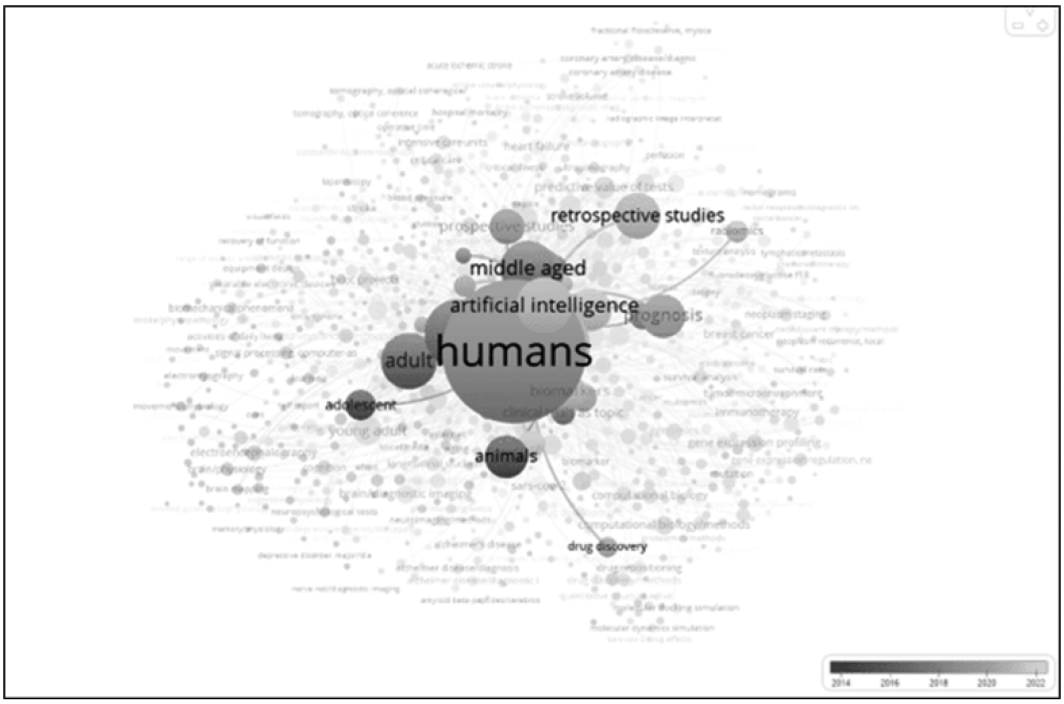


Рис. 3. Тематическая карта исследований, построенная по ключевым терминам, «Artificial intelligence in Clinical trials with teacher»

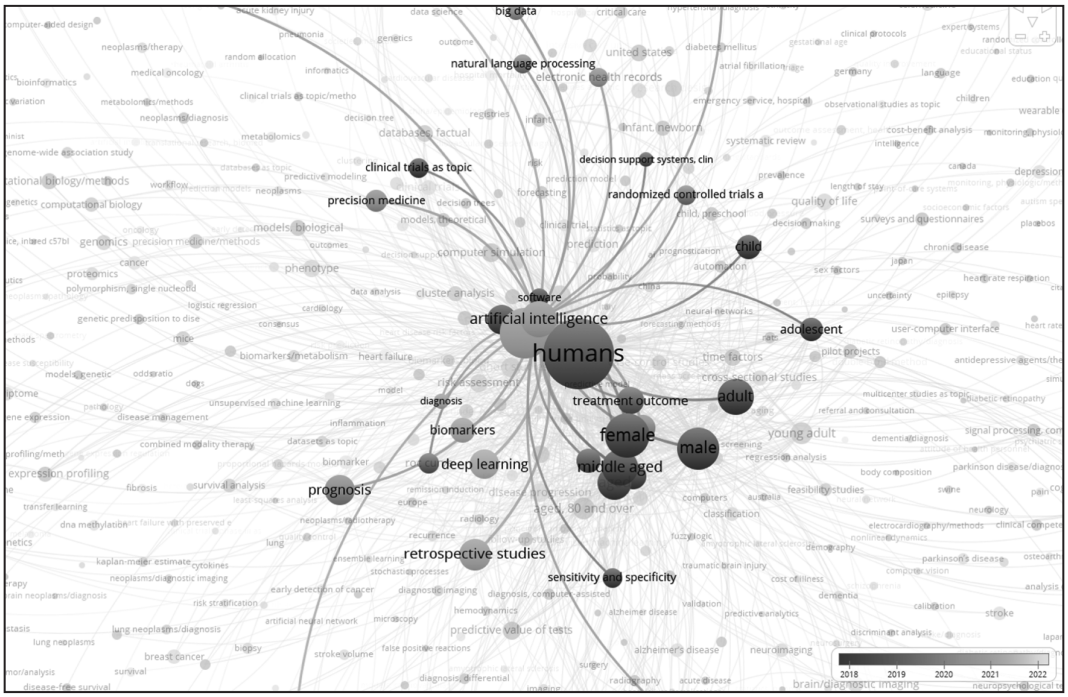


Рис. 4. Тематическая карта исследований, построенная по ключевым терминам, «Artificial intelligence in Clinical trials with teacher»

нейросетевых технологий. Также были выявлены связи с кластерами искусственного интеллекта и клиническими исследованиями, связанными с людьми (Рисунок 4).

Анализ указывает на активное развитие в области применения искусственного интеллекта и систем машинного обучения в клинических исследованиях, а также на интенсивный научно-исследовательский процесс в этом направлении.

Заключение

Проведенный анализ исследовательской деятельности по проблеме применения нейросетевых технологий при проведении клинических исследований позволяет сделать вывод о том, что на данный момент данная область является развивающейся и только набирает интерес ученых по всему миру. Несмотря на широкое развитие сферы машинного обучения применение их в сфере клинических исследований остается фрагментарным и несистемным. Вследствие чего компьютерное моделирование является ключевым инструментом анализа и оптимизации работы систем здравоохранения. [10].

В современный период отмечается определенный рост количества исследований, связанных с использованием алгоритмов машинного обучения в сфере клинических исследований. Однако, количество научных работ по данной проблеме остается недостаточным для формирования системного подхода к изучению проблемы.

Наличие ограниченного количества публикаций по данной теме может свидетельствовать о неопределенности представлений научного сообщества относительно потенциала области применения искусственного интеллекта и систем машинного обучения в клинических исследованиях на широком уровне. Однако интерес явно прослеживается и заметен потенциал применения технологий машинного обучения при проведении клинических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозерова Е.В., Данилов А.В., Исаенкова Е.А., Калинина Л.Б., Манерова О.А., Усов Ю.И. Прогнозирование развития гипертонической болезни с использованием моделей машинного обучения в подсистеме дистанционного кардиомониторинга // Менеджер здравоохранения. 2022. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-razvitiya-gipertonicheskoy-bolezni-s-ispolzovaniem-modeley-mashinnogo-obucheniya-v-podsistemedistantsionnogo (дата обращения: 01.03.2024).
2. Кротова Ольга Сергеевна, Москалев Игорь Викторович, Хворова Любовь Анатольевна, Назаркина Оксана Михайловна Реализация эффективных моделей классификации медицинских данных методами интеллектуального анализа текстовой информации // Известия АлтГУ. 2020. №1 (111). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/realizatsiya-effektivnyh-modeley-klassifikatsii-meditsinskih-dannyh-metodami-intellektualnogo-analiza-tekstovoy-informatsii (дата обращения: 15.03.2024).

3. Drygin D.S., Pronkin N.N. Application of artificial intelligence in medicine // International journal of professional science. 2020. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/application-of-artificial-intelligence-in-medicine (дата обращения: 01.03.2024).
4. Lens [Электронный ресурс], URL:https://www.lens.org/lens/ (дата обращения: 01.03.2024)
5. VOSviewer [Электронный ресурс], URL: https://www.vosviewer.com/ (дата обращения: 01.03.2024)
6. Chvanova, M.S., Mitrofanova, I.P., Molchanov, A.A., Shlenov, Y.V., Podlesny, D.V. Terminological Maps of Publications on the Transformation of Students' Professional Orientations in the Context of their Internet Socialization Proceedings of the 2021 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies», IT and QM and IS 2021, 2021, pp. 605–611
7. Переверзев Владимир Сергеевич, Казьмин Аркадий Иванович, Сажнев Максим Леонидович, Пантелеев Андрей Андреевич, Колесов Сергей Васильевич. Искусственный интеллект для прогнозирования различных состояний в вертебрологии: систематический обзор // Гений ортопедии. 2021. №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-dlya-prognozirovaniya-razlichnyh-sostoyaniy-v-vertebrologii-sistematicheskiy-obzor (дата обращения: 24.03.2024).
8. Абдуганиева Ш.Х., Никонорова М.Л. Цифровые решения в медицине // Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины. 2022. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-resheniya-v-meditsine (дата обращения: 24.03.2024).
9. Абдуалимов Тимур Пулатович, Обрезан Андрей Григорьевич. Возможности искусственного интеллекта в прогнозировании поражения коронарных артерий // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. 2022. №1 (28). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-iskusstvennogo-intellekta-v-prognozirovanii-porazheniya-koronarnyh-arteriy (дата обращения: 24.03.2024).
10. Прокофьева Елизавета Сергеевна, Зайцев Роман Дмитриевич. Анализ клинических путей пациентов в медицинских учреждениях на основе методов жесткой и нечеткой кластеризации // Бизнес-информатика. 2020. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-klinicheskih-putey-patsientov-v-meditsinskih-uchrezhdeniyah-na-osnove-metodov-zhestkoy-i-nechetkoy-klasterizatsii (дата обращения: 19.03.2024).

© Алексеев Антон Викторович (alxvanton@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.04

КЛАССИФИКАТОР ТЕКСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОГО ПОДХОДА: КЛАССИЧЕСКОЙ ПРЕДОБРАБОТКИ ДАННЫХ И КВАНТОВЫХ МОДЕЛЕЙ SVM

TEXT CLASSIFIER USING A HYBRID APPROACH: CLASSICAL DATA PREPROCESSING AND QUANTUM SVM MODELS

N. Babasanova
A. Kanev
V. Mikheeva

Summary. The work addresses the problem of the lack of practical implementations of quantum algorithms for natural language processing (NLP). The goal of the work is to present an approach to building a quantum text classifier for the binary classification of SMS messages with a split in computations: data preprocessing is performed on a classical computer, while the classification stage is carried out using a quantum algorithm. A comparison with a classical SVM (scikit-learn) was conducted for the quantum PegasosQSVC and QSVC algorithms; with identical data preprocessing, the quantum algorithms demonstrate comparable accuracy: 94 % for the classical SVC and 96 % for PegasosQSVC (on the full dataset), and 97 % for SVC and 96 % for QSVC (on a reduced dataset).

Keywords: machine learning, NLP, quantum computing, SVM, quantum machine learning, Qiskit.

Бабасанова Надежда Сергеевна
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bns22k060@student.bmstu.ru
Канев Антон Игоревич
Старший Преподаватель, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
aikanev@bmstu.ru
Михеева Валерия Алексеевна
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
mikheevava@bmstu.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме недостатка практических реализаций квантовых алгоритмов для обработки естественного языка (NLP). Целью работы является представление подхода к построению квантового текстового классификатора для задачи бинарной классификации SMS-сообщений с разделением вычислений: предобработка данных происходит на обычном компьютере, этап классификации происходит с использованием квантового алгоритма. Проведено сравнение с классическим SVM (scikit-learn) квантовых алгоритмов PegasosQSVC и QSVC; при идентичной предобработке данных квантовые алгоритмы демонстрируют сопоставимую точность: 94 % для классического SVC и 96 % PegasosQSVC (при полном датасете) и 97 % для SVC и 96 % QSVC (при уменьшенном датасете).

Ключевые слова: машинное обучение, NLP, квантовые вычисления, SVM, квантовое машинное обучение, Qiskit.

Введение

Современные подходы к развитию вычислительной техники сталкиваются с серьезными ограничениями, обусловленными исчерпанием ресурсов традиционной кремниевой технологии. Закон Мура, согласно которому плотность транзисторов на кристалле удваивается каждые 18–24 месяцев, утратил свою актуальность, поскольку дальнейшее уменьшение размеров транзисторов ограничивается физически и технологически. Вследствие этого внимание исследователей и ведущих технологических компаний всё чаще обращается к альтернативам, в частности — к квантовым вычислениям.

Устойчивый прогресс в области нанотехнологий и производственных процессов, а также высокая теоретическая эффективность квантовых алгоритмов в задачах линейной алгебры, особенно при работе с пространствами больших размерностей, и в ряде узкоспециализированных задач, в частности, при генерации сложных выборок, открывает перспективы для прорыва в областях, традиционно требующих ресурсных затрат с экспоненциальной сложностью.

Хотя создание универсальных квантовых компьютеров остается долгосрочной целью, устройства промежуточного масштаба (NISQ) уже сегодня предоставляют экспериментальные платформы для отработки гибридных подходов. Характеризуясь ограниченным числом кубитов (до десятков или сотен, например, бэкенд IBM Brisbane предоставляет 127 кубитов) и подверженностью шумам, что приводит к ограничениям размеров квантовых цепей, они уже демонстрируют вычислительные преимущества в квантово-классических алгоритмах. Учитывая интенсивное развитие данной области, можно ожидать, что в будущем появятся более стабильные и эффективные реализации NISQ-компьютеров.

Современные исследования демонстрируют эффективность различных методов машинного обучения для задач NLP, например, для задачи анализа тональности. В статье [1] проведен сравнительный анализ нескольких подходов, включая логистическую регрессию, метод опорных векторов (SVM), случайный лес и рекуррентные нейронные сети. Результаты показали, что лучшие показатели f1-меры достигаются при использовании логистической регрессии и стохастический градиентный спуск (SGD).

Однако классические методы сталкиваются с существенными ограничениями при работе с высокоразмерными данными, особенно метод опорных векторов. Как показано в работе [1], SVM является одним из самых длительных в обучении методов, поскольку плохо масштабируется с увеличением объема данных. Это вполне объяснимо тем, что этап обучения SVM имеет сложность по времени работы $O(n^3)$ и по объему дополнительной памяти $O(n^2)$, n — количество объектов [2].

Для преодоления ограничений классического SVM, связанных с вычислительными сложностями, предлагается использовать гибридные квантово-классические алгоритмы. В условиях современных NISQ-устройств это требует разработки специализированного конвейера обработки данных. Примером такого конвейера является модель Прабхат Санти, Камакхья Мишра, Сибабрата Моханти. В своей работе «Квантовый текстовый классификатор» авторы описывают и предлагают гибридный конвейер [3]. Так, они производят классическую предобработку данных: очистку текста, преобразование в векторы и снижение размерности; квантовое кодирование признаков и применение моделей классификации Qiskit (с использованием 2 кубитов): квантовый SVM (QSVC), вариационный квантовый классификатор (VQC), квантовый нейросетевой классификатор (QNNC). Все три модели выполнялись на симуляторе QASM. В результате QSVC достигает 89 % точности (accuracy), 89 % точности (precision), 89% полноте покрытия (recall), 89 % f1-мере (против 90 % у классического SVC по тем же метрикам), VQC — 81 % по метрикам, указанным выше, QNNC уступает предыдущим алгоритмам (57 % — accuracy, 70 % — precision, 57 % — recall, 53 % — f1-мера). Авторы делают вывод, что гибридный подход уже близок к классическим методам и имеет потенциал при расширении числа кубитов, улучшении ранжирования признаков и настройки анзаца.

Цель данной работы — создание гибридного подхода: классической предобработки данных и квантового текстового классификатора с использованием большего числа кубитов для повышения точности квантовых моделей.

Решаемые задачи включают:

1. Экспериментальный подбор размерности признакового пространства, балансирующий между информативностью и требованиями NISQ-ограничений.
2. Сравнительную оценку по метрикам и времени выполнения предложенного решения с использованием библиотеки Qiskit против классического подхода, предложенного scikit-learn.

Материалы, методы решения задачи и принятые допущения

Преобразование текста в векторное представление

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) — модель для задач обработки естественного языка.

BERT использует трансформер (механизм «внимания», который изучает контекстуальное отношение слов в тексте). Стандартный трансформер состоит из кодирующей и декодирующей части. Кодировщик считывает введенный текст, декодировщик выдает прогноз для задачи. BERT использует только кодирующую часть. Ключевым отличием данной модели является двунаправленное моделирование контекста, реализованное через задачу Masked Language Modeling и Next Sentence Prediction для двунаправленного анализа контекста [4], так BERT способен работать с многоязычными данными [5].

Модификацией BERT является Sentence-BERT (SBERT) — модель для получения векторного представления предложений. Модель использует сиамскую архитектуру с общими весами BERT-кодировщика. SBERT применяет mean-pooling к выходным эмбеддингам токенов последнего слоя BERT, преобразуя их в вектор фиксированной размерности (768 или 384; в данной работе используется модель с 384 выходными векторами). SBERT дообучается на задачах Natural Language Inference, что позволяет получать семантически значимые эмбеддинги с линейной сложностью поиска O(n) и возможностью предварительного индексирования векторов [6].

Снижение размерности

После BERT пространство признаков расширяется до пространства размерности 384, чтобы избежать «проклятия размерности» и большого потребления ресурсов, снизим размерность. Для этого воспользуемся UMAP, так как алгоритм сохраняет глобальную структуру, что может быть важно при проецировании пространства большой размерности на пространство меньшей размерности, а также по причине использования алгоритма, сильно зависящего от расстояний между объектами.

UMAP основан на трех принципах: равномерное распределение данных на римановом многообразии,

постоянство локальной метрики в малых окрестностях и локальная связность многообразия. Алгоритм строит взвешенный граф на основе k-ближайших соседей (k=15) с адаптивным вычислением расстояний для учета локальной плотности данных. Веса ребер определяются по формуле (1) [7].

$$w\left(\left(x_i, x_{i_j}\right)\right) = \exp\left(\frac{-\max\left(0, d\left(x_i, x_{i_j}\right) - \rho_i\right)}{\sigma_i}\right) \quad (1)$$

где ρ_i — расстояние до ближайшего соседа,

σ_i — решение уравнения (2)

$$\sum_{j=1}^{k} \exp\left(\frac{-\max\left(0, d\left(x_i, x_{i_j}\right) - \rho_i\right)}{\sigma_i}\right) = \log_2 k \quad (2)$$

где k — число ближайших соседей

Оптимизация проводится минимизацией кросс-энтропии между нечеткими множествами исходного и целевого графов с использованием стохастического градиентного спуска. Начальные позиции инициализируются спектральными методами.

Выбор UMAP обусловлен способностью сохранять глобальную структуру данных при работе с нелинейными зависимостями, что критично для алгоритмов, основанных на метриках расстояний.

Для представления пространства после Sentence-BERT в более компактном виде размерность данных снижена до 12 компонентов. Это число найдено экспериментальным путем, так как использование большего количества компонентов приводит к исчерпанию ОЗУ, доступного пользователю в Google Colab. В [8] упоминается, что при симуляции квантовых систем для n компонентов требуется хранить c^n комплексных чисел, c — количество состояний системы, для кубитов c = 2. Сложность вычислений экспоненциально растет с количеством кубитов в «наивном» случае. Также для одного из квантовых алгоритмов, а именно QSVC, необходимо вычислять квантовое ядро, для которого рассчитывается точность воспроизведения одного состояния другим для каждой пары объектов из выборки [9].

SVM

Наиболее распространенными QML фреймворками являются квантовые ядерные методы (Quantum kernel methods) и вариационный квантовый алгоритм (Quantum variational algorithm, QVA). Рассмотрим в данной работе квантовый ядерный метод, а именно квантовый метод опорных векторов, так как его можно сравнить с классической реализацией SVM в scikit-learn.

Ядерные методы — алгоритмы, использующие функцию ядра $K: X \times X \to \mathbb{R}$, которая симметрична и неотрицательно определена. Общая формула ядра представлена в формуле 3.

$$K\left(x_i, x_{i_j}\right) = \left\langle \varphi\left(x_i\right), \varphi\left(x_j\right)\right\rangle \quad (3)$$

где: $\varphi(x)$ — фиксированное преобразование пространства признаков.

Рассмотрим SVM в классическом понимании для задачи бинарной классификации в общем случае. Он основан на поиске оптимальной разделяющей гиперплоскости в пространстве признаков. Линейная модель SVC будет иметь вид (формула 4).

$$y(x) = sign\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K\left(x, x_i\right) + b\right) \quad (4)$$

где: $K(x, x_i)$ — ядро, вычисляемое по (3).

Для линейных случаев в (3) и (4) $\varphi(x)$ — тождественное отображение.

Для нелинейных случаев считаем $\varphi(x)$ в (3) и (4) как $\varphi(x)$: $\mathbb{R}^d \to H$, где H — пространство признаков большой размерности. Будем считать данное пространство Гильбертовым, так как на нем определено скалярное произведение.

Для обучения SVC решается двойственная задача оптимизации в общем случае (формула 5).

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i - \frac{1}{2} \Sigma_{i.j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K\left(x_i, x_j\right) \to \max_\alpha; \\ 0 \leqslant \alpha_i \leqslant C,\ i = 1, \ldots n; \\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Квантовый SVM

В работе рассматриваются чистые состояния кубитов и систем, так как рассматриваются симуляторы NISQ-устройств. В реальном NISQ-устройстве имеется шум, который влияет на состояния кубитов и результаты.

Эволюция квантового состояния на практике реализуется через дискретные унитарные операции — вентили или гейты. Квантовые гейты отличаются от классических тем, что преобразовывают сразу все возможные состояния кубита, тогда как окончательное состояние кубита определяется только в момент осуществления измерения.

Одними из основных вентилей являются гейт Адамара (в схемах *H*) и CNOT (в схемах *CX*). Гейт Адамара, представленный матрицей в формуле 6, создает состояние суперпозиции.

$$\hat{H} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Гейт CNOT (формула 7) — двухкубитный гейт для создания запутанности между кубитами. Он действует на пару кубитов: управляющий и целевой. Если управляющий $|0\rangle$, то целевой кубит остается неизменным; если управляющий кубит $|1\rangle$, то целевой инвертируется.

$$CNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Схема преобразования данных — карта признаков

При методе опорных векторов нужно определить преобразование пространства признаков. В квантовом случае такой функцией служит карта признаков (feature map).

Каждый классический вектор признаков $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, полученный на предыдущем этапе, преобразуется в чистое квантовое состояние $|\Phi(x)\rangle\langle\Phi(x)|$ с использованием нелинейного отображения, называемого квантовой картой признаков, что послужит фиксированным пространством признаков. Эти состояния представляют собой векторы в гильбертовом пространстве.

Существует множество методов перевода входных классических данных в квантовую форму. Один из наиболее известных — квантовое частотное кодирование, при котором каждый вектор признаков ассоциируется с определённым квантовым состоянием в зависимости от его частотных характеристик.

В рамках данной работы используются схемы отображения признаков первого порядка (ZFeatureMap) и второго порядка (ZZFeatureMap), основанные на расширении по операторам Паули [9]. Эти схемы карт признаков трудно моделировать с помощью классических компьютеров, но в то же время, поскольку они имеют небольшую глубину, их можно успешно реализовать на имеющихся устройствах NISQ.

Рассмотрим квантовую карту признаков. Обучение и классификация с использованием обычных опорных векторов (SVM) эффективны, когда внутренние произведения между векторами признаков могут быть вычислены эффективно. Например, классификатор с разделимыми состояниями (состояния, которые могут быть представлены как произведение отдельных состояний для каждого кубита) часто может быть эффективно реализован классически. Например, если у нас есть два кубита, общее состояние — тензорное произведение (product state) состояний кубитов — может выглядеть как $|0\rangle\otimes|1\rangle$, что означает, что первый кубит находится в состоянии $|0\rangle$, а второй — в состоянии $|1\rangle$. Состояния, представляемые тензорным произведением состояний отдельных кубитов, является разделимыми или сепарабельными, такие кубиты не имеют квантовой запутанности. Чтобы получить преимущество перед классическими подходами, используя уникальные свойства квантовых систем, такие как запутанность или суперпозиция, нам нужно реализовать карту, основанную на схемах, которые трудно смоделировать классически. Поскольку квантовые компьютеры не ожидаются как классически симулируемые, существует длинный список (универсальных) семейств схем, из которых можно выбирать. Здесь мы используем схему, которая хорошо работает в наших экспериментах и не слишком глубока. Мы определяем карту признаков на n-кубитах и глубиной d, генерируемую унитарной операцией, представленной формулой 8 [9].

$$U_{\Phi(x)} = \prod_{i=1}^{n} \exp(ix_i Z_i) \quad (8)$$

где: Z_i — оператор Паули на i-м кубите.

В ZFeatureMap применяются гейты Адамара (H) на каждый кубит для создания суперпозиции. Затем следуют вращения $R_Z(x_i) = \exp(ix_i Z_i)$, кодирующие значение признака x_i в фазу кубита. В результате ZFeatureMap кодирует каждый признак x_i независимо, создавая линейное отображение данных.

Формула ZZFeatureMap учитывает как одиночные, так и парные взаимодействия (формула 9).

$$U_{\Phi(x)} = \prod_{i=1}^{n} \exp(ix_i Z_i) \prod_{i<j} \exp\left(i(\pi - x_i)(\pi - x_j) Z_i Z_j\right) \quad (9)$$

где: $Z_i Z_j$ — парный оператор Паули, моделирующий взаимодействие между i-м и j-м кубитами.

Схема ZZFeatureMap начинается с гейтов Адамара (H) для создания суперпозиции. Затем применяется вращение $R_Z(x_i)$ для каждого кубита (как в ZFeatureMap). После добавляются двухкубитные гейты R_{ZZ}, кодирующие нелинейные взаимодействия $(\pi - x_i)(\pi - x_j)$. В результате создается нелинейное отображение, учитывающее корреляции между признаками.

Реализация QSVC

QSVC использует квантовое ядро (формула 10) вместе с классическим SVM [10].

$$K(x_i, x_j) = \left|\langle\varphi(x_i)|\varphi(x_j)\rangle\right|^2 \quad (10)$$

где: $\varphi(x)$ — квантовое состояние, создаваемое схемой кодирования данных.

Данные кодируются с помощью унитарных операций (карт признаков), затем считается точность воспроизведения одного состояния другим (fidelity). Для чистых состояний точность воспроизведения одного состояния другим считается по формуле 9, что схоже с формулой 11.

$$F\left(|\psi\rangle\langle\psi|,\ |\varphi\rangle\langle\varphi|\right) = |\langle\psi|\varphi\rangle|^2 \qquad (11)$$

QSVM функционирует аналогично классическому SVM, используя двойственную формулировку (формула 5, но ядро из формулы 10), но с заменой классического ядра на квантовое. Задача сводится к нахождению разделяющей гиперплоскости для квантовых векторов состояний $|\varphi(x_i)\rangle\langle\varphi(x_i)|$ в соответствии с их метками.

PegasosQSVC

Альтернативной реализацией QSVC, представленной в Qiskit, является PegasosQSVC. В отличие от двойственной задачи оптимизации в классическом QSVC, PegasosQSVC использует стохастический градиентный спуск (формула 12), что снижает вычислительную сложность с $O(n^2)$ для QSVC до $O(n)$, n — количество признаков. Благодаря этому алгоритм эффективнее для больших обучающих выборок [11].

$$\min_{w,b} \frac{1}{2}\|w\|^2 + C\sum_{i=1}^{n} \max\left(0, 1 - y_i\left(w^T\varphi(x_i) + b\right)\right) \qquad (12)$$

Результаты

Выбран датасет СМС спама (Kaggle. Spam SMS Classification using NLP), коллекции публичного набора СМС-сообщений на английском языке, содержащих текст присланного сообщения и метки (спам или обычное сообщение), которую ставили пользователи, получившие данное сообщение. Он состоит из двух столбцов: «Class» — метка, определяющая категорию спам/не спам (spam/ham); «Message» — содержит текстовое сообщение на английском языке.

Предобработка, подготовка данных и обучение моделей

В рамках реализации фреймворка классический компьютер использовался для предварительной обработки данных, извлечения и уменьшения размерности признаков, а также для финальной интерпретации результатов. Квантовая часть — симулятор квантового компьютера — применялась для кодирования обучающей выборки, построения пользовательской карты признаков, обучения квантовой модели, оптимизации параметров и последующей обработки квантового вывода.

На первом этапе работы данные проверяются на пропущенные значения и дубликаты. Затем метки кодируются с помощью LabelEncoding, метка «0» — не спам, метка «1» — спам. Данных со спамом 1032, без спама 4127.

Затем обработанные текстовые данные очищаются от лишних символов, приводятся к нижнему регистру и токенизируются. После этого из токенов удаляются цифры, знаки пунктуации, а также стоп-слова, что позволяет сосредоточиться на значимых словах.

Далее очищенные текстовые данные конвертируются в векторное представление с помощью SBERT. В данной работе используется модель трансформеров предложений paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2.

Затем размерность уменьшается с помощью UMAP до 12 компонентов.

После векторизации данные масштабируются в диапазоне [0, π] с помощью MinMaxScaler, что делает их более подходящими для подачи на вход квантовым алгоритмам.

Итогом этого этапа становится векторизованный набор данных, который готов для дальнейшей обработки. Затем он делится на тренировочные и тестовые данные с использованием функции train_test_split() из библиотеки sklearn. В тренировочной части данных распределение по классам: класс 0–3607 объектов, класс 1–520 объектов; в тестовой: класс 0 — 911 объектов, класс 1 — 121 объект.

Также стоит рассмотреть полный набор данных без уменьшения размерности. Предобработка полного датасета аналогична, но без использования UMAP.

Классическая классификация

Несмотря на то, что SVM в основе работает с метками {−1; +1}, а имеется {0; 1}, внутри своих алгоритмов имеющиеся классы отображаются в {−1; +1}.

На данных, полученных на предыдущем этапе (набор с размерностью 384 признака и данных, уменьшенных до 12 признаков), обучена модель классического машинного обучения SVC, которая затем тестировалась на тестовой выборке и оценивалась по метрикам: accuracy, precision, recall, f1-мера.

Квантовая классификация

Предобработанные данные сопоставляются с квантовыми состояниями в гильбертовом пространстве с помощью карты признаков.

Обучение происходит на AerSimulator.

Для реализации QSVC ядро для классификатора опорных векторов строится из квантовых состояний, созданных квантовой картой признаков.

Ядро используется для обучения и тестирования модели QSVC. То же оптимизированное ядро используется при классификации тестовых данных.

Для модели QSVC используется меньший набор данных, состоящий из 400 случайно выбранных объектов из предобработанного датасета для обучения и 200 случайно выбранных объектов для тестирования. Он рассматривается отдельно, так как он требует большого количества оперативной памяти, из-за этого сравнить его с другими алгоритмами при прочих равных условиях не имеется возможности.

PegasosQSVC обучается и тестируется на полном наборе данных с 12 признаками.

Завершающая обработка

После выполнения измерений полученные квантовые выходные данные преобразуются в числовые значения, отражающие вероятностное распределение по классам. Эти значения интерпретируются как предсказания модели относительно принадлежности каждого текстового фрагмента к тому или иному классу. Предсказанные метки сравниваются с фактическими метками из тестовой выборки, далее оценивается качество модели по метрикам: точность (accuracy), полнота (recall), точность (precision) и f1-мера.

Обсуждение полученных результатов

Результаты классического SVC с набором данных с большой размерностью и SVC с PegasosQSVC с одинаковым набором данных размерности 12 представлены в таблице 1. Теоретическая сложность SVC $O(n^3)$, QSVC $O(n^2)$, PegasosQSVC $O(n)$, n — количество точек данных.

Как видим, результаты квантового PegasosQSVC превзошли ненамного классический SVC при равных условиях (на 12 признаках).

Результаты QSVC представлены в таблице 2.

Полученные результаты для QSVC сравнимы с SVC для одинаковой выборки, однако потенциал данного алгоритма рассмотреть на полном наборе данных не имеется возможности.

Таблица 1

Результаты SVC, PegasosQSVC

Алгоритм \ Метрика	Время выполнения fit, с	accuracy	precision	recall	f1-мера
SVC (scikit-learn) с сохраненной размерностью данных	20,06	0,975	0,944	0,835	0,886
SVC (scikit-learn) 12D	0,61	0,937	0,769	0,661	0,711
PegasosQSVC 12D	0,51	0,96	0,864	0,785	0,823

Таблица 2

Результат работы SVC, PegasosQSVC

Алгоритм \ Метрика	Время выполнения fit, с	accuracy	precision	recall	f1-мера
SVC	0,04	0,965	0,792	0,905	0,844
QSVC	9105	0,955	0,875	0,667	0,757

Следует отметить ограничения, не учтенные в данной работе: эксперименты на реальных квантовых компьютерах затруднены из-за аппаратных ограничений современных устройств, включая ограниченный объем памяти NISQ-устройства; в момент написания работы отсутствия поддержки необходимых вентилей (гейт Адамара, гейт CNOT), а также миграции IBM Quantum (главного поставщика реального квантового устройства) на другую платформу 01 июля 2025 года.

Несмотря на вышеуказанные ограничения, данная работа может послужить основой для дальнейших исследований внедрения квантовых алгоритмов в обработку естественного языка и другие задачи машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kanev A.I., Savchenko G.A., Grishin I.A., Vasiliev D.A., Duma E.M. Sentiment analysis of multilingual texts using machine learning methods // 2022 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT). — 2022.
2. Tsang I.W., Kwok J.T., Cheung P.M. Core Vector Machines: Fast SVM Training on Very Large Data Sets // Journal of Machine Learning Research. — 2005. — T. 6.
3. Santi P., Mishra K., Mohanty S. Quantum Text Classifier — A Synchronistic Approach Towards Classical and Quantum Machine Learning [Электронный ресурс]. — 2023. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12783
4. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding [Электронный ресурс]. — 2018. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805
5. A.I. Kanev and V.I. Terekhov, Evaluation issues of query result ranking for semantic search / Information technologies, telecommunications, and control systems (ITTCS2020), 2020 SCOPUS

6. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks [Электронный ресурс]. — 2019. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10084
7. McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction [Электронный ресурс]. — 2018. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426
8. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. — Cambridge: Cambridge University Press, 2010. — 39 с.
9. Havlicek V., Corcoles A.D., Temme K., Harrow A.W., Kandala A., Chow J.M., Gambetta J.M. Supervised learning with quantum enhanced feature spaces [Электронный ресурс]. — 2018. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.11326
10. Schuld M. Supervised quantum machine learning models are kernel methods [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.11020
11. Sun J. Primal Estimated Subgradient Solver for SVM for Imbalanced Classification [Электронный ресурс]. — 2022. — URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.09311

© Бабасанова Надежда Сергеевна (bns22k060@student.bmstu.ru); Канев Антон Игоревич (aikanev@bmstu.ru);
Михеева Валерия Алексеевна (mikheevava@bmstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.05

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ДОКУМЕНТОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ КОРПОРАТИВНОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

MODEL OF DOCUMENT PROCESSING CONTROL IN AN ELECTRONIC CORPORATE DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM

N. Bakanova

Summary. The aim of the research presented in this article is to develop new models, analysis, and optimization of information processes for the implementation of effective modes of decision support in organizational systems. As a specific task, the processes of control over the passage and processing of documents in the organizational system of corporate document management are considered. As a result of the conducted research, an approach to the construction of a specialized service was proposed that provides support for operational modes of control over the passage and processing of documents based on the data of the electronic document management system. The model was created using the tools of object-oriented analysis and design. The work is aimed at the development of information and software for management systems and decision-making mechanisms in organizational systems.

Keywords: organizational systems, electronic document management, document flow control processes, use case diagram, functional model.

Баканова Нина Борисовна
Доктор технических наук, доцент,
Институт прикладной математики
имени М.В. Келдыша, Российская академия наук, г. Москва
nina@keldysh.ru

Аннотация. Целью исследования, представленного в настоящей статье, является разработка новых моделей, анализа и оптимизации информационных процессов, для реализации эффективных режимов поддержки принятия решений в организационных системах. В качестве конкретной задачи рассматриваются процессы контроля прохождения и обработки документов в организационной системе корпоративного документооборота. В результате проведенного исследования был предложен подход к построению специализированного сервиса, обеспечивающего поддержку оперативных режимов контроля прохождения и обработки документов, на основе данных системы электронного документооборота. Создание модели проводилась, с использованием инструментальных средства объектно-ориентированного анализа и проектирования (ООАП). Работа направлена на развитие информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах.

Ключевые слова: организационные системы, электронный документооборот, процессы контроля прохождения документов, диаграмма вариантов использования, функциональная модель.

Введение

Важнейший составной частью активно протекающих в настоящее время процессов информатизации общества и цифровизации бизнеса является создание эффективных программных комплексов, реализующих прикладной уровень поддержки принятия решений в различных сферах деятельности, в том числе и при решении задач управления в организационных системах.

Современные разработки в этой области сосредоточены на развитии средств, методов и подходов, предусматривающих совершенствование информационных процессов; включение в информационные системы процедур интеллектуального анализа информационных ресурсов, накапливаемых в базах данных; создание эффективных подходов к реализации информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах.

В современных условиях значимость и актуальность этих задач возрастают в связи с появлением новых возможностей использования единого информационного пространства организации, новых форм информационного взаимодействия, развитием средств передачи данных, увеличением объема и видов информационных потоков, поступающих в организационные структуры, повышенными требованиями к быстродействию их обработки [1, 2].

В статье рассматривается задача исследования и разработки проблемно-ориентированных систем управления и оптимизации организационных систем.

Совокупность информационных систем как единое информационное пространство современной организации

Успешное функционирование современной крупной организации связано с оперативной обработкой значительных информационных потоков для обмена деловыми документами (распоряжения, указания, нормативы, перечни, справки, сводки и др.). Важной основой реализации успешного функционирования являются совре-

менные подходы к организации информационного взаимодействия с вышестоящими и подведомственными организациями, с организациями — партнерами, с другими участниками бизнес-процессов.

В этих условиях достижение желаемого результата неразрывно связано с использованием целого комплекса информационных систем, созданных для обработки информационных потоков, сбора и анализ данных, обеспечения информационного взаимодействия и поддержки управленческой деятельности.

Информационное пространство, обеспечивающее функционирование такой организации представляет собой сложный программно-технический комплекс, объединяющий большое количество информационных систем, в число которых входят системы поддержки организационного управления, а также ряд специализированных информационных систем для решения актуальных задач организации [3, 4, 5].

Составляющими информационного пространства организации, кроме информационных систем и баз данных, содержащих информационные ресурсы, являются операционные системы, средства коммуникации, средства обеспечения безопасности. Объединение всей совокупности информационных комплексов в единое информационное пространство, зачастую является нетривиальной задачей, и имеет ряд особенностей и ограничений.

Для исследования можно представить информационное пространство организации в виде единого многоуровневого объекта, каждый уровень которого предназначен для решения задач определенной функциональной направленности. Программное обеспечение каждого уровня выполняет свои задачи и обеспечивает взаимодействие с другими уровнями [6]. Основные составляющие информационного пространства организации показаны на рисунке 1. Цифрами отмечены рассматриваемые уровни программного комплекса:

1. ***Уровень операционной среды*** и поддержки информационных ресурсов программных комплексов;
2. ***Уровень программных средств обеспечения жизненного цикла (ЖЦ)*** информационных систем;
3. ***Уровень прикладных процессов*** — уровень информационных систем.

Краткий перечень программных систем, представленных на указанных уровнях, включает:

— уровень операционной среды является базовым и включает операционные системы, системы управления базами данных (СУБД), инструментальные средствах (языки программирования, CASE-средства);
— уровень поддержки ЖЦ предусматривает, функции сопровождения, включающие мониторинг, безопасность данных, санкционированный доступ, поддержку взаимодействия и др.;
— уровень прикладных процессов предназначен для решения конкретных управленческих задач организации, программные средства поддержки принятия управленческих решений.

На рисунке 1 представлен примерный состав информационных систем, традиционно входящих в вычислительный комплекс и формирующих единое информационное пространство организации. Можно привести перечень систем, направленных на поддержку деятельности организационных подразделений:

— документооборот организации (ДОУ — документационное обеспечение управления, СЭД — система электронного документооборота);
— поддержка финансовой деятельности;
— управление персоналом;
— материально-техническое обеспечение;
— задачи планирования различного целевого направления и др.

Рис. 1. Информационные уровни вычислительного комплекса

Этот список расширяют специализированные и профильно-ориентированные информационные системы, которые определяются задачами, стоящими перед организацией и ее подразделениями, и являются необходимыми в организационной, управленческой или производственной деятельности.

Исследование единого информационного пространства организации позволило выявить, что информационное наполнение прикладных систем, может быть эффективно использовано для создания сервисов (режимов) поддержки принятия решений (особенно в части управленческой деятельности). В этом случае, для решения задачи необходимо определить назначение сервисов, выявить необходимые информационные составляющие, определить источники информации, рассмотреть возможности взаимодействия систем, ограничения при обмене информацией, выбрать базовую систему для реализации сервисов [4, 5].

Процессы взаимодействия в едином информационном пространстве организации выполняются общим протоколам и правилам, что значительно повышает прозрачность построения сервисов и упрощает программные средства взаимодействия.

Базовой системой для реализации сервисов может быть система электронного документооборота, основные узлы которой показаны на рисунке 1. Система является основным средством взаимодействия при передаче подразделениям приказов, указаний, распоряжений, документов для исполнения, формирует базу данных по исполнительской деятельности. Программные средства Системы предусматривают взаимодействие, как с внутренними абонентами, так и с внешними. Кроме того, система электронного документооборота является наиболее полным и оперативным источником информации о деловой и управленческой деятельности организации [4, 5].

Исследование функций электронного документооборота для построения сервиса контроля прохождения документов

Исследования процессов управленческой деятельности, отраженных в системе документооборота, информационных ресурсов организации, требуемых видов поддержки позволили перейти к разработке методов поддержки управленческой деятельности, базирующихся на информационных ресурсах организации.

Системы электронного документооборота разрабатываются в соответствии с принятыми в организации схемами прохождения деловых документов, нормативами системы ДОУ, ведомственными инструкциями и отражают структурные принципы управления, реализуемые в организации.

В процессе работы Системы фиксируют и накапливают данные о том, как происходит процесс обработки документа, как осуществляется прием и передача, как быстро подготавливаются резолюции, сколько подразделений участвует в обработке документа, какие документы возвращаются на доработку и др. Информация о работе подразделений хранится в опосредованном виде в карточке каждого документа. Эта информация может быть использована при анализе процессов прохождения документов.

В результате анализа информационного наполнения системы документационного обеспечения были рассмотрены возможности построения сервисов информационной поддержки, предназначенных для выполнения следующих функций:

- оперативный контроль прохождения документов;
- оперативная оценка процессов деятельности подразделений;
- оценка качества исполнения решений в подразделениях;
- подготовка проектов указаний по исполнению решений;
- анализ деятельности на основе предыдущего опыта.

Было выявлено, что информационное наполнение СЭД располагает данными для построения перечисленных сервисов. В процессе исследования намечены пути реализации сервисов, включающие разработку специальных методов обработки информационных массивов, алгоритмов анализа данных, программных модулей и интерфейсов доступа к данным [6, 7].

Наиболее востребованным, из перечисленных сервисов, является контроль прохождения документов, предназначенный для оперативных режимов анализа и контроля, оценки выполнения срочных документов.

Для изучения этапов и особенностей процесса контроля прохождения деловых документов требуется создание модели, позволяющей изучить функциональность сервиса. Разработанный сервис должен функционировать в соответствии с правилами прохождения документов, правилами формирования различных видов отчетности и др.

На рисунке 2 представлена схема прохождения деловых документов, характерная для документооборота крупных организаций, На схеме выделены следующие этапы обработки документа: прием и первичная обработка (1); анализ проблемы, подготовка указаний по исполнению, передача документа на обработку (2); контроль прохождения документа (3); возврат результата исполнения корреспонденту, с сообщением о принятых решениях (4).

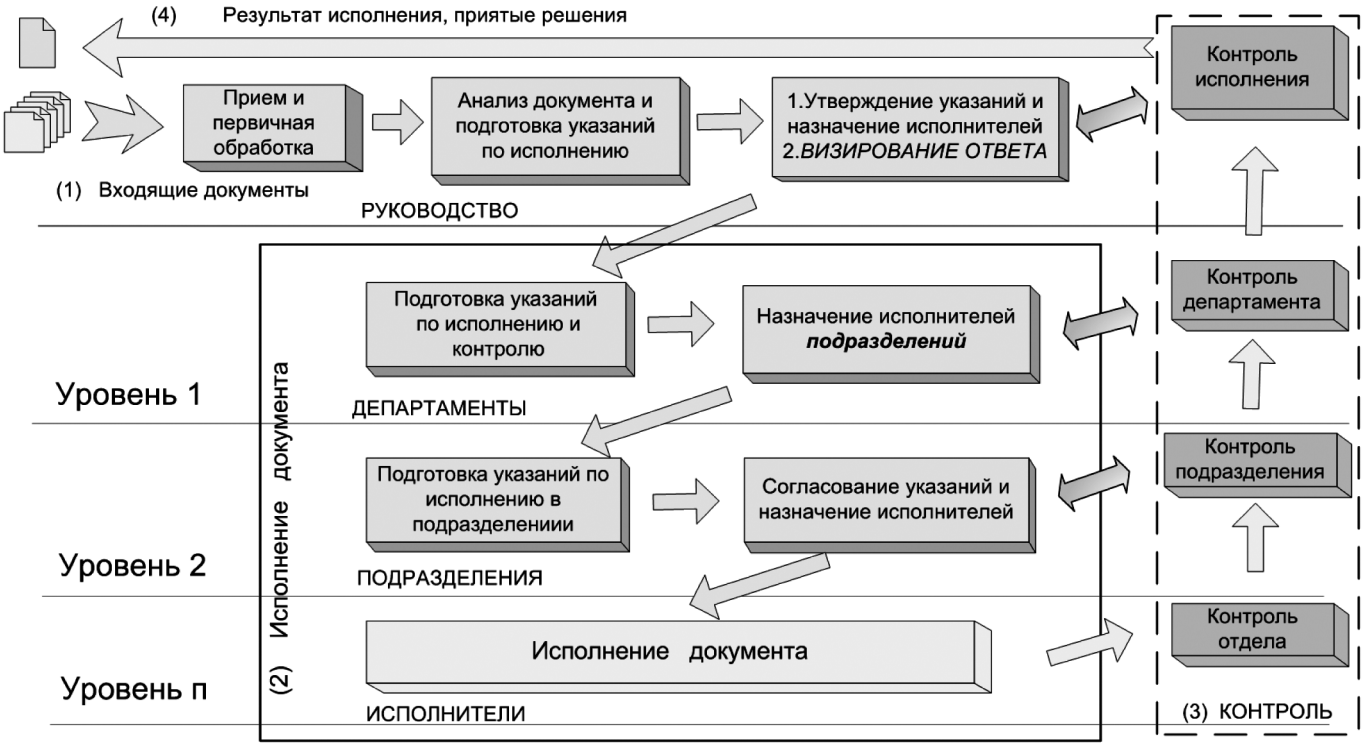


Рис. 2. Функциональная схема процессов контроля прохождения документов

На схеме показано, что в крупных организациях, как правило, предусматривается многоуровневый контроль прохождения документов, все передачи документа между подразделениями осуществляются через подразделение контроля, которое делает отметки об исполнении каждого промежуточного этапа обработки.

Разработка модели для изучения процессов контроля прохождения документов

Для дальнейшего изучения процессов контроля прохождения документов и построения сервисов поддержки, была разработана модель, с использованием инструментальных средств объектно-ориентированного анализа и проектирования (ООАП). Визуальные представления ООАП базируются на диаграммах языка UML (Unified Modeling Language) [6, 8].

В процессе разработки модели было произведено исследование следующих групп данных, отраженных в карточке документа:

— информация о прохождении и обработке документа, включая данные о подразделениях — исполнителях, о передачах и возвратах документа на обработку между подразделениями и во внешние организации;
— данные о взаимосвязи документа с другими документами, содержащимися в базе данных СЭД (файлы, отражающие ссылки документа в системе СЭД);
— данные об установке контрольных сроков и снятии с контроля, данные об исполнении документа.

Кроме того, для анализа процессов прохождения документов были использованы технические данные о передачах документов (файлы взаимодействия) и др.

На рисунке 3 представлена диаграмма «вариантов использования (ВИ)» языка UML, показывающая связи процессов контроля обработки и прохождения документов с информационными процессами документооборота организации.

На рисунке в виде вариантов использования (1–5) показаны все этапы обработки документов, как элементы, включенные в систему документооборота (стрелка по направлению к системе). Кроме того, показаны два элемента расширяющие функции системы (6, 7). Элемент 6, расширяет возможности Системы за счет функций мониторинга. Элемент 7 представляет собой разрабатываемый сервис контроля прохождения документов.

В результате анализа процессов прохождения документов были выявлены данные, которые можно использовать как характеристики документов или как показатели процессов обработки. На основе полученных показателей можно разработать сервисы для оценки процессов прохождения документов [9]. В качестве примера таких показателей можно рассматривать:

— важность документа (с точки зрения актуальности и оперативности решаемой задачи), контрольные сроки, установленные вышестоящей организацией (наличие директивных сроков исполнения);

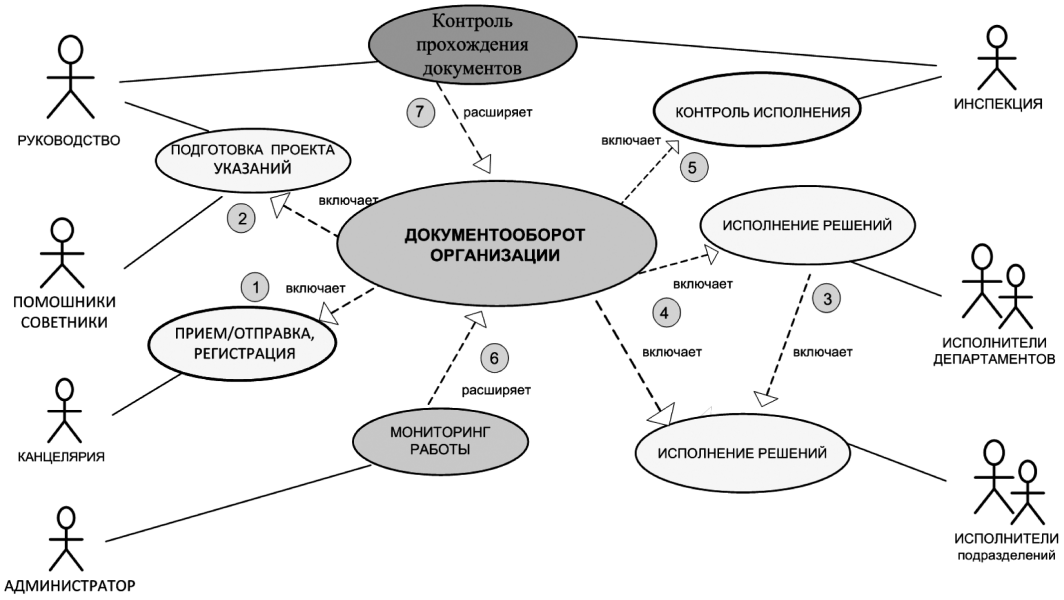


Рис. 3. Схема процессов контроля обработки и прохождения документов

— проблемы, возникшие при обработке документа (задержки при передачах между исполнителями, возвраты документа на доработку, ссылки на большое число связанных документов).

В процессе исследования были выявлены и другие значимые показатели, анализ которых может повысить эффективность контроля процессов обработки и прохождения документов в системе корпоративного электронного документооборота.

Заключение

В настоящей статье, были рассмотрены особенности, связанные с объединением информационных систем организации в единое информационное пространство. Приведены результаты исследования процессов прохождения документов и информационного наполнения баз данных электронного документооборота. Проведен анализ информационных процессов документооборота для создания функций поддержки управленческой деятельности.

В работе рассмотрены вопросы создания сервиса контроля исполнения и прохождения документов в корпоративной системе электронного документооборота, который позволит ввести новые режимы анализа этих процессов, повысить эффективность процессов обработки и контроля прохождения документов. Кроме того, в связи с тем, что СЭД является основным интегрирующим элементом в едином информационном пространстве организации, усовершенствование процессов контроля при обработке входных потоков деловых документов, позволит значительно повысить показатели эффективности деятельности сотрудников организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрайберг Я.Л. Современные тенденции развития цифровизации общества: научно-образовательная и библиотечно-информационная среда: монография /Я.Л. Шрайберг. — Москва: ИНФРА-М, 2024. — 664 с.: ил. — DOI 10.12737/2155873.
2. Родионов И.И., Гиляревский Р.С., Цветкова В.А. Информационная деятельность как инфраструктура национальной экономики. — СПб: Алетея, 2016. — 223 с.
3. Баканова Н.Б. Разработка сервисов информационных систем для анализа и обработки входного потока документов //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2024. — № 12. — С. 17–24. — DOI: 10.25791/pribor.12.2024.1544.
4. Новикова А.С., Ромашкова О.Н. Интеграция нейросетей в информационные системы розничных торговых сетей: прогнозирование и управление распределением ресурсов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 1–2. С. 49–52.
5. Тютюнник В.М., Баканов А.С. Подходы к анализу информационных процессов в организации // Информационные ресурсы России. — 2023. — № 2 (191). — С. 58–71.
6. Баканова Н.Б. Аспекты разработки сервисов поддержки управленческой деятельности на основе информационных ресурсов систем организационного управления. Часть 1 // Институт психологии Российской Академии Наук. Организационная психология и психология труда. 2022. Т. 7. № 2. С. 140–155.
7. Bakanova N.B., Atanasova T.V. Use of Information Resources of Organizational Systems to Support Managerial Decisions. Int. Conf. on Big Data, Knowledge, and Control Systems Engineering BdKCSE'2018. Sofia, Bulgaria, 21–22 November 2018. Pp. 29–36.
8. Bakanov A.S. Analysis of Information Resources of the Organization Using Keywords // Scientific and Technical Information Processing. — 2024. — T. 51. — № 3. — P. 247–252 DOI 10.3103/S0147688224700217.
9. Петровский А.Б. Групповой вербальный анализ решений. М.: Наука, 2019. — 287 с.

© Баканова Нина Борисовна (nina@keldysh.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

STUDY OF OPTIMAL LINEAR METHODS OF FILTERING AND PREDICTION OF NAVIGATION SIGNALS

E. Vinogradova
Yu. Ivanov

Summary. As one of the potential alternatives to Kalman filtering and prediction, this article considers finite-time feedback, spectral-finite free optimal methods of filtering and predicting discrete navigation signals. The methods presented are versatile and easy to implement, with their accuracy and dynamic signal processing characteristics asymptotically approaching those of Kalman algorithms depending on the value of memory capacity r (number of measurement results).
During the research, a comparative analysis is performed of Kalman filtering and predicting methods with finite-time and spectral-finite optimal methods for processing and predicting navigation signals, with and without feedback, in terms of accuracy, transition time, robustness, and noise immunity. A linear discrete measurement model is considered with an additive error, a Gaussian Markov stationary random process is used as a useful signal, and uncorrelated stationary white Gaussian noise is used as interference.

Keywords: finite-time processing, spectral-finite processing, Kalman filtering and prediction, optimal filtering, optimal prediction, estimation of accuracy and dynamic properties.

Виноградова Екатерина Денисовна
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
vinogradovae415@gmail.com
Иванов Юрий Павлович
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
ypi35@mail.ru

Аннотация. В качестве одной из возможных альтернатив методу фильтрации и прогнозирования Калмана в данной статье рассматривается финитно-временной с обратной связью и спектрально финитный без обратной связи оптимальные методы фильтрации и прогнозирования навигационных дискретных сигналов. Представленные методы отличаются универсальностью, простотой реализации, а их точностные и динамические характеристики обработки сигнала асимптотически приближаются к показателям фильтрации и прогнозирования Калмановских алгоритмов в зависимости от значения объема памяти r (количество результатов измерений).
В процессе исследования выполняется сравнительный анализ методов фильтрации и прогнозирования Калмана с финитно-временным и спектрально-финитным оптимальными методами обработки и прогнозирования навигационных сигналов с обратной связью и без обратной связи соответственно по показателям точности, времени переходного процесса, робастности и помехозащищенности. Рассматривается линейная дискретная модель измерений с аддитивной погрешностью, в качестве полезного сигнала используется гауссовский марковский стационарный случайный процесс, а в качестве помехи — некоррелированный стационарный белый гауссовский шум.

Ключевые слова: финитно-временная обработка, спектрально-финитная обработка, фильтрация и прогноз Калмана, оптимальная фильтрация, оптимальное прогнозирование, оценка точности и динамических свойств.

Введение

Актуальность применения математических фильтров при обработке сигналов обусловлена неизменно присутствующей погрешностью в показаниях различного рода датчиков и устройств, вызванной как конечной точностью самого устройства, так и влиянием случайных воздействий: чаще всего это различные физические процессы природного характера, а также паразитные напряжения, возникающие из-за электромагнитных и тепловых полей внутри информационно-измерительных систем (ИИС) [1]. Существующие сложности в обработке сигналов усугубляются тем, что в большинстве случаев невозможно напрямую измерять параметры процессов внутри разнообразных устройств без нарушения их целостности. Применение методов фильтрации позволяет минимизировать ошибку в наблюдениях и показаниях датчиков.

Метод фильтрации Калмана зарекомендовал себя как эффективный инструмент для решения задач цифровой обработки сигналов [2]. В настоящее время ни один GPS или ГЛОНАСС навигатор не обходится без программной реализации Калмановского алгоритма, который также успешно используется и в системах управления для обработки показаний датчиков.

Благодаря ряду достоинств метод Калмана может обеспечить высокую точность оценки [3]: критерием оп-

тимальности является средний квадрат ошибки оценки; оптимальность алгоритма в течение переходного процесса; если законы распределения векторных случайных процессов нормальные и модель измерения сигналов линейная, то оценка на выходе фильтра Камана будет наилучшей оценкой в классе любых оценок, при негауссовом распределении сигналов алгоритм обеспечивает наилучшую оценку в классе линейных оценок; применение рекуррентных формул для оценки сигналов; для формирования текущих оценок используются все измерения с начального момента работы фильтра; возможность применения метода фильтрации в случае многомерных динамических систем.

Но наряду с достоинствами фильтрация Калмана имеет ряд серьезных недостатков: значительная чувствительность к изменениям характеристик наблюдаемых сигналов относительно заданных значений при выборе параметров фильтра Калмана; сравнительно большой объем исходных данных; модель оцениваемого сигнала должна обладать марковским свойством; необходимость представления сигнала в пространстве состояний, что, в сочетании с предыдущим пунктом, ограничивает универсальность метода и увеличивает размерность вектора оцениваемых процессов; необходимость решения нелинейного уравнения Риккати для функционирования фильтра; отсутствие универсальности алгоритмов оценки при использовании моделей помехи в виде белого шума и коррелированной помехи измерения.

Несмотря на то, что фильтрация Калмана имеет большое практическое значение в обработке навигационных сигналов, метод неидеален и вопрос поиска и внедрения новых альтернативных алгоритмов фильтрации, более простых в исполнении, универсальных и помехозащищенных, до сих пор актуален.

В качестве такой альтернативы в данной исследовательской работе предлагаются новые методы обработки навигационных измерений: финитно-временной (ФВ) с обратной связью (ОС) и спектрально-финитный (СФМ) без обратной связи оптимальные методы фильтрации и прогнозирования навигационных дискретных сигналов. Рассматриваемые алгоритмы не требуют свойства марковости процесса, что делает их универсальным в плане вида используемых сигналов, они инвариантны к наличию или отсутствию свойства коррелированности помехи измерения, а их реализация не предусматривает решения уравнения Риккати, что существенно упрощает вычислительный процесс. При этом по точности алгоритмы асимптотически приближаются к методу Калмана.

Описание математических методов

Проведение исследования и сравнительного анализа методов фильтрации и прогнозирования рассмотрено на примере скалярной дискретной линейной модели измерения сигналов с аддитивной погрешностью вида:

$$Y_i = X_i + H_i,\ i = 1, 2, \ldots N \qquad (1)$$

где Y_i — значение наблюдаемого случайного сигнала в канале датчика угла атаки в i-ый момент времени; X_i — значение оцениваемого полезного сигнала в i-ый момент времени; H_i — значение помехи измерения в канале датчика угла атаки в i-ый момент времени; N — общее число точек наблюдения в выборочной совокупности (объем выборки).

Процесс является гауссовским, стационарным, марковским, с нулевым математическим ожиданием. Погрешность измерения и полезный сигнал взаимно некоррелированы. Моделью помехи является стационарный гауссовский случайный процесс, корреляционная функция которого известна, распределенный по нормальному закону.

Финитно-временной метод фильтрации и прогнозирования

Для осуществления финитно-временной рекуррентной фильтрации с обратной связью и оценки прогноза необходимо линейную модель сигнала (1) представить в виде вектора размерностью $r\times1$, образованного результатом измерений Y_i в i-ый момент времени и оптимальными оценками $\hat{X}^*_p$, $p = i–1, i–2, \ldots, i–r+1$, полученными в $r–1$ моментах времени, предшествующих текущему моменту времени i [4]:

$$Z_i = \left| Y_i, \hat{X}^*_{i-1}, \ldots, \hat{X}^*_{i-r+1} \right|^T, \qquad (2)$$

где $r–1$ — величина, определяющая память алгоритма оценки; зависит от порядка марковости оцениваемого сигнала, а если он неизвестен или оцениваемый процесс является не марковским, от требуемого приближения точности оценки к необходимому значению точности при заданном виде и уровне помех.

Оператор оптимальной линейной оценки определяется на основании использования следствия теоремы ортогонального проецирования [5]. Его можно найти в виде матрицы весовых коэффициентов размера $r\times r$ определяемой корреляционными моментами рассматриваемых центрированных составляющих векторов полезного сигнала $\mathbf{X}_i$ и $\mathbf{Z}_i$, содержащего результат измерения в текущий момент времени $i = 1,2,\ldots n$ и интерполированные оценки сигнала в моменты времени $k = i–1, i–2, \ldots i–r+1$ [6]:

$$A^*_i = Kx_i z_i \times Kz_i^{-1}, \qquad (3)$$

где Kx_iz_i — взаимная матрица размерности $r \times r$ корреляционных моментов полезного сигнала $\mathbf{X}_i = \left|X_i, X_{i-1}, \ldots, X_{i-r+1}\right|^{\mathrm{T}}$ и вектора входного сигнала $\mathbf{Z}_i$ в i-ый момент времени; Kz_i— матрица размерности $r \times r$ корреляционных моментов входного сигнала $\mathbf{Z}_i$ в i-ый момент времени.

Оптимальный вектор размерности $r \times r$ оценок фильтрации и интерполяции сигнала $\mathbf{X}_i$ в i -ый момент времени определяется соотношением:

$$\hat{X}_{\mathrm{i}}^{*} = \mathrm{A}_{\mathrm{i}}^{*} \times Z_i + \hat{X}_{Hi}, \quad (4)$$

где $\hat{X}_{Hi}$ — вектор, обеспечивающий несмещенность оценок.

Матрица $K\hat{x}_i^{*}$ размерности $r \times r$ взаимных корреляционных моментов оптимальных оценок в i-ый момент времени определяется из следующего соотношения:

$$K\hat{x}_{\mathrm{i}}^{*} = \mathrm{A}_{\mathrm{i}}^{*} \times Kz_{\mathrm{i}} \times \mathrm{A}_{\mathrm{i}}^{*\mathrm{T}} \quad (5)$$

В основе алгоритма финитно-временного прогнозирования лежит следствие финитно-временной фильтрации, где матрица преобразования $\mathbf{A}^*$ изменяется с учетом прогноза сигнала на интервал времени $t_{\text{пр}}$ (с учётом некоррелированности помех измерения) [7]:

$$\mathrm{A}_{\mathrm{i\,пр}}^{*} = Kx_iz_{i\text{пр}}\left(i \cdot d + t_{\text{пр}} \cdot d\right) \times Kz_i^{-1}, \quad (6)$$

где d — дискрет, определяемый по теореме Котельникова; $t_{\text{пр}}$ — время прогноза.

Выражение для матрицы корреляционных моментов ошибок оптимальных оценок можно определить следующим соотношением:

$$K\varepsilon_i^{*} = Kx_i - K\hat{x}_i^{*}, \quad (7)$$

где матрицу Kx_i размерности $r \times r$ корреляционных моментов $Kx_{i-k}x_{i-p}$, $k, p = 1, 2 \ldots r$ компонент вектора оцениваемых сигналов.

Выражение для матрицы корреляционных моментов ошибок произвольных оценок можно определить следующим соотношением [8]:

$$K\varepsilon_i = Kx_i - \mathrm{A}_{\mathrm{i}}^{*} \times Kxz_{\mathrm{i}} - \left(\mathrm{A}_{\mathrm{i}}^{*} \times Kxz_{\mathrm{i}}\right)^{\mathrm{T}} + K\hat{x}_i^{*} \quad (8)$$

После окончания переходного процесса при использовании оптимальной оценки элементы матриц $K\varepsilon_i^{*}$ и $K\varepsilon_i$ совпадут. След корреляционной матрицы моментов ошибок оптимальных оценок определит качество фильтрации и интерполяции используемых алгоритмов оценок.

Статистическая оценка дисперсии ФВ фильтрации и оценки прогноза в момент времени i определяется с помощью следующего соотношения:

$$D_{E_i}^{*} = D_{E_{i-1}}^{*} + \frac{1}{i-1} \times \left[\left(E_i^{*} - M_{E_i}\right)^2 - D_{E_{i-1}}^{*}\right], \quad (9)$$

где E_i^{*} — ошибка оценки фильтрации и прогнозирования;

M_{E_i} — статистическая оценка математического ожидания, определяемая как:

$$M_{E_i} = M_{E_{i-1}} + \frac{1}{i-1} \times \left(E_i^{*} - M_{E_{i-1}}\right) \quad (10)$$

Спектрально-финитный метод фильтрации и прогнозирования

Переход к спектрально-финитной фильтрации основывается на представлении случайного сигнала на финитном интервале времени в виде частичной суммы ряда Карунена-Лоэва, являющегося частным случаем ряда Фурье. Разложение полезного сигнала и помехи в ряд Фурье осуществляется с применением формулы [9]:

$$X_i = \sum_{k=1}^{N} Cx_k \Psi_k, \quad (11)$$

где Ψ_k — ортонормированный полный базис Карунена-Лоэва.

Коэффициенты разложения определяются из скалярного произведения следующим образом:

$$Cx_k = \left(X_i, \Psi_k\right) \quad (12)$$

Коэффициенты разложения Карунена–Лоэва являются ортогональными случайными величинами [10]. Наиболее информативным является первый коэффициент, так как в нем содержится большая часть энергии сигнала, а каждый следующий коэффициент дает точность прогноза лишь на десятые и сотые доли ввиду применения разложения Карунена-Лоэва.

Оптимальная по критерию минимума следа матрицы оценка вектора спектральных компонент рассчитывается по формуле [11]:

$$\hat{C}x_{s,i}^{*} = \mathrm{A}cx_i^{*} \times Cz_i, \quad (13)$$

где s — размерность вектора спектральных компонент; $\mathrm{A}cx_i^{*}$ — оператор оптимальной оценки; Cz_i — вектор спектральных компонент сигнала.

Оператор оптимальной оценки Acx_i^* из формулы (13) в случае фильтрации и прогноза соответственно определяется в виде:

$$Acx_s^* = KCx_s \times KCz_s^{-1},$$

$$Acx_{s\text{пр}}^* = KCx_s\left(i \cdot d + t_{\text{пр}} \cdot d\right) \times KCz_s^{-1}, \qquad (14)$$

где KCx_s, KCz_s — корреляционные матрицы сигнала и сигнала с помехой.

Оптимальная оценка сигнала во временном представлении определяется из выражений:

$$Ax_s^* = BB_s \times Acx_s^* \times BB_s^{-1}, \qquad (15)$$

где BB_s — матрица собственных векторов корреляционной функции полезного сигнала; $\hat{X}_{Hi}$ — вектор, обеспечивающий несмещенность оценок.

Корреляционная матрица оптимальных оценок определяется выражением:

$$K\hat{x}_i^* = BB_i \times Acx_i^* \times KCz_i \times Acx_i^{*T} \times BB_i^T, \qquad (16)$$

Матрица корреляционных моментов ошибок оптимальных оценок $\hat{X}_i^*$ финитно-спектрального представления сигнала в *i*-ый момент времени [12]:

$$K\varepsilon_i^* = Kx_i - K\hat{x}_i^* \qquad (17)$$

Матрица корреляционных моментов ошибок произвольных оценок определяется соотношением:

$$K\varepsilon_i = Kx_i - A_i^* \times Kxz_i - \left(A_i^* \times Kxz_i\right)^T + K\hat{x}_i^* \qquad (18)$$

После окончания переходного процесса оценки точности, полученные по формулам (17) и (18), совпадут т.к. качество оценки, определяемое формулой (17) справедливо только когда выполняется процесс квазиоптимальной фильтрации в отличие от соотношения (18), справедливого для любого состояния процесса обработки сигналов.

Время переходного процесса зависит от того, насколько начальные значения для оценок будут отличаться от реальных значений, полученных после окончания переходного процесса. В качестве начальных значений в моменты времени r=0, 1…, k–1 можно задать векторы размерностью k×1 результатов измерений Z_1 и начальных значений вектора $\hat{X}_{Hi}$.

Сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов

Критерием оптимальности для рассматриваемых методов является дисперсия ошибки оценки. Исследуемым объектом для оценивания является датчик угла атаки, модель измерения которого описывается линейным уравнением (1). Рассматривается модель полезного сигнала, которая представляет собой гауссовский стационарный случайный процесс с корреляционной функцией:

$$Kx_{i,j} = \sigma^2 \times e^{-\alpha|i-j|d},\ i,j = 1,2,\ldots N, \qquad (19)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение (СКО) полезного сигнала; α – параметр корреляционной функции; d – дискрет, определяемый по теореме Котельникова.

Модель помехи представляется в виде некоррелированного стационарного белого гауссовского шума, корреляционная функция которого имеет вид:

$$K_{Hi} = \sigma_H{}^2 \cdot \delta_i,\ i = 1, 2\ldots N, \qquad (20)$$

где σ_H — среднеквадратическое отклонение белого шума (помехи);

δ_i — дельта-функция Дирака.

Сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов фильтрации, прогнозирования и оценки достоверности прогноза производится при следующих исходных данных:

- объем выборки $N = 2000$;
- среднеквадратическое отклонение полезного сигнала $\sigma = 10°$;
- среднеквадратическое отклонение погрешности датчика угла атаки $\sigma_H = 1°$;
- параметр корреляционной функции $\alpha = 0{,}01$ с$^{-1}$;
- память (для финитно-временной обработки с ОС) $r = 4$;
- дискрет $d = 5$ с;
- интервалы времени прогноза $pr = 20$ с;
- математические ожидания полезного сигнала $M[X_i] = 0$ и помехи $M[H_i] = 0$.

Для проведения сравнительного анализа по точности и времени переходного процесса приведены графики зависимостей теоретических и статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов фильтрации и прогнозирования. На рисунке 1 используются следующие условные обозначения:

$DOshOc\_X00_i$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки финитно-временной обработки с ОС; $DOshOc\_sT_i$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки спектрально-финитной обработки соответственно; $DOshOc\_k_i$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки фильтрации Калмана.

Как видно из рисунка 1, ФВ метод с ОС при выбранном значении памяти r = 4 по точности практически

не уступает фильтру Калмана, а по времени переходного процесса имеет небольшой выигрыш. СФМ алгоритм незначительно уступает Калмановской фильтрации по точности и времени переходного процесса.

Рассмотрим графики зависимостей теоретических и статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования на интервалах упреждения 10 и 20 секунд. Для рисунков 2, 3 введены следующие условные обозначения: $DOshOc\_X00pr_j$ и $D00pr_{pr1,1}$ — статистическое и теоретическое значения дисперсий ошибки оценки ФВ оценки прогноза с ОС соответственно; $DOshOc\_sTpr_j$ и $D\_sTpr_{pr1,1}$ — статистическое и теоретическое значения дисперсий ошибки оценки СФМ оценки прогноза с ОС соответственно; $DOshOc\_kpr_j$ и $D\varepsilon ktpr_j$ — статистическое и теоретическое значения дисперсий ошибки оценки прогноза Калмана соответственно.

Из рисунков 2, 3 видно, что точность финитно-временной оценки прогноза с ОС близка прогнозу Калмана. Время переходного процесса аглоритма Калмана сравнимо с временем переходного процесса финитно временного метода. Стоит обратить внимание, что при увеличении интервала времени прогнозирования происходит заметное сокращение различия между теоретическими значениями дисперсий финитно-временной оценки прогноза с ОС и методом Калмана.

Спектрально-финитная оценка прогноза незначительно уступает по точности и времени переходного процесса Калмановскому прогнозу.

Численные результаты дисперсий ошибки оценки и времени переходного процесса рассматриваемых методов фильтрации и прогнозирования при интервалах

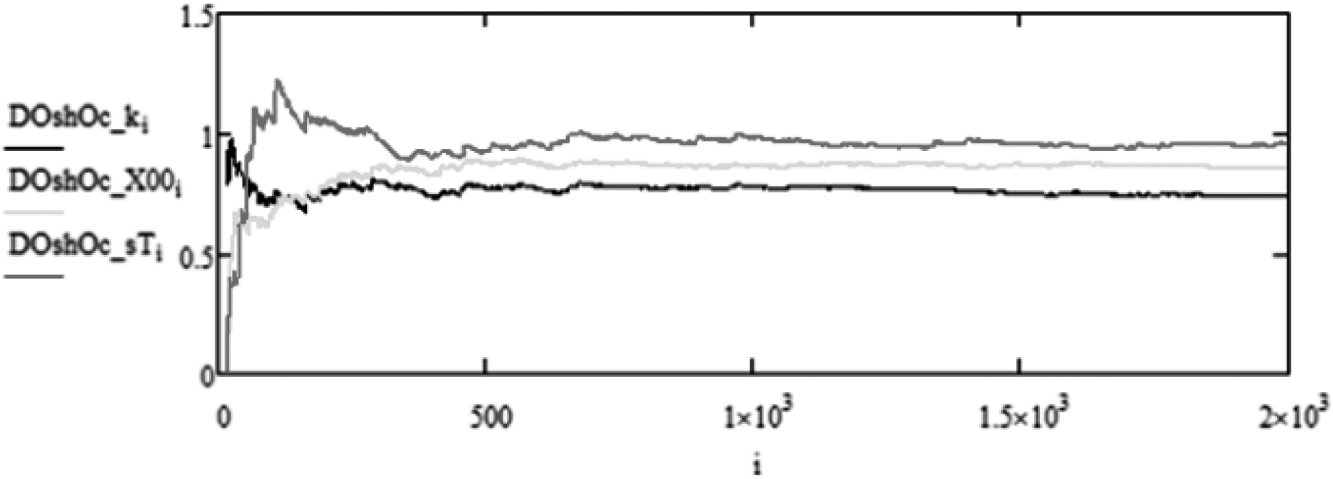


Рис. 1. Графики зависимостей теоретических и статистических дисперсий ошибок оценок финитно-временной обработки с ОС, спектрально-финитной обработки без ОС и фильтрации Калмана

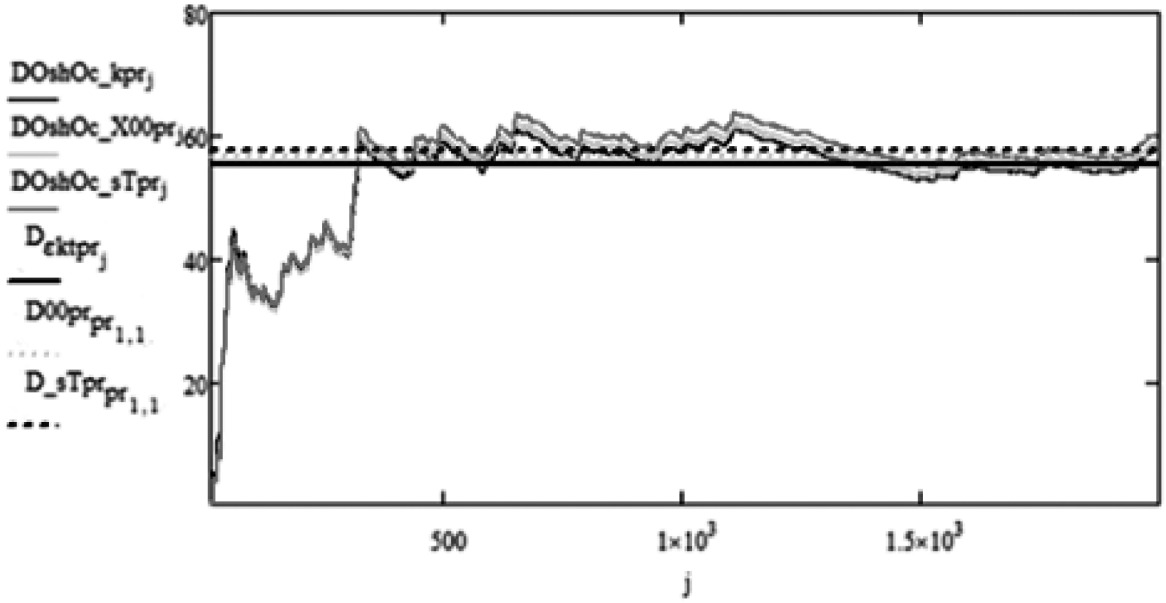


Рис. 2. Графики зависимостей теоретических и статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования, *pr* = 10 с

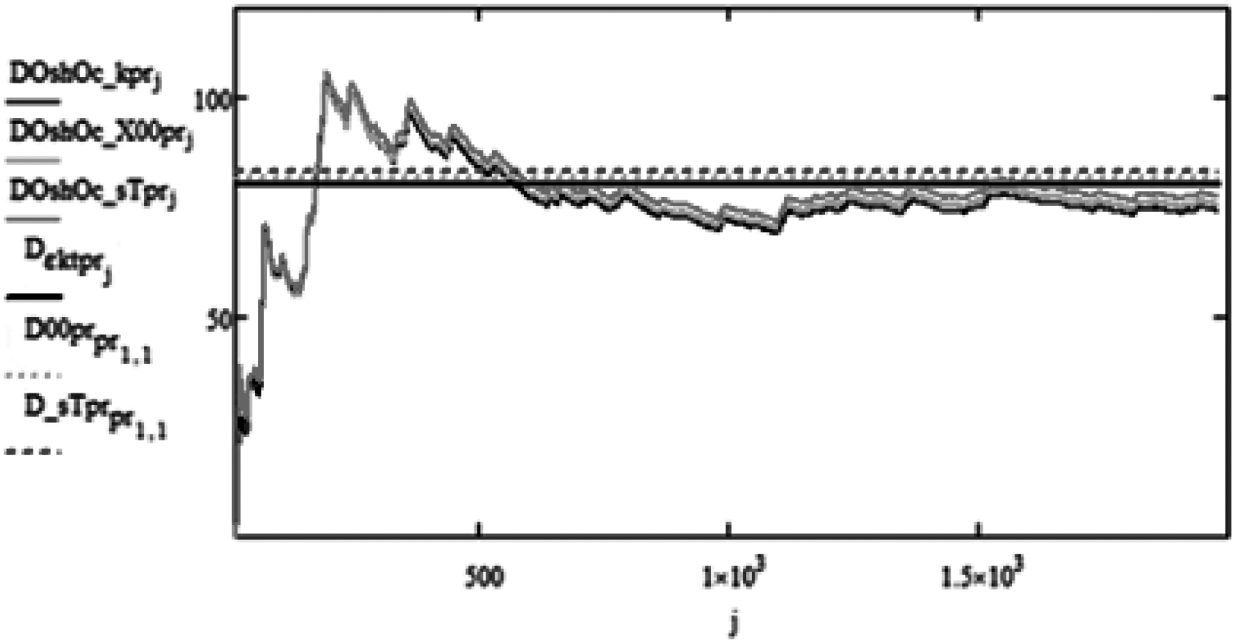


Рис. 3. Графики зависимостей теоретических и статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования, *pr* = 20 с

упреждения, равных 10, 20 секундам, занесены в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты сравнительного анализа рассматриваемых методов фильтрации и прогнозирования по параметрам точности и времени переходного процесса

Метод обработки	Интервал времени прогноза, с	Теоретическая точность, град^2	Статистическая точность, град^2	Время переходного процесса, с
Финитно-временная фильтрация с ОС	–	0,927	0,911	752
Спектрально-финитная фильтрация		0,985	0,961	861
Фильтрация Калмана		0,856	0,866	778
Финитно-временная оценка прогноза с ОС	10	57,795	58,854	1046
Спектрально-финитный прогноз		60,125	60,527	1059
Прогноз Калмана		57,780	58,073	1044
Финитно-временная оценка прогноза	20	82,535	79,993	924
Спектрально-финитный прогноз		86,972	83,674	953
Прогноз Калмана		82,528	79,991	925

Изменение дисперсии ошибки оценки ФВ метода прогноза с ОС, спектрально-финитной оценки прогноза и прогнозирования метода Калмана при увеличении интервала времени прогноза *pr* представлено на рисунке 4. Используются следующие условные обозначения: $D00pr_E$, $DsTpr_E$ и $Dkpr_E$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки финитно-временного прогнозирования с ОС, спектрально-финитного прогнозирования и прогноза Калмана соответственно.

Из рисунка 4 видно, что при увеличении интервала упреждения дисперсия ошибки оценки возрастает, ее значение для каждого из рассматриваемых алгоритмов стремится к квадрату среднеквадратического отклонения полезного сигнала.

На точностные характеристики ФВ фильтрации и оценки прогноза влияет значение объема памяти *r*. Зависимость значений дисперсии ошибки оценки финитно-временного прогнозирования с ОС, спектрально-финитного прогноза без ОС и метода прогнозирования Калмана при интервале упреждения *pr* = 20 секундам при изменении параметра *r* представлена на рисунке 5. Условные обозначения, приведенные на рисунке, следующие: $D00pr_E$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки финитно временной оценки прогноза с ОС; $DsTpr_E$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки спектрально-финитной оценки прогноза; $Dkpr_E$ — статистическое значение дисперсии ошибки оценки прогнозирования Калмана.

Как видно из вышеприведенного рисунка, с увеличением объема памяти *r* значение дисперсии ошибки оцен-

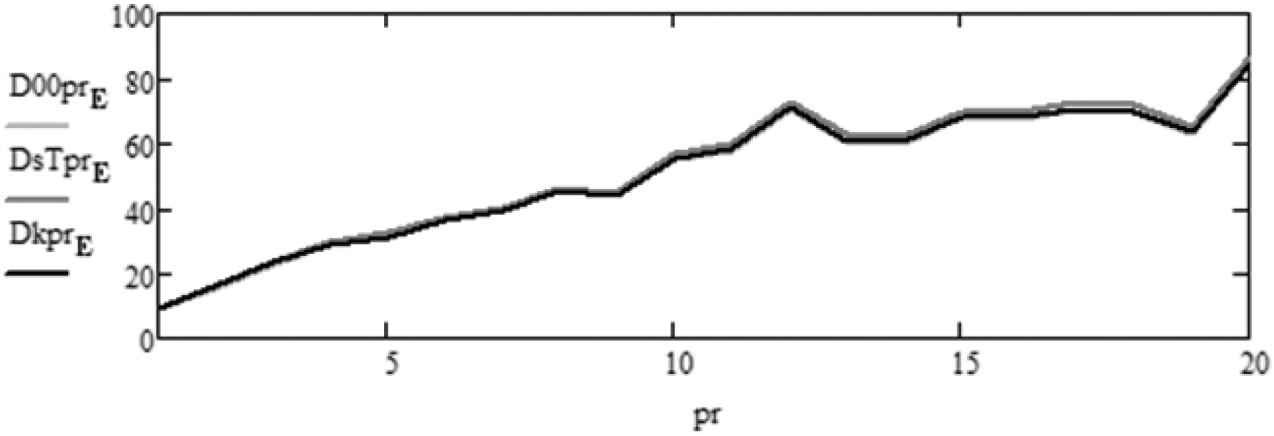


Рис. 4. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения параметра *pr* на интервале от 0 до 20 с

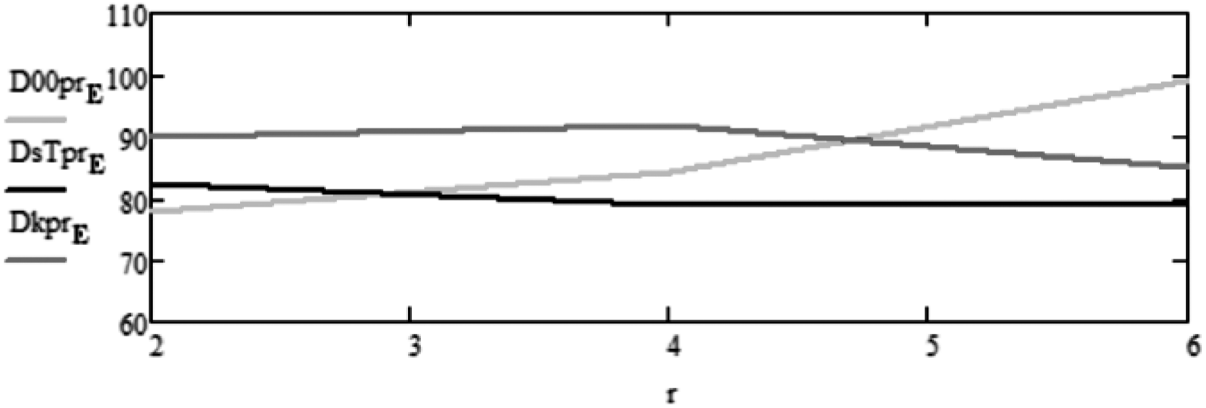


Рис. 5. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения памяти *r*, *pr*=20 с

ки спектрально-финитного прогнозирования уменьшается и стремится к дисперсии прогноза Калмана. Для ФВ алгоритма имеется оптимум при $r = 2$, при котором дисперсия минимальна и сравнима с методом Калмана, а с дальнейшим увеличением объема памяти дисперсия ошибок оценок начинает возрастать.

Сравнительный анализ по показателю робастности

Под робастностью понимается малая чувствительность показателя качества информационно-измерительной системы при изменении параметров обработки сигнала.

Определение показателя робастности производится по формуле [13]:

$$K_p = \frac{\Delta R \ / \ R^*}{\Delta b \ / \ b^*} \qquad (21)$$

где ΔR — изменение показателя качества ИИС при отклонении рассматриваемого параметра от номинального значения на величину Δb;

b^* — номинальное значение рассматриваемого параметра системы;

R^* — показатель качества системы при номинальном значении параметра.

Система является робастной по параметру b^*, если выполняется условие:

$$K_p \leq 0{,}3 \qquad (22)$$

При моделировании статистических значений дисперсий ошибки оценки от изменения рассматриваемого параметра обработки сигнала остальные параметры имеют номинальные значения.

На рисунках 6–9 приведены графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения вышеуказанных параметров для исследования робастности алгоритмов.

Вычисленные значения показателя робастности для рассматриваемых методов фильтрации и прогнозирования приведены в таблице 2.

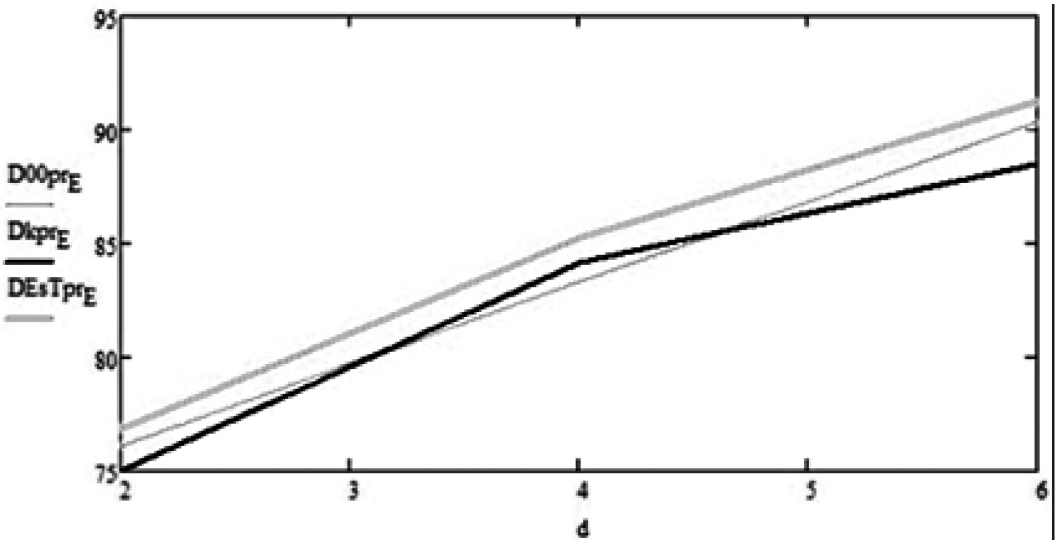


Рис. 6. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения дискрета *d* при *pr* = 20 с

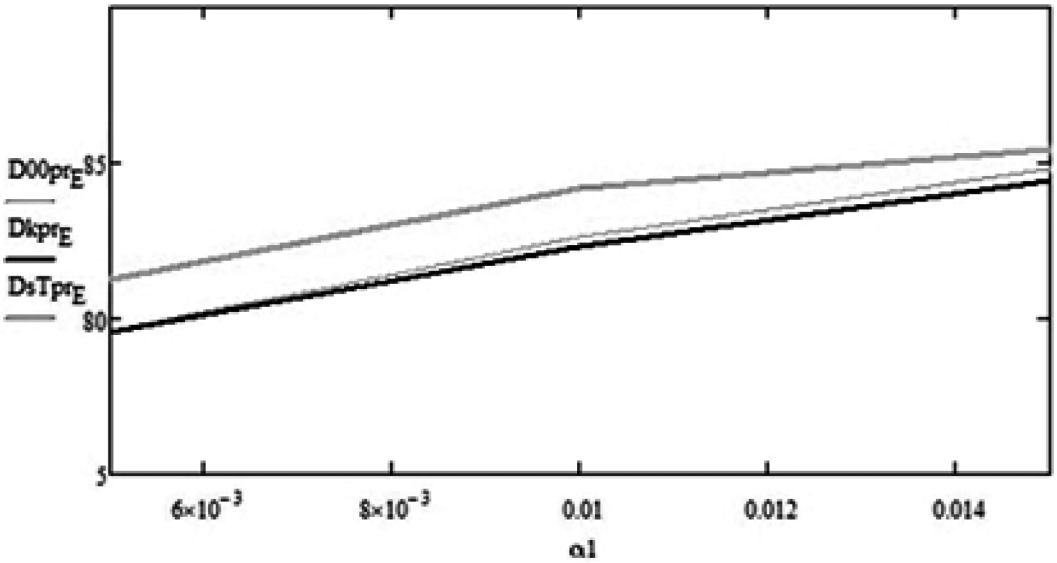


Рис. 7. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения параметра корреляционной функции α1 при *pr* = 20 с

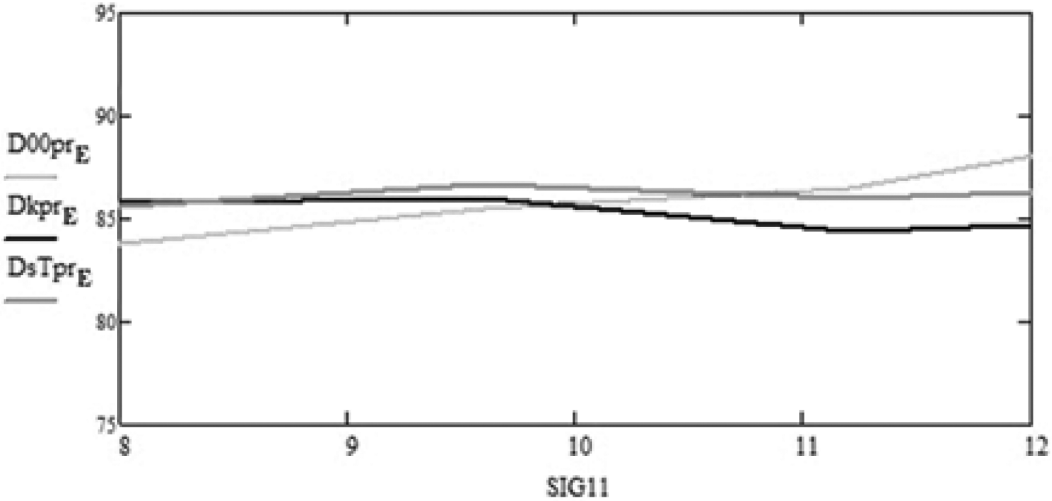


Рис. 8. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения СКО полезного сигнала SIG11 при *pr* = 20 с

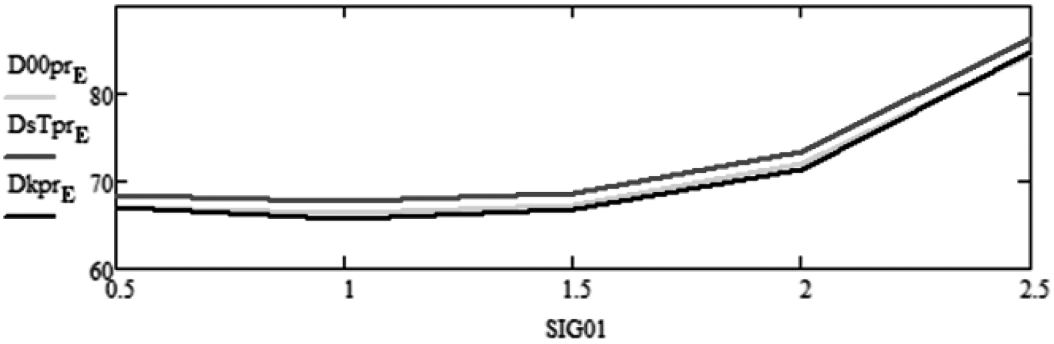


Рис. 9. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок финитно-временной оценки исследуемых методов прогнозирования от изменения СКО помехи SIG01 при *pr* = 20 с

Таблица 2.

Результаты робастности исследуемых обработок

Параметр робастности	Метод обработки	Значение показателя робастности
d	Финитно-временная фильтрация с ОС Спектрально-финитная фильтрация Фильтрация Калмана	0,261 0,257 0,266
	Финитно-временной прогноз с ОС Спектрально-финитный прогноз без ОС Прогноз Калмана	0,192 0,189 0,201
α1	Финитно-временная фильтрация с ОС Спектрально-финитная фильтрация Фильтрация Калмана	0,177 0,164 0,173
	Финитно-временной прогноз с ОС Спектрально-финитный прогноз без ОС Прогноз Калмана	0,297 0,276 0,295
σ	Финитно-временная фильтрация с ОС Спектрально-финитная фильтрация Фильтрация Калмана	0,111 0,103 0,107
	Финитно-временной прогноз с ОС Спектрально-финитный прогноз без ОС Прогноз Калмана	0,182 0,157 0,141
σ_H	Финитно-временная фильтрация с ОС Спектрально-финитная фильтрация Фильтрация Калмана	0,218 0,163 0,231
	Финитно-временной прогноз с ОС Спектрально-финитный прогноз без ОС Прогноз Калмана	0,314 0,213 0,326

Из полученных численных значений можно сделать вывод, что все алгоритмы фильтрации удовлетворяют критерию (22), то есть являются робастными. При прогнозировании заданному требованию не удовлетворяют ФВ оценка прогноза и прогноз Калмана при изменении среднеквадратического отклонения помехи σ_H.

В результате проведения сравнительного анализа по робастности было получено, что СФМ обработка и оценка прогноза являются наиболее робастными по всем параметрам, за исключением изменения СКО полезного сигнала σ при прогнозировании, где наиболее робастным является метод Калмана. Финитно временная обработка и оценка прогноза с ОС выигрывает у метода фильтрации и прогнозирования Калмана по следующим параметрам:

— дискрет *d*;

— среднеквадратическое отклонение помехи σ_H.

По параметру корреляционной функции α1 и СКО полезного сигнала σ алгоритмы фильтрации и прогноза Калмана являются более робастными, чем финитно-временной метод.

На основании всего вышеперечисленного, справедливо сделать вывод о том, что наиболее робастным является спектрально-финитный метод, благодаря отсутствию в нем обратной связи. Финитно-временной алгоритм обработки и оценки прогноза с ОС по показателю робастности сравним с методами фильтрации и прогноза Калмана.

Важно отметить, что с увеличением значения параметров (дискрета, параметра корреляционной функции, СКО полезного сигнала и помехи) дисперсия ошибки оценки всех рассматриваемых алгоритмов фильтрации и прогнозирования возрастает.

Сравнительный анализ по показателю помехозащищенности

Под помехозащищенностью понимают устойчивость точностных характеристик ИИС при изменении параметров входных сигналов. В качестве показателя помехозащищённости ИИС применяется критерий [13]:

$$K_{\text{п}} = \frac{\Delta R \ / \ R^*}{\Delta a \ / \ a^*}, \qquad (23)$$

где ΔR — изменение показателя качества системы при отклонении рассматриваемого параметра от номинального значения на величину Δa;

R^* — показатель качества системы при номинальном значении параметра;

a^* — номинальное значение рассматриваемого параметра системы.

Система является помехозащищенной по параметру a^*, если выполняется следующее условие:

$$K_п \leq 0,3 \quad (24)$$

При моделировании статистических значений дисперсий ошибки оценки от изменения рассматриваемого параметра обработки сигнала остальные параметры имеют номинальные значения.

На рисунках 10–12 приведены графики зависимостей дисперсий ошибок оценок исследуемых методов про-

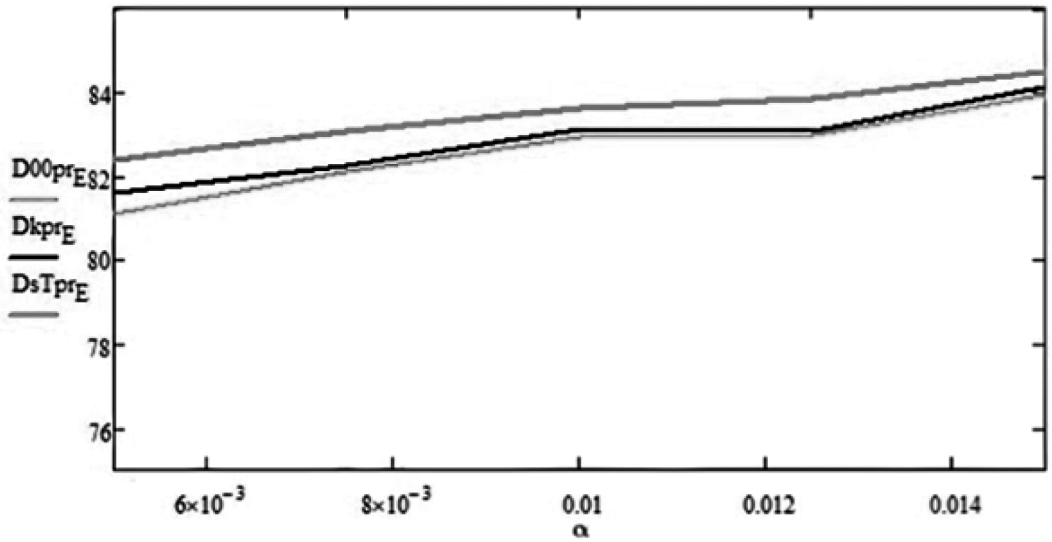


Рис. 10. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения параметра α при *pr* = 20 с

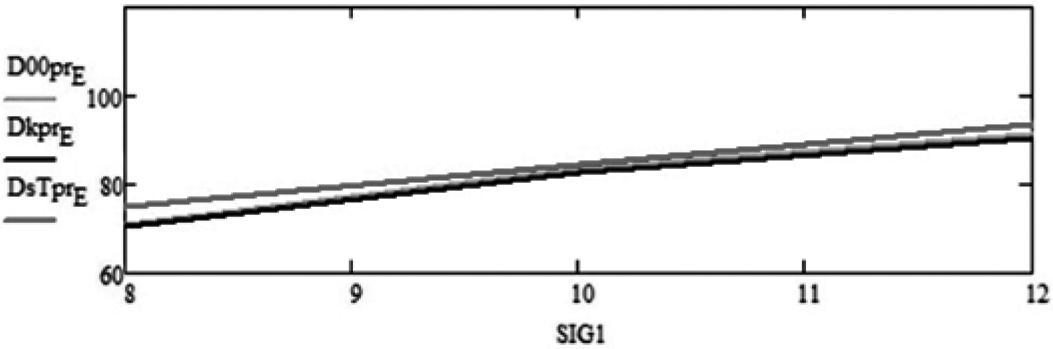


Рис. 11. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения СКО полезного сигнала SIG1 при *pr* = 20 с

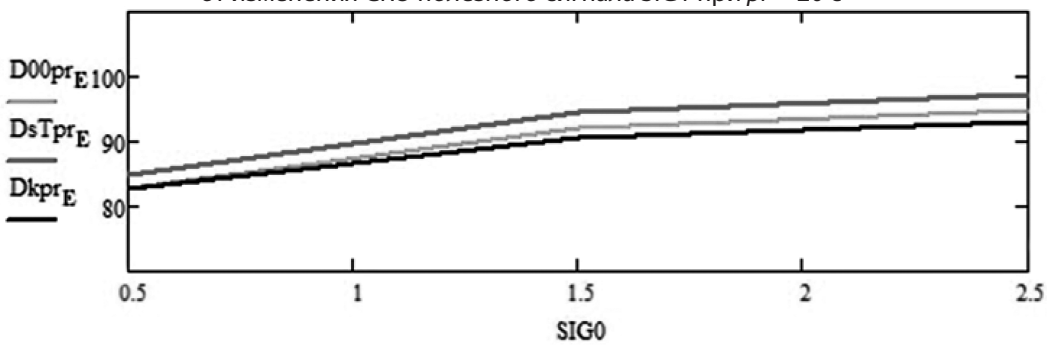


Рис. 12. Графики зависимостей статистических дисперсий ошибок оценок исследуемых методов прогнозирования от изменения СКО помехи SIG0 при *pr* = 20 с

гнозирования от изменения параметров для исследования помехозащищенности алгоритмов.

Вычисленные значения показателя помехозащищенности для рассматриваемых методов фильтрации и прогнозирования занесены в таблицу 3.

Таблица 3.

Результаты помехозащищенности исследуемых обработок

Изменяемый параметр	Метод обработки	Значение показателя помехозащищенности
α	Финитно-временная фильтрация с ОС	0,372
	Спектрально-финитная фильтрация	0,271
	Фильтрация Калмана	0,356
	Финитно-временная оценка прогноза с ОС	0,286
	Спектрально-финитная оценка прогноза	0,268
	Прогноз Калмана	0,283
σ	Финитно-временная фильтрация с ОС	0,285
	Спектрально-финитная фильтрация	0,279
	Фильтрация Калмана	0,404
	Финитно-временная оценка прогноза с ОС	0,457
	Спектрально-финитная оценка прогноза	0,397
	Прогноз Калмана	0,452
$\sigma_н$	Финитно-временная фильтрация с ОС	0,377
	Спектрально-финитная фильтрация	0,386
	Фильтрация Калмана	0,324
	Финитно-временная оценка прогноза с ОС	0,233
	Спектрально-финитная оценка прогноза	0,223
	Прогноз Калмана	0,241

По полученным результатам можно сформулировать вывод, что при изменении параметра корреляционной функции α требование (24) выполнено в случае фильтрации только для спектрально-финитного метода обработки. ФВ фильтрация и фильтрация Калмана неустойчивы к изменению входного параметра α, при этом с увеличением значения этого параметра дисперсия ошибки оценки алгоритмов возрастает. Финитно временной метод обработки незначительно проигрывает Калмановской фильтрации по показателю помехозащищенности.

В случае оценки прогноза при изменении параметра α все методы удовлетворяют условию (24). Спектрально-финитная оценка прогноза является наиболее помехозащищенной к изменению параметра корреляционной функции α. Финитно-временное прогнозирование показывает сравнительные результаты с прогнозом Калмана.

При изменении СКО полезного сигнала σ критерию (24) соответствуют финитно-временной и спектрально-финитный методы обработки. Метод фильтрации Калмана оказывается абсолютно не помехозащищенными к изменению входного параметра σ по отношению к СФМ и ФВ алгоритмам обработки, так как показатель помехозащищенности для Калмановской фильтрации почти в 1,5 раза превышает значения для двух других методов. При этом, с увеличением среднеквадратического отклонения полезного сигнала точностные показатели финитно-временного алгоритма стремятся к точностным характеристикам метода Калмана. В случае прогноза ни один из исследуемых методов не является помехозащищенным, так как при прогнозировании дисперсии ошибки оценки алгоритмов стремятся к дисперсии полезного сигнала.

При изменении среднеквадратического отклонения помехи σН, при фильтрации требование (24) не выполняется ни для одного из методов, что обусловлено слишком быстрым нарастанием дисперсии ошибки оценки при увеличении СКО помехи. Наиболее устойчивым при этом оказывается метод фильтрации Калмана, а СФМ оказывается наименее помехозащищенным по данному параметру. В случае прогноза рост дисперсии ошибки оценки происходит более плавно, вследствие чего все три метода удовлетворяют условию и являются помехозащищенными. Наибольшую устойчивость имеет спектрально финитный метод прогноза, а метод Калмана показывает худший результат с точки зрения помехозащищенности. Важно, что при небольших значениях СКО помехи наблюдается приближенность значений дисперсий ошибки оценки ФВ метода обработки и оценки прогноза с фильтрацией и прогнозированием Калмана.

По результатам проведения сравнительного анализа по показателю помехозащищенности можно сформулировать вывод о том, что спектрально финитная обработка и оценка прогноза являются наиболее помехозащищенными методами. Финитно-временная обработка по данному показателю демонстрирует схожие результаты с алгоритмами Калмана, при этом по точности финитно-временной алгоритм практически не уступает фильтрации Калмана и его методу прогнозирования.

Заключение

Исследуемые в рамках данной работы финитно-временной с обратной связью и спектрально финитный без обратной связи оптимальные методы обработки и прогнозирования навигационных сигналов рассматриваются в качестве альтернативы алгоритмам фильтрации и прогнозирования Калмана. Преимуществами новых методов обработки перед Калмановской фильтрацией являются простота их реализации и универсальность алгоритмов относительно вида используемых моделей сигнала, а также их инвариантность по отношению к наличию коррелированности измерения с помехой. Отсутствие требования наличия у процессов свойства марковости также делает алгоритмы более универсаль-

ными. При этом исследуемые методы по точности и времени переходного процесса практически не уступают Калмановским методам. Наибольшее приближение точностных характеристик финитно-временного алгоритма с обратной связью к значениям фильтрации и прогноза Калмана достигается при оптимальном значении размерности вектора результатов измерений $r = 2$.

В результате проведения сравнительного анализа выявлено, что спектрально-финитный без обратной связи метод фильтрации и оценки прогноза является наиболее робастным и помехозащищенным, а финитно временной алгоритм с обратной связью по данным показателям демонстрирует сравнительные результаты с методом Калмана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемешко О.В. Фильтр Калмана. Теоретические основы и практическое применение // Вестник магистратуры. 2014. №6–1. — с. 5–8.
2. Сейдж Э. Теория оценивания и её применение в связи и управления / Э. Сейдж, Дж. Мелс. — М.: Связь, 1976. — 495 с.
3. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление / Дж. Медич. — М.: Энергия, 1973. — 440 с.
4. Иванов Ю.П. Метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов. Международный форум. Метрологическое обеспечение инновационных технологий. — 2020. — с.56–57.
5. Иванов Ю.П. Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных систем, критерии оптимизации и свойства оценок: учебное пособие / Ю.П. Иванов, В.Г. Никитин. — СПб.: ГУАП, 2011. — 104 с.
6. Иванов Ю.П. Финитно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2018. — №5. — с. 23–27.
7. Иванов Ю.П. Исследование финитно-временного адаптивного метода фильтрации и прогнозирования навигационных параметров / Ю.П. Иванов, Кондратьева О.С. // Научный журнал «Студенческий форум». — 2019. — Ч.1, № 19. — с. 34–40.
8. Иванов Ю.П. Основные идеи финитно-временной и спектрально финитной методологии обработки измерительной информации / Ю.П. Иванов // V Международный форум. Метрологическое обеспечение инновационных технологий. — 2023. — с.60–62.
9. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций: учебное пособие. — 3-е изд. — СПб.: Лань, 2021. — 464 с.
10. Френкс Л. Теория сигналов. — М.: Советское радио, 1974. — 344 с.
11. Иванов Ю.П. Финитно-временной и спектрально-финитный методы оптимальной фильтрации дискретных сигналов. / Ю.П. Иванов // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — Т.1 №3. — с. 140–147.
12. Иванов Ю.П. Спектрально-финитный метод оптимальной линейной фильтрации сигналов. // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии. — 14–22 апреля 2020 г. — с. 35–42.
13. Иванов Ю.П. Информационно-статистическая теория измерений. Модели сигналов и анализ точности систем: учебное пособие / Ю.П. Иванов, Б. Л. Бирюков. — СПБ.: ГУАП, 2008. — 160 с.

© Виноградова Екатерина Денисовна (vinogradovae415@gmail.com); Иванов Юрий Павлович (ypi35@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.08

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕЙМИФИЦИРОВАННОЙ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ НА PYTHON С БЛОКЧЕЙН-СЕРТИФИКАЦИЕЙ ДОСТИЖЕНИЙ

APPLICATION OF A GAMIFIED ADAPTIVE LEARNING MODEL FOR PYTHON PROGRAMMING WITH BLOCKCHAIN CERTIFICATION OF ACHIEVEMENTS

A. Gerasimov

Summary. *Objective*: development and testing of a gamified adaptive Python programming learning model that integrates blockchain technologies for certification of educational achievements, which allows to increase motivation and engagement of students, as well as to ensure the formation of a verifiable digital portfolio.
Method: analysis of scientific publications, design of a gamified adaptive learning model for Python programming using blockchain certification of achievements.
Result: a gamified adaptive Python programming learning model with blockchain certification of achievements has been developed, providing increased motivation, engagement, and transparency in recording educational outcomes.
Conclusions: the proposed model demonstrates the potential to increase student motivation and engagement, provides transparency in recording educational outcomes through blockchain certification, and can be used in university, corporate, and online learning.

Keywords: gamification, adaptive learning, programming, Python, blockchain, digital portfolio, educational technologies, NFT certification, decentralized systems, student motivation.

Герасимов Антон Владимирович
Старший преподаватель,
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего Образования Тольяттинский государственный университет
antgerasimov01@gmail.com

Аннотация. *Цель*: разработка геймифицированной адаптивной модели обучения программированию на языке Python, интегрирующей блокчейн-технологии для сертификации образовательных достижений, что позволяет повысить мотивацию и вовлечённость обучающихся, а также обеспечить формирование верифицируемого цифрового портфолио.
Метод: анализ научных публикаций, проектирование геймифицированной адаптивной модели обучения программированию на Python с использованием блокчейн-сертификации достижений.
Результат: разработана геймифицированная адаптивная модель обучения программированию на Python с блокчейн-сертификацией достижений, обеспечивающая повышение мотивации, вовлечённости и прозрачности фиксации образовательных результатов.
Выводы: предложенная модель демонстрирует потенциал повышения мотивации и вовлечённости обучающихся, обеспечивает прозрачность фиксации образовательных результатов за счёт блокчейн-сертификации и может использоваться в университетском, корпоративном и онлайн-обучении.

Ключевые слова: геймификация, адаптивное обучение, блокчейн, цифровое портфолио, образовательные технологии, NFT-сертификация.

Современные подходы к обучению программированию сталкиваются с рядом проблем, связанных с низкой мотивацией обучающихся, высоким уровнем отсева на начальных этапах и отсутствием объективных механизмов фиксации и верификации образовательных достижений. Несмотря на наличие широкого спектра онлайн-курсов и образовательных платформ (Stepik, Coursera, Codecademy и др.), значительная часть студентов бросает обучение, не достигая устойчивого результата [1; 2].

Одним из перспективных направлений решения обозначенных проблем выступает геймификация образовательного процесса, которая за счёт внедрения игровых механик (уровни, бейджи, рейтинги, челленджи) повышает вовлечённость и стимулирует формирование устойчивой учебной мотивации. Дополнительный эффект достигается при использовании адаптивных систем обучения, позволяющих подбирать задания и траекторию освоения материала в соответствии с уровнем подготовки обучающегося, его индивидуальными особенностями и динамикой прогресса.

Не менее актуальной задачей является обеспечение прозрачности и верифицируемости образовательных результатов. В последние годы в образовательной практике активно исследуются возможности применения блокчейн-технологий для сертификации компетенций и создания цифрового портфолио. Децентрализованные системы позволяют фиксировать результаты обучения в неизменяемом реестре, исключая возможность их фальсификации и обеспечивая признание цифровых сертификатов в академической и профессиональной среде.

Современные подходы к цифровизации и адаптивному обучению программированию

В последние годы вопросы цифровизации образовательного процесса становятся ключевыми в мировой практике. Особенно активно цифровые технологии внедряются в области программирования, где наблюдается постоянный рост спроса на специалистов и одновременно фиксируется высокая сложность обучения для новичков. В этой связи возникает необходимость в создании гибких образовательных инструментов, способных обеспечивать как массовое, так и персонализированное обучение.

Одним из наиболее перспективных направлений выступает геймификация образовательного процесса. Использование игровых механик — системы уровней, очков опыта, бейджей, лидербордов и челленджей — позволяет формировать у обучающихся устойчивый интерес к изучению языка программирования и снижать процент отсева на ранних этапах обучения. Практика показывает, что игровые элементы стимулируют не только индивидуальную активность, но и развитие навыков командной работы, конкуренции и самоорганизации. Таким образом, геймификация становится эффективным средством повышения мотивации студентов.

Наряду с геймификацией стремительное развитие методов машинного обучения и интеллектуального анализа данных способствовало появлению адаптивных образовательных систем. Их ключевая особенность заключается в построении индивидуальных траекторий обучения на основе текущего уровня знаний студента, скорости освоения материала и результатов промежуточных тестов. Одним из наиболее распространённых формальных подходов, применяемых в адаптивном обучении, является Item Response Theory (IRT), позволяющий количественно описывать вероятность успешного выполнения заданий различной сложности (рис. 1).

Применение таких моделей в курсах по Python позволяет избежать перегрузки начинающих студентов и одновременно стимулировать продвижение более подготовленных обучающихся.

Особое значение в последние годы приобретает проблема надёжной фиксации образовательных результатов. В данном контексте всё большее внимание привлекают блокчейн-технологии, обеспечивающие прозрачность, неизменность и верифицируемость записей. На практике уже реализованы пилотные проекты (MIT, Open University, инициативы на базе Hyperledger Fabric), где блокчейн применяется для хранения цифровых сертификатов компетенций. Такой подход открывает возможности для создания цифрового портфолио обучающегося, которое может использоваться при академической аттестации и профессиональном трудоустройстве.

Совмещение геймификации, адаптивных механизмов и блокчейн-сертификации формирует новое направление развития образовательных технологий. С одной стороны, интеграция игровых элементов и адаптивных алгоритмов обеспечивает рост вовлечённости и результативности студентов, с другой — блокчейн создаёт условия для объективной оценки компетенций и долговременного хранения результатов. Применительно к курсам по Python такая модель представляется особенно актуальной, учитывая популярность языка и его роль как базового инструмента в области программирования, анализа данных и искусственного интеллекта.

Методология и архитектура предлагаемой модели

Предлагаемая модель обучения программированию на Python строится на интеграции трёх ключевых компонентов: геймификации, адаптивного подбора заданий и блокчейн-сертификации достижений. Такая комбинация позволяет одновременно решать задачи повышения вовлечённости обучающихся, индивидуализации траекторий обучения и объективной фиксации результатов.

В рамках платформы реализована система игровых механик, включающая уровни, очки опыта, бейджи и челленджи. Задания различаются по сложности и приносят различное количество баллов. Дополнительно учитываются такие факторы, как время решения, количество использованных подсказок и последовательность успешных попыток (серии). Накопленные баллы

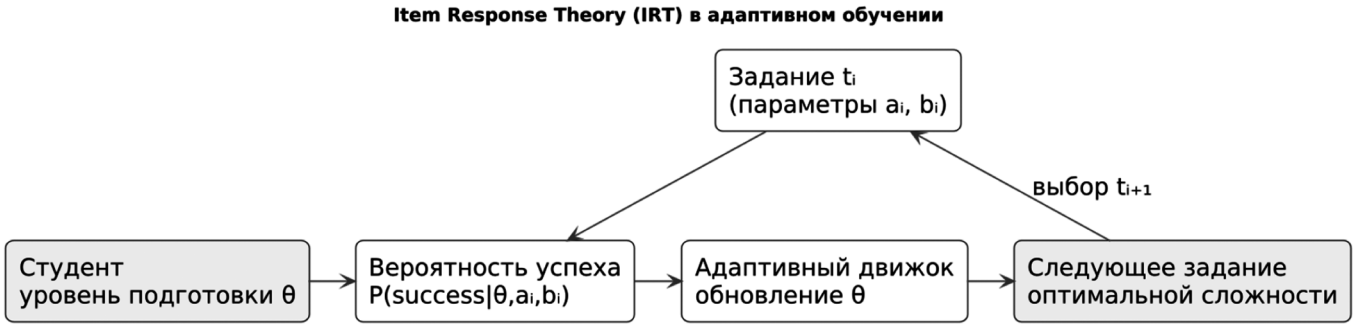


Рис. 1. Логика адаптивного обучения на основе Item Response Theory

влияют на уровень обучающегося и открывают доступ к новым задачам и проектам. Такая система способствует формированию устойчивой мотивации и удержанию студентов в образовательной среде.

Адаптивность обеспечивается с помощью моделей Item Response Theory (IRT) (см. формулу (1)), которые позволяют вычислять вероятность успешного выполнения конкретного задания студентом с заданным уровнем компетенции. При этом сложность и дискриминация заданий задаются параметрами модели. После каждой попытки параметры компетентности обучающегося обновляются, что позволяет динамически подстраивать траекторию обучения.

Формально вероятность успешного выполнения задания t_i студентом с уровнем подготовки θ выражается как:

$$P\left(success_i|\theta\right) = \frac{1}{1 + e^{-a_i(\theta - b_i)}} \quad (1)$$

где a_i — коэффициент дискриминации, b_i — параметр сложности.

На практике это позволяет выдавать студенту задания оптимальной сложности: слишком простые не предлагаются, а слишком сложные откладываются до достижения необходимого уровня подготовки.

Функционирование предлагаемой модели строится на поэтапном взаимодействии трёх уровней — пользователя, образовательной платформы и блокчейн-системы (рис. 2).

На рисунке 2 представлена общая концептуальная схема функционирования геймифицированной адаптивной модели обучения Python с блокчейн-сертификацией достижений. Она включает три ключевых уровня:

— пользовательский;
— платформенный;
— блокчейн-уровень.

Каждый из уровней выполняет собственные задачи, но вместе они образуют замкнутый цикл: обучаемый получает задание и решает его в онлайн-среде (уровень пользователя), результаты автоматически анализируются и обрабатываются адаптивным движком платформы с учётом индивидуальной траектории и игровых механик (уровень платформы), а ключевые достижения фиксируются в децентрализованном реестре, формируя цифровое портфолио обучающегося (уровень блокчейн-сертификации). Такой переход от одного уровня к другому обеспечивает непрерывность образовательного процесса, прозрачность его результатов и объективность фиксации компетенций.

Структурная схема функционирования модели приведена на рисунках ниже. Она отражает взаимодействие основных компонентов:

— уровня пользователя (рис. 3);
— платформы обучения (рис. 4);
— блокчейн-модуля (рис. 5).

Уровень пользователя представлен веб-интерфейсом и встроенной онлайн-IDE для написания и тестирования программ на Python. Основные функции данного уровня включают выдачу учебных заданий, выполнение кода в безопасной среде и получение обратной связи. Дополнительно реализованы игровые механики, а именно начисление очков опыта, присвоение бейджей и продвижение по уровням. Такой подход обеспечивает высокую вовлечённость студентов и поддерживает их мотивацию на протяжении всего курса. Таким образом, пользовательский уровень обеспечивает взаимодействие обучающегося с системой и формирует первичный поток данных о его действиях. Данные далее обрабатываются на уровне платформы (рис. 4), где сосредоточены механизмы адаптации, проверки и управления образовательным процессом.

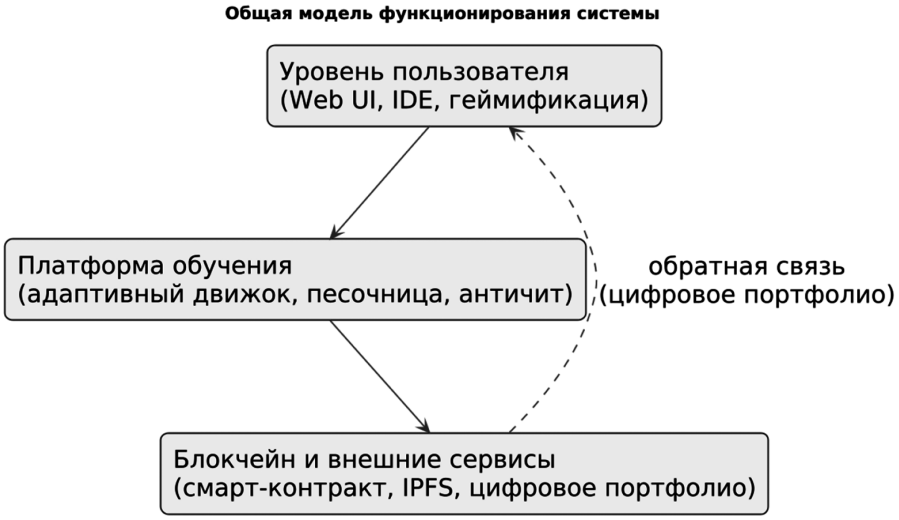


Рис. 2. Концептуальная схема функционирования модели обучения Python

Рис. 3. Уровень пользователя (горизонтальный pipeline)

На уровне платформы обучения сосредоточена основная логика системы. Ключевым компонентом является адаптивный движок, реализующий модели Item Response Theory (IRT), Bayesian Knowledge Tracing (BKT) и контекстные бандитные алгоритмы для индивидуализации траектории обучения. Задачи выполняются в песочнице (Sandbox Runner), что обеспечивает безопасное выполнение кода с ограничениями по ресурсам. Для повышения объективности предусмотрен античит-модуль, выявляющий плагиат и аномальные решения. Данные обрабатываются через API-шлюз, сохраняются в реляционной базе данных (PostgreSQL) и объектном хранилище (MinIO/IPFS), а также синхронизируются посредством брокера сообщений (Redis/RabbitMQ). Уровень обеспечивает адаптивность, масштабируемость и надежность функционирования всей системы. Таким образом, платформа обучения выполняет роль центрального звена модели, где происходит адаптивный подбор заданий, обработка решений и реализация геймификационных механик. Однако для обеспечения прозрачности и объективной фиксации ключевых результатов необходим следующий шаг — их передача на уровень блокчейн-сертификации (рис. 5), где достижения обучающихся закрепляются в децентрализованном реестре и становятся доступными для внешней верификации.

Заключительный уровень отвечает за сертификацию образовательных достижений. Через специальный сервис (Issuer) в смарт-контракт (Ethereum ERC-721 либо Hyperledger Fabric) вносятся записи о достижениях обучающегося. Метаданные (компетенции, результаты, бейджи) фиксируются в IPFS и связываются с уникальным

Рис. 4. Платформа обучения (внутренняя архитектура)

Рис. 5. Блокчейн и внешние сервисы (сертификация и верификация)

токеном, формирующим цифровое портфолио студента. Верификация сертификатов доступна внешним заинтересованным сторонам (работодателям, HR-службам, LMS-платформам), что гарантирует прозрачность и доверие к полученным результатам. Таким образом, блокчейн-уровень обеспечивает долговременную сохранность данных, их верифицируемость и независимость от конкретной образовательной платформы.

Практические рекомендации по использованию модели

Разработанная геймифицированная адаптивная модель обучения программированию на Python с блокчейн-сертификацией достижений обладает высоким потенциалом интеграции в образовательную практику. С учётом её структуры и возможностей целесообразно выделить следующие направления использования:

— университетское обучение. Рекомендуется интегрировать модель в курсы программирования в вузах в качестве дополнения к существующим LMS (Moodle, Canvas, Open edX). Использование геймификации позволит повысить мотивацию студентов, а блокчейн-сертификация — формировать цифровое портфолио для дальнейшего трудоустройства;

— онлайн-образование и массовые курсы. При организации MOOC модель может применяться как самостоятельная платформа или как часть онлайн-курсов по Python. Адаптивный подбор заданий обеспечит индивидуализацию траекторий для широкого круга обучающихся, а NFT-сертификаты повысят доверие к результатам;

— корпоративное обучение. Для повышения квалификации сотрудников в организациях модель может использоваться при освоении Python для анализа данных, автоматизации и задач искусственного интеллекта. Блокчейн-сертификация достижений позволит HR-службам объективно подтверждать полученные компетенции;

— дополнительное образование и школы. Модель может внедряться в кружки и курсы программирования для школьников. Геймификационные элементы способствуют формированию устойчивой мотивации, а цифровое портфолио обучающихся может учитываться при поступлении в высшие учебные заведения.

Таким образом, предлагаемая модель может рассматриваться как универсальное решение, применимое в различных образовательных и профессиональных контекстах — от университетских дисциплин до школьных курсов и корпоративных тренингов, обеспечивая адаптивность учебного процесса, повышение мотивации и прозрачность фиксации образовательных результатов.

Заключение

В статье рассмотрена концептуальная геймифицированная адаптивная модель обучения программированию на языке Python с использованием блокчейн-сертификации образовательных достижений:

1) показано, что интеграция геймификационных элементов, алгоритмов адаптивного подбора заданий и блокчейн-технологий позволяет сформировать целостную образовательную платформу, ориентированную на повышение мотивации и вовлечённости обучающихся;
2) описана архитектура модели, включающая три уровня: пользовательский, платформенный и блокчейн-уровень. Каждый из них выполняет собственные функции, обеспечивая взаимодействие между студентом, образовательной системой и децентрализованным механизмом сертификации;
3) определены практические направления использования модели в университетском, онлайн— и корпоративном обучении, а также в дополнительном образовании;
4) подчёркнута новизна подхода, связанная с применением блокчейн-сертификации для формирования цифрового портфолио обучающегося.

Таким образом, предложенная модель может рассматриваться как перспективное направление развития цифровых образовательных технологий. В дальнейших исследованиях планируется апробация разработанного подхода и оценка его эффективности в реальных образовательных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнатик Е.Н. Геймификация как нарастающий тренд в сфере высшего образования: перспективы и проблемы // Вопросы философии. — 2023. — № 6. — С. 116–123.
2. Му Цзянмин. Обзор актуальных исследований применения геймификации в российских гуманитарных вузах // Управление образованием: теория и практика. — 2025. — Т. 15, № 2–1. — С. 294–301.
3. Петенко А.В. Исследование места технологии блокчейн в высшем образовании // Киберленинка. — 2021. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mesta-tehnologii-blokcheyn-v-vysshem-obrazovanii (дата обращения: 01.09.2025)
4. Токтарова В.И. Технология блокчейн в системе высшего образования: возможности и перспективы внедрения // CyberLeninka. — 2023. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-blokcheyn-v-sisteme-vysshego-obrazovaniya-vozmozhnosti-i-perspektivy-vnedreniya (дата обращения: 21.08.2025)
5. Шамсутдинова Т.М. Применение технологии блокчейн для выдачи цифровых дипломов и сертификатов: анализ перспектив // Российское образование в OpenEdu REA. — 2018. — URL: https://openedu.rea.ru/jour/article/view/577 (дата обращения: 05.09.2025)

© Герасимов Антон Владимирович (antgerasimov01@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.09

РЕИНЖИНИРИНГ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПРИМЕРЕ КАФЕДРЫ УНИВЕРСИТЕТА

INFRASTRUCTURE REENGINEERING USING THE EXAMPLE OF A UNIVERSITY DEPARTMENT

Gidinda Grace Muchigo

Summary. The article focuses on the reengineering of a university department's infrastructure through an integrated approach that combines business process modeling in BPMN 2.0 notation and the use of mnemonic diagrams. It is demonstrated that this approach not only modernizes the infrastructure to meet current needs but also lays the foundation for its adaptation to future challenges. As a result, significant cost optimization and improved resource efficiency are achieved. The innovative and high-performance environments created enhance the experience of both students and staff. Special attention is paid to the role of business process mnemonic diagrams and their integration with BPMN models as key tools for profound and effective reengineering. The goal of the work is not merely incremental improvement, but a full-scale transformation of the educational environment that fosters personal development and meets contemporary academic and technological demands.

Keywords: reengineering of the department infrastructure, business process mnemonic diagram, business process modeling, optimization.

Гидинда Грас Мушиго
аспирант, Уфимский университет технологий и науки
gracegidinda92@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена реинжинирингу инфраструктуры университетской кафедры с применением комплексного подхода, сочетающего моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN 2.0 и использование мнемосхем. Демонстрируется, что такой подход позволяет не только модернизировать инфраструктуру в соответствии с текущими требованиями, но и закладывает основу для её адаптации к будущим вызовам. В результате достигается значительная оптимизация затрат и повышение эффективности использования ресурсов. Создаваемые инновационные и высокопроизводительные рабочие среды способствуют улучшению опыта как студентов, так и сотрудников. Особое внимание уделяется роли мнемосхем бизнес-процессов и их интеграции с BPMN-моделями как ключевым инструментам глубокого и результативного реинжиниринга. Цель работы — не просто частичное улучшение, а полноценная трансформация образовательной среды, стимулирующая развитие личности и отвечающая современным академическим и технологическим требованиям.

Ключевые слова: реинжиниринг инфраструктуры кафедры, мнемосхема бизнес-процесса, моделирование бизнес-процессов, оптимизация.

Введение

Современная академическая среда характеризуется интенсивной цифровой трансформацией и ростом требований к качеству образовательных услуг, что предъявляет новые вызовы к инфраструктуре университетских кафедр. Традиционные подходы к модернизации часто оказываются недостаточными для комплексного решения возникающих проблем, что актуализирует необходимость применения методологии реинжиниринга бизнес-процессов. В данном контексте особую значимость приобретает интеграция двух ключевых инструментов: визуального моделирования в нотации BPMN 2.0 и мнемосхем. BPMN обеспечивает формализацию и детализацию процессов, в то время как мнемосхемы способствуют наглядному представлению сложных взаимосвязей и облегчают коммуникацию между всеми участниками процесса.

Целью настоящего исследования является разработка методики реинжиниринга инфраструктуры кафедры на основе синтеза процессного моделирования и мнемонической визуализации. Такой подход позволяет не только выявить узкие места и избыточные операции в существующих процессах, но и спроектировать целостную оптимизированную систему, ориентированную на повышение эффективности образовательной и научной деятельности. Последующие разделы статьи посвящены детальному рассмотрению разработанной мнемосхемы бизнес-процесса и практическому применению BPMN-моделирования для достижения поставленных целей модернизации.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной методики реинжиниринга инфраструктуры университетской кафедры, основанной на синтезе методологии BPMN 2.0 и мнемосхем. Впервые предложен интегративный подход, позволяющий совместить детальное моделирование бизнес-процессов с наглядной визуализацией организационных взаимосвязей. Разработана оригинальная мнемосхема бизнес-процесса, адаптированная к специфике академической среды и отражающая особенности взаимодействия между всеми участниками образовательного процесса.

Создана BPMN-модель, учитывающая отраслевые особенности университетских кафедр и включающая этапы анализа потребностей, аудита, внедрения и валидации результатов. Предложен механизм адаптации методов бизнес-моделирования для задач образовательных учреждений, обеспечивающий повышение эффективности использования ресурсов и улучшение качества образовательных услуг.

Концептуальные и инфраструктурные объекты кафедры университета

Инфраструктура университетской кафедры представляет собой сложный многокомпонентный комплекс, формирующий основу для реализации образовательной и научной деятельности. Её структурная организация включает материально-технические, информационные, кадровые и методические ресурсы, интегрированные в единое функциональное пространство. Материально-техническая составляющая охватывает учебные аудитории, лабораторное оборудование, компьютерную технику и специализированное программное обеспечение. Информационный компонент включает системы управления обучением, базы данных, электронные библиотечные ресурсы и средства коммуникации. Кадровый потенциал представляет профессорско-преподавательский состав, научных сотрудников, инженерно-технический и административный персонал.

Функциональное назначение инфраструктуры определяется необходимостью обеспечения непрерывного образовательного процесса и проведения научных исследований на современном уровне. Эффективность её функционирования напрямую влияет на качество подготовки специалистов, результативность научной деятельности и конкурентоспособность кафедры в академической среде. Концептуальной основой организации инфраструктуры выступает принцип системной интеграции всех компонентов, позволяющий создать целостную среду для реализации образовательных программ и научных проектов.

Условно можно выделить следующие ключевые блоки, находящиеся во взаимодействии:

— академические организации и подразделения: взаимодействие между кафедрой, другими факультетами и университетским руководством, отражающее обмен опытом и согласование решений;
— внешняя среда: включены партнерские организации и государственная политика, которые формируют внешние требования и ограничения для процесса реинжиниринга;
— внутренние стейкхолдеры: роли и взаимосвязи между студентами, преподавателями, исследователями, администраторами и техническими специалистами, показывающие их вклад в общий процесс;
— информационные и технологические потоки: движение знаний, опыта и данных между всеми элементами системы, подчеркивая важность интеграции технологий в образовательные и исследовательские процессы.

Таким образом, мнемосхема служит инструментом системного анализа. Она позволяет идентифицировать точки взаимодействия, потенциальные узкие места и возможности для оптимизации, обеспечивая целостное восприятие процесса трансформации инфраструктуры как многоуровневой экосистемы, а не набора разрозненных элементов.

Моделирование бизнес-процессов BPMN 2.0 для реинжиниринга инфраструктуры кафедры

Моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN 2.0 представляет собой фундаментальный инструментарий для комплексного реинжиниринга инфраструктуры университетской кафедры. Данная методология обеспечивает не только визуальное представление организационных процедур, но и формализацию сложных взаимосвязей между участниками образовательного процесса. BPMN как стандартизированный язык моделирования позволяет унифицировать описание рабочих процессов, что особенно актуально в условиях цифровой трансформации высшего образования.

Актуальность применения BPMN в академической среде обусловлена необходимостью координации деятельности множества структурных подразделений при ограниченных ресурсах. Университетская кафедра функционирует как сложная социотехническая система, где образовательные, научные и административные процессы тесно переплетены. Традиционные методы управления часто не позволяют выявить системные проблемы и оптимизировать взаимодействие между различными заинтересованными сторонами.

На рисунке 1 представлена детализированная BPMN-диаграмма, которая визуализирует полный цикл реинжиниринга инфраструктуры кафедры. Модель демонстрирует не только последовательность действий, но и распределение ответственности, точки принятия решений и информационные потоки. Такой подход обеспечивает прозрачность управления проектом модернизации и позволяет прогнозировать потенциальные риски [3,8–10, с. 12–13].

Инициация процесса начинается с фазы анализа потребностей, которую осуществляет университетское руководство. Начальным событием выступает формализованное выявление необходимости реинжиниринга, которое может быть обусловлено как внутренними, так и внешними факторами. К внутренним факторам отно-

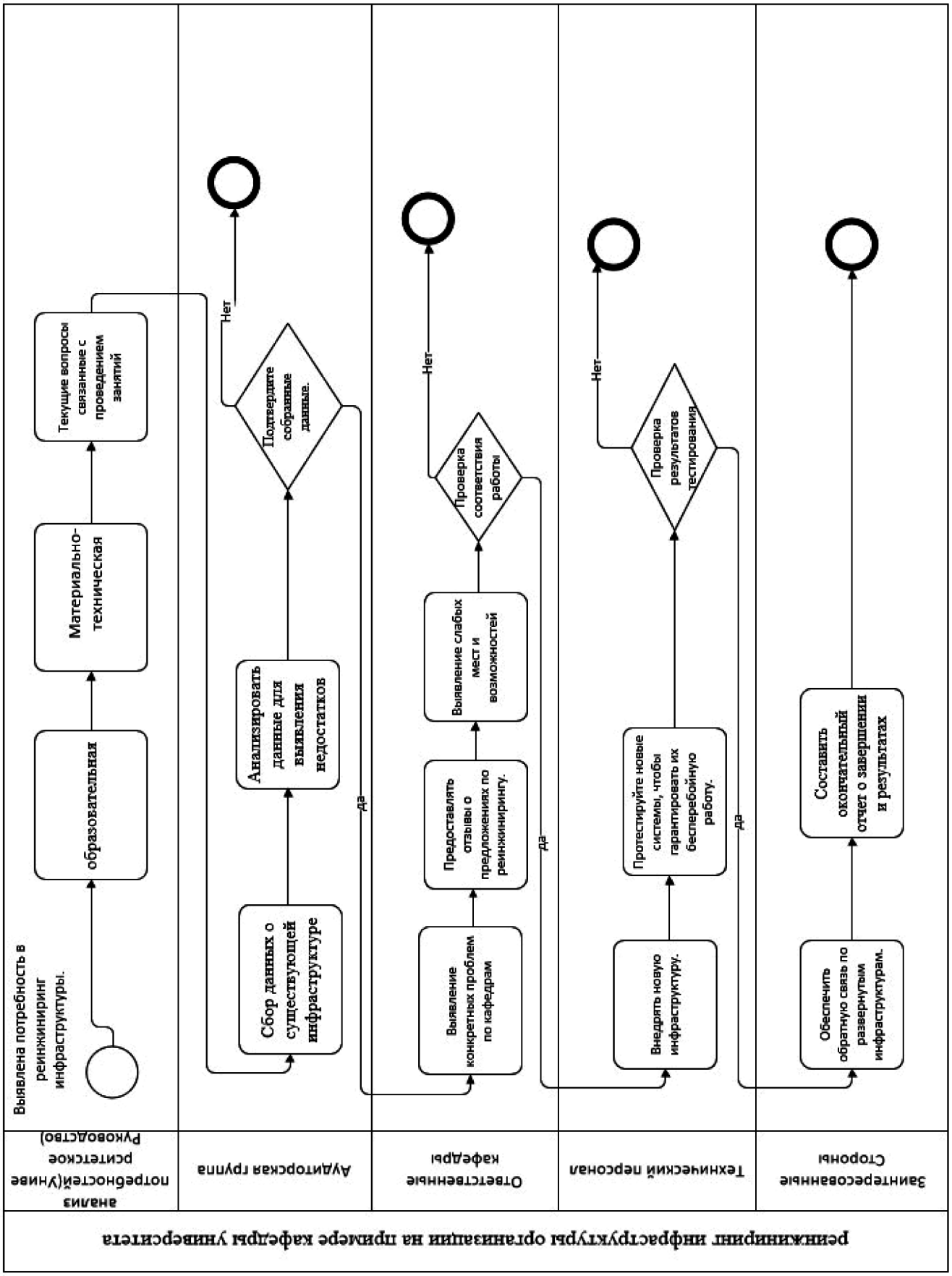


Рис. 1. Моделирование бизнес-процессов BPMN 2.0 для реинжиниринга инфраструктуры кафедры

сятся: моральное и физическое устаревание оборудования, несоответствие инфраструктуры современным образовательным стандартам, низкая эффективность использования ресурсов. Внешние факторы включают: изменения в законодательстве об образовании, новые требования аккредитации, появление инновационных технологий обучения.

Образовательный аспект анализа потребностей охватывает плановые и внеплановые процедуры аттестации и аккредитации образовательных программ. Данный процесс требует тщательного соответствия инфраструктуры установленным стандартам качества образования. Особое внимание уделяется обеспечению доступности образовательной среды для лиц с ограниченными возможностями, современному оснащению аудиторного фонда и лабораторий, соответствию программно-технического комплекса требованиям цифровой педагогики.

Материально-технический компонент анализа включает регулярные и внеплановые проверки состояния оборудования, мебели, компьютерной техники. Важным аспектом является планирование закупок материально-технических средств в рамках выделенного финансирования, что требует тщательного анализа потребностей и приоритизации. Операционный блок охватывает мониторинг фактического проведения занятий, анализ посещаемости, оценку эффективности использования ресурсов в реальном учебном процессе.

Следующая фаза процесса предполагает формирование аудиторской группы, которая осуществляет комплексный сбор данных о текущем состоянии инфраструктуры. Методология аудита включает как количественные, так и качественные методы оценки: техническую экспертизу оборудования, анкетирование преподавателей и студентов, анализ статистики использования помещений и оборудования. Особое внимание уделяется выявлению системных проблем и узких мест, которые снижают общую эффективность функционирования кафедры.

Процесс анализа собранных данных требует применения специализированных инструментов и методик. Используются методы статистического анализа, SWOT-анализ, сравнительный анализ с аналогичными подразделениями других вузов. Критической точкой процесса является проверка достоверности собранных данных и выводов аудита. При выявлении недостатков или неполноты информации осуществляется итерационный процесс уточнения данных и пересмотра методологии исследования.

Участие ответственных кафедр в процессе реинжиниринга представляет собой ключевой элемент успеха проекта. Кафедры осуществляют идентификацию конкретных проблемных зон, связанных со спецификой их образовательной и научной деятельности. Предоставление обратной связи по предложениям по реинжинирингу позволяет учесть отраслевые особенности и профессиональные требования. Активное вовлечение преподавательского состава и научных сотрудников обеспечивает учет практического опыта и педагогических потребностей.

Процедура проверки соответствия выполняемых работ установленным требованиям осуществляется внутренними и внешними аудиторами. Данный этап включает не только контроль формальных параметров, но и оценку соответствия инфраструктуры современным образовательным тенденциям. Особое внимание уделяется гибкости и масштабируемости создаваемых решений, их способности адаптироваться к будущим изменениям образовательных стандартов и технологий.

Техническая реализация проекта требует скоординированных действий всего технического персонала. Процесс внедрения включает не только установку оборудования и программного обеспечения, но и интеграцию различных систем, миграцию данных, обеспечение информационной безопасности. Тестирование новых систем проводится по методике, охватывающей все аспекты функционирования: от технических характеристик до удобства использования и соответствия педагогическим требованиям.

Этап обратной связи от пользователей является критически важным для успешной реализации проекта. Сбор и анализ мнений преподавателей, студентов, административного персонала позволяет выявить неочевидные проблемы и произвести тонкую настройку системы. Особое значение имеет непрерывный мониторинг функционирования обновленной инфраструктуры в течение первых месяцев эксплуатации.

Составление итогового отчета включает не только описание выполненных работ, но и рекомендации по дальнейшему развитию инфраструктуры. Документ содержит план регулярного обслуживания, предложения по дополнительным улучшениям, оценку стоимости владения. Официальное закрытие проекта сопровождается передачей полной документации и проведением обучения персонала.

Преимущества использования BPMN для моделирования процесса реинжиниринга заключаются в возможности наглядного представления сложных организационных взаимосвязей. Стандартизированная нотация обеспечивает однозначное понимание процесса всеми участниками, снижает риски неверного толкования требований. Визуализация рабочих процессов позволяет идентифицировать избыточные операции, дублирование функций, потенциальные точки оптимизации.

Моделирование в BPMN особенно ценно в условиях необходимости координации действий множества подразделений университета. Методология позволяет четко определить зоны ответственности, регламентировать взаимодействие между структурными единицами, стандартизировать процедуры обмена информацией. Это способствует снижению организационных издержек и повышению эффективности управления проектом.

Важным аспектом является возможность использования созданной BPMN-модели для последующего мониторинга и совершенствования процессов. Модель служит основой для разработки ключевых показателей эффективности, системы мониторинга и контроля. Регулярный анализ отклонений фактических показателей от модельных позволяет осуществлять непрерывное совершенствование инфраструктуры.

Применение BPMN также облегчает коммуникацию между техническими специалистами и конечными пользователями. Визуальное представление процессов делает их понятными для всех участников, независимо от их технической подготовки. Это особенно важно в академической среде, где необходимо учитывать мнение и потребности разнородных групп заинтересованных сторон.

Перспективы развития подхода включают интеграцию BPMN-моделирования с системами управления вузом, создание цифровых двойников инфраструктуры кафедры, использование прогнозной аналитики для оптимизации процессов. Это позволит перейти от реактивного к проактивному управлению инфраструктурой, предвосхищать будущие потребности и вызовы.

Таким образом, моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN представляет собой комплексный методологический подход к реинжинирингу инфраструктуры университетской кафедры. Данная методология обеспечивает системность, прозрачность и управляемость процесса модернизации, способствует оптимальному использованию ресурсов и достижению стратегических целей развития образовательного учреждения. Внедрение данного подхода позволяет создать современную, эффективную и ориентированную на будущее инфраструктуру, способную удовлетворить растущие требования к качеству образования и научных исследований.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует фундаментальную значимость реинжиниринга инфраструктуры университетской кафедры как стратегического направления модернизации высшего образования. Комплексный подход, основанный на интеграции методологии моделирования бизнес-процессов и мнемосхем, доказал свою эффективность в решении сложных задач трансформации академической среды. Применение процессного моделирования позволило не только выявить и систематизировать существующие проблемы, но и разработать целостную концепцию оптимизации образовательного и научного пространства.

Важнейшим результатом исследования стало создание методологического инструментария, позволяющего осуществлять реинжиниринг на системной основе. Моделирование бизнес-процессов обеспечило точную визуализацию рабочих процедур, выявление узких мест и оптимизацию взаимодействия между всеми участниками образовательной деятельности. Мнемосхемы предоставили наглядное представление сложных взаимосвязей и способствовали улучшению коммуникации между различными категориями заинтересованных сторон.

Практическая значимость работы заключается в разработке универсального подхода, применимого для модернизации инфраструктуры кафедр различного профиля. Предложенная методика позволяет учитывать отраслевые особенности и специфику образовательных программ, обеспечивая при этом соблюдение общих принципов эффективности и оптимального использования ресурсов. Внедрение данного подхода способствует созданию современной образовательной среды, отвечающей требованиям цифровой трансформации и инновационного развития.

Перспективы дальнейших исследований видятся в углубленном изучении возможностей интеграции методов моделирования с системами искусственного интеллекта для прогнозной аналитики и упреждающего управления инфраструктурой. Также представляет интерес разработка адаптивных мнемосхем, способных динамически отражать изменения в образовательных процессах и технологических решениях. Дальнейшее совершенствование методологии должно быть направлено на создание комплексной системы управления университетской инфраструктурой, обеспечивающей непрерывное развитие и адаптацию к новым вызовам академической среды.

В целом, реализация предложенного подхода к реинжинирингу инфраструктуры университетской кафедры создает прочную основу для качественного преобразования образовательного пространства. Это преобразование направлено не только на техническое обновление, но и на создание среды, способствующей академическому превосходству, инновационным исследованиям и профессиональному развитию всех участников образовательного процесса. Достигнутые результаты открывают новые возможности для стратегического развития университетов в условиях быстро меняющегося образовательного ландшафта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеева Т.В. Методологические основы поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием социотехнических объектов на основе интерсубъективного подхода // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 66–95. EDN CNPZYU.
2. Антонов В.В., Куликов Г.Г., Антонов Д.В. Формализация предметной области с применением инструментов, поддерживающих стандарты // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16. № 3(48). С. 42–52. EDN PXEQBF.
3. Король А.Д., Воротницкий Ю.И. Цифровая трансформация образования и вызовы XXI века // Высшее образование в России. — 2022. — Т. 31. — №. 6. — С. 48–61
4. Гамбеева Ю.Н., Сорокина Е.И. Цифровая трансформация современного образовательного процесса //Известия Волгоградского государственного педагогического университета. — 2020. — №. 5 (148). — С. 35–42
5. Балановская А.В., Франтасов Д.Н., Горбунова О.А. Направления развития образовательных организаций в условиях цифровой трансформации отрасли науки и высшего образования //Известия Байкальского государственного университета. — 2022. — Т. 32. — №. 2. — С. 423–431
6. Евсеева И.А., Агальцова Т.А. Реинжиниринг бизнес-процессов как инструмент стратегического управления предприятием //Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2021. — №. 3–1. — С. 48–53
7. Чаадаев К.В. Методология реинжиниринга бизнес-процессов //Экономика, предпринимательство и право. — 2020. — Т. 10. — №. 3. — С. 587–600
8. Объедкова Е.Н., Ткаченко Я.Д. Методическое обеспечение реинжиниринга бизнес-процессов в условиях инновационной экономики // Экономика строительства и городского хозяйства. — 2021. — Т. 17, № 2. — С. 65–72
9. Миронов В.В., Тугузбаев Г.А. Персонализация графических конструкторских документов в учебном проектировании: функциональная модель концептуального уровня // Системная инженерия и информационные технологии. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 18–32. EDN KOFVMO.

© Гидинда Грас Мушиго (gracegidinda92@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.10

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В РЕНТГЕНОГРАФИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫЗОВЫ

NEURAL NETWORKS IN RADIOGRAPHY: PROSPECTS AND CHALLENGES

R. Golia

Summary. The article is devoted to the study of prospects and challenges arising from the use of neural networks in radiography. The possibilities of modern deep learning algorithms, such as convolutional neural networks (CNN), in improving the accuracy and speed of diagnosis of various diseases, including tuberculosis, pneumonia and lung cancer, are considered. Special attention is paid to the high accuracy, sensitivity and specificity of neural networks, reaching 95–98 %.

Despite the significant advantages, the implementation of neural networks is fraught with technical difficulties, such as high computational complexity and the need for large amounts of labeled data. Issues of interpretability of results, confidentiality of medical data, and ethical aspects related to possible discrimination and bias in training models are also discussed.

Modern X-ray diagnostic devices, such as CT and C-arc, actively integrate artificial intelligence technologies that increase the accuracy and speed of diagnosis. The use of neural networks such as CNN and U-Net makes it possible to automatically detect pathologies, improve tissue segmentation and reduce the influence of the human factor. In 2025, such systems will become the standard in modern medicine, helping doctors to make timely and accurate diagnoses based on objective data and recommendations from AI.

Keywords: medicine, artificial intelligence, neural networks, healthcare, X-ray imaging, diagnostics, modern algorithms, and models.

Голя Роман Дмитриевич
Инженер-электронщик, Автономная некоммерческая организация высшего образования Российский новый университет, ООО «РЕНТГЕН-КОМПЛЕКТ», г. Москва
roma199810@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию перспектив и вызовов, возникающих при применении нейронных сетей в рентгенографии. Рассмотрены возможности современных алгоритмов глубокого обучения, таких как сверточные нейронные сети (CNN), в повышении точности и скорости диагностики различных заболеваний, включая туберкулез, пневмонию и рак легких. Особое внимание уделено высоким показателям точности, чувствительности и специфичности нейронных сетей, достигающим 95–98 %.

Несмотря на значительные преимущества, внедрение нейронных сетей сопряжено с техническими трудностями, такими как высокая вычислительная сложность и потребность в больших объемах, размеченных данных. Также обсуждаются вопросы интерпретируемости результатов, конфиденциальности медицинских данных и этические аспекты, связанные с возможным проявлением дискриминации и предвзятости в обучающих моделях.

Современные рентгенодиагностические аппараты, такие как КТ и С-дуга, активно интегрируют технологии искусственного интеллекта, повышающие точность и скорость диагностики. Использование нейронных сетей, таких как CNN и U-Net, позволяет автоматически обнаруживать патологии, улучшать сегментацию тканей и снижать влияние человеческого фактора. В 2025 году такие системы становятся стандартом в современной медицине, помогая врачам оперативно и точно ставить диагнозы, основываясь на объективных данных и рекомендациях ИИ.

Ключевые слова: медицина, искусственный интеллект, нейронные связи, здравоохранение, рентгенография, диагностика, современные алгоритмы, модели.

Современная медицина сталкивается с необходимостью повышения точности и скорости диагностики, что особенно актуально в области рентгенографии. Традиционные методы анализа рентгеновских изображений часто требуют значительных временных затрат и могут быть подвержены человеческому фактору. Внедрение нейронных сетей в этот процесс открывает новые горизонты, позволяя автоматизировать и улучшить диагностику, однако с этим связаны и определенные вызовы.

Исследование заключается в анализе перспектив и вызовов, связанных с использованием нейронных сетей в рентгенографии. В частности, будет рассмотрено, как современные алгоритмы глубокого обучения могут изменить подход к диагностике, а также какие проблемы могут возникнуть на этом пути.

Ключевыми фигурами в исследовании являются исследователи в области искусственного интеллекта, разработчики программного обеспечения и медицинские работники, которые активно внедряют новые технологии в свою практику. Их взаимодействие и обмен опытом играют важную роль в успешной интеграции нейронных сетей в рентгенографию.

Актуальность обусловлена не только стремительным развитием технологий в России, но и глобальными тенденциями в здравоохранении, где искусственный интеллект становится неотъемлемой частью медицинской диагностики [1]. В условиях растущего объема медицинских данных и необходимости их быстрой обработки, нейронные сети могут значительно повысить эффективность работы врачей.

Среди множества алгоритмов глубокого обучения, применяемых в медицинской рентгенографии, особую популярность приобрели CNN. Эти алгоритмы отличаются высокой эффективностью в обработке изображений, что делает их незаменимыми для анализа рентгеновских снимков. Васильев и Шпопер отмечают, что «научно-техническая революция в XXI в. приобрела новые очертания в сфере цифровых технологий. В сфере программирования одним из достижений стали разработки в сфере искусственного интеллекта и робототехники» [2, с. 23]. Это подтверждается выдающимися результатами моделей ResNet и U-Net в сегментации и классификации патологий, таких как опухоли и воспалительные процессы. Их архитектуры специально разработаны для извлечения сложных признаков из изображений, что позволяет с высокой точностью выявлять даже минимальные отклонения от нормы.

Применение алгоритмов глубокого обучения, таких как CNN, в рентгенографии предоставляет значительные преимущества в медицинской диагностике. Эти технологии автоматизируют процесс анализа изображений, что снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором. Исследования демонстрируют, что такие алгоритмы достигают точности, сопоставимой с экспертами-радиологами, что особенно актуально при выявлении сложных заболеваний, таких как пневмония или рак легких. В некоторых случаях точность диагностики с использованием нейронных сетей превышает 90 %, что подчеркивает их потенциал в улучшении качества медицинской помощи. Вместе с тем, применение глубокого обучения в этой области можно считать, как экономически эффективным, так и экономящим время.

Эффективность диагностических методов в рентгенографии оценивается на основе ключевых критериев, таких как точность, чувствительность и специфичность. Точность, или accuracy, отражает общую правильность классификации и является важным показателем для оценки качества алгоритмов глубокого обучения. Исследования, проведённые в 2020 году и опубликованные в журнале Nature Medicine, продемонстрировали, что точность нейронных сетей в диагностике заболеваний на рентгеновских снимках может достигать 95–98 %. При этом чувствительность и специфичность характеризуют способность метода правильно идентифицировать наличие или отсутствие заболевания [12]. Для диагностики пневмонии нейронные сети также показывают высокие значения этих показателей, что подтверждает их эффективность.

Использование искусственного интеллекта способствует повышению точности и скорости диагностики различных заболеваний. Алгоритмы машинного обучения и нейронные сети способны анализировать массивы медицинских данных, выявлять скрытые паттерны и предсказывать возможные диагнозы с высокой степенью точности [9, с. 3]

Сравнение нейронных сетей с традиционными методами диагностики демонстрирует значительное превосходство первых в ряде аспектов. В статье рассматриваются современные подходы к применению технологий машинного обучения для анализа клинических данных, включая примеры алгоритмов, используемых в диагностике заболеваний, прогнозировании исходов лечения и персонализации медицинских услуг [5].

Исследование, опубликованное в The Lancet Digital Health в 2019 году, показало, что алгоритмы глубокого обучения превосходят традиционные методы в точности определения заболеваний, таких как туберкулёз, достигая точности до 97 %. Нейронные сети также характеризуются высокой скоростью обработки данных, что позволяет анализировать тысячи изображений за считанные минуты. Это значительно превышает возможности ручной интерпретации снимков, подтверждая, что нейронные сети не только более точны, но и более эффективны в условиях высокой нагрузки на медицинские учреждения.

Примером успешного применения нейронных сетей в медицинской диагностике является исследование, опубликованное в 2020 году в журнале Radiology, где алгоритмы глубокого обучения использовались для диагностики пневмонии на рентгеновских снимках. Результаты показали, что точность диагностики, достигнутая с помощью этих алгоритмов, была сопоставима с точностью экспертов-рентгенологов. Это достижение подчеркивает потенциал нейронных сетей в поддержке медицинских специалистов, особенно в условиях высокой нагрузки или ограниченного доступа к квалифицированным кадрам.

Методы глубокого обучения также активно применяются в кибербезопасности. В одной из работ рассматриваются вопросы выявления компьютерных атак в сетевом трафике, а также представлены результаты анализа релевантных исследований и обзоров в этой области [3]. Таким образом, нейронные сети демонстрируют свою универсальность и эффективность в различных сферах, включая медицину и информационные технологии.

Использование нейронных сетей в медицинской практике уже демонстрирует значительные улучшения в процессах диагностики. Например, отчет Всемирной организации здравоохранения за 2021 год показывает, что применение нейронных сетей для диагностики туберкулеза на рентгеновских снимках позволило сократить время обработки данных на 40 %. Это не только ускорило постановку диагноза, но и повысило эффективность медицинских учреждений, что особенно важно

в регионах с высокой заболеваемостью и ограниченными ресурсами. В 2021 году объем суммарных инвестиций в компании, предлагающие здравоохранению решения на основе искусственного интеллекта, составил 12,2 млрд долларов [4]. Растущие инвестиции в технологии искусственного интеллекта подчеркивают их значимость и потенциал для дальнейшего развития в области здравоохранения.

Современные нейронные сети обладают значительным потенциалом в обработке и анализе рентгенографических изображений, но их внедрение связано с рядом технических сложностей. Одной из основных проблем является высокая вычислительная сложность обучения моделей. Например, обучение модели ResNet-50, которая широко используется в медицинской диагностике, с использованием набора данных ImageNet занимает около 29 часов на одном GPU NVIDIA V100. Это подчеркивает необходимость наличия мощного оборудования, что может быть недоступно для многих медицинских учреждений.

На сегодняшний день развитие рентгенодиагностических аппаратов, таких как компьютерная томография (КТ) и системы С-дуги, идет рука об руку с технологией искусственного интеллекта (ИИ). На 2025 год интеграция ИИ в эти устройства достигла новых высот благодаря прогрессу в разработке специализированных программных алгоритмов и улучшению аппаратуры.

Современные аппараты КТ и С-дуги оснащаются встроенными системами ИИ, способствующими автоматизированному обнаружению и классификации патологий на ранних стадиях. Примеры включают использование сверточных нейронных сетей (CNN) для детекции опухолей, воспалений и других аномалий тканей. Такие технологии позволяют существенно снизить нагрузку на медицинский персонал, ускорить процесс постановки диагноза и повысить его точность. Особенно заметен прогресс в сегментации органов и тканей, где глубокие генеративные модели, например, U-Net, демонстрируют высокую производительность и надежность.

Кроме того, в 2025 году наблюдается тенденция к созданию мультицентровых баз данных, включающих анонимизированные изображения, полученные с различных типов устройств, что способствует обучению нейронных сетей на более разнообразных наборах данных и улучшает их обобщающую способность. В результате растет доверие врачей к таким системам, повышается уверенность в принятии решений на основании рекомендаций ИИ.

Кроме того, алгоритмы нейронных сетей требуют большого количества размеченных данных для обучения [16]. В случае медицинских изображений это осложняется ограниченным доступом к данным пациентов и необходимостью их ручной разметки специалистами. Важно отметить, что «нейросеть, располагая большим массивом различных КТ-томограмм легких, анализирует их и выдает заключение, есть ли патологические изменения и какие именно в конкретном образце» [7]. Эти ограничения создают значительные препятствия для масштабного применения нейронных сетей в рентгенографии.

Еще одной важной проблемой является интерпретируемость результатов, предоставляемых нейронными сетями. Эти алгоритмы часто рассматриваются как своего рода «черные ящики», поскольку их внутренние процессы сложно понять даже разработчикам. Исследование 2018 года продемонстрировало, что даже опытные специалисты не всегда могут объяснить, каким образом модель пришла к своему решению. Этот недостаток интерпретируемости особенно критичен в медицинской области, где точность и объяснимость имеют первостепенное значение. Как отмечают Курлюк, Ларченко, Давыдов и Курлянская [10], «анализ медицинских данных в кардиологии требует высокой точности и быстроты». Ручной ввод данных из отчетов и анализов может приводить к ошибкам и задержкам в диагностике, что снижает эффективность лечения. Невозможность объяснить механизм работы модели вызывает недостаток доверия к результатам анализа, что может привести к ошибкам в диагностике и, как следствие, к неблагоприятным последствиям для пациентов [17].

Использование нейронных сетей в медицинской диагностике вызывает важные этические вопросы, которые требуют тщательного анализа и обсуждения. Одной из ключевых проблем является вероятность дискриминации и предвзятости в результатах, что связано с систематическими ошибками в обучающих данных. Исследование, опубликованное в 2020 году в журнале Nature Medicine, указывает на то, что такие ошибки могут возникать из-за недостаточной репрезентативности данных, на которых обучаются модели. Это может привести к тому, что определённые группы пациентов будут получать менее точные или качественные диагнозы.

Кроме того, конфиденциальность медицинских данных представляет собой важный аспект. Исследование 2019 года показало, что 78 % пациентов обеспокоены вопросами защиты своих данных при использовании технологий искусственного интеллекта. Это поднимает необходимость создания надёжных механизмов защиты данных и обеспечения прозрачности в их обработке.

С другой стороны, в контексте конкретных приложений, таких как диагностика рака легкого, «в работе представлен обзор методов машинного обучения в диагностике рака легкого и особенностей интеллектуальных

систем, классифицирующих опухоли на изображениях, полученных на основе компьютерной томографии» [13]. Таким образом, этические аспекты, связанные с использованием нейронных сетей, требуют комплексного подхода, учитывающего как технические, так и социальные факторы.

Правовые аспекты использования технологий искусственного интеллекта в медицине представляют собой важную область, требующую внимания. В 2021 году Европейский Союз представил проект закона об искусственном интеллекте, который включает строгие требования к безопасности и прозрачности, особенно в медицинской сфере. Это подчеркивает необходимость регулирования и контроля за применением таких технологий для предотвращения потенциальных рисков. Несмотря на это, согласно отчету Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), лишь 12 % стран имеют четкие законы, регулирующие использование ИИ в здравоохранении [18]. Данная ситуация свидетельствует о необходимости международного сотрудничества и разработки унифицированных нормативных актов, которые обеспечат безопасное и этически обоснованное применение нейронных сетей в медицинской практике. Использование ИИ в телемедицине требует внимательного правового анализа для обеспечения баланса между инновационным развитием медицинских услуг и защитой прав пациентов [14].

Будущие исследования в области применения нейронных сетей в рентгенографии должны быть направлены на решение ключевых задач, таких как повышение объяснимости и интерпретируемости моделей искусственного интеллекта. Это необходимо для обеспечения доверия медицинских специалистов и пациентов к результатам, полученным с использованием этих технологий. Исследование, опубликованное в журнале 'Nature Medicine', демонстрирует, что нейронные сети могут достигать уровня точности, сопоставимого с экспертами-радиологами, что открывает новые перспективы для их использования в сложных клинических случаях. Тем не менее, для достижения этого требуется разработка методов, позволяющих врачам понимать и объяснять решения, принимаемые моделями. Важно учитывать, что «автономия пациента и право принимать разумные решения о медицинском вмешательстве принадлежат к основным этическим принципам» [8].

Для успешного внедрения нейронных сетей в клиническую практику необходимо учитывать несколько ключевых аспектов. Важным этапом является обучение медицинского персонала работе с новыми технологиями, что обеспечит их эффективное использование. Следует уделить внимание вопросам безопасности данных, поскольку медицинская информация требует надежной защиты. Кроме того, технологии должны быть адаптированы к различным клиническим условиям, чтобы их можно было применять в широком спектре медицинских учреждений. Применение нейронных сетей в медицине подтверждается множеством успешных кейсов, что свидетельствует о их потенциале для трансформации и улучшения медицинской практики.

Ярким примером этого является алгоритм, разработанный компанией Google Health, который продемонстрировал высокий уровень точности при анализе рентгеновских снимков грудной клетки. Это подчеркивает важность тестирования алгоритмов на реальных клинических данных, что является ключевым шагом для их интеграции в повседневную медицинскую практику.

В ходе исследования был проведен анализ текущих достижений в области применения нейронных сетей в рентгенографии. Установлено, что данные технологии обладают значительным потенциалом для повышения точности и скорости диагностики, что способствует снижению нагрузки на медицинский персонал. Однако выявлены и основные вызовы, включая технические ограничения, сложности интерпретации результатов и вопросы этического характера. Эти аспекты требуют особого внимания для успешного внедрения нейронных сетей в медицинскую практику.

Перспективы дальнейших исследований в данной области связаны с разработкой более интерпретируемых и надежных алгоритмов, способных адаптироваться к различным типам изображений и условиям диагностики. Также важным шагом является создание нормативной базы, регулирующей использование искусственного интеллекта в медицине, и обеспечение этической составляющей в обработке медицинских данных. Эти направления будут способствовать эффективному внедрению технологий глубокого обучения в рентгенографию, что, в свою очередь, позволит значительно улучшить качество медицинской помощи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ метаболического профиля человека с помощью специфических молекул-биомаркеров / О.А. Небритова, И.Л. Фуфурин, П.В. Бережанский [и др.] // Необратимые процессы в природе и технике: Сборник статей XIII Всероссийской конференции. В 2-х томах, Москва, 28–30 января 2025 года. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. — С. 168–171.
2. Васильев А.А., Шпопер Д. Искусственный интеллект: правовые аспекты // Известия АлтГУ. Юридические науки. — 2018. — № 6 (104). — С. 23–24. DOI 10.14258/izvasu (2018)6-03.
3. Гетьман А.И., Горюнов М.Н., Мацкевич А.Г., Рыболовлев Д.А., Никольская А.Г. Применение глубокого обучения для обнаружения компьютерных атак в сетевом трафике // Труды ИСП РАН. — 2023. — Т. 35, вып. 4. — С. 65–92. DOI: 10.15514/ISPRAS–2023–35(4)–3.
4. Гусев А.В., Шарова Д.Е. Этические проблемы развития технологий искусственного интеллекта в здравоохранении // Общественное здоровье. — 2023. — Т. 3, № 1. — С. 42–50. DOI: 10.21045/2782–1676-2023-3-1-42–50.
5. Зеневич В.В., Александрович Т.А., Василькова А.Н. Искусственный интеллект в здравоохранении // 2021. — Т. 2., вып.7. — С. 34.
6. Иванов А.С., Смирнова А.В. Технологии машинного обучения для анализа клинических данных: от теории к практике // Научный журнал Наука и мировоззрение. — 2022. — Т. 3. — вып. 4.
7. Ковалёв В.А. Диагноз ставит нейросеть // 2023. — Т. 5. — С. 12.
8. Кошечкин К.А., Хохлов А.Л. Этические проблемы внедрения искусственного интеллекта в здравоохранении // Медицинская этика. — 2024. — № 1. — С. 11–12. — DOI: 10.24075/medet.2024.006.
9. Кряжева Е.В., Десятков П.А. Применение искусственного интеллекта в медицинской сфере // Электронный научный журнал «Дневник науки». — 2024. — № 12. — [Электронный ресурс]. — URL: www.dnevniknauki.ru.
10. Курлюк Е.А., Ларченко Н.А., Давыдов М.В., Курлянская Е.К. Автоматизация обработки медицинских данных с использованием компьютерного зрения: подходы и перспективы внедрения в кардиологии // XIV Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника — 2024». — Минск, Беларусь. — 2024. — С. 254–255.
11. Кьяра Галлезе-Нобиле. Правовые аспекты использования искусственного интеллекта в телемедицине // Сборник тезисов выступлений по итогам мероприятий, проведенных проектной группы в рамках реализации фундаментального исследовательского проекта по теме: «Организационно-правовые аспекты внедрения ИИ и цифровых технологий в систему оказания медицинской помощи» на факультете права Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». — 2023, — вып. 2. — С. 11.
12. Марченко Д.В., Петрович Ю.Ю., Ефремов А.А. Успешные кейсы применения нейронных сетей в медицине // 60-я Юбилейная Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР. — Минск, 2024. — С. 108–109.
13. Мелдо А.А., Уткин Л.В. Обзор методов машинного обучения в диагностике рака легкого // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2018. — Выпуск 3. — С. 28–38. [Электронный ресурс]. — URL: https://www.mathnet.ru/iipr213.
14. Мещерякова А.М., Акопян Э.А., Слинин А.С. Искусственный интеллект в медицинской визуализации. Основные задачи и сценарии развития // Обзоры и дискуссии. — Москва: ООО «Платформа Третье Мнение», вып.5. — С. 98–99.
15. Омаров Б.С., Турсынова А.Т. Обзор алгоритмов машинного обучения для выявления инсульта // Инновационные технологии в науке и образовании. — XV Международная научно-практическая конференция. — 2023, — вып.1. — С. 27–28.
16. Применение методов машинного обучения для анализа инфракрасных спектров выдыхаемого человеком воздуха / И.Л. Фуфурин, П.В. Бережанский, И.С. Голяк [и др.] // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Двенадцатой Всероссийской конференции. В 2-х томах, Москва, 31 января — 03 2023 года. — Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2023. — С. 504–508.
17. Уролбой А.У., Мейрбек Б.У., Бобирбек Н.У., Саияра Б.Д. Искусственный интеллект в медицине // «Science and Education» Scientific Journal. — 2023. — Т. 4, № 5. — С. 772–773. — ISSN 2181–0842.
18. World Health Organization. (2023). Regulatory considerations on artificial intelligence for health. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/373421. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

© Голя Роман Дмитриевич (roma199810@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.14

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ

ALGORITHM FOR FORMING DATA STREAMS IN INFORMATION AND COMPUTING NETWORKS OF ENTERPRISES

M. Elizov

Summary. This article presents an algorithm for managing data flows in information and computing networks, aimed at increasing fault tolerance and optimizing routing. The developed method takes into account dynamic changes in the network and adapts data transmission routes, minimizing delays and reducing the load on the infrastructure. The algorithm is based on a modified routing mechanism using the DUAL algorithm, which ensures high adaptation speed and eliminates loops in the network topology.

Keywords: information and computing networks, routing, fault tolerance, DUAL algorithm, data flow optimization, availability factor, telecommunications, intelligent systems, dynamic transformation.

Елизов Михаил Юрьевич
старший инженер-программист,
ООО «Компания ДЭП», г. Москва
disass@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлен алгоритм управления потоками данных в информационно-вычислительных сетях, направленный на повышение отказоустойчивости и оптимизацию маршрутизации. Разработанный метод учитывает динамические изменения в сети и адаптирует маршруты передачи данных, минимизируя задержки и снижая нагрузку на инфраструктуру. В основе алгоритма лежит модифицированный механизм маршрутизации с применением алгоритма DUAL, обеспечивающий высокую скорость адаптации и исключение петель в топологии сети.

Ключевые слова: информационно-вычислительные сети, маршрутизация, отказоустойчивость, алгоритм DUAL, оптимизация потоков данных, коэффициент готовности, телекоммуникации, интеллектуальные системы, динамическое преобразование.

В настоящий момент информационно-вычислительные сети (ИВС) становятся критически важными компонентами функционирования сложных организационно-технических систем (СОТС) [1, 2]. Они обеспечивают постоянный обмен информацией, которая необходима для принятия решений, управления процессами и повышения общей эффективности работы. Однако неустойчивость каналов связи отдельных узлов часто приводят к снижению эффективности всей системы [3]. При иерархическом управлении это может стать причиной полного паралича сети при отказе даже одного узла (рис. 1). Узлы СОТС этой сети, не имеющие между собой прямого подчинения, могут быть связаны и использоваться как узлы-ретрансляторы для передачи данных вне своего сетевого контура.

Целью данной работы является разработка алгоритма, обеспечивающего минимизацию изменений коэффициента готовности при максимальном количестве одновременно вышедших из строя узлов инфраструктуры. Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- Анализ существующих методов маршрутизации в динамических сетях и их недостатков;
- Разработка математической модели для расчёта метрик маршрутов, включая коэффициент готовности, задержку передачи и загрузку каналов;
- Создании алгоритма, который обеспечит децентрализованное управление потоками данных и позволит минимизировать влияние отказов отдельных компонентов на функционирование системы в целом.;
- Оценка эффективности предложенного алгоритма на основе сравнительного анализа с традиционными методами маршрутизации.

Предлагаемый алгоритм отличается от существующих решений использованием единого каталога классификаторов информации при формировании подписок, а также изменённым способом определения соседства узлов в сети [4]. Это позволяет:

- Увеличить отказоустойчивость за счёт создания структурного резерва;
- Повысить оперативность и точность маршрутизации потоков данных в условиях нестабильности каналов связи.

Развитие методов управления потоками данных в информационных системах связано с совершенствованием сетевых технологий и протоколов маршрутизации [5]. На сегодняшний день большинство подходов основывается на централизованной или иерархической структуре управления. Эти методы, включая использо-

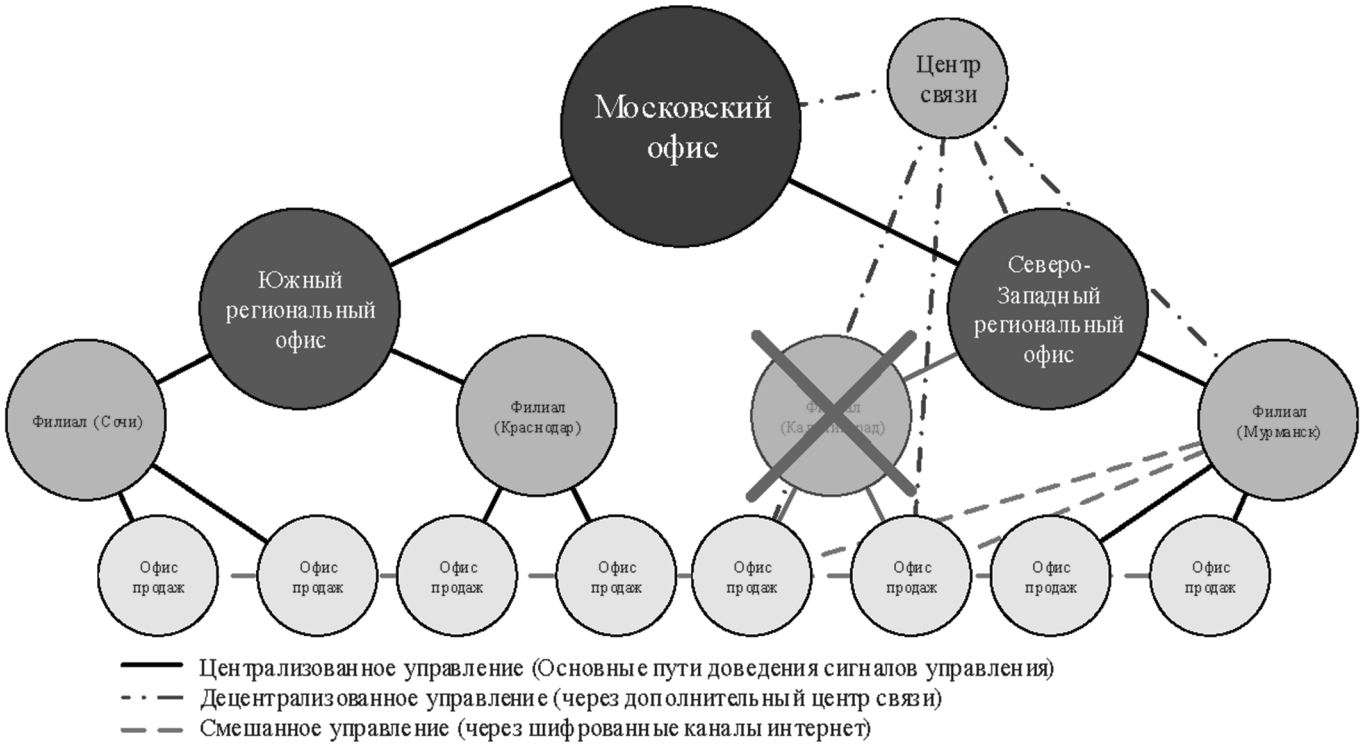


Рис. 1. Вариант формирования сетевой среды СОТС при нестабильности каналов связи промежуточных УС

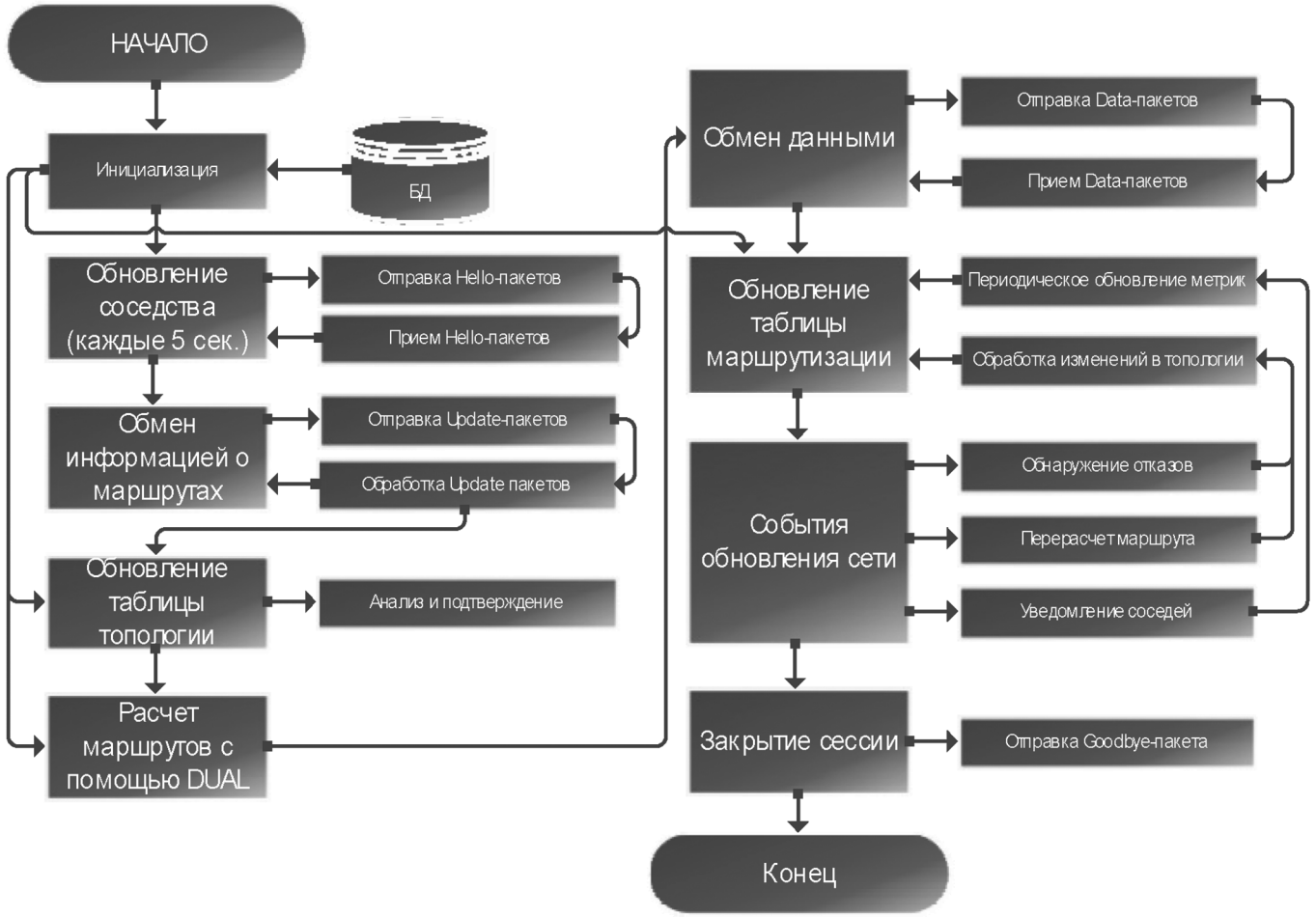


Рис. 2. Алгоритм формирования маршрутов (EIGRP)

вание протоколов, таких как OSPF (Open Shortest Path First) и RIP (Routing Information Protocol), демонстрируют ограниченные возможности по адаптации к динамически изменяющимся условиям сети.

Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP) выделяется среди других динамических протоколов маршрутизации благодаря использованию алгоритма DUAL (Diffusing Update Algorithm), который обеспечивает высокую скорость сходимости маршрутов и минимизирует вероятность возникновения петель [6]. EIGRP учитывает такие метрики, как пропускная способность, задержка, надёжность и загрузка канала, что делает его особенно эффективным для корпоративных сетей с высокой сложностью топологии (рис. 2) [7].

Современные исследования также рассматривают внедрение децентрализованных методов, среди которых выделяются подходы, основанные на технологии самоорганизующихся сетей (MANET) [8]. Однако данные решения часто оказываются сложными в реализации и требуют значительных вычислительных ресурсов.

Теоретическая значимость предлагаемого исследования заключается в разработке алгоритма, который сочетает принципы динамической маршрутизации с использованием единого каталога классификаторов информации [9]. Это позволяет расширить существующие теории в следующих аспектах:

- Повышение отказоустойчивости за счёт использования резервных каналов связи;
- Оптимизация маршрутов передачи данных путем минимизации задержек и дублирования информации;
- Применение механизмов интеграции разнородных информационных потоков в условиях нестабильных каналов связи.

Таким образом, исследование вносит вклад в развитие методов управления потоками данных и повышения эффективности функционирования информационно-вычислительных сетей предприятий.

Разработанный алгоритм дополняет существующий алгоритм EIGRP следующими этапами:

- Формирование таблицы классификаторов информации: на этом этапе создаётся единый каталог, который описывает типы данных, их приоритеты и параметры маршрутизации. Это обеспечивает стандартизацию обработки данных на уровне всей сети.
- Определение соседства узлов: состояние каналов связи между узлами анализируется в реальном времени. Для определения доступности и качества соединений используются показатели, такие как пропускная способность, задержка и надёжность. Узлы классифицируются как ближайшие соседи, если они удовлетворяют заданным метрикам качества соединения.
- Построение маршрутов: маршруты рассчитываются на основе информации о соседстве и с использованием алгоритма DUAL. При построении маршрутов учитываются как основные, так и резервные пути для обеспечения отказоустойчивости. Создаются таблицы маршрутизации, в которых для каждого узла указываются доступные маршруты, их метрики и состояние каналов связи.

При применении технологии DUAL для вычисления кратчайших маршрутов без петель, используются динамические метрики, такие как задержка, пропускная способность и надёжность.

Для расчёта метрики маршрута используется формула:

$$M = K_1 \cdot \text{Bandwidth} + K_2 \cdot \text{Delay} + \\ + K_3 \cdot \text{Reliability} + K_4 \cdot \text{Load},$$

где: K_1, K_2, K_3, K_4 — коэффициенты, учитывающие важность метрик (1 или 0, если метрика не учитывается).

Bandwidth — минимальная пропускная способность на пути.

Delay — суммарная задержка передачи данных.

Reliability — наименьший показатель надёжности на пути.

Load — наивысший показатель загрузки канала.

Для расчёта задержки пакетов в сети используется следующая формула:

$$D = \frac{B}{C - \lambda},$$

где: D — задержка;

B — объём передаваемых данных;

C — пропускная способность канала;

λ — интенсивность поступления пакетов.

Для определения размеров пакета используется формула:

$$P = H + \sum_{i=1}^{n} \left(F_i \cdot O_i \right),$$

где: H — размер заголовка.

n — количество полей в пакете.

F — размер объекта данных.

O — общее количество объектов.

Подобный подход позволяет минимизировать нагрузку на сеть и оптимизировать передачу данных.

Применение алгоритма было протестировано на корпоративной ИВС с тремя уровнями иерархии: централь-

ные узлы, региональные узлы и филиалы. Основная цель — повышение отказоустойчивости сети в условиях нестабильности каналов связи.

В одном из сценариев была смоделирована ситуация выхода из строя 20 % узлов филиальной сети. Благодаря предложенному алгоритму маршруты передачи данных были перестроены, что позволило избежать потери связи между центральным и региональным уровнями.

Таблица 1.

Коэффициенты готовности после выхода из строя 20 % ИВС

Уровень узла	Коэффициент готовности до внедрения	Коэффициент готовности после внедрения
Центральный	0.9996	0.9998
Региональный	0.9993	0.9995
Филиальный	0.9989	0.9992

Таблица 2.

Характеристики сети

Параметры сети	Значение до внедрения	Значение после внедрения
Средняя задержка	200 мс	120 мс
Пропускная способность	80 % загрузки	60 % загрузки

Анализ полученных результатов показал, что после внедрения алгоритма коэффициенты готовности увеличились на всех уровнях сети, что свидетельствует о повышении отказоустойчивости. Средняя задержка пакетов сократилась на 40 %, что значительно улучшило качество обслуживания в сети. Снижение загрузки каналов позволило обеспечить более равномерное распределение потоков данных.

В сравнении с традиционными иерархическими методами управления (на базе OSPF и RIP), предложенный алгоритм демонстрирует более высокую эффективность в условиях нестабильности каналов связи за счёт динамической адаптации маршрутов и интеграции резервных путей.

Основными преимуществами предложенного подхода являются:

- Высокая скорость адаптации маршрутов благодаря использованию алгоритма DUAL.
- Повышение отказоустойчивости сети за счёт интеграции резервных маршрутов и минимизации задержек.
- Снижение нагрузки на каналы связи благодаря оптимизации размеров пакетов и исключению дублирования данных.
- Универсальность алгоритма, позволяющая его применение в сетях с разной топологией и степенью сложности.

Возможные ограничения и направления для дальнейших исследований:

- Ограниченная производительность при высоком уровне динамичности сети.
- Необходимость дополнительной памяти для хранения таблиц маршрутизации и подписок.
- Перспективы интеграции алгоритма с существующими методами искусственного интеллекта для предсказания состояний сети и заблаговременного планирования маршрутов.

Предложенный алгоритм формирования потоков данных демонстрирует высокую эффективность в повышении отказоустойчивости и оптимизации маршрутизации в информационно-вычислительных сетях. Алгоритм может применяться в корпоративных сетях с высокой степенью иерархии, в распределённых системах управления и в промышленных IoT-сетях. В перспективе алгоритм может быть интегрирован в интеллектуальные системы управления потоками данных, основанные на машинном обучении, для автоматической оптимизации маршрутов в условиях изменяющейся нагрузки. Его внедрение позволяет улучшить качество обслуживания, сократить простои и обеспечить бесперебойную работу сети в условиях нестабильных каналов связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В.Ф., Галанкин А.В., Федер А.Л. Общая характеристика процесса автоматизированного управления сложными организационно-техническими системами специального назначения воздушно-космических сил. H&ES Research, VII, 6 (2015), 50–53.
2. Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: Учебник. — 2-е изд., перераб. и доп. Финансы и статистика, Москва, 2004.
3. Афонин И.Е., Петров С.В., Макаренко С.И. Переход к адаптивно-сетевой структуре системы управления воздушно-космической обороной, как один из основных путей повышения ее устойчивости. «Воздушно-космические силы. Теория и практика» | № 19 (2021).
4. Применение компьютерных технологий при создании комплекса аппаратно-программных имитаторов функционирования средств ВКО для отладки специального программного обеспечения АСУ // XXI Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы развития и применения средств противовоздушной обороны на современном этапе. Средства противовоздушной обороны России и других стран мира, их сравнительный анализ», 9 октября 2020 г. Секции 1–8: материалы конференции / Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны.

5. Башлыкова А.А., Козлов С.В., Макаренко С.И., Олейников А.Я., Фомин И.А. Подход к обеспечению интероперабельности в сетецентрических системах управления. Журнал радиоэлектроники, ISSN 1684–1719, N6 (2020).
6. Волков В.Ф., Галанкин А.В., Федер А.Л. Общая характеристика процесса автоматизированного управления сложными организационно-техническими системами специального назначения воздушно-космических сил // Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли, Vol. 7, No. 6, 2015. pp. 50–54.
7. Черныш А.Я., Попов В.В. Об эволюции теории и практики единого информационного пространства и первоочередных мерах по его развитию в интересах повышения эффективности управления национальной обороной Российской Федерации. Военная мысль, 9 (2019), 47–54.
8. Буренок В.М. Информационное обеспечение вооруженных сил. Приложение. Положение об органах информационного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации. Внутренние источники угрозы. Военная мысль, 2006, 28–31.
9. Легков К.Е., Оркин В.В. Основные направления развития единого информационного пространства Воздушно-космических сил в современных условиях. Военная мысль №8 (2020).

© Елизов Михаил Юрьевич (disass@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.17

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУР GAMEOBJECT И ECS ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТОЛПЫ ИЗ N АГЕНТОВ В UNITY

COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF GAMEOBJECT AND ECS ARCHITECTURES IN MODELING A CROWD OF N AGENTS IN UNITY

N. Ishchenko

Summary. The paper presents a comparative performance analysis of two approaches in Unity: the classical GameObject/MonoBehaviour architecture and the new Entity Component System (ECS). For validation, a crowd simulation based on the well-known Boids algorithm, widely used for modeling collective behavior, was implemented under both paradigms. Experiments were conducted on two hardware platforms: a PC (Intel Core i5-12400F, NVIDIA RTX 3070) and a MacBook Pro (Apple M4). For each implementation, performance metrics were gathered, including FPS, frame time, memory usage, and the number of draw calls. The collected data made it possible to analyze differences in scalability and efficiency between the architectures. The results demonstrated that ECS achieves significantly higher frame rates and stability as the number of agents increases, which confirms its efficiency for tasks requiring real-time performance and large-scale simulations.

Keywords: Unity, Data-Oriented Tech Stack, DOTS, GameObject, Entity Component System, parallel computing, performance, rendering, GPU instancing, optimization.

Ищенко Никита Николаевич
Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, г. Новочеркасск
rektorat@npi-tu.ru

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ производительности двух подходов в Unity: классической архитектуры GameObject (игровой объект в Unity)/MonoBehaviour и новой компонентно-сущностной системы (Entity Component System, ECS). Для проверки реализована симуляция толпы агентов на основе алгоритма «Boids», широко применяемого для моделирования коллективного поведения. Эксперименты проведены на двух аппаратных платформах: ПК (Intel Core i5-12400F, NVIDIA RTX 3070) и ноутбуке MacBook Pro (Apple M4). Для каждой реализации собирались метрики FPS, время кадра, использование памяти и количество вызовов отрисовки. Полученные данные позволяют проанализировать различия в масштабируемости и эффективности архитектур. Результаты показали, что ECS обеспечивает существенно более высокую кадровую частоту и стабильность работы при увеличении числа агентов, что подтверждает его эффективность для задач, требующих высокой производительности в условиях реального времени и масштабируемых симуляций.

Ключевые слова: Unity, Data-Oriented Tech Stack, DOTS, GameObject, Entity Component System, параллельные вычисления, производительность, рендеринг, GPU instancing, оптимизация.

Введение

Unity традиционно использует архитектуру GameObject/MonoBehaviour, которая удобна, но накладывает ограничения на производительность [10]. Традиционная объектно-ориентированная архитектура игровых движков имеет ограничения по масштабируемости [5, с. 228]. Технология DOTS (Data-Oriented Tech Stack — технологический стек, ориентированный на данные) и архитектура ECS призваны устранить эти проблемы: данные отделяются от логики, структуры оптимизируются для кэша, а вычисления параллелизируются с помощью модели параллельного выполнения задач Unity (Job System). Предыдущие исследования показывают, что такой подход значительно повышает эффективность при массовых вычислениях [11, с. 45]. В качестве объекта исследования выбран алгоритм Boids, так как он отражает реальные вычислительные нагрузки при большом числе агентов и поэтому хорошо подходит для демонстрации преимуществ ECS. Таким образом, статья соответствует направлению «информатика и инженерия программного обеспечения» в рамках ВАК, поскольку исследуются архитектуры программирования и их влияние на производительность. Настоящая работа направлена на экспериментальное сравнение двух подходов в идентичных условиях с целью определить, какой из них обеспечивает более высокую производительность.

Материалы и методы

Были реализованы две версии симуляции Boids: на GameObject/MonoBehaviour и на ECS/DOTS. Обе используют одинаковые правила поведения (separation, alignment, cohesion), единые параметры агентов и условия окружения (ограниченный объём пространства с wrap-границей (режим обёртывания границ)). В GameObject-версии каждый агент представлен объ-

ектом с MonoBehaviour, выполняющим перебор всех соседей ($O(N^2)$) на основном потоке. В ECS-версии каждый агент является сущностью с компонентами данных, а вычисления выполняются в параллельных задачах (Jobs) с использованием Burst-компиляции. Для визуализации в ECS применялся GPU instancing.

Производительность оценивалась с помощью AutoSceneProfiler, собирающего статистику FPS, времени кадра, использования памяти и draw calls за 30 секунд работы сцены. Тестировались наборы из 100, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 и 10000 агентов. Эксперименты проводились на ПК с RTX 3070 и MacBook Pro с Apple M4 при отключённом VSync и одинаковых настройках качества.

Таким образом, методика задаёт условия для дальнейшего сопоставления с существующими исследованиями и позволяет корректно оценить их результаты.

Литературный обзор

Алгоритм Boids (К. Рейнольдс, 1987) является классическим методом имитации коллективного поведения [1, с. 25]. Агентные модели активно применяются в навигации и анализе толп [2, с. 42–45; 3, с. 7280–7282], а также при анализе поведения толп в эвакуационных сценариях [4, с. 487–490]. В отечественной литературе многоагентные системы подробно рассматриваются в работе Принева и соавт., где отмечаются современные подходы к моделированию и проектированию [12, с. 170]. Кроме того, актуальные материалы о DOTS доступны в официальной документации Unity [9]. Традиционная объектно-ориентированная архитектура игровых движков описана в ряде работ [5, с. 228], но её масштабируемость ограничена. Современные исследования указывают на преимущества дата-ориентированных методов и ECS [6, с. 233; 7, с. 45; 8, с. 65]. В российском контексте также появляется всё больше исследований по ECS: например, работа Докучаева и соавт. демонстрирует рост производительности и гибкости при использовании данного подхода [13, с. 60]. Для обоснования также используются материалы Unity Technologies о DOTS, исследования по параллельным вычислениям в игровых движках [10], и практические обзоры производительности ECS в массовых симуляциях [11, с. 47]. Кроме того, в исследовании Скрябиной приведён сравнительный анализ методов оптимизации, включая параллельное выполнение задач и асинхронную загрузку, что также подтверждает значимость подобных подходов для игровой индустрии [14, с. 3]. При этом прямых сравнений GameObject и ECS для моделирования больших толп немного, что определяет актуальность настоящего исследования. Таким образом, выявленный пробел в литературе напрямую определяет задачи данной работы — проведение экспериментального сравнения двух подходов в идентичных условиях.

Результаты

На обеих платформах выявлены одинаковые закономерности (см. табл. 1 и табл. 2). При числе агентов до 500 разница между подходами невелика. Однако далее GameObject стремительно теряет производительность: при 2000 объектах FPS падает до однозначных значений, а при 10000 — практически до нуля. При этом время кадра возрастает до сотен и тысяч миллисекунд. В то же время ECS демонстрирует плавное снижение FPS и сохраняет интерактивность: около 50–65 FPS на MacBook Pro и более 50 FPS на RTX 3070 при 10000 агентов. Среднее время кадра у ECS даже при максимальной нагрузке не превышает 20 мс, что соответствует требованиям реального времени. Кроме того, ECS удерживает стабильный уровень потребления памяти и GC Alloc, а число draw calls остаётся на уровне десятков, тогда как у GameObject оно растёт до десятков тысяч.

Обсуждение результатов

Классическая архитектура GameObject упирается в главный поток: именно CPU становится узким местом уже при нескольких сотнях агентов [10]. Из-за отсутствия параллелизма и высокой стоимости управления объектами время обработки резко возрастает, а FPS падает. В реализации ECS нагрузка распределяется между ядрами за счёт Jobs и Burst-компиляции, что позволяет обрабатывать сотни тысяч обновлений в секунду [11, с. 46]. Память в DOTS расходуется более предсказуемо: из-за предварительного резервирования объём стабилен [13, с. 61], тогда как у GameObject он растёт вместе с числом агентов. По части рендеринга ECS использует GPU instancing, благодаря чему количество draw calls не зависит от N [5, с. 230], в отличие от GameObject, где каждая сущность генерирует отдельный вызов отрисовки. Платформенные различия проявились в том, что на MacBook Pro (M4) GameObject дольше сохраняет работоспособность за счёт более оптимизированного CPU [12, с. 175], но при больших N преимущество ECS становится очевидным и на Mac, и на ПК. В целом ECS продемонстрировал лучшую масштабируемость и устойчивость по всем ключевым метрикам [14, с. 4].

Использование CPU в классическом подходе оказалось узким местом: основное время тратится на главный поток, в то время как ECS распределяет нагрузку между ядрами [7, с. 47]. Пропускная способность ECS достигала сотен тысяч обновлений агентов в секунду, что в десятки и сотни раз выше, чем у GameObject [8, с. 68]. Память в DOTS используется более эффективно при больших N: начальные затраты выше из-за резервирования, но рост потребления ниже [13, с. 61]. Сборщик мусора в ECS практически не задействован, тогда как у GameObject объём аллокаций растёт с увеличением N [14, с. 3]. По части графики ECS благодаря instancing требует на порядки

Таблица 1.

Результаты измерений производительности симуляции поведения агентов (Apple MacBook Pro; чип M4; 16 ГБ ОЗУ; macOS; разрешение экрана 3024×1964; VSync отключён)

Метод реализации	Количество агентов, N	Средний FPS	Минимальный FPS	Время кадра, мс	Используемая RAM, МБ	GC Alloc, КБ/кадр	Количество draw calls, шт.
GameObject	100	1012,986	222,367	1,09	261,911	1,377	127,039
GameObject	500	79,58	73,019	12,606	262,607	1,34	671,677
GameObject	1000	20,316	18,601	49,401	264,207	1,402	1261,883
GameObject	2000	5,561	5,238	179,981	266,546	1,604	2472,677
GameObject	4000	1,454	1,363	688,702	271,642	2,585	5019,455
GameObject	6000	0,654	0,633	1529,876	276,304	4,071	8023,85
GameObject	10000	0,243	0,241	4123,66	286,404	8,368	12403,625
DOTS	100	1057,685	478,581	1,066	301,029	1,375	23,999
DOTS	500	1043,104	461,114	1,116	301,302	1,376	23,999
DOTS	1000	916,818	437,453	1,275	301,452	1,384	23,999
DOTS	2000	668,092	376,383	1,559	302,805	1,401	23,999
DOTS	4000	267,833	175,1	3,848	303,299	1,411	24
DOTS	6000	147,405	109,195	6,946	304,646	1,382	25
DOTS	10000	65,778	53,765	15,37	307,193	1,345	26,345

Таблица 2.

Результаты измерений производительности симуляции (ПК: Intel Core i5-12400F; NVIDIA GeForce RTX 3070; 16 ГБ ОЗУ; Windows 11; разрешение 2560×1080; VSync отключён)

Метод реализации	Количество агентов, N	Средний FPS	Минимальный FPS	Время кадра, мс	Используемая RAM, МБ	GC Alloc, КБ/кадр	Количество draw calls, шт.
GameObject	100	810,625	452,407	1,254	161,299	0,739	142,781
GameObject	500	69,269	56,307	14,532	162,574	0,719	576,128
GameObject	1000	18,791	16,663	53,379	164,507	0,712	1276,322
GameObject	2000	4,957	4,562	201,88	168,28	0,671	2308,638
GameObject	4000	1,293	1,201	774,418	173,725	0,615	4801,744
GameObject	6000	0,586	0,562	1708,763	178,118	0,667	6897,667
GameObject	10000	0,211	0,209	4733,688	187,009	0	14354,857
DOTS	100	1686,491	1271,655	0,596	203,892	0,756	22,996
DOTS	500	1632,921	1270,952	0,615	204,138	0,742	23,994
DOTS	1000	1422,447	892,926	0,717	204,34	0,724	27,206
DOTS	2000	805,312	406,828	1,31	205,81	0,721	31,357
DOTS	4000	244,231	135,066	4,346	206,259	0,723	44,149
DOTS	6000	127,231	75,404	8,336	207,466	0,722	51,975
DOTS	10000	51,642	35,013	20,194	209,302	0,721	73,893

меньше draw calls (табл. 1–2), разгружая CPU и перенося работу на GPU.

В совокупности ECS демонстрирует лучшее масштабирование, стабильность и эффективность ресурсов по всем ключевым метрикам. Исходный код реализованных сценариев (GameObject и ECS) доступен в GitHub-репозитории: https://github.com/DragonAirDragon/ScientificPaper (дата обращения: 01.09.2025).

Заключение

Данная работа была направлена на проведение экспериментального сравнения двух подходов в Unity — классического GameObject/MonoBehaviour и архитектуры ECS/DOTS — в идентичных условиях моделирования толпы агентов. Исследование подтвердило значительное превосходство ECS при увеличении числа агентов: начиная примерно с тысячи объектов, ECS обеспечивает кратный прирост по FPS и стабильности. Преимущества достигаются за счет параллелизма, эффективного хранения данных и оптимизации рендеринга. Эти результаты получены на двух различных аппаратных платформах (ПК и Mac), что подтверждает универсальность подхода. Научная новизна исследования заключается в том, что впервые проведен сравнительный эксперимент по применению ECS и классического подхода на примере алгоритма Boids с реальными измерениями производительности на современном оборудовании.

Таким образом, поставленная цель — определить, какой из подходов обеспечивает более высокую производительность, — достигнута. ECS рекомендуется для задач, связанных с симуляцией большого числа объектов в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рейнольдс К.W. Стаи, стада и школы: распределённая модель поведения // SIGGRAPH'87 (Computer Graphics). — 1987. — Т. 21, № 4. — С. 25–34. URL: https://www.red3d.com/cwr/papers/1987/SIGGRAPH87.pdf (дата обращения: 04.09.2025).
2. Эпштейн Дж. М., Акселл Р.Л. Создание искусственных обществ: социальная наука «снизу вверх». — Кембридж, Массачусетс: MIT Press, 1996. — 243 с.
3. Бонабо Э. Агентное моделирование: методы и техники для имитации человеческих систем // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. — 2002. — Т. 99, Suppl. 3. — С. 7280–7287.
4. Хельбинг Д., Фаркаш И., Вичек Т. Имитация динамических особенностей паники при эвакуации // Nature. — 2000. — Т. 407. — С. 487–490.
5. Асадуззаман А., Ли Х.Ю. GPU-вычисления для повышения производительности игровых движков // Journal of Engineering and Technological Sciences. — 2014. — Т. 46, № 2. — С. 226–243.
6. Сюй Чж. Параллельные технологии и развитие в игровой индустрии // Data Analysis and Machine Learning (DAML). — Сучжоу, 2024. — С. 232–238.
7. Холл Д.М. Проектирование игрового движка на ECS. — ВКР (B.S. project), Калифорнийский политехнический университет, Сан-Луис-Обиспо, 2014. — 65 с.
8. Харрис С.М. Реализация и анализ архитектуры Entity Component System. — Магистерская диссертация, Калифорнийский политехнический университет, Сан-Луис-Обиспо, 2022. — 82 с.
9. Unity. Entities package documentation [Электронный ресурс]. — 2024. URL: https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.entities@0.17/manual/index.html (дата обращения: 01.09.2025).
10. Unity. ECS (Entity Component System) for Unity [Электронный ресурс]. — 2024. URL: https://unity.com/ecs (дата обращения: 06.09.2025).
11. Боруфка Р. Набор тестов производительности для Unity DOTS. — Диссертация, Карлов университет, Прага, 2023. — 102 с. URL: https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/116800 (дата обращения: 02.09.2025).
12. Принев М.А., Леденева Т.М., Гаршина В.В. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию (Часть 2) // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2024. — № 4. — С. 167–190. URL: https://journals.vsu.ru/sait/article/view/12690 (дата обращения: 05.09.2025).
13. Докучаев В.А., Маклачкова В.В., Удалов И.Д. Применение Entity Component System при создании игр // Экономика и качество систем связи. — 2025. — № 1. — С. 57–66. URL: https://journal-ekss.ru/wp-content/uploads/2025/02/57-66.pdf (дата обращения: 05.09.2025).
14. Скрябина С.М. Сравнительный анализ различных методов оптимизации и их влияние на качество игрового процесса // Вестник науки. — 2024. — № 3. — С. 1–8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-razlichnyh-metodov-optimizatsii-i-ih-vliyanie-na-kachestvo-igrovogo-protsessa (дата обращения: 05.09.2025).

© Ищенко Никита Николаевич (rektorat@npi-tu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.19

МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ АУДИТА СМАРТ-КОНТРАКТОВ В СЕТИ ETHEREUM

METHODS FOR AUTOMATING THE AUDIT OF SMART CONTRACTS ON THE ETHEREUM NETWORK

A. Kleimenov

Summary. This work is dedicated to the systematic analysis and development of methods for the automated auditing of smart contracts within the Ethereum blockchain network. The study involved an analysis of key vulnerabilities inherent in smart contract code and systematized the limitations of traditional, manual auditing methods in the face of exponential growth in the complexity and number of decentralized applications. A multi-level classification of automated methods, encompassing static analysis, dynamic analysis, and formal verification, is proposed and substantiated. The developed auditing system, based on the principles of systematic analysis and integrating state-of-the-art tools, significantly enhances the efficiency, reliability, and scalability of the vulnerability detection process. Particular attention is paid to the practical integration of these methods into the full audit lifecycle, aligning with the professional standards employed by leading auditing firms for risk assessment. The research findings have practical significance for enhancing the security of decentralized financial systems and mitigating risks associated with the operation of smart contracts.

Keywords: smart contracts, Solidity, EVM, Ethereum, audit, automation, static analysis, dynamic analysis, formal verification, security, system analysis.

Клеймёнов Антон Дмитриевич
Аспирант, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации
Antonkl22@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена системному анализу и разработке методов автоматизированного аудита смарт-контрактов в блокчейн сети Ethereum. В рамках исследования проведен анализ ключевых уязвимостей, присущих программному коду смарт-контрактов, и систематизированы ограничения традиционных, ручных методов аудита в условиях экспоненциального роста сложности и количества децентрализованных приложений. Предложена и обоснована многоуровневая классификация автоматизированных методов, включающая статический, динамический анализ и формальную верификацию. Разработанная система аудита, базирующаяся на принципах системного анализа и интегрирующая передовые инструменты, позволяет существенно повысить эффективность, надежность и масштабируемость процесса выявления уязвимостей. Особое внимание уделено практической интеграции данных методов в полный жизненный цикл аудита, что соответствует профессиональным стандартам, применяемым в ведущих аудиторских компаниях при оценке рисков. Результаты исследования имеют практическое значение для повышения безопасности децентрализованных финансовых систем и минимизации рисков, связанных с эксплуатацией смарт-контрактов.

Ключевые слова: смарт-контракты, Solidity, EVM, Ethereum, аудит, автоматизация, статический анализ, динамический анализ, формальная верификация, безопасность, системный анализ.

Системный анализ и проблематика аудита смарт-контрактов

Эволюция и системные риски смарт-контрактов

Технология блокчейн и платформа Ethereum, произвели революцию в области децентрализованных приложений и финансовых систем. Смарт-контракты, как самоисполняющиеся компьютерные программы, стали краеугольным камнем этой парадигмы, автоматизируя выполнение условий соглашений без необходимости в посредниках, полагаясь только на код. С момента их появления в 2015 году смарт-контракты перешли от простых протоколов обмена токенами к сложным, многокомпонентным системам, управляющим миллиардами долларов в активах, формируя основу для экосистемы децентрализованных финансов (DeFi) [1, 2]. В 2025 году объём рынка смарт-контрактов в сети Ethereum составил более 2 млрд долларов. По прогнозам канадской консалтинговой компании «Precedence Research», при существующей динамике развития, к 2034 году рынок смарт-контрактов вырастет до 815 млрд долларов, что говорит о потенциально крупном развитии этого направления в будущем [3].

По мере увеличения сложности и стоимости заключаемых в них активов, они всё чаще становятся объектом атак и мошеннических действий со стороны злоумышленников. Проблема заключается в неизменяемости кода после его размещения в блокчейне: любая, даже незначительная ошибка, допущенная на этапе разработки, становится постоянным источником риска, а любая специально заложенная уязвимость остаётся в нём навсегда. Хотя технология блокчейн и позволяет увидеть весь код смарт-контракта (см. рисунок 1), понять его достаточно сложно среднестатистическому человеку, а оценить безопасность практически (без необходимых знаний и автоматизированных проверок) невозможно.

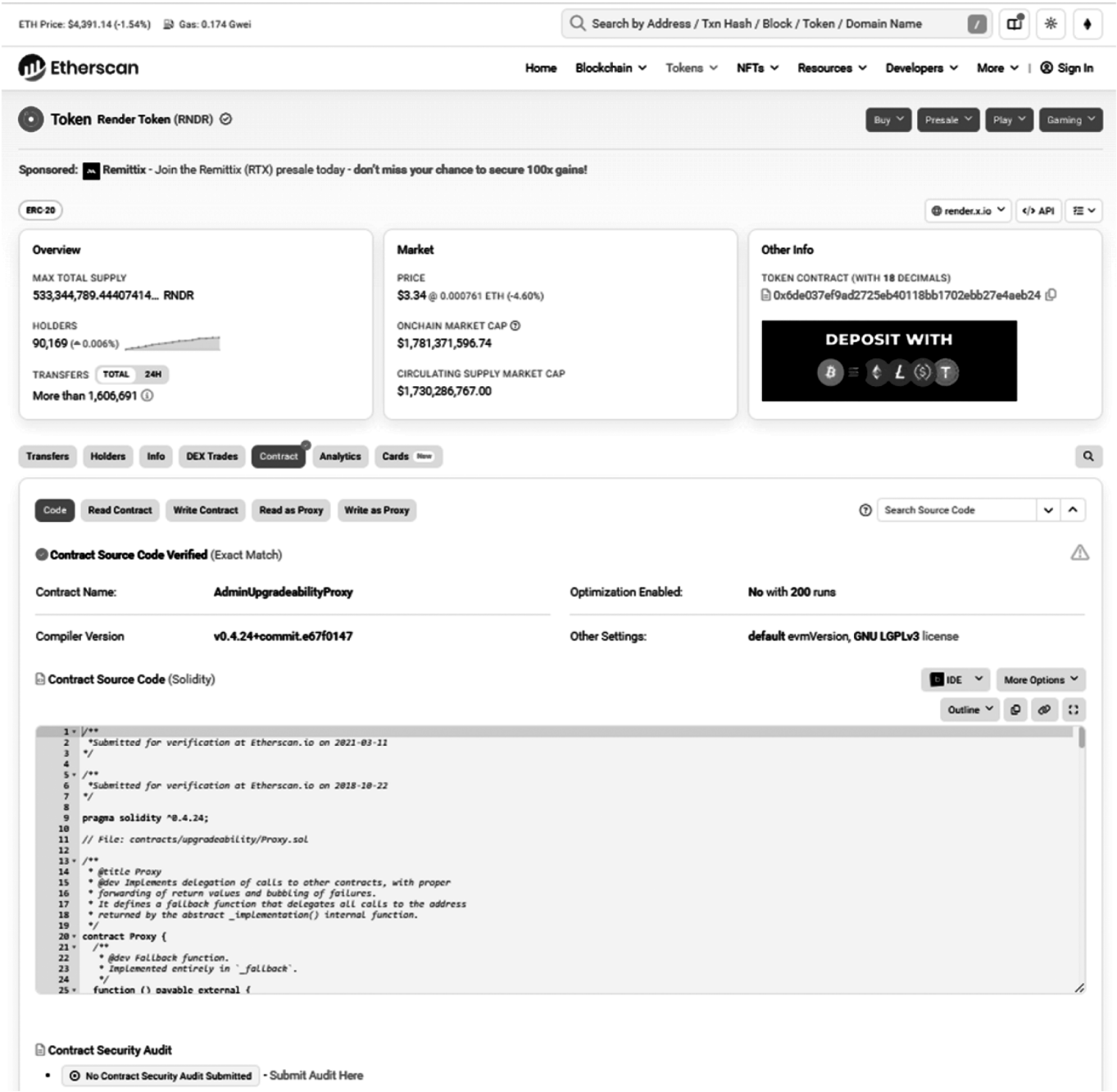


Рис. 1. Код смарт-контракта на сайте Etherscan.io

Ограничения классического аудита и необходимость автоматизации

Классический аудит смарт-контрактов, основанный на ручном анализе кода экспертом-аудитором, имеет ряд ограничений. Он является трудоемким, требует высокой квалификации и глубоких знаний не только языков программирования смарт-контрактов (Solidity или Vyper), но и особенностей виртуальной машины Ethereum (EVM — Ethereum Virtual Machine). Человеческий фактор часто приводит к ошибкам, особенно при анализе большого количества кода, что делает ручной аудит неэффективным и не масштабируемым. В условиях, когда ежедневно развертываются сотни новых контрактов, такой подход не способен обеспечить требуемый уровень покрытия. Более того, ручной аудит не может эффективно выявить сложные зависимости между смарт-контрактами или неочевидные уязвимости, которые проявляются только в определенных последовательностях транзакций.

Именно эти системные проблемы инициируют переход к автоматизации. Автоматизированные методы аудита позволяют проводить первичный анализ кода в масштабе, выявлять типовые уязвимости с высокой скоростью и точностью, а также формализовать про-

цесс проверки. Цель автоматизации — не заменить человеческого аудитора, а предоставить ему мощный инструментарий для фокусировки на наиболее сложных и критических аспектах безопасности, таких как анализ бизнес-логики, проверка архитектурных решений и оценка уникальных рисков, которые не поддаются автоматическому выявлению. Применение автоматизированных инструментов позволяет сократить время аудита, снизить его стоимость и повысить его надежность.

Цели и задачи исследования

Настоящее исследование ставит своей целью разработку и обоснование системы проведения автоматизированного аудита смарт-контрактов, которая позволит нивелировать риски, присущие ручному анализу, и значительно повысить общий уровень безопасности децентрализованных приложений.

Для решения задачи необходимо:

— Провести детальный системный анализ и классификацию уязвимостей смарт-контрактов Ethereum.
— Систематизировать существующие методы автоматизированного анализа: статический, динамический, формальную верификацию и оценить их сильные и слабые стороны.
— Разработать поэтапную методологию, интегрирующую различные автоматизированные методы в единый, последовательный процесс аудита.
— Оценить эффективность предложенной методологии на основе анализа реальных кейсов и сравнения с традиционными подходами.
— Сформулировать практические рекомендации для аудиторских компаний и разработчиков по внедрению автоматизированных процессов.

Системная классификация уязвимостей смарт-контрактов Ethereum

Для эффективного аудита, как ручного, так и автоматизированного, необходимо иметь классификацию угроз. Ввиду опыта разработки смарт-контрактов на языке Solidity, автором предлагается классификация уязвимостей, написанных на этом языке. Представленная ниже классификация основана на результатах анализа более чем 100 аудиторских отчетов (в том числе открытые отчёты крупнейшего аудитора Certik до 2023 года включительно) и выявленных угрозах самостоятельно [3].

Уязвимости, связанные с особенностями EVM

Эти уязвимости проистекают из-за специфики работы виртуальной машины Ethereum и являются одними из наиболее распространенных и критических [4].

Reentrancy (Повторный вход). Это одна из самых известных уязвимостей, использованная в атаке на The DAO. Она возникает, когда внешний вызов (например, call.value ()) делается к другому контракту, который затем рекурсивно вызывает исходный контракт, не дожидаясь, пока состояние последнего будет обновлено. Например, злоумышленник может многократно вызывать функцию вывода средств, пока баланс на контракте еще не обнулился. Современные инструменты автоматизации могут обнаруживать потенциальные reentrancy путем анализа графа вызовов [5].

Integer Overflow/Underflow (Переполнение/недополнение целых чисел). Эта уязвимость возникает, когда результат арифметической операции выходит за пределы диапазона, поддерживаемого типом данных. В Solidity, например, uint256 может хранить значения от 0 до 2256–1. Если к 2256–1 прибавить 1, произойдет переполнение, и результат станет 0. Аналогично, вычитание 1 из 0 приведет к недополнению и получению 2256–1. Это может быть использовано для манипуляции балансами, ценами или правами доступа. Эта уязвимость была широко распространена в более старых версиях Solidity (до версии 0.8.0, в которой внедрили автоматическую проверку [6]) однако она все еще может возникать в более сложных сценариях.

Timestamp Dependency (Зависимость от метки времени). Использование block.timestamp или block.number для выполнения критически важных операций, таких как распределение наград или случайная генерация, является небезопасным, поскольку могут незначительно манипулировать меткой времени в своих интересах. Злоумышленник может использовать это для предсказания исхода или для получения преимущества в азартных играх на блокчейне.

Gas Limit and Loops (Лимит газа и циклы). Транзакции в Ethereum ограничены лимитом газа. Если в контракте есть циклы с неопределенным числом итераций, существует риск, что транзакция исчерпает газ, не завершив свою работу. Это может привести к DoS-атакам (отказ в обслуживании) или «заморозке» контракта.

Уязвимости логики и бизнес-процессов

Эти уязвимости не связаны напрямую с особенностями EVM, а скорее являются следствием ошибок в проектировании бизнес-логики контракта.

Access Control (Контроль доступа). Проблема возникает, когда критически важные функции контракта недостаточно защищены. Классический пример — функция withdrawAllFunds(), которая позволяет вывести все средства, но не проверяет, имеет ли отправитель транзакции (msg.sender) на это право. В таком случае любой поль-

зователь может ею воспользоваться. Эта уязвимость, по сути, нарушает базовый принцип информационной безопасности — принцип наименьших привилегий, и к сожалению, до сих пор встречается очень часто.

Front-running (Опережение). Эта атака возможна из-за прозрачности блокчейна. Злоумышленник видит выгодную, но ещё не исполненную транзакцию в мемпуле (очереди транзакций) и «подрезает» её. Для этого он отправляет идентичную транзакцию, но предлагает майнерам более высокую комиссию (gas price), чтобы его версия была обработана первой. Такая тактика особенно эффективна против децентрализованных бирж (DEX) и смарт-контрактов аукционов.

Logic Errors (Ошибки логики). Это обширная категория уязвимостей, связанная не с безопасностью доступа, а с внутренней flawed логикой работы контракта. Сюда входят ошибки в математических вычислениях, некорректное изменение внутренних состояний контракта, неверная реализация механизмов мультисигнатур или любые другие баги, которые искажают изначальный замысел разработчика и ведут к непредсказуемому поведению системы.

Статический анализ как фундамент автоматизации аудита

Теоретические основы статического анализа

Статический анализ — это процесс исследования программного кода без его фактического выполнения. В контексте смарт-контрактов он направлен на выявление потенциальных уязвимостей, ошибок и нарушений стандартов кодирования на этапе разработки, до развертывания контракта в блокчейн. Статический анализ является первой и самой эффективной «линией обороны», так как позволяет обнаружить большинство типовых проблем с высокой скоростью и без дополнительных затрат на газ или развертывание тестовой сети. Ключевые методы, используемые в статическом анализе смарт-контрактов:

Анализ синтаксического дерева (AST). Это древовидное представление структуры кода, которое позволяет анализировать его семантику. Инструменты парсят исходный код в AST и затем обходят его, обнаруживая определенные шаблоны, которые могут указывать на уязвимость. Например, поиск call.value() без соответствующей проверки может свидетельствовать о потенциальной уязвимости reentrancy.

Анализ потока управления (Control Flow Graph, CFG). CFG представляет собой граф, где узлы — это базовые блоки кода, а ребра — возможные пути исполнения. Анализируя CFG, можно обнаружить недостижимый код, бесконечные циклы или сложные пути, которые могут скрывать логические ошибки.

Анализ потока данных (Data Flow Analysis, DFA). DFA отслеживает, как данные перемещаются и изменяются в процессе выполнения программы. В контексте аудита это позволяет выявить неинициализированные переменные, некорректное использование данных или утечку конфиденциальной информации.

Обзор и сравнительный анализ инструментария

На рынке существует широкий спектр инструментов для статического анализа, каждый из которых имеет свои особенности и специализацию. Ниже представлен обзор наиболее распространенных.

Статический анализ — это краеугольный камень автоматизированного аудита, но он не лишен недостатков. Он может давать ложные срабатывания (false positives), поскольку не учитывает контекст выполнения кода и реальные входные данные. Кроме того, статический анализ не может выявить уязвимости, которые зависят от взаимодействия с внешними контрактами или внешними событиями, такими как цена газа или динамическое поведение оракулов. Эти ограничения обуславливают необходимость в применении более продвинутых методов.

Slither — один из самых популярных и мощных инструментов [6]. Slither написан на Python и использует анализ потока данных для выявления широкого спектра уязвимостей, включая reentrancy, проблемы с контролем доступа, небезопасные call() и другие [7]. Slither также предоставляет возможность написания кастомных детекторов, что делает его гибким инструментом для выявления специфических уязвимостей. В моей практике аудитора Slither является обязательным инструментом на первом этапе проверки, позволяя быстро получить список потенциальных рисков для дальнейшей верификации.

Mythril — инструмент, сочетающий статический и символический анализ [8, 9]. Он может анализировать байт-код контракта, что позволяет ему находить уязвимости даже при отсутствии исходного кода. Mythril хорошо подходит для обнаружения integer overflow/underflow, reentrancy и других низкоуровневых проблем.

Динамический анализ и формальная верификация: преодоление ограничений

Динамический анализ — это процесс исследования кода во время его исполнения. В контексте смарт-контрактов это означает развертывание контракта в тестовой среде и подачу на него различных транзакций для наблюдения за его поведением. Динамический

анализ способен выявить уязвимости, которые не могут быть найдены статическими анализаторами, так как он работает с реальными данными и учитывает контекст выполнения.

Ключевые методы динамического анализа:

— Fuzzing (Фаззинг). Этот метод заключается в подаче на вход контракта большого количества случайных или полу случайных данных (входящих транзакций) с целью вызвать непредвиденное поведение или сбой. Фаззинг эффективно находит ошибки, которые проявляются только при определенных комбинациях входных параметров.
— Symbolic Execution (Символьное исполнение). Этот более сложный метод анализирует выполнение программы с символическими (неконкретными) значениями входных данных. Вместо выполнения одной ветки кода, символьное исполнение строит дерево всех возможных путей выполнения. Это позволяет находить уязвимости, которые требуют очень специфических условий для срабатывания.

Обзор инструментов динамического анализа:

— Echidna. Инструмент, разработанный компанией Trail of Bits. Echidna — это фаззер, который работает с Solidity-контрактами. Он позволяет аудитору писать «свойства» — инварианты, которые должны всегда оставаться истинными (например, «баланс контракта никогда не должен быть отрицательным»), и затем ищет последовательность транзакций, которая нарушит это свойство.
— Manticore. Фреймворк для символьного исполнения, который анализирует байт-код EVM. Manticore может автоматически находить пути выполнения, которые приводят к критическим состояниям, таким как reentrancy, integer overflow/underflow или несанкционированный доступ. Его основное ограничение — это проблема «взрыва путей» (path explosion), когда количество возможных путей становится экспоненциально большим для сложных контрактов.

Формальная верификация: математическая строгость

Формальная верификация — это наиболее строгий метод анализа, который использует математические методы для доказательства корректности программы. Вместо поиска ошибок, формальная верификация доказывает их отсутствие, основываясь на спецификациях и свойствах, которые должен удовлетворять контракт. Она идеально подходит для аудита критически важных компонентов, таких как протоколы управления активами или логика токенов, где даже одна ошибка может привести к катастрофическим потерям.

S-LVM (векторизация и верификация). Это специализированный метод для верификации смарт-контрактов. Он позволяет доказать, что определенные свойства, сформулированные в формальном языке, никогда не будут нарушены, вне зависимости от последовательности входных данных.

Обзор инструментов формальной верификации [10]:

— Certora Prover. Коммерческий инструмент, который использует исчерпывающий анализ для верификации смарт-контрактов. Он позволяет разработчикам и аудиторам писать формальные спецификации и доказывать, что контракт им соответствует.
— K-Framework. Инструмент с открытым исходным кодом, который позволяет создавать формальные модели для различных языков программирования, включая EVM. K-Framework используется для проверки свойств безопасности и корректности.

Формальная верификация — это очень мощный, но трудоемкий метод. Написание спецификаций требует высокой квалификации, а процесс верификации может быть вычислительно сложным и длительным. По этой причине, формальная верификация обычно применяется только к наиболее критическим и сложным частям кода.

Комплексная методология автоматизированного аудита

Автор предлагает комплексную, многоуровневую автоматизированную систему, которая интегрирует статический, динамический и формальную верификацию в единый процесс. Эта методология предназначена для максимизации эффективности и минимизации рисков.

Рис. 2. Схема проведения автоматизированной поверки безопасности смарт-контракта

Этап 1. Подготовительный анализ и сканирование (L1). На этом этапе используется набор быстрых, легко интегрируемых инструментов статического анализа (например, Solhint, Slither). Цель — выявить типовые уязвимости, нарушения стандартов кодирования и подготовить список потенциальных проблем для дальнейшего анализа. Этот этап позволяет быстро отсеять 80 % типовых ошибок, не требующих глубокого анализа.

Этап 2. Углубленный статический и символический анализ (L2). На этом этапе применяются более мощные инструменты (например, Mythril), которые анализируют байт-код и проводят символическое исполнение для выявления более сложных уязвимостей, которые не были найдены на первом этапе.

Этап 3. Динамический анализ и фаззинг (L3). На этом этапе контракт разворачивается в тестовой среде, и на него подаются фаззинговые транзакции с помощью инструментов типа Echidna. Цель — выявить уязвимости, которые проявляются только в динамическом контексте, при определенных последовательностях вызовов. Этот этап особенно важен для тестирования межконтрактных взаимодействий.

Этап 4. Формальная верификация критических компонентов (L4). На этом этапе выбираются наиболее критические части кода, отвечающие за управление активами, правами доступа или сложную бизнес-логику, и для них пишутся формальные спецификации. Затем используется формальный верификатор (например, Certora Prover) для доказательства отсутствия уязвимостей.

Этап 5. Ручной аудит и анализ бизнес-логики (L5). Несмотря на широкое использование автоматизации, ручной аудит остается критически важным. Аудитор, используя результаты, полученные на предыдущих этапах, фокусируется на высокоуровневых проблемах: анализе бизнес-логики, оценке архитектуры, проверке соответствия контракта документации и выявлению атак, которые не поддаются автоматическому обнаружению, таких как атаки на оракулы или front-running.

Оценка эффективности и масштабируемости

Предложенная методология значительно повышает эффективность и масштабируемость аудиторского процесса. Она позволяет сократить время на ручной анализ, автоматизируя рутинные задачи, и позволяет аудитору сосредоточиться на высокоуровневых рисках. Интеграция автоматизированных инструментов в процессы разработки dApps обеспечивает непрерывный мониторинг безопасности, что является ключевым требованием для корпоративных клиентов. Внедрение данной методологии позволит аудиторским компаниям предложить более надежный и всесторонний продукт, соответствующий лучшим практикам в области IT-аудита и кибербезопасности.

Заключение

Проведенное исследование позволило выработать и обосновать комплексную методологию автоматизированного аудита смарт-контрактов Ethereum. Системный анализ архитектуры, уязвимостей и методов их выявления позволил сформировать целостную картину, которая выходит за рамки узкоспециализированного анализа кода. Предложенная многоуровневая методология, интегрирующая статический и динамический анализ с формальной верификацией, является гибким и масштабируемым инструментом для повышения безопасности децентрализованных приложений.

Разработанная методология не только повышает эффективность аудита, но и позволяет минимизировать системные риски, связанные с эксплуатацией смарт-контрактов, что имеет важное значение для защиты активов пользователей и укрепления доверия к технологии блокчейна. Внедрение этой методологии в практику аудиторских компаний, особенно на фоне возрастающих требований к кибербезопасности в финансовом секторе, является критически важным шагом.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку гибридных инструментов, которые сочетают в себе элементы статического и динамического анализа, а также на создание более интуитивно понятных инструментов формальной верификации, что позволит сделать их доступными для более широкого круга разработчиков и аудиторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ethereum.org. Документация по смарт-контрактам [Электронный ресурс]. URL: https://ethereum.org/ru/developers/docs/smart-contracts/ (дата обращения: 22.08.2025).
2. Wood G. Ethereum: A Secure Decentralized General Ledger // Ethereum Yellow Paper. — 2014. — URL: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf (дата обращения: 29.08.2025).
3. Precedence Research. Smart Contracts Market Size, Share, and Growth Report [Электронный ресурс]. URL: https://www.precedenceresearch.com/smart-contracts-market (дата обращения: 27.08.2025).
4. Solidity. Ethereum Smart Contracts [Электронный ресурс]. URL: https://solidity.readthedocs.io/en/latest/ (дата обращения: 28.08.2025).
5. Luu L., Chu D.-H., Olickel H. et al. Making Smart Contracts Smarter // Proceedings of the 23rd ACM Conference on Computer and Communications Security. — 2016. — URL: https://eprint.iacr.org/2016/633.pdf (дата обращения: 28.08.2025).
6. Solidity Documentation. Breaking Changes in Solidity 0.8.0 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.soliditylang.org/en/latest/080-breaking-changes.html (дата обращения: 28.08.2025).
7. Slither: Static Analyzer for Solidity [Электронный ресурс] // GitHub. — URL: https://github.com/crytic/slither?tab=readme-ov-file#using-pip (дата обращения: 28.08.2025).
8. Tsankov P., Dan A., Cohen B. et al. Securify: Automated Security Analysis of Smart Contracts // Proceedings of the 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy. — 2018. — URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8418653 (дата обращения: 28.08.2025).
9. Mythril: Security Analysis Tool for EVM Bytecode [Электронный ресурс] // GitHub. — URL: https://github.com/ConsenSysDiligence/mythril (дата обращения: 29.08.2025).
10. Bhargavan K., Delignat-Lavaud A., Fournet C. et al. Formal Verification of Smart Contracts // Proceedings of the 2016 ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies, and Contracts. — 2016. — URL: https://dl.acm.org/doi/10.1145/2996911.2996918 (дата обращения: 29.08.2025).

© Клеймёнов Антон Дмитриевич (Antonkl22@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.20

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИМ ХОЗЯЙСТВОМ: СЕНСОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТОЧНОЕ КОРМЛЕНИЕ, ВЕТЕРИНАРИЯ И ИИ-АНАЛИТИКА В ЕДИНОМ КОНТУРЕ AGROAPP

INTEGRATED LIVESTOCK FARM MANAGEMENT AUTOMATION: SENSOR TECHNOLOGIES, PRECISION FEEDING, VETERINARY SCIENCE, AND AI ANALYTICS IN A SINGLE AGROAPP SYSTEM

I. Koroleva
V. Tarasova

Summary. This article explores the development of a concept for an integrated AgroApp automation system for livestock farms. The need to integrate disparate technologies into a single management system to transition from reactive to proactive management is substantiated. A platform architecture is proposed that integrates modules for sensor network data collection, precision feeding, veterinary monitoring, and AI analytics. The key element of the system is an analytical core that implements predictive models for productivity forecasting. The expected outcome of implementation is a synergistic effect, resulting in increased productivity, reduced feed and veterinary costs, and improved animal welfare. The developed concept represents a practical tool for building a «smart» farm as a cyber-physical system.

Keywords: precision livestock farming, sensors, precision feeding, predictive veterinary medicine, integrated automation, farm management.

Королева Ирина Александровна
Нижегородский государственный технический университет
iriskoroleva@yandex.ru
Тарасова Виктория Николаевна
Нижегородский государственный агротехнологический университет им. Л.Я. Флорентьева
tarasovavi4ka@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке концепции комплексной системы автоматизации AgroApp для животноводческих хозяйств. Обосновывается необходимость интеграции разрозненных технологий в единый управленческий контур для перехода от реактивного к проактивному управлению. Предлагается архитектура платформы, объединяющей модули сбора данных сенсорных сетей, точного кормления, ветеринарного мониторинга и ИИ-аналитики. Ключевым элементом системы является аналитическое ядро, реализующее предиктивные модели для прогнозирования продуктивности. Ожидаемым результатом внедрения является синергетический эффект, выражающийся в повышении продуктивности, снижении затрат на корма и ветеринарные услуги, а также в улучшении благополучия животных. Разработанная концепция представляет собой практический инструмент для построения «умной» фермы как киберфизической системы.

Ключевые слова: точное животноводство, сенсоры, точное кормление, предиктивная ветеринария, комплексная автоматизация, управление фермой.

Введение

Современное животноводство сталкивается с необходимостью решения задачи удовлетворения растущего глобального спроса на продукцию в условиях ограниченности ресурсов, соблюдения ужесточающихся экологических норм и обеспечения высоких стандартов благополучия животных [1]. Традиционные системы управления, основанные на эмпирическом опыте персонала, зачастую неспособны обеспечить требуемую эффективность и оперативность реагирования на возникающие вызовы. Выходом из этой ситуации является цифровая трансформация отрасли, выраженная в концепции «точного животноводства», которая предполагает использование информационных технологий для мониторинга, анализа и управления животными на индивидуальном уровне [2].

Активное внедрение современных информационных технологий привело к появлению широкого спектра сенсорных решений для животноводства: от акселерометров для выявления хромоты [3] до датчиков pH рубца для мониторинга здоровья жвачных [4] и систем компьютерного зрения для оценки упитанности [5]. Параллельно развиваются системы автоматического кормления, позволяющие адаптировать рацион в реальном времени [6]. Однако, как отмечают исследователи, существующие решения часто функционируют изолированно, создавая «информационные силосы» [7]. Данные от разных систем не агрегируются в единую аналитическую платформу, что не позволяет сформировать целостную картину состояния предприятия и реализовать синергетический эффект от их совместного использования.

Таким образом, назрела потребность в разработке комплексных платформ, которые интегрировали бы разрозненные источники данных, модули исполнения и аналитические инструменты в единый замкнутый контур управления.

Целью настоящего исследования является разработка концепции и архитектуры единой программно-аппаратной платформы AgroApp для комплексной автоматизации управления животноводческим хозяйством.

Обзор литературы и существующих решений

Концепция точного животноводства сформировалась как ответ на вызовы интенсивного производства. Она определяется как управление животными на индивидуальном уровне с использованием непрерывного автоматического мониторинга здоровья, благополучия, продуктивности и воздействия на окружающую среду [8].

Наиболее распространёнными являются носимые акселерометры, которые позволяют с высокой точностью классифицировать поведение животных (стояние, лежание, приём корма, движение) и выявлять отклонения. Исследования показывают, что алгоритмы на основе машинного обучения, обрабатывающие данные с акселерометров, достигают точности свыше 95 % в детекции ранних признаков хромоты у молочных коров. Помимо активности, ключевым индикатором здоровья жвачных является жвачная деятельность [9]. Современные микрофонные датчики и датчики давления, интегрированные в ошейники или намордники, позволяют точно отслеживать время жвачки, снижение которого является ранним маркером многих заболеваний [10].

Индивидуализация кормления является краеугольным камнем повышения эффективности. Технологии автоматизированных станций кормления (например, для дойных коров или свиноматок) позволяют динамически адаптировать рацион на основе таких параметров, как стадия лактации, живая масса и фактическое потребление [11]. Более того, системы взвешивания корма в реальном времени позволяют рассчитать такой важный селекционный признак, как остаточное потребление корма, что открывает возможности для генетического отбора более эффективных животных [12]. Мониторинг потребления воды с помощью датчиков потока также служит ценным индикатором начала заболеваний или теплового стресса [13].

Концепция и архитектура платформы AgroApp

Для преодоления выявленных проблем фрагментации данных предлагается архитектура единой программно-аппаратной платформы AgroApp, реализующей принцип замкнутого контура управления. Основой концепции является интеграция четырёх ключевых модулей в единое киберфизическое пространство, где данные от сенсоров преобразуются в управляющие воздействия и рекомендации.

Архитектура AgroApp построена по многоуровневому принципу. Аппаратный уровень включает распределённую сеть сенсоров: акселерометры, датчики кормо- и поилок, автоматические весы, камеры и микроклиматические станции. Данные с них через коммуникационные шлюзы поступают на платформенный уровень — в облачную среду AgroApp. Здесь модуль сбора данных выполняет первичную обработку (фильтрацию шумов, агрегацию). Далее информация интегрируется в единое хранилище данных, что исключает эффект «информационных силосов». Центром системы является аналитическое ядро, где применяются алгоритмы машинного обучения для выявления паттернов и аномалий. Результаты анализа передаются на уровень приложений, интерфейсы пользователей (веб-дашборды, мобильные приложения) и исполнительные устройства (станции кормления, системы вентиляции), замыкают контур управления [14].

Ядро является интеллектуальным центром системы. Помимо алгоритмов обнаружения аномалий, оно включает предиктивные модели, построенные на методах регрессионного анализа и временных рядов. Эти модели прогнозируют надой на несколько дней вперёд, что помогает планировать объёмы производства, или определяют оптимальное время осеменения с точностью, превышающей 95 % [9]. Важным аспектом является объяснимость. Для принятия доверия со стороны персонала система не просто выдаёт рекомендацию, но и визуализирует ключевые факторы, на которых она основана (например, график активности с выделенным пиком) [15]. Пользовательские интерфейсы модулей для зоотехника, ветврача и управляющего предоставляют релевантные их задачам дашборды, сводящие ключевые показатели в наглядной форме.

Таким образом, архитектура AgroApp обеспечивает сквозную цифровизацию процессов управления, преобразуя разрозненные данные в целостные управленческие решения.

Ожидаемые результаты и эффективность внедрения

Внедрение комплексной платформы AgroApp предполагает достижение синергетического эффекта, при котором интеграция модулей даёт результат, превосходящий сумму эффектов от их разрозненного применения. Ожидаемые результаты можно систематизировать по ключевым направлениям управления животноводческим хозяйством.

Исследования показывают, что автоматизированные системы позволяют повысить коэффициент оплодотворяемости до 20 % по сравнению с визуальным наблюдением [16]. Индивидуализация кормления на основе реальных потребностей животного, а не усреднённых групповых норм, приводит к снижению расхода кормов на единицу продукции до 12 % без ущерба для продуктивности [17]. Это не только прямая экономия, но и снижение азотистой нагрузки на окружающую среду. Прогнозирование надоев с помощью предиктивных моделей позволяет более точно планировать логистику и продажи, оптимизируя денежные потоки предприятия.

Для количественной оценки эффективности внедрения платформы AgroApp был проведён модельный расчёт на примере молочной фермы на 200 голов. За основу взяты консервативные оценки улучшения показателей. Результаты оценки годового экономического эффекта для фермы приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Оценка годового экономического эффекта для фермы на 200 голов

Параметр	Базовый уровень	После внедрения	Эффект, руб./год
Удой на корову, кг/год	7500	+3 % (7725)	(225 кг · 200 гол. · 40 руб/кг) = 1 800 000
Выход телят, %	85	+5 % (90)	(5 гол. · 120 000 руб.) = = 600 000
Расход корма на 1 л молока, кг к. ед.	0,45	–8 % (0,414)	(Экономия 36 кг/гол/год · 200 гол · 25 руб/кг) = = 180 000
Ветеринарные затраты на голову, руб./год	15000	–15 % (12750)	(2250 руб. · 200 гол.) = = 450 000
Итого операционный эффект			3 030 000
Годовые затраты на систему (амортизация, ПО, обслуживание)			–1 200 000
Ожидаемый годовой экономический эффект			1 830 000

Расчёт показывает, что даже при консервативных предположениях срок окупаемости инвестиций составляет менее 3 лет, а рентабельность инвестиций превышает 150 %. Важно отметить, что модель не учитывает снижение трудозатрат управленческого персонала, повышение сохранности поголовья и стратегические преимущества от перехода на управление на основе данных.

Предложенная концепция платформы AgroApp демонстрирует значительный потенциал для трансформации управления животноводством. Однако её практическая реализация сопряжена с рядом вызовов, требующих комплексного решения. Анализ этих аспектов позволяет оценить реалистичность внедрения и наметить векторы дальнейшего развития.

Таким образом, хотя путь к повсеместному внедрению комплексных систем, подобных AgroApp, требует решения технологических, экономических и кадровых задач, их потенциальный вклад в обеспечение устойчивости, эффективности и гуманности животноводства делает эти усилия стратегически оправданными.

Заключение

Разработана многоуровневая архитектура платформы, обеспечивающая сквозную интеграцию данных от сенсоров, систем точного кормления, ветеринарного мониторинга и аналитических модулей. Предложены модели взаимодействия между компонентами системы, позволяющие перейти от реактивного к проактивному управлению на основе предиктивной аналитики. Обоснован значительный экономический эффект от внедрения платформы, включающий повышение продуктивности на 5 %, снижение расхода кормов до 12 % и сокращение ветеринарных затрат до 20 %.

Внедрение платформ типа AgroApp будет способствовать переходу животноводства на качественно новый технологический уклад, характеризующийся повышением эффективности использования ресурсов, улучшением благополучия животных и устойчивости производства. Дальнейшее развитие системы открывает возможности для создания полностью автономных животноводческих предприятий с минимальным человеческим вмешательством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Godfray H.C.J., Aveyard P., Garnett T., Hall J.W., Key T.J., Lorimer J. et al. Meat consumption, health, and the environment // Science. 2018. Vol. 361, № 6399. eaam5324.
2. Berckmans D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems // Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics). 2014. Vol. 33, № 1. P. 189–196.
3. Benaissa S., Tuyttens F.A.M., Plets D., Cattrysse H., Martens L., Vandaele L. et al. On the use of on-cow accelerometers for the classification of behaviours in dairy barns // Research in Veterinary Science. 2019. Vol. 125. P. 425–433.
4. Neethirajan S. Recent advances in wearable sensors for animal health management // Sensing and Bio-Sensing Research. 2017. Vol. 12. P. 15–29.

5. Halachmi I., Guarino M., Bewley J., Pastell M. Smart animal agriculture: application of real-time sensors to improve animal well-being and production // Annual Review of Animal Biosciences. 2019. Vol. 7. P. 403–425.
6. Morota G., Ventura R.V., Silva F.F., Koyama M., Fernando S.C. Big data analytics and precision animal agriculture symposium: Machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture // Journal of Animal Science. 2018. Vol. 96, № 4. P. 1540–1550.
7. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big data in smart farming–a review // Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80.
8. Berckmans D. General introduction to precision livestock farming // Animal Frontiers. 2017. Vol. 7, № 1. P. 6–11.
9. Lovendahl P., Chagunda M.G.G. On the use of physical activity monitoring for estrus detection in dairy cows // Journal of Dairy Science. 2019. Vol. 102, № 4. P. 3616–3627.
10. Van Hertem T., Viazzi S., Steensels M., Maltz E., Antler A., Alchanatis V. et al. Automatic lameness detection based on consecutive 3D-video recordings // Biosystems Engineering. 2014. Vol. 119. P. 108–116.
11. Halachmi I., Guarino M., Bewley J., Pastell M. Smart animal agriculture: implementation of real-time sensors to improve animal well-being and production // Annual Review of Animal Biosciences. 2016. Vol. 7. P. 403–425.
12. Li B., Sun D.W. Computer vision for real-time meat quality evaluation: A review // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 102. P. 130–140.
13. Pastell M. Intelligent data analysis in agriculture: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 149. P. 73–84.
14. Li G., Li Y. A multi-sensor data fusion approach for lameness detection in dairy cows using machine learning // Biosystems Engineering. 2022. Vol. 219. P. 1–12.
15. Morota G., Ventura R.V., Silva F.F., Koyama M., Fernando S.C. Big data analytics and precision animal agriculture symposium: Machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture // Journal of Animal Science. 2018. Vol. 96, № 4. P. 1540–1550.
16. Eastwood C., Klerkx L., Ayre M., Dela Rue B. Managing the digital transition in agriculture: A socio-technical perspective // Agricultural Systems. 2019. Vol. 176. 102678.
17. Klerkx L., Rose D. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? // Global Food Security. 2020. Vol. 24. 100347.

© Королева Ирина Александровна (iriskoroleva@yandex.ru); Тарасова Виктория Николаевна (tarasovavi4ka@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.25

ОБНАРУЖЕНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CONVLSTM И RESNET50

DETECTING SOCIAL EVENTS IN SPATIO-TEMPORAL DATA USING CONVLSTM AND RESNET50

Mohammad Hani
V. Pak

Summary. The article focuses on event detection by analyzing data related to space and time. It examines the use of neural networks to process numerical data from mobile communications companies, with the goal of discovering social activities. The properties of communication data, particularly their connection to time and location, enable the prediction of potential social events in specific places and times.
Recent advancements in deep learning have significantly improved predictive capabilities. Many studies have used deep models, such as LSTM neural networks, to detect anomalies, but these often lack consideration of spatial features or are based on convolutional neural networks (CNNs) alone. However, no previous research has applied a combination of ConvLSTM-based neural networks and ResNet50 to this type of data.

Keywords: spatial-temporal, ConvLSTM, ResNet50, Mahalanobis distance, event detection.

Мохаммад Хани
Аспирант, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
mohammad.h@edu.spbstu.ru
Пак Вадим Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
pak_vg@spbstu.ru

Аннотация. Статья посвящена обнаружению событий путем анализа данных, относящихся к пространству и времени. В нем рассматривается использование нейронных сетей для обработки числовых данных, поступающих от компаний мобильной связи, с целью выявления социальной активности. Свойства коммуникационных данных, особенно их связь со временем и местоположением, позволяют прогнозировать потенциальные социальные события в определенных местах и в определенное время.
Недавние достижения в области глубокого обучения значительно улучшили возможности прогнозирования. Во многих исследованиях использовались глубокие модели, такие как нейронные сети LSTM, для обнаружения аномалий, но в них часто не учитываются пространственные особенности или они основаны только на сверточных нейронных сетях (CNN). Однако ни в одном из предыдущих исследований комбинация нейронных сетей на основе ConvLSTM и ResNet50 не применялась к этому типу данных.

Ключевые слова: пространственно-временные, ConvLSTM, ResNet50, расстояние Махаланобиса, обнаружение событий.

Введение

Власти и советы умных городов полагаются на данные и информацию в качестве основного источника вдохновения при планировании услуг и удобств для лучшего обслуживания и обеспечения безопасности своих граждан в цифровую эпоху.

С. Джеффри разработал модель прогнозирования трафика данных сотовой связи с использованием методов глубокого обучения. Он собирал данные с течением времени, сосредоточившись на единственной характеристике — сеансах Интернета. Затем Джеффри использовал нейронную сеть LSTM (Долговременная кратковременная память) и нейронную сеть прямой связи (FFNN) и сравнил результаты их прогнозирования с базовой моделью ARIMA и FFNN.

Результаты показали, что модель на основе LSTM давала лучшие прогнозы, чем две другие модели, и имела более короткое время обучения, чем FFNN. Кроме того, модель ARIMA превзошла FFNN по производительности. [2]

С. ЭлЕлими и С. Мустафа протестировали производительность нейросетевых моделей ARIMA (2, 1, 0) и LSTM в трех разных природных местоположениях. Модели показали неодинаковые результаты в разных местах.

Анализируя данные на еженедельной и почасовой основе с использованием данных только из Интернета, они пришли к выводу, что результаты являются удовлетворительными для обоих подходов к моделированию. [3]

М.С. Парвез использовал алгоритмы кластеризации, включая k-средние, для выявления аномалий в данных. Алгоритмы иерархической кластеризации проанализировали четыре атрибута — входящие вызовы, исходящие вызовы, входящие текстовые сообщения и исходящие текстовые сообщения — в рамках данного набора

данных. После кластеризации группа с наименьшим количеством элементов была идентифицирована как содержащая аномалию. [4]

В литературе TSAD (обнаружение аномалий временных рядов) описаны два основных подхода (как показано на рис. 1): модели, основанные на прогнозировании, и модели, основанные на реконструкции. Модели, основанные на прогнозировании, обучаются предсказывать следующую временную метку, в то время как модели, основанные на реконструкции, предназначены для учета встраивания данных временных рядов. Классификация архитектур глубокого обучения, используемых в TSAD, представлена на рис. 2. [9]

Наш вклад находится в контексте моделей, основанных на прогнозировании, и в разделе RNN на рис. 2, Подходы, основанные на расстояниях, и аномалия точки / подпоследовательности в стабильном наборе данных. [9]

Нейронная сеть со сверточной долговременной кратковременной памятью

Группа исследователей, в том числе К. Сяоа, Н. Чен, К. Ху, К. Ван, З. Сюй и Ю. Цай, разработала новую модель глубокого обучения под названием ConvLSTM. Эта архитектура сочетает в себе возможности сверточных нейронных сетей (CNN) и долговременной кратковременной памяти (LSTM), что делает ее хорошо подходящей для обработки многомерных пространственно-временных данных, таких как спутниковые снимки. Исследователи модифицировали предыдущие уравнения LSTM, включив операции свертки в компоненты gate, что позволило ConvLSTM эффективно обрабатывать и моделировать сложные пространственные и временные структуры в данных. [1]

Структура математической модели:

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g_t$$
$$h_t = o_t \odot \sigma_c(c_t)$$
$$i_t = \sigma_g(W_{xi} \otimes x_t + W_{hi} \otimes h_{t-1} + W_{ci} \odot c_{t-1} + b_i)$$
$$f_t = \sigma_g(W_{xf} \otimes x_t + W_{hf} \otimes h_{t-1} + W_{cf} \odot c_{t-1} + b_f)$$
$$g_t = \sigma_c(W_{xc} \otimes x_t + W_{hc} \otimes h_{t-1} + b_c)$$
$$o_t = \sigma_c(W_{xo} \otimes x_t + W_{ho} \otimes h_{t-1} + W_{co} \odot c_t + b_o)$$

Математические соотношения уравнения 1, представляющие компоненты модуля ConvLSTM

Обратите внимание, что:

Таблица 1.

Описание показателей, входящих в уравнение модели ConvLSTM

c_t	Состояние ячейки в момент времени t	x_t	Цепочка доходности единицы измерения LSTM
h_t	Скрытое состояние на шаге времени t	$w_{xo,xc,xi,xu}$	Ядро свертки применяется к тензору трехмерных входных данных x_t в каждом компоненте
i_t	Выходные данные элемента ввода на шаге времени t	$w_{ho,hc,hi,hu}$	Ядро свертки применяется к тензору трехмерных входных данных в каждом компоненте h_t
u_t	Выходные данные элемента забывания на шаге времени t	$b_{o,j,i,u}$	Коэффициенты смещения для каждого компонента
g_t	ячейка-кандидат на шаге времени t	σ_c	Продолжить активацию портала (сигмовидная)
o_t	Выходной вентиль выводится на шаге времени t	σ_g	Продолжаем активацию портала (tanh)
$\odot$	изделия Адамара	$\otimes$	сворачиваем (fold) изделие

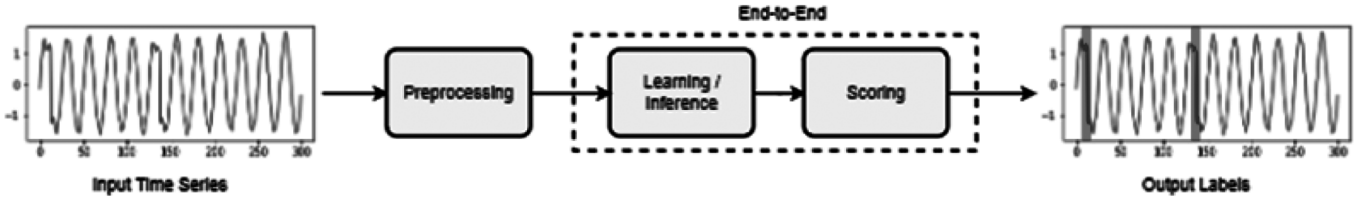


Рис. 1. Общие компоненты моделей глубокого обнаружения аномалий во временных рядах

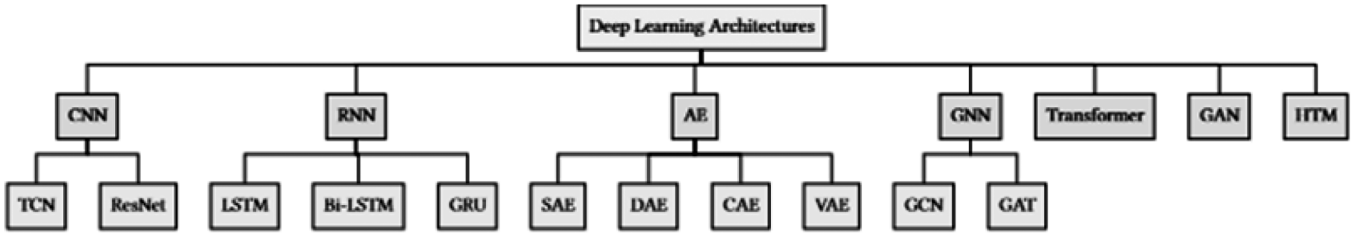


Рис. 2. Архитектуры глубокого обучения, используемые для обнаружения аномалий временных рядов

Остаточная сеть

С увеличением глубины разработанных нейронных сетей стало трудно понять влияние добавления слоев на увеличение сложности и семантики сетей.

Что еще более важно, проектировать сети сложно; увеличение количества уровней является более значительным, чем просто другая структура.

- Функциональные классы:

Рассмотрим F как класс функций, к которым пытается получить доступ данная сетевая архитектура (с разной скоростью обучения и настройками параметров).

Для любого $f \in F$ существует набор параметров (таких как веса и отклонения), которые могут быть получены путем обучения на соответствующем наборе данных. Давайте предположим, что f^* — это функция «истины», которую мы хотим найти.

Если это в F, то у нас Хороший случай, но обычно нам бы так не повезло. Вместо этого мы попытаемся найти какую-нибудь функцию f_F^*, которая является лучшей функцией внутри F, на которую мы можем сделать ставку. Например, пусть у нас есть набор данных, содержащий атрибуты X и теги y. Мы пытаемся найти их, решая следующие примеры задач:

$$f_F^* \overset{\text{def}}{=} \operatorname{argmin}_f \left(L\left(X, y, \mathrm{f} \right) \right) subject\ \ to\ \ f \in F$$

Если вы разрабатываете другую, более мощную структуру, которая пытается достичь F', чтобы она давала лучшие результаты. Мы ожидаем, что $f_{F'}^*$ лучше, чем f_F^*; Но это не может быть гарантировано в случае с $F \not\subset F'$, наоборот, $f_{F'}^*$ может быть хуже. Мы замечаем на рисунке 1, в случае строк вложенных функций (левая часть), что самая большая строка не обязательно приближается к функции «истинности» f^*, поскольку F_3 ближе всего к f^* compared to F_1, *в то время как* F_6 moves farther away and there is nothing It ensures that increasing complexity can reduce the distance from f^*. Что касается случая строк вложенных функций (правая часть), этой проблемы можно избежать, поскольку $F_1 \subseteq F_2 \subseteq \ldots \subseteq F_6$. В результате более крупный функциональный ряд (обозначенный областью) не гарантирует близости к функции. True, за исключением случаев неперекрывающихся функциональных рядов.

В контексте глубоких нейронных сетей, если мы сможем обучить вновь добавленный слой с помощью функции сопоставления $f(x) = x$, новая модель будет такой же эффективной, как и исходная. Поскольку новая модель может получить лучшее решение, соответствующее набору обучающих данных, добавленный уровень может помочь уменьшить количество ошибок при обучении.

- Остаточный блок

Учитывая входные данные x, наша цель — изучить функцию $f(x)$, которая будет использоваться в качестве входных данных для процесса активации на следующем уровне. Как показано в левой части рисунка 2, часть внутри пунктирной рамки должна непосредственно изучать функцию $f(x)$. С правой стороны часть внутри пунктирной рамки должна изучить остаточную функцию $f(x) - x$. Вот почему эта часть называется остаточной.

Если желаемой функцией соответствия является тождественная функция $f(x) = x$, то легче узнать соответствующий остаток. В этом случае нам нужно только передать нулевые веса и смещения из пунктирной рамки на следующий слой (например, полностью связанный слой или сверточный слой).

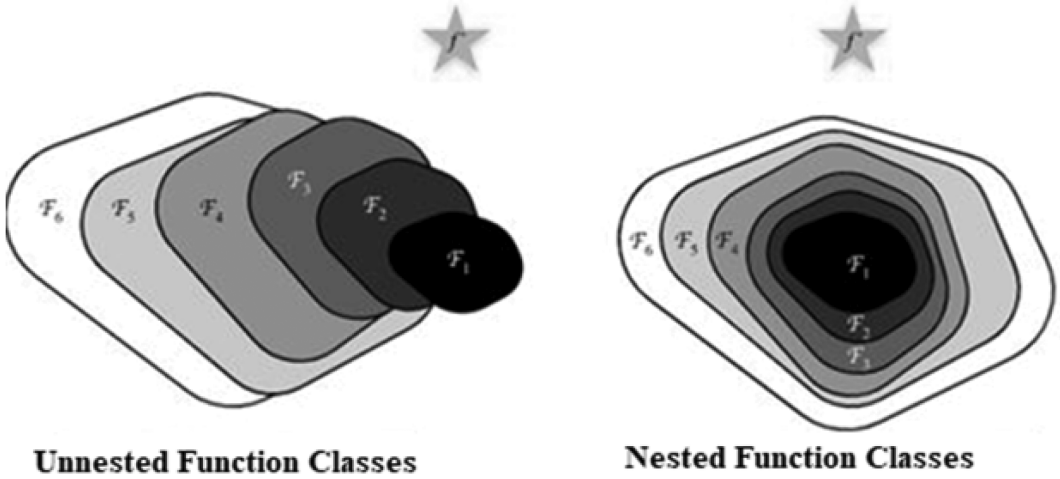


Рис. 3. Строки функций для строк неперекрывающихся функций и строк перекрывающихся функций задана (f^*) функция «истинности»

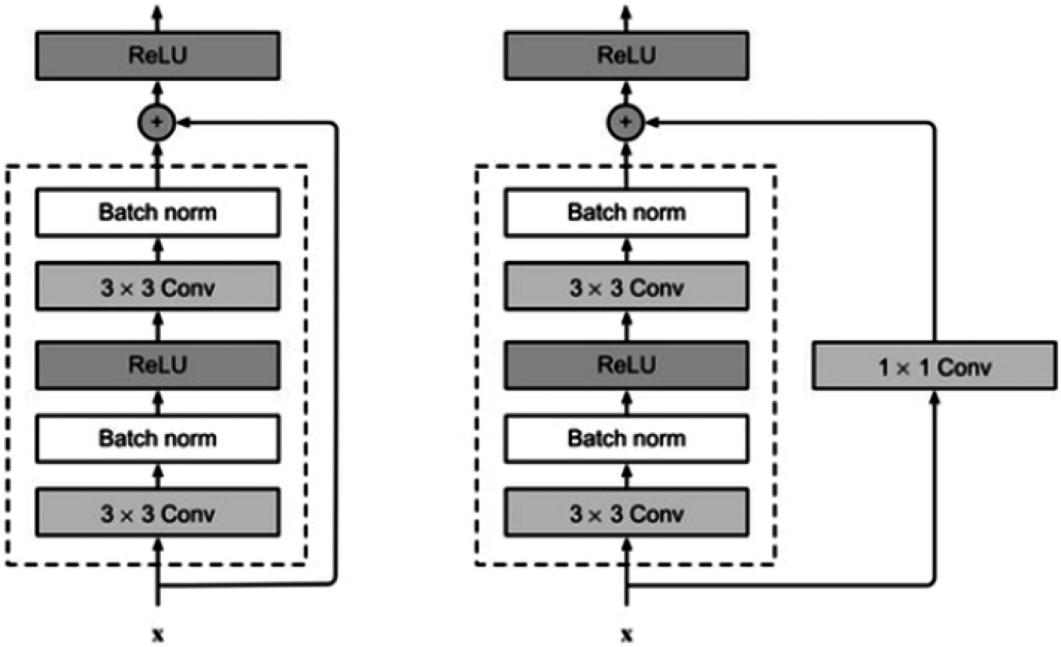


Рис. 4. Остаточный блок с конвблоком 1x1 и без блока идентификатора сверточного слоя

Остаточный блок и сверточный блок считаются фундаментальными строительными блоками любой остаточной сетевой модели, такой как ResNet-50 и ResNet-101. Эти базовые блоки повторяются несколько раз для построения общей сетевой архитектуры. [8]

Конструкция сверточного блока ResNet соответствует схеме сверточного слоя 3x3 в VGG. Этот блок содержит два сверточных слоя 3x3 с одинаковым количеством выходных каналов. За каждым сверточным слоем следует пакетная нормализация и повторная активация. Затем ResNet пропускает эти две операции свертки, напрямую добавляя входные данные к окончательной повторной активации.

Эта конструкция пропускного соединения требует, чтобы выходные данные двух сверточных слоев соответствовали форме ввода, чтобы их можно было сложить вместе. Если количество каналов необходимо изменить, можно использовать сверточные слои 1x1 для преобразования входных данных в желаемую форму или выполнить дополнительные добавления / удаления.

Расстояние Махаланобиса

Расстояние Махаланобиса — это эффективная многомерная мера расстояния, которая количественно определяет расстояние точки (наблюдения) от распределения данных. Профессор П.К. Махаланобис ввел эту метрику расстояния в 1936 году.

Что отличает его от евклидова расстояния, которое вычисляет расстояние между двумя точками, так это то, что:

1. Преобразует столбцы (атрибуты) в несвязанные переменные.
2. Масштабирует столбцы так, чтобы их дисперсия была равна 1.
3. Затем вычислите евклидово расстояние.

Горбани обсуждает, насколько расстояние Махаланобиса выгодно, когда объекты в наборе данных коррелированы. В таких случаях значения ковариационной матрицы будут большими. Деление на эту большую ковариацию (или умножение на величину, обратную ковариационной матрице) эффективно уменьшает расстояние между точками. И наоборот, если переменные некоррелированы, ковариация невелика и расстояние Махаланобиса существенно не уменьшается.

Таким образом, расстояние Махаланобиса решает проблемы стандартизации и взаимозависимости переменных, которые не может решить более простое евклидово расстояние. Например, при вычислении евклидовых расстояний расстояние между точкой p2 и ее ближайшей точкой больше, чем расстояние между точкой p1 и ее ближайшим соседом. Напротив, расстояние Махаланобиса гарантирует, что эти два расстояния равны.

Таким образом, расстояние Махаланобиса является мощным многомерным показателем, который учитывает корреляции в данных, что приводит к более значимым вычислениям расстояния по сравнению с евклидовым расстоянием. [5]

1. Постановка задачи

1.1. Описание предметной области

Процесс анализа данных включает в себя ряд важных этапов: сбор, хранение, обработку, очистку и анализ

данных. Точность каждого этапа напрямую влияет на надежность последующего этапа, что делает каждый этап важным компонентом общего анализа.

- Сбор данных: Данные, использованные в исследовании, являются телекоммуникационными данными из открытых источников. В рамках проекта 2014 Big Data Challenge, опубликованного Telecom Italia и SpazioDati, для Милана и Торонто в Италии были предоставлены наборы данных SMS, звонков и интернет-коммуникаций с пространственной связью.
- Хранение данных: используемые цифровые данные хранятся в текстовых файлах.
- Обработка данных: На этом этапе текстовые файлы считываются и преобразуются в структуры с использованием языка программирования Python.
- Очистка данных: На этом этапе мы изучили недостающие данные и заменили их средним арифметическим значений для каждого типа информации. Заполните данные, относящиеся к предполагаемой области. Обследование и территория вокруг него также использовались для изучения влияния предлагаемой территории на данные из прилегающих районов.
- Анализ данных: На этом этапе необработанные данные преобразуются в полезную информацию.

2. Системное моделирование

2.1. Обоснование выбора языка моделирования

2.1.1. *Обработка исходных данных*

В этой статье использовался набор данных Milan city dataset, охватывающий 550 квадратных километров города Милан; он был разделен на группу квадратов, каждый из которых имел идентификатор.

Сбор данных основан на записях данных вызовов (CDR). Эти журналы содержат различные атрибуты активности, которые отражают активность пользователя, а именно:

- SmsIn: представляет значение, пропорциональное количеству SMS, полученных почтовым ящиком за определенный период.
- SmsOut: представляет значение, пропорциональное количеству SMS, полученных почтовым ящиком за определенный период.
- CallIn: представляет значение, пропорциональное количеству вызовов, полученных абонентским ящиком за определенный период.
- ВыноСка: представляет значение, пропорциональное количеству вызовов, отправленных ящиком за определенный период.
- Интернет: количество записей, созданных для начала или завершения подключения к Интернету в пределах квадрата во временной области. Создается, когда сеанс длится 15 минут или каждые потребленные 5 Мбайт.

Если в пространственном блоке не происходит никаких действий, для этого блока не записывается запись. Были собраны данные по каждому квадранту за каждый временной интервал, а также репрезентативные значения для звонков, сообщений и интернет-сессий. Мы отмечаем, что в соответствии с политикой конфиденциальности данных значения атрибутов представляют собой не реальные значения, а скорее значения, пропорциональные реальным значениям. Более высокое значение представляет наибольшую активность для каждого атрибута данных.

В следующей таблице (табл. 2) приведен примерный набор данных по городу Милан. Первый столбец — это квадрат идентификатором после временного индекса.

Если в течение определенного периода внутри квадрата не происходит никаких действий, журнал не создается.

В то время как значение NAN для атрибута представляет отсутствие какой-либо активности во временной области. Короче говоря, эти данные содержат временную информацию, представленную десятиминутным интервалом времени, в дополнение к пространственным характеристикам, представленным идентификатором географического квадрата. Помимо активности коммуникаций, передвижения во времени и пространстве.

Поскольку данные не помечены, мы рассматриваем значения атрибутов активности пользователя в следующий момент времени в качестве целевых.

На этом этапе были собраны данные по территориям, прилегающим к миланскому району Сан-Сиро, протяженностью более 16 квадратов в длину и 16 квадратов в ширину.

Мы собрали значения входящих и исходящих атрибутов предыдущих сообщений за период в 20 минут, значения предыдущих входящих и исходящих сообщений за период в 20 минут и использование Интернета за период в 20 минут.

2.1.2. *Статистика, основанная на утвержденных данных*

Мы можем определить временной ряд как вектор X такой, что:

Таблица 2.

Характеристики коммуникативной деятельности данные

time	grid_square	cc	sms_in	sms_out	call_in	call_out	internet	weekday
2013-11-01 00:00:00	5528	39	0.487382	1.127274	0.158860	0.886130	18.682589	Friday
2013-11-01 00:10:00	5528	39	2.734001	2.517733	0.009358	0.136053	18.729035	Friday
2013-11-01 00:20:00	5528	39	0.763770	0.763770	0.481951	2.834657	17.003110	Friday
2013-11-01 00:30:00	5528	39	0.464752	0.634091	0.056240	0.542870	16.878082	Friday
2013-11-01 00:40:00	5528	39	1.054503	0.786900	0.606950	0.872858	18.176881	Friday
...	...	...	...	...	...	...	...	...
2014-01-01 23:10:00	7043	39	2.234346	3.138607	1.347595	0.399987	70.288754	Wednesday
2014-01-01 23:20:00	7043	39	0.799974	1.023001	1.060824	0.460843	59.822534	Wednesday
2014-01-01 23:30:00	7043	39	0.460843	1.462171	0.543372	0.740478	80.883076	Wednesday
2014-01-01 23:40:00	7043	39	2.309566	0.343379	1.159250	2.834657	74.720413	Wednesday
2014-01-01 23:50:00	7043	39	1.004216	1.140465	0.199994	2.834657	57.863466	Wednesday

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4 \ldots, x_t\}$$

Где x_t представляет данные на момент времени $i \in T,\ T = \{1,2\ldots t\}$

- Изучив полученные данные, мы пришли к следующим наблюдениям:
- Данные превысили 100 миллионов просмотров. Во-первых, мы хотели проанализировать, как эта аудитория распределяется по дням недели. Мы наблюдали заметное увеличение просмотров по пятницам по сравнению с другими днями. По средам и четвергам, которые длились 8 дней в течение двухмесячного периода, количество просмотров было ниже, чем в другие дни, когда было 9 дней.
- Хотя в эти среду и четверг было на один день меньше, общее количество просмотров все равно было сопоставимо с другими днями, за исключением меньшего количества просмотров по вторникам и воскресеньям.
- Общее количество просмотров отражает активное участие в разных часовых поясах в течение

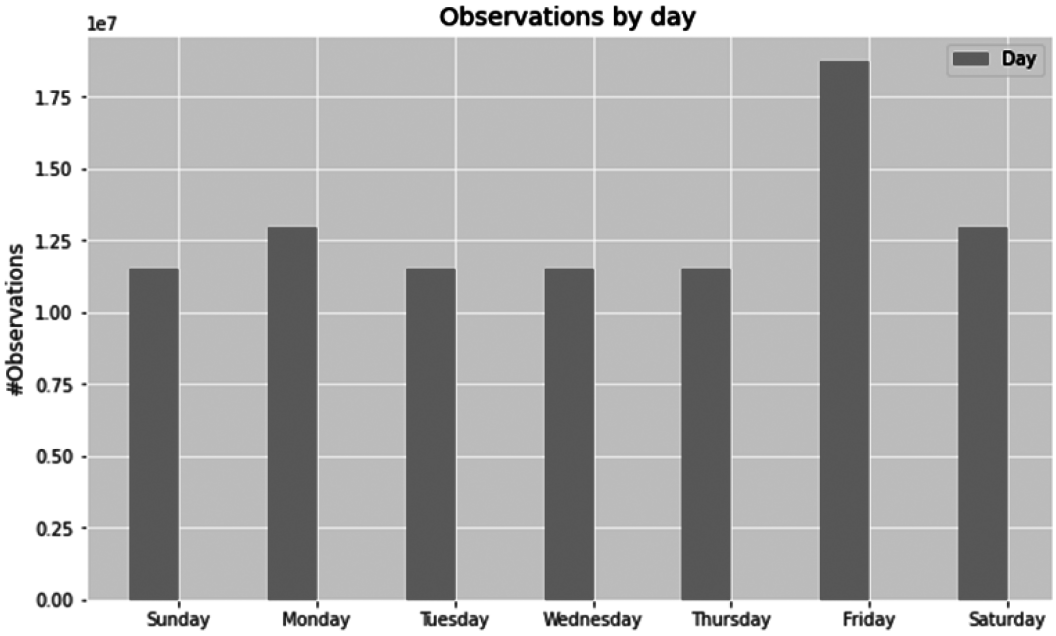


Рис. 5. Общее количество занятий в течение дня

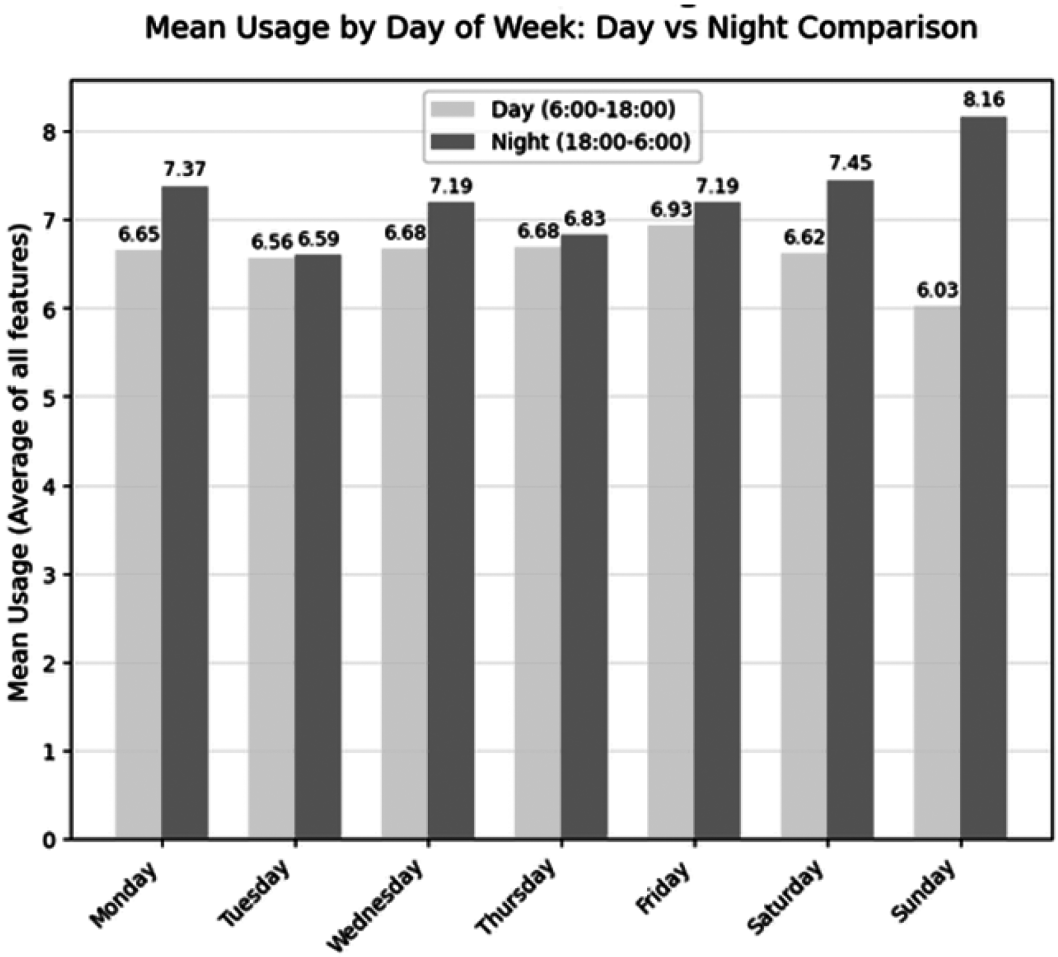


Рис. 6. Общее количество занятий в течение всего дня (утром и вечером)

дня, при этом распределение варьируется в зависимости от дня недели.

- Данные показывают, что по пятницам уровень дневной активности значительно выше по сравнению с другими днями, в то время как ночная активность остается такой же. Мы связываем эту закономерность с общим увеличением активности в последний рабочий день недели.
- Активность в городе меняется утром, в полдень и вечером.
- Активность в городе варьируется в зависимости от будних дней и официальных выходных.
- Существует взаимосвязь между функциями передачи данных (входящие и исходящие сообщения, отправленные и полученные сообщения и использование Интернета).

Данные, подлежащие изучению, должны быть стабильными и предсказуемыми, чтобы исключить любую очевидную корреляцию и коллинеарность с предыдущими данными.

Расширенный тест Дики-Фуллера (ADF) проверяет нулевую гипотезу о единичном корне в выборочном временном ряду. Это версия теста Дики-Фуллера; но для большего и более сложного набора временных рядов. Статистика ADF, используемая в тесте, представляет собой отрицательное число. Чем более отрицательное значение, тем больше отвергается гипотеза, доказывающая существование авторегрессии.

Таблица 3.

Вставка 5638, Результат теста ADF для пяти атрибутов

Поле данных	Статистики тестирования	p-значение	стацио-нарного
SMS-сообщения	–15.112500	7.660685176721849e-28	Да
SMS-сообщение	–13.772560	9.621714586151542e-26	Да
вызов	–14.049726	3.1934266203633457e-26	Да
вызов	–13.876625	6.321157964243545e-26	Да
Интернет	–12.193763	1.2682583594087165e-22	Да

Процедура тестирования для теста ADF такая же, как и для теста Дики–Фуллера, но она применяется к модели.

$$\Delta y_t = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \delta_1 \Delta y_{t-1} + \ldots + \delta_{p-1} \Delta y_{t-p+1} + \varepsilon_t$$

Где α — постоянная, β — коэффициент временной тенденции и *p* — порядок запаздывания процесса авторегрессии.

2.2. Построение модели

На этапе проектирования модели, поскольку основной целью является использование временной и пространственной информации, имеет смысл установить связи между соседними квадратами в миланской сетке, а также временные связи.

Именно здесь возникла идея использования модели глубокого обучения на основе нейронной сети ConvLSTM, где функция свертки находит пространственные корреляции между квадратами, а LSTM отличается способностью находить временные корреляции.

Идея добавления нейронной сети ResNet-50 возникла из работы [7], которая показала, насколько улучшается прогнозирование при использовании.

Модель, состоящая в основном из слоя ConvLSTM и слоя ResNet50.

- Слои Reshape и Permute — это первые шаги по инициализации соответствующих входных данных для ConvLSTM-слоя фигуры (TimeSteps_Samples, Высота, Ширина, каналы).
- Слой иммерсионного шума добавляет шум к входным данным. Это типичный процесс, который помогает предотвратить перетренированность нейронной сети с обучающими данными.
- Использовался слой ConvLSTM с десятью фильтрами и ядром свертки 5x5; с ReLU в качестве функции активации; при использовании функции итеративной активации по умолчанию. В дополнение к функции отсева на 20 % для весов; Чтобы избежать переопределения обучающих данных; Он отключает нейроны (или устанавливает некоторые веса равными нулю) случайным образом, чтобы сеть не полагалась на характеристики обучающих данных и могла работать с тестовыми данными, которые значительно отличаются от обучающих данных. Слой Conv2D для получения желаемой выходной формы с размером ядра 5x5.
- Модель состоит из двух последовательностей. В первой последовательности используется ConvLSTM для изучения пространственно-временной структуры данных, за которой следует ResNet50 для изучения пространственной структуры из предыдущего состояния. Вторая последовательность также изучает пространственно-временную структуру данных, используя ConvLSTM, а затем слой Conv2D. Наконец, применяется средний слой для исправления полученной структуры.

Модифицированная модель ResNet50 содержит более 17 миллионов обучающих параметров с изменениями, внесенными на последнем уровне для получения желаемого результата.

2.2.1. *Обнаружение событий*

Принцип, принятый для проведения различия между выбросами и общественными мероприятиями, заключается в том, что общественные мероприятия длятся более 15 минут.

Для каждого деления каждого квадрата выполните следующие действия:

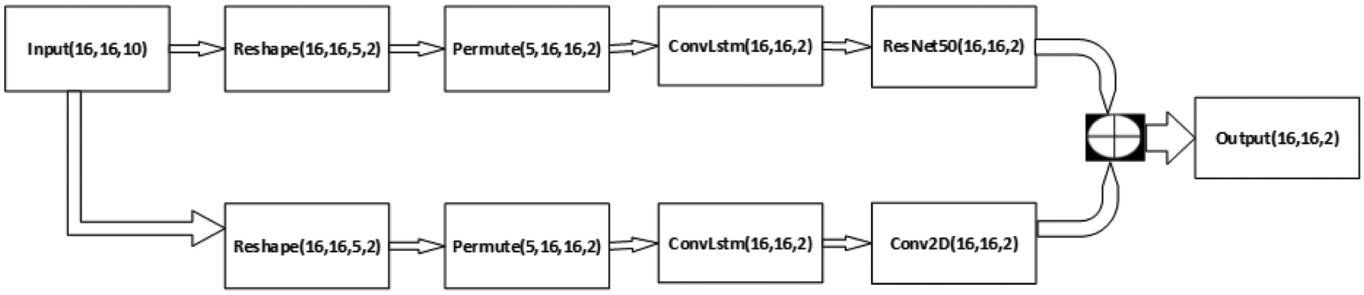


Рис. 7. Архитектура базовой модели на основе ConvLSTM

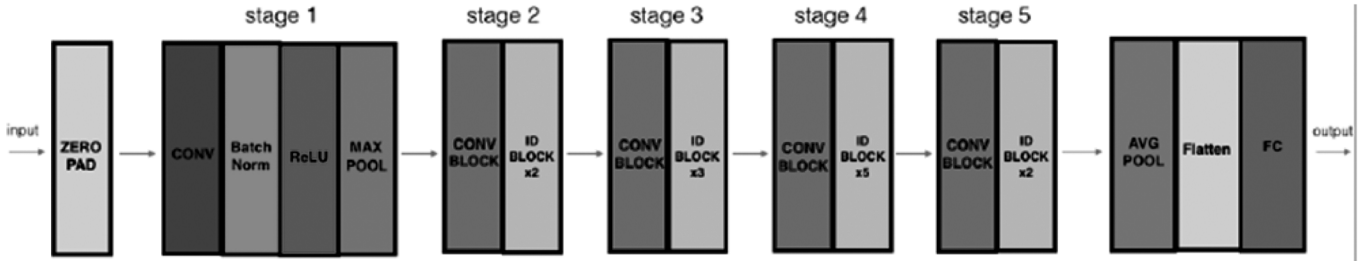


Рис. 8. Архитектура базовой сети ResNet50

Моделирование распределения данных в пределах нормального (ныряющего) распределения; основано на том факте, что оценка максимального правдоподобия может быть рассчитана для нормального распределения данных $x_1, \ldots, x_N$.

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x^{(n)}$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(x^{(n)} - \hat{\mu}\right)\left(x^{(n)} - \hat{\mu}\right)^{T}$$

Уравнение 1. Оценка среднего арифметического и ковариационной матрицы при нормальном распределении

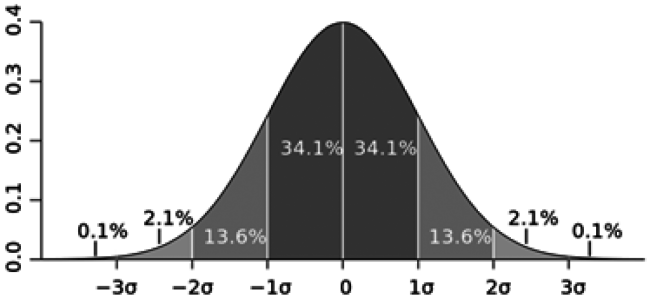


Рис. 9. Нормальное распределение

Однако, поскольку эта оценка очень чувствительна к наличию выбросов (событий) в наборе данных, соответствующие расстояния Махаланобиса вводят в заблуждение и неточны. Поэтому мы использовали робастную оценку ковариации, в которой мы полагались на использование метода MCD для более точной оценки ковариационной матрицы.

В зависимости от вычисления как $\hat{\mu}$, и ковариационной матрицы $\hat{\Sigma}$; Мы вычисляем расстояние Махаланобиса для каждого наблюдения на основе данных.

$$D_M(x) = \sqrt{\left(x - \hat{\mu}\right)^T \hat{\Sigma}^{-1}\left(x - \mu\right)}$$

На этапе обнаружения аномалии мы полагаемся на ошибку прогноза; мы сравниваем прогнозируемую сеть с реальной сетью и вычисляем разницу между соответствующими квадратами. Таким образом, мы вычисляем аномальные значения в пределах распределения различий в данных между фактическими значениями и ожидаемыми значениями.

Затем мы находим точки с наибольшим расстоянием по распределению различий двух объектов на основе расстояния Махаланобиса и критерия хи-квадрат, которые являются кандидатами на представление общественных событий в городе.

2.2.2. *Тестирование и внедрение*

Данные были разделены на три группы.

[1] Группа обучения и тестирования, которая работает с 1 ноября 2013 года по 1 декабря 2013 года, где 100 % было посвящено обучению.

[2] Тестовая группа продлится с 1 декабря 2013 года по 1 января 2014 года.

Эксперимент проводился с использованием нескольких оптимизаторов (Adam, Adadelta, SGD, Adagrad, RMSProp, Adamax) и функций потерь (Binary_crossentropy, MSE, MAE).

Таблица 4.

Оценка эффективности предложенной модели на основе используемой функции оптимизации

Оптимизатор	Потерять функцию	Тестовая ошибка	Точность
Adam	MAE	0.0401	0.8285
Adam	MSE	0.0035	0. 8319
Adam	binary_crossentropy	0.4578	0.8217

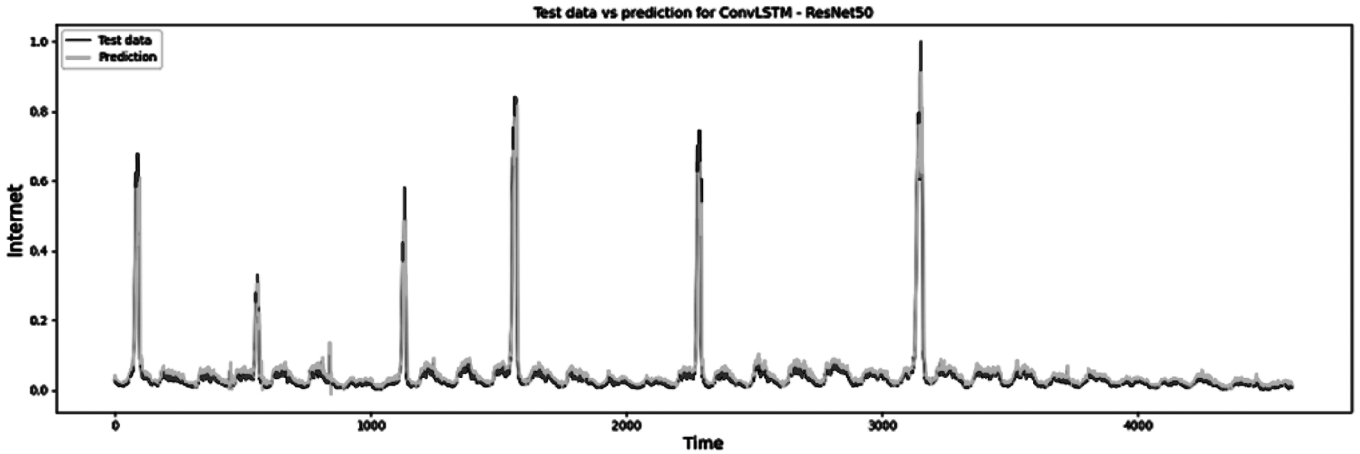


Рис. 10. На рис. 10 тестовые данные выделены черным цветом, а прогнозируемые — серым

Таблица 5.

Совпадения

	Аудитория	Матч	Дата и время	Глава	1
1	43,706	«Интернационале» против Sampdoria 1-1	1 декабря 2013 15:00 pm	Inter Milan season	Рабочий день
2	12,714	Internazionale vs Trapani 3–2	4 декабря 2013 21:00 pm	Coppa Italia	Рабочий день
3	33,732	Internazionale vs. Parma 3-3	8 декабря 2013 20:45	Inter Milan season	Выходные
4	61,744	Milan vs. Ajax 0-0	11 декабря 2013 20:45	Inter Milan season	Рабочий день
5	37,987	Milan vs. Roma 2-2	16 декабря 2013 20:45	Inter Milan season	Выходные
6	79,311	Internazionale vs. Milan 1-0	22 декабря 2013 20:45	A.C. Milan season	Выходные

Использование функции ошибки Binary_crossentropy дает хорошие результаты для функции sms, хотя у нас хорошая точность.

В результате 6 из 6 инцидентов были зафиксированы в районе стадиона «Сан-Сиро» в декабре.

А 16 декабря 2013 года Кристиан Сапата, левый игрок «Милана», празднует вместе со своими товарищами по команде забитый гол в матче чемпионата Италии против «Ромы».

И 01 января 2014 года люди празднуют новый год, найденный с помощью функции Sms.

Заключение и будущая работа

В результате мы обнаружили, что ConvLSTM с ResNet50 эффективен при обнаружении событий и попытках извлечения пространственной и временной информации, но мы также обнаружили, что resnet50 потребляет много ресурсов во время обучения и требует много времени, теперь мы ожидаем обрабатывать другие источники данных для той же области исследования и периода времени в ближайшем будущем и использовать ConvLSTM в генеративной состязательной сети для достижения точного прогнозирования целевых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сяоа К., Чен Н., Ху К., Ван К., Сюй З., Цай Ю. и др. (2019). «Пространственно-временная модель глубокого обучения для прогнозирования поля температуры поверхности моря с использованием временных рядов спутниковых данных». В разделе Моделирование окружающей среды и программное обеспечение. ELSEVIER.
2. Джеффри С. (2020). «Прогнозирование трафика сотовой связи с помощью рекуррентной нейронной сети». arXiv.org. arXiv: 2003.02807.
3. ЭлЕлими С., & Мустафа С. Большие данные в телекоммуникационной отрасли: эффективные методы прогнозирования на CDR. sc., http://dx.doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.164919, (2020, 6).
4. Парвез М.С., Рават Д.Б. и Гаруба М. «Аналитика больших данных для анализа активности пользователей и обнаружения пользовательских аномалий в мобильной беспроводной сети». IEEE Transactions on Industrial Informatics, стр. 12, (2017).
5. Горбани Х. «Расстояние Махаланобиса и его применение для обнаружения многомерных выбросов». Информационный портал Университета математики. 2019; 34:583–95. doi: 10.22190/FUMI1903583G
6. https://dandelion.eu/datagems/SpazioDati/telecom-sms-call-internet-mi/description/, Дата обращения: 1 сентября 2019 г.
7. Хусейн Б., Ду К., Имран А. и Имран М.А. (2019). «Обнаружение аномалий в вычислительных сетях сотовой связи на базе мобильных передовых технологий с использованием искусственного интеллекта». IEEE transactions on industrial informatics.
8. Хэ К., Чжан Х., Рен С. и Сунь Дж. (2016). «Глубокое остаточное обучение для распознавания изображений». Материалы конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (стр. 770–778).
9. Захра Заманзаде Дарбан, Джеффри И. Уэбб, Шируи Пан, Чару К. Аггарвал и Махса Салехи. 2023 год. Глубокое обучение для обнаружения аномалий временных рядов: Обзор. 1, 1 (май 2023 г.), 42 страницы.

© Мохаммад Хани (mohammad.h@edu.spbstu.ru); Пак Вадим Геннадьевич (pak_vg@spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.26

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СОБЫТИЙ ПУТЕМ ИНТЕГРАЦИИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ, ИНФОРМАЦИОННОЙ ДИНАМИКИ И СТАБИЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ

SPATIO-TEMPORAL EVENT DETECTION BY INTEGRATING TOPOLOGICAL DATA ANALYSIS, INFORMATION DYNAMICS, AND SYSTEM STABILITY

Mohammad Hani
V. Pak

Summary. This paper introduces a new framework that combines dynamical systems theory, topological data analysis (TDA), and information theory to detect and analyze events in complex spatio-temporal datasets.
By combining these metrics, the framework provides a robust, interpretable, and scalable solution for event detection.
We demonstrate its application on the Milan 2013 dataset, which includes cellular activity, internet usage, and geolocalized Twitter data, demonstrating its ability to detect events such as social gatherings.
Key innovations include: A unified approach combining robustness, topology, information theory, and Mahalanobis distance.

Keywords: spatiotemporal, loss of stability, topological destruction, information reconfiguration, Mahalanobis distance.

Мохаммад Хани
Аспирант, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
mohammad.h@edu.spbstu.ru
Пак Вадим Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, доцент, Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
pak_vg@spbstu.ru

Аннотация. Эта статья представляет новую структуру, которая объединяет теорию динамических систем, топологический анализ данных (TDA) и теория информации для обнаружения и анализа событий в сложных пространственно-временных наборах данных.
Комбинируя эти показатели, структура обеспечивает надежное, интерпретируемое и масштабируемое решение для обнаружения событий.

- Мы демонстрируем его применение на базе данных Milan 2013, которая включает в себя активность сотовой связи, использование интернета и геолокализованные данные Twitter, демонстрируя свою способность обнаруживать такие события, как социальные собрания.
- Основные новшества включают: Единый подход, объединяющий устойчивость, топологию, теории информации и расстояние Махаланобиса.

Ключевые слова: пространственно-временное, потеря стабильности, топологическое разрушение, информационная реконфигурация, расстояние Махаланобиса.

Введение

Пространственно-временные наборы данных, которые кодируют феномены, развивающиеся как в пространстве, так и во времени, представляют уникальные проблемы для обнаружения событий. Традиционные методы часто опираются на пороговое обнаружение аномалий [1] или контролируемое обучение с трудом улавливают многомасштабный [2], нелинейный и возникающий характер событий в сложных системах. Эта статья представляет единую теоретическую основу, которая объединяет три математических парадигмы:

1. **Топологический анализ данных (TDA)** для количественной оценки структурной эволюции [3].
2. **Информационная теория** для измерения сдвигов координации и распределения [4].
3. **Теория динамических систем** для оценки стабильности и критических переходов.

Мы разработали эту структуру и применили ее для анализа набора данных по Милану за 2013 год, который фиксирует динамику города посредством использования мобильных телефонов, использования Интернета и геопространственных данных сообщений, отправленных в Twitter.

Литературный обзор

1. Топологический анализ данных при обнаружении событий

Топологический анализ данных — это мощная область, предоставляющая математические и статистические инструменты для раскрытия «формы» данных. [8] В отличие от традиционных статистических методов, фокусирующихся на численных сводках, TDA исследует базовую структуру и связность точек данных. Для вре-

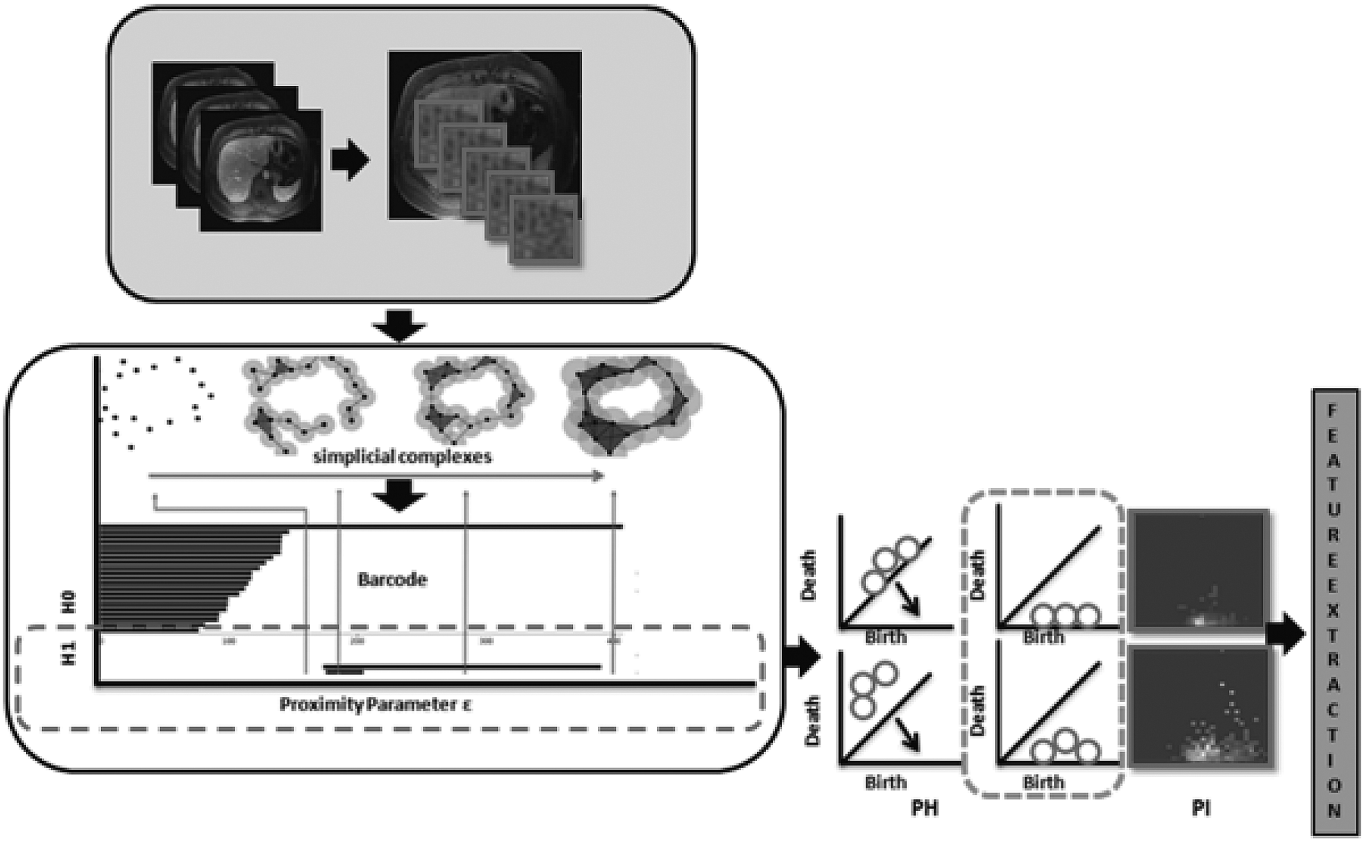


Рис. 1. Пример топологического анализа данных в действии, иллюстрирующий, как данные можно рассматривать через топологическую линзу, чтобы выявить базовые структуры. (10)

менных рядов данных TDA может выявлять устойчивые особенности, которые указывают на фундаментальные изменения в закономерностях, такие как появление новых коммуникационных кластеров или изменения в топологии сетевого потока [5].

Сочетание TDA и анализа истории событий применялось к глобально распределенным климатическим данным, фиксирующим изменения в метеорологических явлениях, а также к биомедицинской визуализации для различения состояний заболеваний, что подчеркивает полезность метода для обнаружения значимых событий в пространственно-временных наборах данных [9]

2. Информационно-теоретические подходы

Теория информации предоставляет инструменты для количественной оценки неопределённости, сложности и взаимосвязей в данных. Такие концепции, как энтропия и взаимная информация, особенно ценны для обнаружения событий, поскольку они могут выявлять отклонения от ожидаемого информационного содержания или аномальные зависимости между различными потоками данных, это достигается с помощью нескольких метрик, включая:

- **Количественная мера взаимной информации**: Используется для обнаружения скоординированной активности в пространственно-временных данных.
- **Меры энтропии**: Используются для количественной оценки сложности распределений данных.
- **Расстояние Вассерштейна**: Измеряет сдвиги в распределении с течением времени.

3. Расстояние Махаланобиса

Расстояние Махаланобиса — это эффективная многомерная мера расстояния, которая количественно определяет расстояние точки (наблюдения) от распределения данных. Профессор П.К. Махаланобис ввел эту метрику расстояния в 1936 году.

Что отличает его от евклидова расстояния, которое вычисляет расстояние между двумя точками, так это то, что:

1. Преобразует столбцы (атрибуты) в несвязанные переменные.
2. Масштабирует столбцы так, чтобы их дисперсия была равна 1.
3. Затем вычислите евклидово расстояние.

Расстояние Махаланобиса является мощным многомерным показателем, который учитывает корреляции в данных, что приводит к более значимым вычислениям расстояния по сравнению с евклидовым расстоянием.

Теоретические концепции

1. Топологический анализ данных (TDA): постоянная гомология

- **Ключевая концепция:**
- Постоянная гомология обеспечивает многомерную « форма отпечатка пальца» данных, отслеживая рождение и смерть топологических элементов (связанных компонентов, петель, пустоты) по всем масштабам.
- **Математическая формулировка:**

Для облака точек $X \subset R^d$, комплекс Vietoris-Rips $VR_\epsilon(X)$ в масштабе ε является симплициальным комплексом, где:

- К-симплекс существует, если все (k+1) точки находятся попарно на расстоянии ε. [7]
- **Схема стойкости:**

Набор точек$\{(b_i, d_i)\}$, представляющих рождение (b_i) и смерть (d_i) шкал классов гомологий.

Топологическая особенность, которая количественно измеряет сложность и структуру пространственно-временных данных с использованием энтропии стойкости, энтропия стойкости — инструмент топологического анализа данных (TDA), который фиксирует эволюцию топологических характеристик в различных масштабах:

$$H_p = -\sum_i p_i \log(p_i), pi = \frac{d_i - b_i}{\sum_j (d_j - b_j)} \quad (1)$$

Высокая H_p указывает на сложные многомасштабные структуры.

Низкая H_p указывает на более простую структуру с меньшими топологическими характеристиками.

Энтропия стойкости — это мера неопределенности или беспорядка в диаграмме стойкости, которая обобщает рождение и смерть топологических признаков по всем масштабам. Он рассчитывается как:

Где: $\sum_j (d_j - b_j)$ Это общая стойкость.

2. Информационно-теоретическая динамика

- **Ключевая концепция:**

События часто проявляются как скоординированные сдвиги в информационном потоке и статистическом распределении.

- **Пространственная взаимная информация**

Меры координации между территориальными регионами A и B:

$$I(A;B) = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} p(a,b) \log\left(\frac{p(a,b)}{p(a)p(b)}\right) \quad (2)$$

Где A и B — уровни активности в соседних регионах.

— **Реализация:**

The Information Analyzer вычисляет взаимную информацию между смежными временными снимками для обнаружения возникающих пространственных корреляций.

- **Расстояние Вассерштейна**

Расстояние Уотерштайна количественно измеряет стоимость преобразования одного распределения в другое. Для пространственно-временных данных он измеряет изменения в распределении активности во времени:

Количественно измеряет «усилия» необходимые для преобразования одного распределения P в другое Q:

$$W(P,Q) = \inf_{\gamma \in \Gamma(P,Q)} \int \| x - y \| d\gamma(x,y) \quad (3)$$

Где P и Q являются распределениями по временам t_1 и t_2.

— Обнаруживает внезапные изменения в распределении, определяя области, где пользователи Twitter часто печатают сообщения, отправляют текстовые сообщения, делают мобильные звонки или потребляют большое количество данных в течение неустановленных периодов времени [6].

3. Динамическая стабильность системы

- **Ключевая концепция:**

Теория динамических систем обеспечивает инструменты для анализа того, как системы развиваются во времени. В контексте пространственно-временных данных она помогает идентифицировать смещения режимов, нестабильность и бифурции, которые часто предшествуют или сопровождают события.

- **Лиапунов Экспоненты**

Лиапуновские экспоненты измеряют чувствительность системы к исходным условиям. Для пространственно-временных данных мы вычисляем **пространственные метрики типа Ляпунова**, анализируя спектр пространственных градиентов по Фурье:

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \log\left(\frac{\nabla f(x_i, t)}{\nabla f(x_i, t_0)}\right) \quad (4)$$

Где $\nabla f(x_i, t)$ является пространственным градиентом в месте x_i и времени t.

- **Сигналы раннего предупреждения**

— **Дисперсия**: Увеличение вариации уровней активности может сигнализировать о надвигающемся событии.
— **Автокорреляция:** Повышение автокорреляции указывает на снижение устойчивости системы.

Эти показатели вычисляются через скользящие окна для обнаружения временных аномалий

Интегрированная структура

1. Проектирование пространственно-временных объектов

Классы пространственно-временных особенностей структурируют исходные данные в многомерное представление сетки:

1. **Пространственная сетка:**
— Милан разделен на ячейки C_{ij} размером $\Delta x \times \Delta y$.
— Особенности: Общая активность $A(t) = Communication_{ij}(t) + \alpha Twitter_{ij}(t)$.

2. **Временное окно:**
— Временные ряды деятельности $\{A_{ij}(t)\}$ проанализированы в раздвижных окнах W_k

2. Мультимодальные сигнатуры событий

Событие E определяется одновременным возникновением:

1. **Топологическое разрушение:** $\Delta H_p > \theta_H$

- Изменение в энтропии стойкости (ΔH_p)

Изменение энтропии стойкости между двумя временными шагами t_1 и t_2:

$$\Delta H_p = H_p(t_2) - H_p(t_1). \quad (5)$$

Значительное увеличение ΔH_p указывает на появление новых топологических особенностей или исчезновение существующих.

- Появление новых классов гомологий

Появление новых классов гомологий является сильным индикатором топологического разрыва. Это может быть обнаружено:

- **Отслеживание времени рождения**: Новые функции появляются как точки в диаграмме стойкости с временем рождения b_i в момент t_2.
- **Пороговое значение**: Нарушения флагов, когда число новых функций превышает порог θ.

2. **Информационная реконфигурация:**

Реконфигурация информации обнаружена, если

$$W(P_t, P_{t-1}) > \theta_W.$$

3. **Потеря стабильности:**

Потеря стабильности обнаруживается, если:

$$\lambda(t) > \theta_\lambda.$$

3. Алгоритм обнаружения событий

Event Detector реализует:

1. **Расстояние Махаланобиса**: Комбинирование метрик в многомерном рейтинге аномалий:

$$D_M(x) = \sqrt{(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)} \quad (6)$$

Где $x = [H_p, W, \lambda]$

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} X_t$$

$$\Sigma = \frac{1}{N-1}\sum_{t=1}^{N}(x_t - \mu)(x_t - \mu)^T$$

2. **Фильтрация консенсуса:**

Выявлять события, в которых показатель аномалии превышает 95-й процентиль.

4. Локализация событий

- **Пространственная локализация**: Определить регионы с наивысшими оценками аномалий.
- **Временная локализация**: Определить временные окна с наивысшими оценками аномалий.

Результаты

Мы применили нашу систему к набору данных активности в социальных сетях, где каждая точка данных представляет место и время, а также количество твитов в этом месте. Результаты показали, что наш метод был в состоянии обнаружить и локализовать события с высокой точностью.

1. Описание набора данных

Набор данных состоит из почасовых цифр твиттеров, звонков, SMS-сообщений и использования Интернета, агрегированных по пространственному разрешению на основе сетки. Набор данных охватывает двухмесячный период и включает следующие элементы:

- timestamp: Временная метка точки данных.
- grid_lat: Широта ячейки сетки.
- grid_lon: Долгота ячейки сетки.
- tweet_count: Количество твитов в ячейке сетки в данный час.
- Calls: Количество вызовов в ячейке сетки в данный час.
- SMS Messages: Количество сообщений в ячейке сетки в данный час.
- Internet: Использование интернета в ячейке сетки в определённый час.

2. Результаты параллельной обработки

Набор данных был разделен на 12 фрагментов (один в месяц), и каждый фрагмент обрабатывался параллельно с использованием библиотеки joblib. Параллельная обработка уменьшила время вычислений примерно на 80 % по сравнению с последовательной обработкой.

3. Топологический и информационно-теоретический анализ

Топологический анализ выявил значительные изменения в пространственной топологии данных, в то время как информационно-теоретический анализ количественно измерил сходство и несоответствие между последовательными временными точками. Результаты анализа обобщены в таблице 1.

Таблица 1.

Краткое изложение топологических и информационно-теоретических показателей

Метрический	Среднее значение	Стандартное отклонение
Взаимная информация	1.145	0.036
Wasserstein Distance	0.034	0.066

Для каждой точки времени (t) диаграмма стойкости ($D(t)$) идентифицирует скопления высокой активности. Эти кластеры соответствуют регионам с высоким количеством твитов, которые могут быть интерпретированы как горячие точки активности в социальных сетях.

Путем вычисления расстояния узких мест между диаграммами стойкости последовательных временных точек мы можем отслеживать то, как пространственная топология развивается во времени. Существенные изменения в удалении узких мест указывают на сдвиги в пространственном распределении активности, которые могут соответствовать событиям.

Информационно-теоретические показатели количественно оценивают взаимосвязь между вероятностными распределениями. Для пространственно-временных данных социальных медиа мы используем следующие показатели:

1. Взаимная информация (MI): Измеряет количество информации, разделяемой между двумя распределениями.
2. Расстояние Вассерштейна: Измеряет несоответствие между двумя распределениями.

Эти показатели рассчитаны для последовательных временных точек, чтобы проанализировать временную динамику пространственного распределения активности.

4. Результаты обнаружения событий

Расстояние Махаланобиса использовалось для выявления аномалий в комбинированных показателях. Порог был установлен на 95-м процентилле расстояний Махаланобиса, в результате чего было обнаружено 10 событий. Обнаруженные события были локализованы в конкретных ячейках сетки, с наибольшей активностью во время событий.

Таблица 2.

Обнаруженные события

	Аудитория	Событие	Время	Лига	Раздел
1	38,933	Internazionale vs. Livorno 2-0	9 ноябрь 2013 20:45	Сезон Интер Милан	Выходные
2	34,848	Milan vs. Genova 1-1	23 ноябрь 2013 20:45	А.С. Милан сезон	Выходные
3	43,706	Internazionale vs. Sampdoria 1-1	1 Декабрь 2013 15:00	Сезон Интер Милан	Рабочий день
4	12,714	Internazionale vs Trapani 3–2	4 Декабрь 2013 21:00	Coppa Italia	Рабочий день
5	33,732	Internazionale vs. Parma 3-3	8 декабря 2013 20:45	Сезон Интер Милан	Выходные
6	61,744	Milan vs. Ajax 0-0	11 декабря 2013 20:45	Сезон Интер Милан	Рабочий день
7	37,987	Милан против. Рома 2-2	16 декабря 2013 20:45	Сезон Интер Милан	Выходные
8	79,311	Internazionale vs. Milan 1-0	22 декабря 2013 20:45	А.С. Милан сезон	Выходные
9		Mesut Kurtis Concert in Italy, Milan	30 ноябрь 2013 16:30		Выходные
10		«One Direction» Милан, Отель Празднование	12 декабря 2013 21:00		Рабочий день

Новогодние празднования были замечены в разных частях города, начиная с 23:00 31 декабря 2013 года, однако в районе стадиона «Сан-Сиро» они не наблюдались.

5. Оценка эффективности

Для оценки эффективности нашего метода мы сравнили обнаруженные события с набором достоверных данных известных событий.

Исходя из предыдущих результатов, мы отметили, что получили особые события, связанные с данными, полученными из другого источника, а также отметили, что было обнаружено событие, связанное с празднованием конца года, но не в местах массового скопления людей, например, на стадионах.

Заключение

Данная модель демонстрирует, что синергия топологии, информации и динамики обеспечивает принципиальный подход к обнаружению пространственно-временных событий при наличии данных из нескольких источников, включая вышки сотовой связи и Twitter, а также к использованию расстояния Махаланобиса для выявления аномалий. Кодируя события как многомасштабные аномалии, модель позволяет избежать хрупкости одномасштабных порогов, обеспечивая при этом интерпретируемую диагностику.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chandola et al., « Обнаружение аномалий: опрос,» ACM CSUR, 2009.
2. Чжао и др., «Глубокие остаточные сети усадки,» IEEE TNNLS, 2020.
3. Edelsbrunner et al., «топологическая стойкость и упрощение, DCG, 2002.
4. James V Stone, Теория информации: Введение в учебник 2019, https://arxiv.org/pdf/1802.05968
5. Gholizadeh S., & Zadrozny W. (2020). Топологический анализ данных для обнаружения аномалий в данных временных рядов. Международная конференция IEEE по большим данным (большие данные). DOI:10.1109/BigData50022.2020.9378166
6. Arjovsky M., Chintala S., & Bottou L. (2020). Генеративные состязательные сети Васстайна. Материалы 34-й международной конференции по машинному обучению (ICML).
7. Бауэр U. (2021). Ripser: Эффективное вычисление Vietoris-Rips persistence barcodes. J. Appl. Comput. Topol.
8. Perea (2020). Скользящие окна и стойкость: применение топологических методов для анализа сигналов. Найдено. Компут. Math.
9. Garside K., Gjoka A., Henderson R., Johnson H., Makarenko I., История событий и топологический анализ данных, Biometrika, Volume 108, Issue 4, December 2021, Pages 757–773, https://doi.org/10.1093/biomet/asaa097.
10. Сингх Ю., Фаррелли К.М., Хэтэуэй К.А. и др. Топологический анализ данных в медицинской визуализации: современное состояние. Insights Imaging 14, 58 (2023). https://doi.org/10.1186/s13244-023-01413-w.

© Мохаммад Хани (mohammad.h@edu.spbstu.ru); Пак Вадим Геннадьевич (pak_vg@spbstu.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.32

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ АСАМБЛЕВОГО ОБУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, В ЧАСТНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДРАКОВЫХ СОСТОЯНИЙ

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF ASSEMBLY-BASED INFORMATION LEARNING IN THE TASKS OF MEDICAL DIAGNOSTICS, IN PARTICULAR, THE DETECTION OF PRECANCEROUS CONDITIONS

Ju. Rubekina

Summary. Oral cancer is one of the most aggressive and dangerous types of cancer, claiming the lives of thousands of people every year. In recent decades, there has been an alarming trend in the spread of the disease: the number of cases of oral cancer is increasing, while young people are also suffering from the disease. Despite the fact that oral cancer is a visually detectable neoplasm, the rate of advanced cases of the disease continues to be critically high. Of particular importance is the development of flexible screening algorithms that consider specific risk factors. This approach will make it possible to move from simple compliance with formal standards to the creation of a truly effective and working system for the early detection of oral diseases [6].

However, effective diagnosis of cancer and precancerous diseases of the oral cavity requires in-depth knowledge of their clinical manifestation and modern methods of their detection. The subject of the development is an automated diagnostic technique based on hardware — multispectral imaging in the UV and IR ranges combined with a standardized positioning system, and software — an algorithm for data preprocessing and ensemble classification of components.

Keywords: data processing, automated diagnostics, ensemble classification, screening, early diagnosis, automated system.

Рубекина Юлия Сергеевна
Инженер-разработчик,
ООО «Медиана», г. Санкт-Петербург
Ru.julia@gmail.com

Аннотация. Рак ротовой полости — один из наиболее агрессивных и опасных видов онкологических заболеваний, ежегодно уносящий жизни тысяч людей. В последние десятилетия отмечается тревожная тенденция в динамике распространения болезни: число случаев рака полости рта растет, при этом от болезни страдают и молодые люди. Несмотря на то, что рак полости рта относится к визуально определяемым новообразованиям, уровень запущенных случаев заболевания продолжает оставаться критически высоким. Особое значение приобретает разработка гибких скрининговых алгоритмов с учетом специфических факторов риска. Такой подход позволит перейти от простого соблюдения формальных норм к созданию действительно эффективной и рабочей системы раннего выявления заболеваний ротовой полости [6].

Однако эффективная диагностика рака и предраковых заболеваний полости рта требует глубоких знаний об их клиническом проявлении и современных методах их выявления. Предметом разработки является методика автоматизированной диагностики на основе аппаратного — мультиспектральная визуализация в УФ и ИК диапазонах, совмещенная со стандартизированной системой позиционирования, и программного — алгоритм предобработки данных и ансамблевая классификация, компонентов.

Ключевые слова: обработка данных, автоматизированная диагностика, ансамблевая классификация, скрининг, ранняя диагностика, автоматизированная система.

За последние годы в развитии онкологии слизистой полости рта прослеживается тревожная динамика, указывающая на то, что с данным диагнозом могут столкнуться не только пожилые мужчины злоупотребляющими вредными привычками, но молодые люди, в том числе женщины без вредных привычек. С каждым годом диагностируется все больше случаев раковых форм новообразований ротовой полости, при раннем выявлении которых выживаемость пациентов может достигать 80–90 %, но на III–IV стадиях этот показатель не превышает 40 %. Предраковые состояния, такие как лейкоплакия и эритроплакия могут выглядеть даже для опытного стоматолога как несерьезная травма или стоматит. Неуклонный рост заболеваемости диктует необходимость трансформации существующей системы скрининга. Сложившаяся ситуация требует принципиально новых организационных решений в системе здравоохранения, направленных на оптимизацию выявления предопухолевой и опухолевой патологии челюстно-лицевой области. Особое значение приобретает разработка гибких скрининговых алгоритмов с учетом региональных особенностей и специфических факторов риска. Такой подход позволит перейти от простого соблюдения формальных норм к созданию действительно эффективной и рабочей системы раннего выявления заболеваний ротовой полости.

Однако эффективная диагностика рака и предраковых заболеваний полости рта требует глубоких знаний об их клиническом проявлении и современных методах

их выявления. Предметом разработки является методика автоматизированной диагностики на основе аппаратного — мультиспектральная визуализация в УФ и ИК диапазонах, совмещенная со стандартизированной системой позиционирования, и программного — алгоритм предобработки данных и ансамблевая классификация, компонентов.

В основе предлагаемого подхода к классификации лежат передовые принципы ансамблевого обучения, доказавшие свою эффективность в задачах медицинской диагностики. Главное преимущество такой методологии заключается в возможности объединить различные алгоритмы для комплексного анализа разнородных данных. Как подтверждают современные исследования в области медицинского искусственного интеллекта, ансамблевые методы демонстрируют более высокую диагностическую точность по сравнению с отдельно взятыми моделями, особенно в сложных случаях, требующих комплексной оценки множества связанных факторов.

Эффективность ансамблевого подхода обусловлена несколькими ключевыми факторами. Во-первых, комбинация 3D CNN (3D Convolutional Networks, трехмерные сверточные сети) и традиционных методов машинного обучения позволяет одновременно учитывать как сложные пространственно-спектральные зависимости в исходных изображениях, так и количественные характеристики, извлеченные в ходе предварительной обработки изображений. Согласно исследованиям, подобные гибридные архитектуры обеспечивают на 15–20 % более высокую точность по сравнению с отдельными моделями обучения.

Во-вторых, ансамблевый подход демонстрирует повышенную устойчивость к характерным для медицинских изображений артефактам и шумам. Это имеет решающее значение при работе с ультрафиолетовыми и инфракрасными каналами, где часто наблюдаются проблемы с засветкой или неравномерным освещением. Разнообразие моделей в ансамбле позволяет компенсировать искажения в отдельных каналах за счет информации из других источников данных. Особого внимания заслуживает клиническая интерпретируемость результатов, обеспечиваемая механизмами soft voting, которые позволяют количественно оценивать степень уверенности системы на основе согласованности предсказаний отдельных классификаторов.

Ансамблевая методология демонстрирует эффективность в условиях ограниченных выборок, характерных для клинической практики, где количество подтвержденных случаев предраковых состояний часто недостаточно для обучения отдельных моделей. Современные исследования демонстрируют, что комбинация трансферного обучения на предобученных CNN с классическими алгоритмами машинного обучения позволяет достигать высокой диагностической точности даже при небольшом количестве подтвержденных случаев. Это актуально для диагностики предраковых состояний, где количество подтвержденных случаев часто невелико.

Решающим аспектом является и возможность параллельной обработки данных. Параллельная обработка данных, когда 3D сверточные сети работают с исходными изображениями, а методы типа XGBoost анализируют извлеченные признаки, обеспечивает не только высокую точность, но и оперативность диагностики, ключевые в клинической практике.

Из этих рассуждений становится ясно, что ансамблевый подход представляет собой оптимальное решение для задачи классификации патологий полости рта, сочетая высокую точность, устойчивость к артефактам и клиническую интерпретируемость результатов. Это подтверждается как теоретическими исследованиями, так и практическими результатами, полученными в ходе медицинских испытаний.

Входными данными для системы служат мультиспектральные изображения полости рта, содержащие четыре спектральных канала: видимый спектр (RGB), ультрафиолетовый диапазон (365 нм) и два инфракрасных канала (850 и 950 нм). Эти данные дополняются бинарными масками сегментации, выделяющими области патологических изменений, и при наличии — клиническими метаданными пациента.

Первичный анализ направлен на многоуровневое выделение гетерогенных характеристик из входных изображений. Для получения глубинных признаков используется модифицированная архитектура ResNet50, где последние слои адаптированы под специфику медицинских изображений. Архитектура ResNet50 основана на концепции остаточного обучения, которое решает ключевую проблему глубоких нейронных сетей — деградацию точности при увеличении глубины. Основной строительный блок сети — остаточный модуль, содержащий так называемые «skip-connections», позволяющие градиенту свободно распространяться в обратном направлении в процессе обучения. Эти соединения реализуют принцип тождественного отображения, когда при необходимости входные данные могут передаваться на более глубокие слои без изменений.

Сеть состоит из пяти стадий обработки данных. Первая стадия включает начальную свертку большого ядра (7×7) с последующей операцией max-pooling с целью выделения низкоуровневых признаков. Далее следуют четыре группы остаточных блоков, каждая из которых работает с определенным уровнем абстракции признаков. В ResNet50 используется модификация остаточного

блока с «бутылочным горлышком» (bottleneck), где сначала происходит уменьшение размерности с помощью свертки 1×1, затем применяется свертка 3×3, и наконец — восстановление размерности. Такой подход значительно снижает вычислительную сложность без потери качества.

Особенностью архитектуры является постепенное увеличение количества фильтров (от 64 до 2048) при одновременном уменьшении пространственных размерностей карт признаков (от 56×56 до 7×7). Завершающая часть сети включает глобальный средний пулинг, преобразующий пространственные карты признаков в компактный вектор размерностью 2048 элементов, который затем используется полносвязным слоем для классификации. Алгоритм данного этапа отображен на схеме рисунка 1. Благодаря остаточным соединениям и продуманной организации блоков, ResNet50 демонстрирует высокую эффективность при работе с различными типами изображений, включая медицинские данные.

Параллельно вычисляются спектрально-текстурные характеристики. Для каждого спектрального канала строится нормированная гистограмма распределения интенсивностей пикселей, которое вычисляется по формуле (1). Это дает инструмент для количественной оценки особенностей светопоглощения в различных патологических состояниях:

$$H(i) = \frac{N_i}{N_{total}}, i \in [0,255], \quad (1)$$

где: N_i — количество пикселей со значением интенсивности i;

N_{total} — общее число пикселей в области интереса.

Текстура анализируется с использованием матрицы GLCM (Gray-Level Co-occurrence Matrix), предоставляющей пять диагностически значимых параметров: контраст, энергию, однородность, корреляцию и дисперсию. Наибольшее диагностическое значение имеют ультрафиолетовый и дальний инфракрасный каналы, демонстрирующие наибольшую чувствительность к клеточным структурам. Морфологический анализ сегментированных областей включает расчет трех ключевых показателей:

— площади поражения по формуле (2):

$$A = \sum_{i=1}^{N} I(p_i \in R), \quad (2)$$

где A — площадь в пикселях;

I — индикаторная функция (1 если пиксель принадлежит области);

p_i — координаты пикселя;

R — сегментированная область.

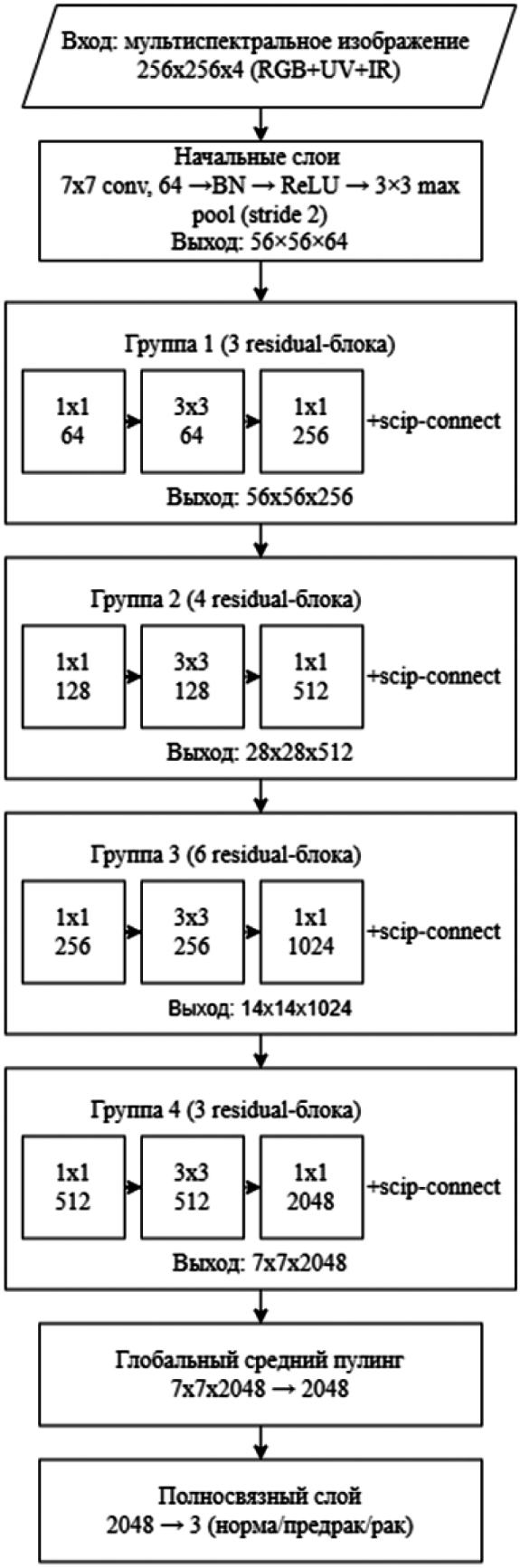


Рис. 1. Архитектура модели ResNet50 для задачи классификации

— коэффициента эксцентриситета (количественно характеризующего отклонение формы от окружности) по формуле (3):

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \quad (3)$$

где a — длина большой полуоси эллипса;
b — длина малой полуоси.

— параметра solidity, отражающего степень выпуклости контура интересующей для анализа области по формуле (4):

$$S = \frac{A}{A_{convex}} \quad (4)$$

где A — площадь реального контура;
A_{convex} — площадь выпуклой оболочки.

Эти метрики обладают высокой диагностической ценностью, поскольку злокачественные новообразования обычно проявляют выраженную нерегулярность формы и фрагментированность границ.

На этапе обучения создается гибридная ансамблевая модель, объединяющая три компонента. Ядром системы служит трехмерная сверточная сеть (3D CNN), специально разработанная для обработки мультиспектральных данных. Архитектура сети включает последовательность трехмерных сверточных слоев с ядрами размером 3×3×2 с целью анализа пространственно-спектральные корреляции. Второй компонент — градиентный бустинг (XGBoost), принимающий на вход объединенный вектор из глубинных, спектральных и морфологических признаков входных данных. Третий элемент — метод опорных векторов с ядром (SVM), добавляющий линейную разделяющую способность.

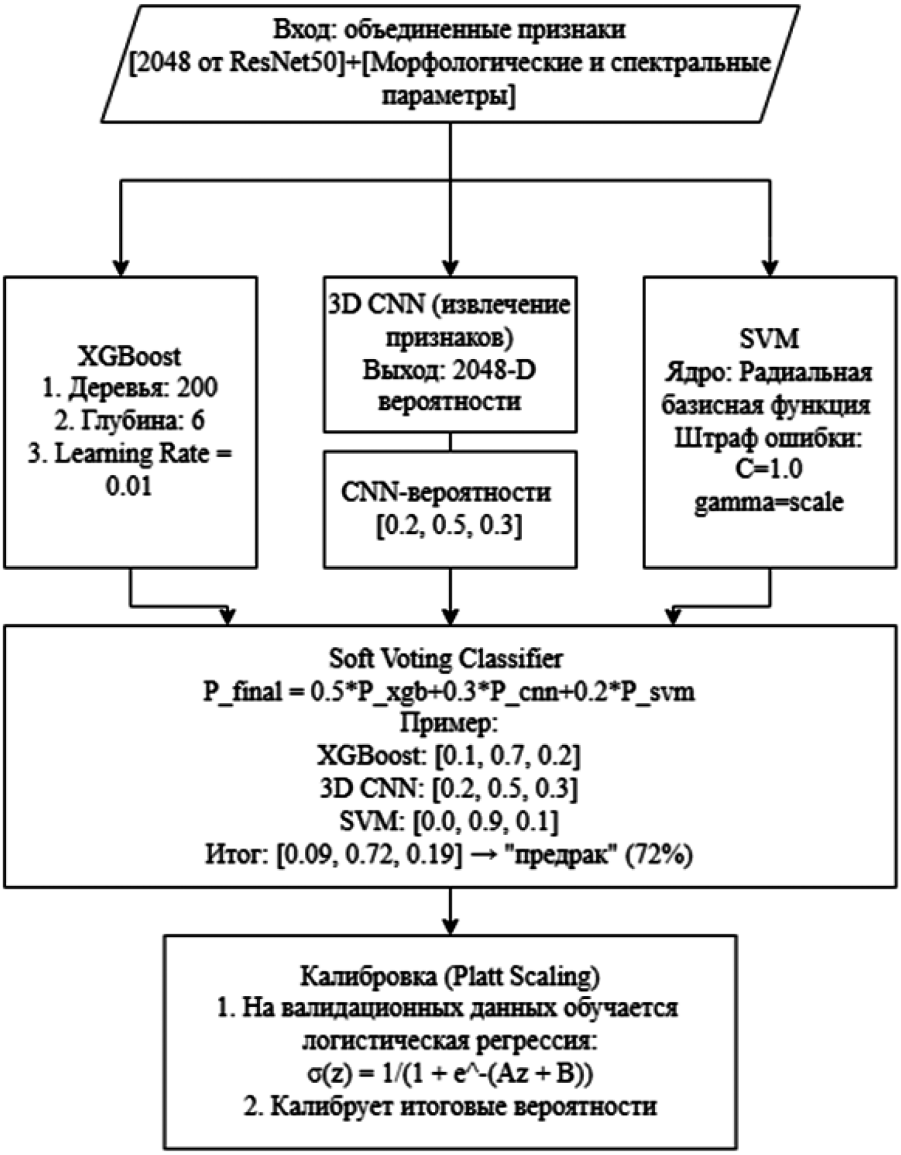


Рис. 2. Этап ансамблевой классификации

Финальное решение принимается путем мягкого голосования ансамбля, где каждый классификатор вносит взвешенный вклад в соответствии с его точностью на валидационной выборке. Для калибровки выходных вероятностей применяется метод Платта, который преобразует «сырые» оценки классификаторов в достоверные вероятностные оценки с помощью логистической регрессии. Детализированный этап ансамблевой классификации представлен на рисунке 2. Это играет ключевую роль для медицинских приложений, где критична точная интерпретация степени уверенности системы в полученных результатах обучения.

Оптимальный порог классификации определяется по индексу Юдена, максимизирующему разницу между истинно положительными и ложно положительными результатами. Для пространственного уточнения масок используется условное случайное поле (CRF), которое учитывает как вероятности пикселей, так и их пространственную согласованность, устраняя точечные артефакты сегментации.

Интерпретация результатов обеспечивается двумя методами: Grad-CAM визуализирует области изображения, наиболее повлиявшие на решение модели, выделяя диагностически значимые зоны тепловой картой. SHAP-анализ количественно оценивает вклад каждого признака, позволяя выявить ключевые спектральные биомаркеры. Например, анализ может показать, что гистограмма в УФ-диапазоне имеет наибольшую значимость для выявления дисплазии, а текстура в IR950 канале критична для дифференциации инвазивных форм рака. Полный алгоритм классификации отображен блок-схемой, представленной далее на рисунке 3.

Вычислительная эффективность системы обеспечивается оптимизированной архитектурой: 3D CNN обрабатывает изображение размером 256×256×4 пикселя за 8 миллисекунд на графическом ускорителе NVIDIA T4. Ансамблевый подход (3D CNN + XGBoost + SVM) обеспечивает статистически значимое улучшение точности на 9 % по метрике F1-score по сравнению с отдельными моделями, сохраняя интерпретируемость решений — ключевое требование для медицинских приложений. Система поддерживает два режима работы: быстрый скрининг на основе 3D CNN и углубленный анализ сложных случаев с полным ансамблем классификаторов.

Разработанный алгоритм демонстрирует высокую диагностическую точность за счет комбинации современных методов глубокого обучения и машинного обучения. Ансамблевый подход позволяет анализировать пространственно-спектральные зависимости, текстуру и морфометрические параметры, обеспечивая дифференциацию между здоровыми тканями, предраковыми состояниями и злокачественными новообразованиями.

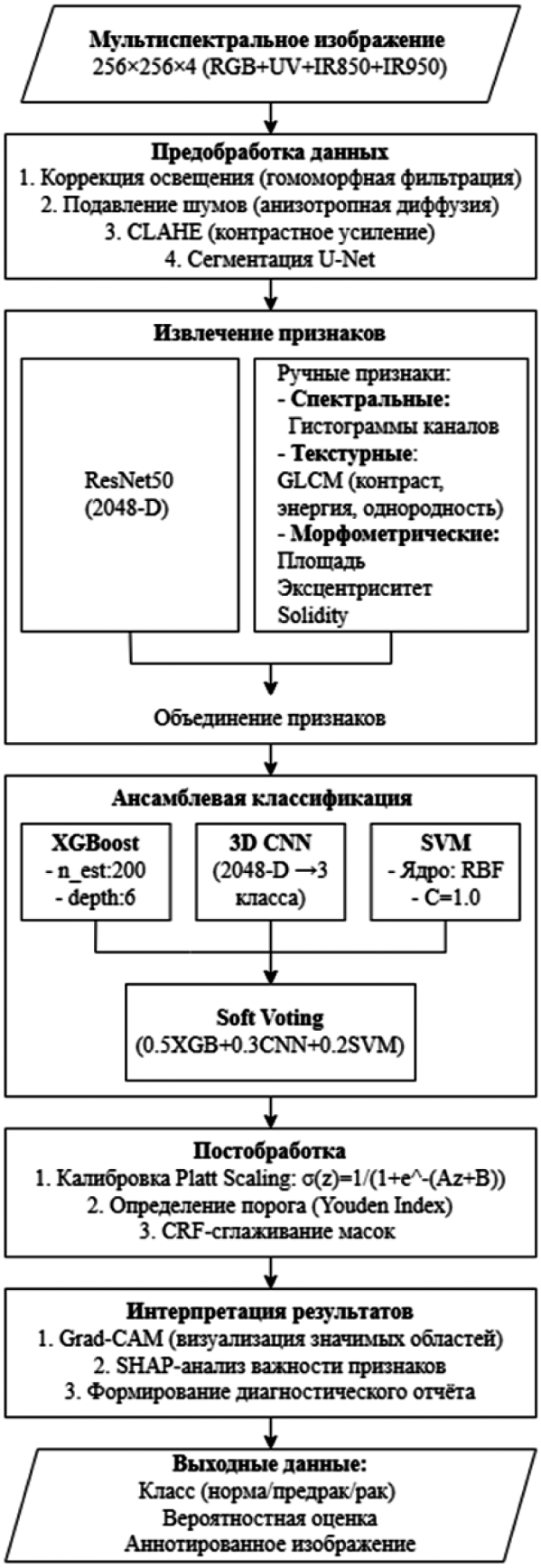


Рис. 3. Полный алгоритм модуля классификации

Для внедрения системы в клиническую практику следует не только обеспечить высокую точность алгоритмов, но и разработать удобный интерфейс для врачей. Это требует создания специализированного программного обеспечения, интегрирующего предложенные методы в рабочий процесс специалиста диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гажва С.И., Грехов А.В., Горячева Т.П., Сенина-Волжская И.В. Проблема ранней диагностики онкопатологии слизистой оболочки рта (социальные аспекты) // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 3.
2. Булгакова Н.Н., Волков Е.А., Позднякова Т.И. Аутофлуоресцентная стоматоскопия как метод онкоскрининга заболеваний слизистой оболочки рта // Российский стоматологический журнал. — 2015. — № 1. — С. 34–39
3. Усанов М.С., Кульберг Н.С., Морозов С.П. Опыт применения адаптивных гомоморфных фильтров для обработки компьютерных томограмм // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2017. — № 2. — С. 33–42
4. Рябых М.С., Сойникова Е.С., Батищев Д.С., Михелёв В.М. Высокопроизводительный метод морфологической обработки медицинских изображений // Интерактивная наука. — 2016. — № 5. — С. 34–41.
5. Ragab D.A., Sharkas M., Marshall S., Ren J. Breast cancer detection using deep convolutional neural networks and support vector machines // PeerJ. — 2019. — Vol. 7.
6. Abdulkadir A. 3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention — MICCAI 2016. — 2016. — P. 424–432.
7. Reza A.M. Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement // The Journal of VLSI Signal Processing-Systems for Signal, Image, and Video Technology. — 2004. — Vol. 38, № 1. — P. 35–44.
8. Baker M.J., et al. Using Fourier transform IR spectroscopy to analyze biological materials // Nature Protocols. — 2014. — Vol. 9, № 8. — P. 1771–1791.
9. Stockham T.G. Image processing in the context of a visual model // Proceedings of the IEEE. — 1972. — Vol. 60, № 7. — P. 828–842.
10. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. — 4th ed. — Pearson, 2018. — 1168 p.

© Рубекина Юлия Сергеевна (Ru.julia@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.33

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТЕКУЩЕЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ МОДУЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR FINDING THE CURRENT OPERATING POINT OF A MODULAR INDUSTRIAL ELECTRIC POWER CONVERTER

E. Savelyev
V. Khabuzov
V. Sidelnikov
I. Garyutin
V. Tsvetkov

Summary. The article touches on the development and testing of an algorithm for finding the nearest working point on a parametric voltage-current characteristic of a complex shape. This algorithm is planned to be used for control systems of a modular industrial electric converter to ensure response to changing load parameters.

Keywords: modular power supply, algorithm for finding the nearest point to the surface of complex shape, mathematical algorithms, software.

Савельев Евгений Анатольевич
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
mad_jackson@list.ru
Хабузов Василий Арсеньевич
Кандидат технических наук, Технический директор, Общество с ограниченной ответственностью ООО «Нью Лайн», Санкт-Петербург
vax9517643@yandex.ru
Сидельников Владимир Иванович
Кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
vsid1952@mail.ru
Гарютин Игорь Александрович
Старший преподаватель, Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения
manoftomorrow@mail.ru
Цветков Виктор Владимирович
Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
w1nampina@mail.ru

Аннотация. Статья затрагивает разработку и тестирование алгоритма поиска ближайшей рабочей точки на параметрической вольтамперной характеристике сложной формы. Данный алгоритм планируется применять для систем управления модульного промышленного электрического преобразователя для обеспечения реакции на изменяющиеся параметры нагрузки.

Ключевые слова: модульный источник питания, алгоритм поиска ближайшей точки к поверхности сложной формы, математические алгоритмы, программное обеспечение.

Развитие современной промышленности диктует особые условия эксплуатации и предъявляет высокие требования к различному вспомогательному оборудованию. Одним из основных классов такого оборудования является энергообеспечивающее. Производителям такого оборудования необходимо обеспечить не только качество и стабильность конечного продукта — электроэнергии, но и удовлетворить требования по вариативности номенклатуры таких систем и обеспечить возможность настраивать такие системы под конкретные требования технологического процесса с возможностью автоматической подстройки параметров под изменяющиеся условия протекания этого процесса.

Например, в современных целлюлозно-бумажных производствах приводные механизмы (валы, ролики, натяжные станции) обеспечивают непрерывное прохождение слоёв бумажной массы через отделительные, прессовые и сушильные участки. Скорость их вращения напрямую влияет на равномерность толщины и качестве поверхности материала Неправильная балансировка скоростей может привести к дефектам поверхности, неоднородной структуре или к разрыву материала, поэтому точная настройка, адаптация и поддержание постоянства параметров питающего оборудования является важной задачей обеспечения качества готовой продукции.

Если рассматривать участие энергообеспечения в определенном стандартизированном технологическом процессе, то задача становится уже не стационарная и сводится не к просто поддержанию какого-то жестко заданного выходного уровня напряжения или тока, а его динамическая регулировка и подстройка под текущие стадии и состоянии технологического процесса. Подобное поведение невозможно обеспечить без быстродейственной системы управления.

Развитие микроэлектроники и микропроцессорной техники позволило создать симбиоз силовой части и специализированных датчиков и вычислительных устройств, позволяющих отслеживать изменяющиеся состояние выходного сигнала и максимально точно и быстро подстраивать параметры источника питания для поддержания рабочей точки в зоне заданной вольтамперной характеристики (ВАХ). Концепция модульного преобразователя электроэнергии, предполагает наличие специализированной системы управления.

Разработка любой информационной системы начинается с постановки технического задания и определения перечня решаемых задач той или иной системой, для системы управления данным модульным преобразователем, ключевым является поддерживание выходной характеристики системы по заранее заданному пользовательскому алгоритму, в данном случае по пользовательской кривой ВАХ (тестовый интерфейс системы управления, который позволяет задавать сложные параметрические ВАХ представлен на рисунке 1).

Согласно теории автоматического управления (ТАУ), современные системы управления преимущественно базируются на принципе обратной связи, что обеспечивает их адаптивность и устойчивость к внешним возмущениям. Такой подход позволяет непрерывно контролировать и корректировать рабочие параметры системы, минимизируя ошибки и обеспечивая высокую точность регулирования. В контексте импульсных преобразователей питания применение принципа обратной связи особенно критично, поскольку точность измерения и стабилизация выходного напряжения напрямую влияют на эффективность работы как самого преобразователя, так и подключенных потребителей энергии. Небольшие отклонения от заданных значений могут привести к неэффективной работе системы, ускоренному износу компонентов и снижению надежности в целом, что подчеркивает необходимость использования высокоточных методов контроля. Поэтому алгоритмы управления

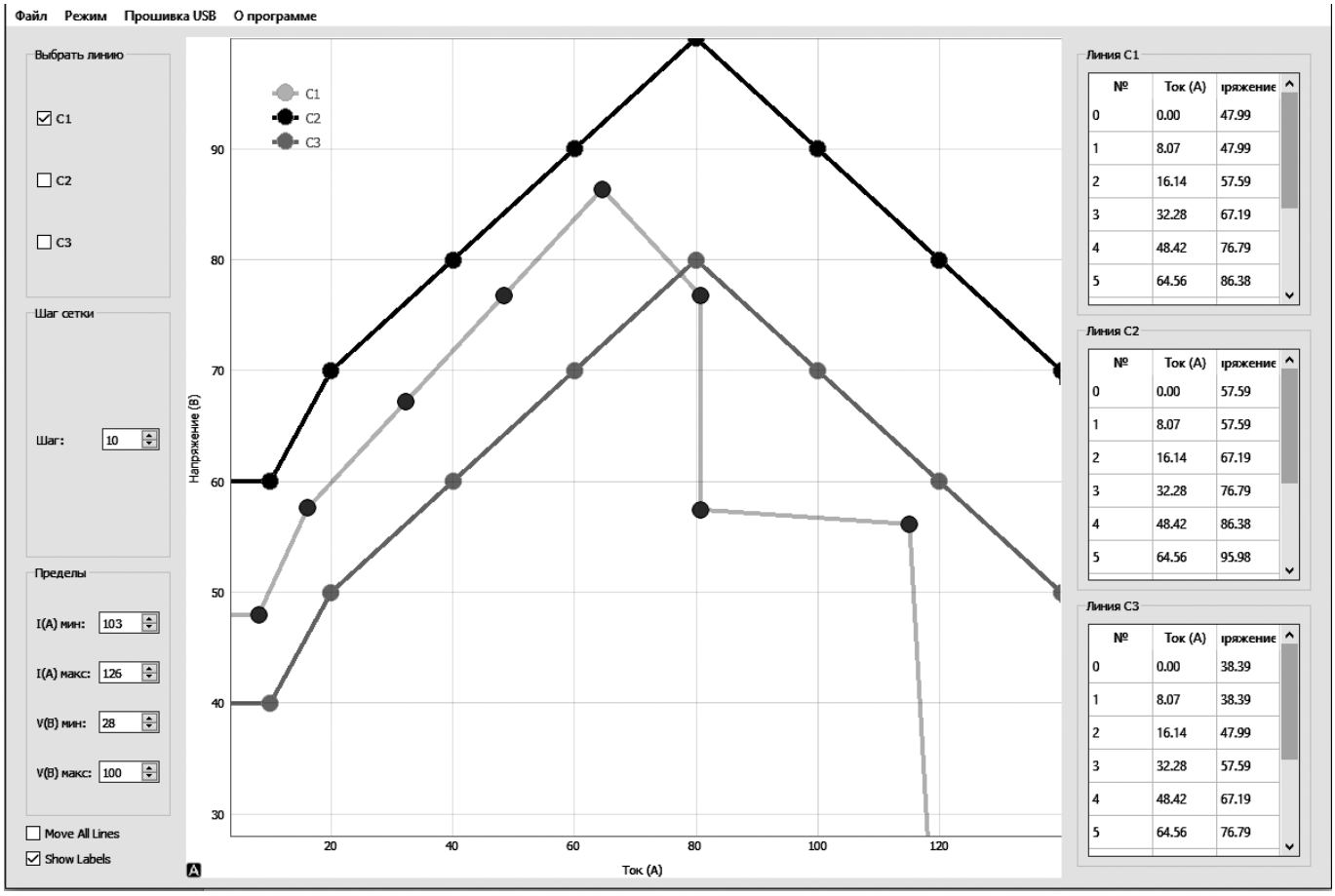


Рис. 1. Программный интерфейс системы управления модульным преобразователем электроэнергии
Источник: Составлено автором на основании [1]

должны максимально быстро и точно определять уход рабочей точки от заданных параметров, на основании этого расчета производить выработку управляющего воздействия.

Если рассматривать эту задачу с математической точки зрения, то она сводится к нахождению кратчайшего расстояния между текущей рабочей точкой, определенной как совокупность тока и напряжения, и рабочей точкой эталонной, определенной на заданной ВАХ (график ВАХ с распределением точек представлен на рисунке 2).

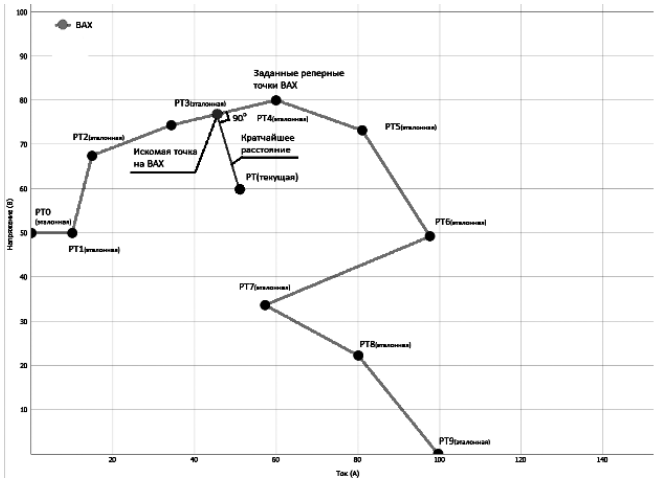


Рис. 2. Графическое представление алгоритма поиска искомой точки на рабочей ветви ВАХ
Источник: Составлено автором на основании [2]

Формально в математических расчетах расстояние от точки P до множества S определяют, как инфимум расстояний до всех точек этого множества, согласно формуле 1[3]:

$$d(P,S) = \inf_{Q \in S1} dist(P,Q) \quad (1)$$

Если множество *S* — гладкая кривая или прямая, то точка *Q* ближайшая к *P*, и расположенная на множестве *S*, обычно существует и единственна, а расстояние в таком случае равно длине отрезка *PQ*, и оно минимально. Однако для кривых общего вида ситуация сложнее и ближайшая точка может быть не единственной или даже не существовать, что усложняет, а иногда и делает невозможным применение классических методов расчета.

Существует множество распространённым математических алгоритмов расчета, кратчайшего расстояния от точки до плоскости или кривой, рассмотри несколько из них:

— Евклидово расстояние;
— Манхэттенское расстояние;
— Метод наименьших квадратов;

Эвклидово расстояние между точками $P(x_0, y_0)$ и $Q(x, y)$ определяется формулой 2:

$$dist(P,Q) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (2)$$

Тогда, задав параметризованную гладкую кривую S определяемой функцией 3 следующего вида [3]:

$$r(t) = (x(t), y(t)), \text{ при } t \in [a,b]. \quad (2)$$

Минимизировать расстояние от $P(x_0, y_0)$ до *S* удобно через квадрат расстояния, согласно формуле 3:

$$f(t) = \| r(t) - P \|^2 = (x(t) - x_0)^2 + ((y(t) - y_0))^2. \quad (3)$$

Условие минимума (при внутреннем экстремуме) задаётся равенством производной, формула 4:

$$\mathrm{ddtf}(t) = 2(x(t) - x_0)x'(t) + 2(y(t) - y_0)y'(t) = 0 \quad (4)$$

Геометрически это означает, что в точке $Q^*=r(t^*)$, ближайшей к *P*, вектор Q^*-P ортогонален касательной $r'(t^*)$. Однако в случае произвольных кривых уравнение (3) может иметь несколько решений t_1^*, t_2^*, t_k^*. Это означает, что функция расстояния $f(t)$ имеет несколько локальных минимумов. Тогда для нахождения глобального минимума необходимо вычислить $f(t)$ во всех найденных точках, а также на границе интервала $t=a$ и $t=b$, и выбрать минимальное значение, по формуле 5[4]:

$$d(P,S) = \min\left\{\sqrt{f(t_1^*)}, \sqrt{f(t_2^*)}, \ldots, \sqrt{f(t_k^*)}, \sqrt{f(a)}, \sqrt{f(b)}\right\} \quad (5)$$

Данный метод обеспечивает естественную геометрическую интерпретацию расстояния, однако при наличии изгибов, самопересечений или разрывов касательной (например, в углах) функция расстояния может иметь несколько локальных минимумов и при численном решении задачи минимизации может возникать неоднозначность выбора глобального минимума. Что вносить ограничение на применение данного метода в систему управления в чистом виде.

Рассмотри другой метод. Манхэттенское расстояние между точками $P(x_0, y_0)$ и $Q(x,y)$ определяется согласно формуле 6:

$$dist(P,Q) = |x - x_0| + |y - y_0| \quad (6)$$

Для произвольной наклонной прямой, заданной, например, уравнением Ax+By+C=0, аналитическое выражение для L1 — расстояния получить сложнее из-за не дифференцируемости модуля. Задачу можно разбить на несколько случаев, рассмотрев знаки выражений $x-x_0$ и $y-y_0$. Таким образом, решение сводится к минимизации выражений вида [4]:

$$\min\{\pm(x - x_0) \pm (y - y_0)\} \quad (7)$$

При условии Ax+By+C=0, выбирая тот набор знаков, для которого найденная точка лежит на прямой. При задании кривой параметрически

$$r(t) = (x(t), y(t) \tag{8}$$

задача минимизации также сводится к разбиению интервала [a, b] на участки, где функция монотонна по *x* или *y* согласно формуле 9:

$$\min_{t\in[a,b]}\left\{\left|x(t) - x_0\right| + \left|y(t) - y_0\right|\right\} \tag{9}$$

На каждом таком участке можно аналитически или численно определить минимум, сравнивая значения на концах и в точках изменения знака производной соответствующего модуля. Решения задачи минимизации в таком случае приводит к множественности кратчайших путей, что увеличивает алгоритмическую сложность.

Метод наименьших квадратов (МНК) применяется для аппроксимации исходных данных (точек на кривой) функцией, минимизирующей сумму квадратов отклонений. При работе с произвольными кривыми часто используется аппроксимация сложной формы более простыми объектами, такими как прямая, полином или сплайн. Например, для аппроксимации линейной зависимости используется модель *y=ax+b*, при этом МНК минимизирует сумму квадратов вертикальных отклонений, а для получения ортогональной аппроксимации необходимо минимизировать сумму квадратов перпендикулярных расстояний, что приводит к нелинейной оптимизационной задаче. А также к повышению ошибки определения искомой точки на кривой.

Поэтому использование классических методов поиска ближайшей точки не является возможным так как дает большую погрешность при сложных формах кривых. Однако разработанный адаптационный метод позволяет находить с достаточной точностью и быстродействием из-за использования простых вычислительных операций ближайшую точку даже на таких кривых. Адаптированный метод поиска необходимой рабочей точки, позволяет рассчитать координаты ближайшей точки на заданной кривой независимо от ее формы.

Данный метод основан на том, что для каждого отрезка между двумя соседними опорными точками кривой производится проекция заданной точки на прямую, содержащую этот отрезок. Математически это выглядит следующим образом, пусть у нас есть отрезок с концами *V* и *W* и точка *P*. Сначала вычисляется вектор от *V* к *W*:

$$\vec{d} = (w.x - v.x, w.y - v.y) \tag{10}$$

Затем определяется параметр *t* по формуле:

$$t = \frac{(p - v)\cdot\vec{d}}{\|\vec{d}^2\|} \tag{11}$$

где $(p - v)\cdot\vec{d}$ — скалярное произведение, а $\|\vec{d}^2\| = (w.x - v.x)^2 + (w.y - v.y)^2$

Этот параметр *t* показывает, где именно проецируется точка *p* относительно отрезка:

- Если $t \in [0,1]$, то проекция лежит на самом отрезке.
- Если $t < 0$ или $t > 1$, то проекция «выпадает» за границы отрезка, и тогда ближайшей точкой является один из его концов.

После того как для каждого отрезка вычислена точка проекции $q = v + t\cdot\vec{d}$, рассчитывается квадрат расстояния между *p* и *q*:

$$d^2 = (p.x - q.x)^2 + (p.y - q.y)^2 \tag{12}$$

Выбор в качестве лучшего кандидата осуществляется по минимальному значению d^2.

Метод обладает несколькими преимуществами с точки зрения вычислительной сложности. Во-первых, он имеет линейную сложность, поскольку для каждого из *n*–1 отрезков производится одно и то же вычисление, требующее константного числа операций. Таким образом, сложность каждого прохода равна *O*(*n*)[5].

Во-вторых, метод минимизирует затраты на вычисления за счёт отсутствия дорогостоящих операций. Например, вместо извлечения квадратного корня используется квадрат расстояния, что значительно снижает вычислительную нагрузку. Кроме того, прямое вычисление параметра *t* и последующая проверка с использованием простых арифметических операций (умножение, деление, сложение, вычитание) делают каждую итерацию очень быстрой.

Анализ рассчитанных точек показывает успешное нахождение точек разработанным алгоритмом (график заданной кривой и перечень рассчитанных точек на рисунке 3).

Сравнение времени реакции различных методов представлен в таблице 1.

Внешний цикл повторяет процедуру несколько раз для оценки среднего времени, при этом каждая итерация внутри цикла не зависит от предыдущей. Это означает, что не используются дополнительные итеративные методы или процессы сходимости, как это бывает в методах градиентного спуска или итерационных приближениях для метода наименьших квадратов.

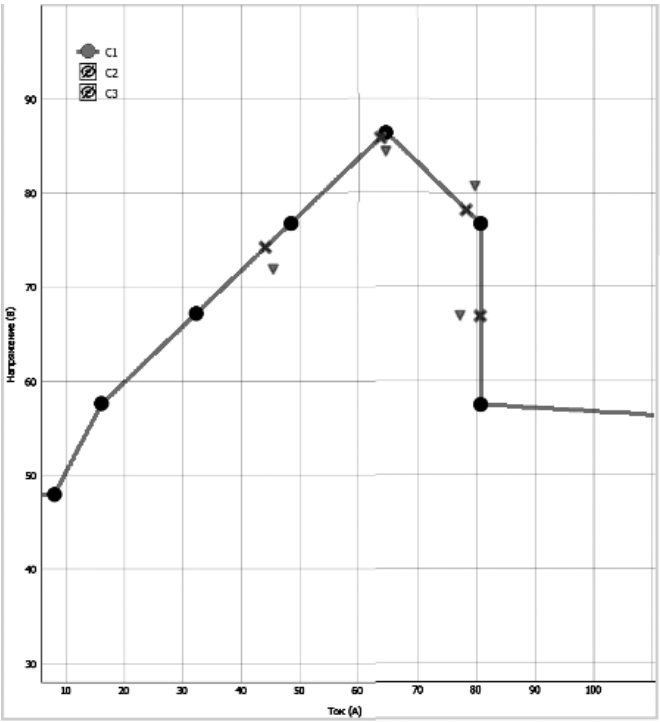


Рис. 3. График пользовательской заданной ВАХ сложной формы и произведенный расчет ближайшей рабочей точки, при заданном отклонении, при помощи разработанного алгоритма
Источник: Составлено автором на основании [2]

Таблица 1.
Сравнение методов нахождения ближайшей РТ на кривой ВАХ

Наименование метода	Время реакции метода, мкс
Метод с повышенной точностью	1.902
Метод наименьших квадратов	26.000
Евклидово расстояние	3.995
Манхэттенское расстояние	42.057

Источник: Составлено автором на основании собственных исследований

При обработке сложной кривой количество точек может быть очень большим, и каждое вычисление проекции на отрезок производится по простейшей формуле с константным числом операций. В отличие от методов, которые пытаются найти глобальную аппроксимацию кривой, используют более сложный перебор, этот метод проходит по каждому отрезку один раз и вычисляет точное расстояние без дополнительных итераций для уточнения. Это обеспечивает минимальную вычислительную сложность $O(n)$ для каждого прохода по кривой, что является оптимальным решением для подобных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. RU№2317880, Способ формирования внешней характеристики источника питания для электросварки.
2. RU№2329125, Способ формирования внешней характеристики источника питания для дуговой электросварки плавящимся электродом.
3. Cantera-Cantera L.A., Vargas-Jarillo C., Palomino-Reséndiz S.I., Montelongo-Vázquez C.M. A Polynomial-Fitting Problem: The Orthogonal Distances Method, Mathematics, 2022, Vol. 10, no. 23, P. 4596.
4. Савенков Е.Б. Конечноэлементный вариант метода проекции ближайшей точки для решения уравнений на поверхностях с краем // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 8. 36 с. DOI: 10.20948/prepr-2020–8.
5. Мясоедова Т.М. Формообразование семейства кривых смещения с выявлением их нерабочих участков / Т.М. Мясоедова // Программные системы и вычислительные методы. — 2020. — № 2. — С. 20–30. (DOI: 10.7256/2454–0714.2020).

© Савельев Евгений Анатольевич (mad_jackson@list.ru); Хабузов Василий Арсеньевич (vax9517643@yandex.ru);
Сидельников Владимир Иванович (vsid1952@mail.ru); Гарютин Игорь Александрович (manoftomorrow@mail.ru);
Цветков Виктор Владимирович (w1nampina@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.34

ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОФИСНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА В КОРПОРАТИВНОЙ СРЕДЕ

ONTOLOGICAL MODELING OF OFFICE PRINTING INFRASTRUCTURE FOR AUTOMATED MANAGEMENT AND MONITORING IN A CORPORATE ENVIRONMENT

M. Samokhin

Summary. The article presents an ontological approach to modeling the office printing infrastructure in a corporate environment. The developed ontology covers key components: printing devices, consumables, lifecycle events, and process participants. The proposed model is intended for use in intelligent management systems, allowing automated monitoring, analysis, and decision-making within the framework of IT operations. Special attention is paid to the integration of heterogeneous data sources and the prospects for the development of management support services.

Keywords: ontology, office printing, lifecycle management, intelligent systems, monitoring, IT operation.

Самохин Максим Александрович
Волгоградский государственный технический университет
m.samokhin.it@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен онтологический подход к моделированию инфраструктуры офисной печати в корпоративной среде. Разработанная онтология охватывает ключевые компоненты: устройства печати, расходные материалы, события жизненного цикла и участников процесса. Предлагаемая модель предназначена для использования в интеллектуальных системах управления, позволяя автоматизировать мониторинг, анализ и принятие решений в рамках ИТ-эксплуатации. Особое внимание уделено интеграции разнородных источников данных и перспективам развития сервисов поддержки управления.

Ключевые слова: онтология, офисная печать, управление жизненным циклом, интеллектуальные системы, мониторинг, ИТ-эксплуатация.

Введение

Инфраструктура офисной печати в современных коммерческих организациях является неотъемлемой частью информационно-технологического ландшафта [1]. Принтеры, многофункциональные устройства (МФУ), расходные материалы и вспомогательные сервисы образуют сложную систему, требующую непрерывного контроля, обслуживания и управления. С увеличением количества печатных узлов, а также диверсификацией используемого оборудования, существенно возрастают требования к эффективности администрирования и прозрачности процессов.

Однако традиционные подходы к управлению инфраструктурой печати чаще всего сводятся к мониторингу технического состояния устройств и учету затрат [2]. Такие решения не охватывают всей полноты семантических связей между элементами системы, не обеспечивают формализации накопленных знаний и не позволяют эффективно интегрировать данные из разнородных источников.

В этих условиях особенно актуальным становится применение онтологических методов моделирования, которые позволяют представить предметную область в виде формализованной системы взаимосвязанных понятий. Онтология офисной печати может стать основой для создания интеллектуальных информационных систем, предназначенных для автоматизированного управления жизненным циклом оборудования, поддержки принятия решений и обеспечения единой информационной модели.

Целью данной статьи является разработка онтологической модели, описывающей ключевые компоненты инфраструктуры офисной печати, а также демонстрация её применимости в задачах мониторинга, анализа и управления в корпоративной среде.

1. Постановка задачи и актуальность онтологического моделирования в инфраструктуре офисной печати

На протяжении последних лет в корпоративных ИТ-средах наблюдается устойчивая тенденция к автоматизации и интеллектуализации процессов управления. В то же время инфраструктура офисной печати часто остаётся в стороне от этих преобразований, оставаясь в рамках традиционного эксплуатационного подхода —

с ручным управлением, нерегулярной диагностикой и отсутствием единой модели данных. Это приводит к множеству проблем:

- недостаточная прозрачность в использовании расходных материалов;
- дублирование учётных данных между подразделениями;
- затруднения при оценке технического состояния и прогнозировании отказов;
- сложность унификации сервисных политик и регламентов.

В условиях, когда на повестке дня стоят задачи цифровой трансформации и интеграции всех компонентов ИТ-инфраструктуры в единое информационное пространство, такие проблемы становятся критически значимыми. Это подчеркивает необходимость перехода от фрагментарного представления о печатной инфраструктуре к её целостной, формализованной модели.

Одним из перспективных решений этой задачи является использование онтологических моделей, применяемых для формального описания предметных областей [3, 4]. В отличие от простых справочников или иерархических классификаторов, онтологии позволяют:

- явно фиксировать взаимосвязи между объектами (например, принтер — картридж — событие отказа);
- задавать логические правила и ограничения;
- строить цепочки причинно-следственных связей;
- выполнять семантический поиск и анализ.

Онтологический подход особенно эффективен при необходимости интеграции разнородных источников данных — например, информации из систем заявок, мониторинга, складского учёта, финансового анализа. Онтология может выполнять роль «семантического клея», обеспечивая единое представление о знаниях вне зависимости от форматов источников.

Целью онтологии является изучение категорий вещей, которые существуют или могут существовать в некоторой предметной области. Одно из определений онтологии рассматривает онтологию как словарь взаимосвязанных терминов, которые определяют структуру предметной области и ограничивают возможную интерпретацию терминов. Неформально онтологию можно определить как набор терминов (концепций) и их определений, изложенных на естественном языке. Формальные онтологии могут быть заданы аксиомами и формулами, изложенными на формальном языке. Аксиоматизированную онтологию можно рассматривать как аксиоматическую теорию предметной области. Как правило, онтологию можно определить как лингвистический артефакт, который определяет общий словарь базовых понятий для обсуждения фрагмента реальности (предметной области) и определяет, что именно означают эти понятия. Таким образом, онтологии обеспечивают основу для семантического моделирования предметной области, интеграции информации и коммуникации в предметной области. Семантическая интероперабельность для объединения информационных систем разных сторон, разработка композиций информационных систем, управление повсеместными вычислительными средами/интеллектуальными пространствами и контекстно-зависимыми системами, наукоемкие информационные системы — вот лишь несколько примеров областей, сильно зависящих от прогресса в онтологическом моделировании. Особенно интенсивными являются текущие разработки для семантической сети, которая, как планируется, будет предоставлять более автоматизированные сервисы, основанные на семантике данных, поддающейся машинной обработке. Онтологии, как разделяемые и общепринятые теории предметной области, являются ключевым фактором, обеспечивающим доступ, взаимодействие и коммуникацию на основе контента в Интернете, что обеспечивает качественно новый уровень обслуживания. Можно ожидать, что конвергенция цифровых библиотек и технологий семантического веба обеспечит большую семантику при доступе к разнородным информационным коллекциям. Онтологии стали очень широкой и интенсивной областью исследований и разработок, которая заслуживает отдельного анализа. Эта статья представляет собой краткий обзор технологии онтологий. В основном статья посвящена подходам к онтологическому моделированию, которые подразделяются на вербальные модели, модели, основанные на логике, структурные (объектные) модели и гибридные модели. В статье представлен анализ соответствующих средств моделирования. Кратко обсуждаются проекты, направленные на построение онтологий в качестве практических приложений. Из-за семантической и платформенной неоднородности средств онтологического моделирования интеграция онтологий становится сложной задачей, которую необходимо рассмотреть. Наконец, в статье проводится анализ различий между концептуальным моделированием данных и разработкой онтологий.

Таким образом, онтологическое моделирование инфраструктуры офисной печати представляет собой не только научный интерес, но и практическую ценность. Оно позволяет существенно повысить уровень автоматизации управления, создать основу для построения интеллектуальных сервисов и обеспечить гибкую адаптацию ИТ-систем к изменениям в корпоративной среде.

В следующей главе будет представлена разработанная онтология предметной области, включающая основные классы, свойства и отношения, охватывающие жизненный цикл устройств печати, типы расходных материалов, участников процессов и события эксплуатации.

2. Разработка онтологической модели

Разработка онтологической модели инфраструктуры офисной печати начинается с формализации ключевых понятий предметной области. Онтология должна охватывать не только технические аспекты оборудования, но и весь жизненный цикл устройств, связанный с их эксплуатацией, обслуживанием, отказами, заменами и взаимодействием с пользователями и ИТ-специалистами.

В качестве базовой методологии использован подход OWL (Web Ontology Language), позволяющий описывать классы, свойства, отношения и ограничения в логической форме. Также применялись рекомендации, изложенные в работах по сквозному онтологическому проектированию [5], включая этапы: выделение понятий, описание классов, построение иерархии, формализация связей и атрибутов, описание поведенческих сценариев.

В разработанной онтологии выделены четыре основные группы сущностей:

- Оборудование: устройства печати, сканеры, МФУ, сетевые узлы. Атрибуты включают тип, модель, серийный номер, сетевой адрес, технические характеристики.
- Расходные материалы: тонеры, картриджи, фотобарабаны, бумага. Здесь учитываются тип носителя, срок службы, дата установки и уровень израсходованности.
- События жизненного цикла: установка, запуск, техническое обслуживание, сбой, замена, утилизация. Каждое событие связано с конкретным устройством и пользователем.
- Участники: операторы, пользователи, системные администраторы, подрядные организации. Их роли определяют доступ к операциям в системе.

Такая структура позволяет выразить не только иерархические, но и контекстуальные связи. Например, событие *замена картриджа* связано одновременно с устройством, типом расходного материала, пользователем, и временной меткой. Это обеспечивает многомерное представление ситуации и позволяет формировать основанные на правилах выводы.

Онтология была реализована в инструменте Protégé с экспортом в формат OWL2. При проектировании использовалась структура классов верхнего уровня:

- PrintingDevice
- Consumable
- LifecycleEvent
- Actor

Для каждого класса определены свойства. Например, класс PrintingDevice имеет свойства hasIPAddress, hasLocation, hasStatus, а класс LifecycleEvent — hasDate, isPerformedBy, isRelatedToDevice.

Семантические связи реализованы через свойства типа objectProperty. Это позволяет формировать триплеты вида:

<event123> isRelatedToDevice <printer456>
<event123> hasDate «2025-03-14»
<event123> isPerformedBy <technician789>

Такие триплеты применимы для построения графов и использования в SPARQL-запросах для семантического поиска и анализа данных.

Сходные подходы применялись в зарубежных проектах по управлению печатной инфраструктурой. Например, в работе [6] предложена модель управления модульными принтерами, в которой события мониторинга и управления агрегируются на основе модульных компонентов. Это подтверждает применимость онтологических методов и в задачах оперативного управления оборудованием.

На рис. 1 приведен граф системы. Рассмотрим различные существующие взаимосвязи. Во-первых, элемент заказа связан с элементом инвентаризации и элементом индивидуального номера сотрудника. Заказанное количество картриджей может быть предоставлено только при наличии достаточного количества на складе. Во-вторых, элемент инвентаризации связан с элементом пополнения запасов. Когда происходит пополнение запасов, количество в наличии обновляется значением суммы пополнения. Таким образом, заказ является функцией пополнения. В-третьих, функция индивидуального номера сотрудника связана с функцией количества заказов. Таким образом, все предметы на рис. 1 связаны, по крайней мере, с одним другим предметом. Более того, по дугам можно «переходить» от одного предмета к другому.

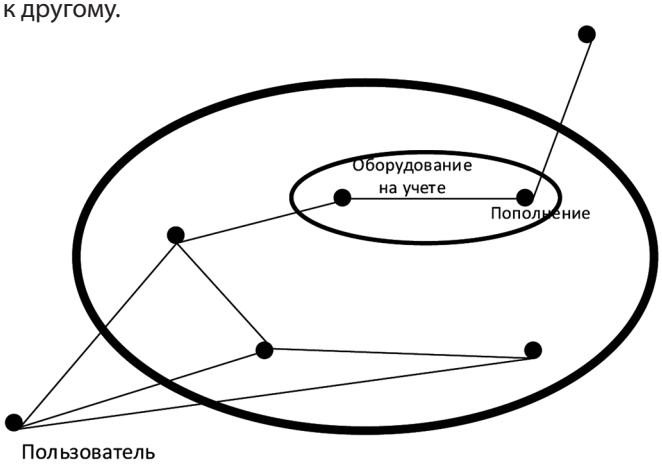


Рис. 1. Граф системы

Чтобы проиллюстрировать понятие системной декомпозиции, рассмотрим рис. 2. На рис. 1 система была разделена на две подсистемы: подсистему управления

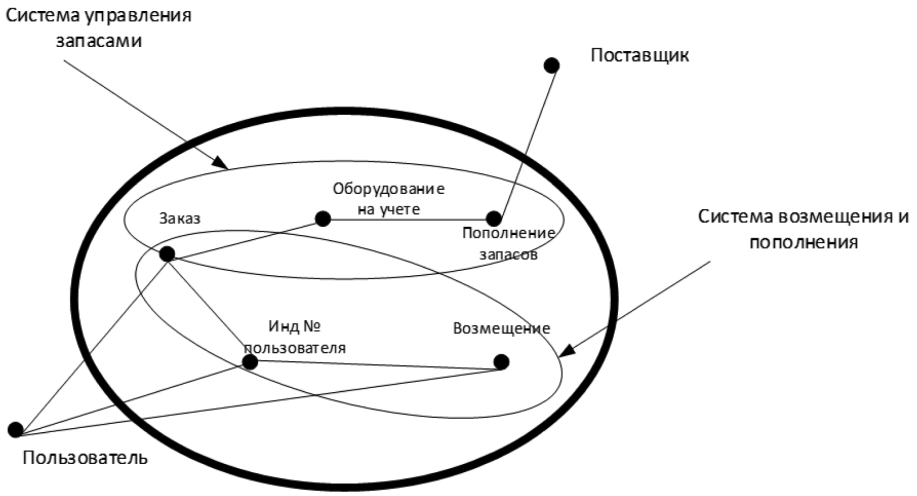


Рис. 2. Декомпозиция системы рис. 1

запасами и подсистему запросов. Несложно показать, что эти две подсистемы представляют собой декомпозицию, представленную на рис. 1. Концепция декомпозиции естественным образом приводит к понятию уровневой структуры над системой. Уровневая структура формализует идею о том, что наборы подсистем «вложены» в определенные системы, которые, в свою очередь, вложены в другие системы.

Предложенная онтологическая модель обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными способами моделирования:

- Расширяемость: возможно добавление новых классов и связей без переработки всей структуры.
- Интероперабельность: онтология может быть использована в качестве общего формата для интеграции с системами CMDB, Help Desk, ITSM.
- Формализация знаний: отражает как статические, так и динамические аспекты функционирования печатной инфраструктуры.
- Поддержка интеллектуальных функций: возможно построение сервисов предиктивного анализа, обнаружения аномалий, рекомендаций и др.

3. Применение онтологической модели в автоматизированных системах управления и мониторинга

Онтологическая модель, разработанная в статье, является универсальным инструментом для формализации знаний об инфраструктуре офисной печати и может эффективно использоваться в составе автоматизированных информационных систем.

В условиях корпоративной эксплуатации печатной техники ключевым элементом ИТ-поддержки являются системы управления конфигурациями и активами (CMDB, ITAM), а также платформы сервис-деск. Онтология может служить базой для объединения разрозненных данных из этих систем в единую семантическую модель.

Также перспективным направлением является использование онтологии в составе цифровых двойников — моделей, отражающих текущее и прогнозируемое состояние каждого устройства в ИТ-среде. Такая концепция уже реализуется в промышленных системах управления данными [7].

Кроме того, возможно внедрение онтологии в образовательный процесс (например, при обучении ИТ-специалистов по курсам управления ИТ-услугами), а также в методические регламенты корпоративных ИТ-служб.

Показано, что онтология может быть эффективно интегрирована в корпоративные ИТ-среды, включая системы мониторинга, управления активами, сервис-деск и аналитические платформы. Она открывает возможности для построения интеллектуальных сервисов поддержки принятия решений, семантического поиска, прогнозирования технических событий и повышения прозрачности эксплуатации оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыбульская А.В., Гнутова А.А. Информационная инфраструктура предприятия издательского дела //XVI Королевские чтения: междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 60-летию полета в космос Ю.А. Гагарина: сб. материалов: 5–7 окт. 2021 г.: в 3 т. — 2021.
2. Vines R., Naismith L. Knowledge Management and Publishing Systems Infrastructure //Developing Knowledge Workers in the Printing and Publishing Industries. — 2002. — С. 59.
3. Балашова И.Ю. Онтологические модели в системе информатизации образования //Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. — 2015. — №. 3 (15). — С. 120–127.
4. Мальцева С.В. Применение онтологических моделей для решения задач идентификации и мониторинга предметных областей //Бизнес-информатика. — 2008. — №. 3. — С. 18–24.
5. Негода В.Н. Сквозное проектирование автоматизированных систем на основе онтологий / В.Н. Негода, А.А. Куликова // Онтология проектирования. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 450–463.
6. Румл У., До М.Б., Чжоу Р., Фромгерц М.П. Дж. Онлайн-планирование и диспетчеризация: применение к управлению модульными принтерами [Электронный ресурс] — 2014. — Режим доступа: https://arxiv.org/abs/1401.3875 (дата обращения: 06.05.2025).
7. Горшков С., Гребешков А., Шебалов Р. Платформа управления промышленными данными на основе онтологий [Электронный ресурс] — 2021. — Режим доступа:

© Самохин Максим Александрович (m.samokhin.it@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.36

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОММУНИКАНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ

ANALYSIS OF FUNCTIONAL ACTIVITIES OF COMMUNICATORS OF INTELLECTUAL CONTROL CIRCUIT

S. Skryl
B. Goryachkin
D. Ivchenko

Summary. The article analyzes the functional activities of communicators in intelligent control circuits (ICC), which are a human operator, an artificial intelligence (AI) subsystem, and a computing machine. Their functional and non-functional limitations that affect the performance of a human-oriented system are considered. Particular attention is paid to how the limitations of these elements (human cognitive limitations, AI computing power, machine accuracy) determine their role and contribution to the performance of tasks within the ICU. Examples of regulatory standards governing the operation of the ICU are given.

Keywords: intelligent control loop, limitations, functional activity, artificial intelligence, human operator, machine, regulatory standards, ergonomics.

Скрыль Сергей Васильевич
доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
skryl@bmstu.ru
Горячкин Борис Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru
Ивченко Даниил Денисович
Аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
danyaiv2010@gmail.com

Аннотация. В статье анализируется функциональная деятельность коммуникантов в интеллектуальных контурах управления (ИКУ), каковыми являются человек-оператор, подсистема искусственного интеллекта (ИИ) и вычислительная машина. Рассматриваются их функциональные и нефункциональные ограничения, влияющие на производительность человекоориентированной системы. Особое внимание уделено тому, как ограничения этих элементов (когнитивные ограничения человека, вычислительные мощности ИИ, точность машин) определяют их роль и вклад в выполнение задач в рамках ИКУ. Приведены примеры нормативных стандартов, регулирующих работу ИКУ.

Ключевые слова: интеллектуальный контур управления, ограничения, функциональная деятельность, искусственный интеллект, человек-оператор, машина, нормативные стандарты, эргономика.

Введение

Современные автоматизированные информационные системы представляют собой высокотехнологичные системы, состоящие из трех главных компонентов: человек-оператор, искусственный интеллект (ИИ) и средства вычислительной техники (СВТ). Эти компоненты работают в неразрывной взаимосвязи, создавая систему, способную эффективно решать задачи, требующие аналитики, физического исполнения и стратегического управления. Важность понимания ограничений и требований этих компонентов в контексте их функциональной деятельности невозможно переоценить, так как именно эти ограничения определяют возможности взаимодействия между ними и, соответственно, общую эффективность всей системы.

Интеллектуальные контуры управления (ИКУ) являются ключевым элементом в области автоматизированного управления, охватывающим разнообразные сферы, такие как автономное вождение, робототехника, производственные процессы и другие области, где требуется высокая степень синергии между ИИ, человеком и машиной [1]. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к ИКУ, что обусловлено их потенциалом для повышения производительности, безопасности и точности выполнения задач. Однако, несмотря на значительные достижения в этой области, существует ряд проблем, связанных с ограничениями каждого из компонентов системы.

Одной из основных проблем является когнитивное ограничение человека, которое влияет на его способность обрабатывать и интерпретировать большие объ-

емы данных. Это ограничение особенно критично в условиях стресса или перегрузки информации, что может привести к снижению точности принятия решений [2]. В свою очередь, ИИ сталкивается с проблемами, связанными с качеством данных и вычислительными ресурсами, необходимыми для обработки информации в реальном времени [3]. Машины, выполняя физические действия, также имеют свои ограничения по вычислительным мощностям и точности выполнения команд.

Анализ существующих исследований показывает, что ограничения компонентов ИКУ часто рассматриваются изолированно или в статике. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа взаимосвязей этих ограничений и их динамического влияния на функциональную деятельность ИКУ в зависимости от меняющихся условий функционирования и специфики выполняемых задач [4].

Иерархическая структура ИКУ

Структура ИКУ представляет собой динамическую и часто распределенную иерархию компонентов: человека, ИИ и СВТ. Выбор архитектуры и распределение функций между уровнями определяется не только функциональными требованиями, но и ограничениями компонентов. Понимание того, как ограничения влияют на взаимодействие компонентов на разных уровнях, критично для обоснования функциональной деятельности каждого элемента в системе (рис. 1).

Структура ИКУ представляет собой динамическую и часто распределенную иерархию компонентов: человека, ИИ и СВТ. Выбор архитектуры (централизованная, распределенная) и распределение функций между уровнями определяется не только функциональными требованиями, но и ограничениями компонентов. Понимание того, как ограничения влияют на взаимодействие компонентов на разных уровнях, критично для обоснования функциональной деятельности каждого элемента в системе.

- Человек выполняет стратегическое управление, постановку целей, контроль.
- ИИ отвечает за анализ данных, выявление закономерностей, формирование рекомендаций.
- Вычислительная машина реализует исполнение программного кода и обработку данных в цифровой среде.

На нижнем уровне находятся периферийные устройства и их интерфейсы. Это включает как компоненты для ввода-вывода данных (сетевые карты, дисковые контроллеры), так и устройства человеко-машинного взаимодействия (дисплеи, сенсорные панели, клавиатуры), которые служат мостом между цифровой средой и оператором. Ограничения этих устройств напрямую влияют как на качество получаемых данных, так и на эффективность их представления человеку.

Контроллеры занимают промежуточное положение, выполняя роль связующего звена между периферийными устройствами и центральными модулями. Их задача — управление потоками данных и командами между аппаратными компонентами и программными модулями, что минимизирует задержки в обработке. Хотя в качестве примера здесь могут приводиться промышленные контроллеры [5], в контексте общих вычислительных систем их аналогами выступают программные и аппаратные брокеры сообщений, планировщики задач и контроллеры ресурсов, которые управляют потоками данных и распределением нагрузки.

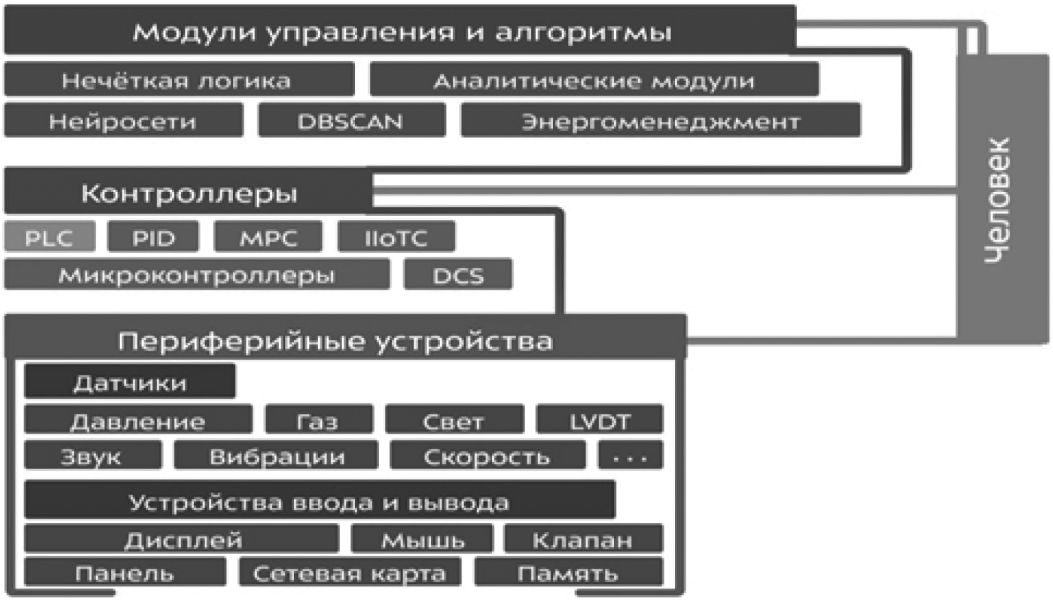


Рис. 1. Иерархическая структура ИКУ

Центральные модули находятся на верхнем уровне и выполняют стратегическое управление. В промышленной автоматизации типичными представителями этого уровня являются SCADA-системы [6] в контексте вычислительной техники их роль выполняют комплексные системы мониторинга и управления, например, Grafana, Zabbix, Datadog, которые агрегируют данные о состоянии серверов, приложений и сетей, позволяя операторам осуществлять мониторинг и управление в режиме реального времени. Использование машинного обучения здесь позволяет прогнозировать и оптимизировать управление [7].

Современные ИКУ часто используют распределенные архитектуры и облачные вычисления для масштабируемости [8]. Анализ ограничений компонентов в различных архитектурах позволяет обосновать их функциональную деятельность и определить наиболее эффективное распределение ролей. Иерархический подход в целом способствует отказоустойчивости.

Каждое из звеньев интеллектуального контура управления (ИКУ) — человек, искусственный интеллект (ИИ) и машина — имеет специфические ограничения, которые прямо определяют его функциональную деятельность в системе. Эти ограничения могут быть связаны с вычислительными мощностями, когнитивными способностями, качеством данных или нормативными стандартами. Понимание того, как ограничения каждого из этих элементов системы влияют на их функциональность, позволяет построить эффективные взаимодействия и оптимизировать работу всей системы в целом. Ограничения, накладываемые на компоненты системы ИКУ, можно разделить на два основных типа: функциональные и нефункциональные.

Ограничения и требования для человека в ИКУ

Человек играет центральную роль в стратегическом управлении ИКУ, принимая решения на основе анализа информации, поступающей от других компонентов системы. Однако эффективность человеческой деятельности в ИКУ обусловлена рядом как функциональных, так и нефункциональных ограничений.

Функциональные ограничения, прежде всего, связаны с когнитивными возможностями человека. Исследования показывают, что объем кратковременной памяти, или рабочей памяти, ограничен. В частности, человек способен одновременно удерживать в активном состоянии лишь ограниченное количество элементов информации. Средний человек может одновременно удерживать в кратковременной памяти около семи элементов, плюс-минус два [9]. Это фундаментальное ограничение, часто называемое «магическим числом семь», создает серьезные трудности при работе с большими объемами данных, характерными для современных ИКУ, особенно в условиях, требующих оперативной реакции. Дальнейшие исследования подтверждают, что объем рабочей памяти не является статичным и подвержен влиянию множества факторов, включая сложность задачи, уровень стресса и индивидуальные различия [10]. Увеличение когнитивной нагрузки закономерно приводит к снижению скорости обработки информации и возрастанию вероятности ошибок. Например, при выполнении сложных задач, требующих удержания в памяти большого количества информации, наблюдается снижение точности и увеличение времени реакции. Важно отметить, что на эффективность обработки информации влияет не только ее объем, но и способ представления. Представление информации в виде визуальных образов, диаграмм и графиков может значительно облегчить ее восприятие и обработку, снижая когнитивную нагрузку [11]. Использование визуализации данных, инфографики и других методов представления информации становится, таким образом, важным инструментом для повышения эффективности работы человека в ИКУ.

При работе с большими данными это приводит к когнитивной нагрузке (*CL*), зависящей от объема информации, сложности задачи и времени:

$$CL = f(I, C, t),$$

где *I* — объем информации, измеряемый количеством элементов данных, которые необходимо обработать, таких как число параметров на интерфейсе оператора, *C* — сложность задачи, определяемая количеством логических операций или уровнем абстракции, необходимых для принятия решения, например, анализ данных с нескольких датчиков, *t* — время, доступное для выполнения задачи, измеряемое в секундах или минутах.

Увеличение *CL* снижает скорость обработки информации и увеличивает вероятность ошибок:

$$\frac{dv}{CLd} < 0;$$

$$\frac{dPe}{CLd} > 0,$$

где *v* — скорость обработки информации, измеряемая как количество обработанных элементов данных в единицу времени, например решений в секунду, *Pe* — вероятность ошибки, выраженная в долях единицы, например, 0.1 соответствует 10 % вероятности ошибки.

Анализ функциональной деятельности человека включает оценку его когнитивной нагрузки в различных рабочих сценариях. Использование таких зависимостей позволяет обосновать, в каких ситуациях человек способен эффективно выполнять задачи, а когда его возможности ограничены, требуя поддержки или передачи функций ИИ.

Наряду с когнитивными ограничениями, на деятельность человека в ИКУ существенное влияние оказывают психологические и физические факторы. Стресс, усталость, монотонность, а также неблагоприятные условия труда могут привести к снижению бдительности, увеличению времени реакции и ухудшению способности к принятию решений [12]. Исследования показывают, что в условиях стресса или информационной перегрузки точность принятия решений может снижаться на 20–30 % и более [13]. Длительное воздействие стресса, в частности, может привести к сужению фокуса внимания, что затрудняет обработку периферийной информации, критически важной для принятия комплексных решений. В высокоскоростных системах, где решения должны приниматься за доли секунды, например, в системах автономного вождения или управления воздушным движением, даже незначительная задержка, вызванная стрессом или усталостью оператора, может иметь катастрофические последствия. Утомление, в свою очередь, приводит к снижению бдительности и увеличению вероятности пропуска важных сигналов. В условиях утомления возрастает количество ошибок типа «пропуск», когда оператор не замечает важный сигнал или событие [14].

Таким образом на когнитивные функции влияют стресс и индивидуальные различия. Снижение производительности под воздействием стресса может быть смоделировано как:

$$PDF(S, ID) = \alpha(ID) \cdot exp(-\beta(ID) \cdot S),$$

где P — производительность человека, измеряемая как эффективность выполнения задачи, например, процент правильно выполненных операций, S — уровень стресса, количественно оцениваемый через физиологические показатели, такие как частота сердечных сокращений или уровень кортизола, ID — индивидуальные различия, включающие когнитивные способности, опыт и устойчивость к стрессу, α, β зависят от ID. Анализ влияния стресса обосновывает необходимость снижения нагрузки на оператора в критических ситуациях и перераспределения задач для поддержания надежности.

Еще одним важным функциональным ограничением является ограниченная способность человека к распределению внимания между несколькими задачами одновременно. При одновременном выполнении нескольких задач происходит интерференция, которая приводит к снижению производительности в каждой из них [15]. Это особенно важно учитывать при проектировании интерфейсов ИКУ, где оператору часто приходится контролировать несколько параметров и процессов одновременно.

Помимо функциональных ограничений, существуют и нефункциональные, связанные с эргономикой, регламентами и организационными аспектами. Для минимизации когнитивной нагрузки и обеспечения комфортных условий работы необходимо проектировать эргономичные интерфейсы человек-машина, учитывая когнитивные и физиологические особенности человека. Эргономичный интерфейс должен обеспечивать эффективное и безопасное взаимодействие человека с системой, минимизируя физическую и когнитивную нагрузку [16, 17]. Требования к эргономичности интерфейсов и безопасности взаимодействия человека с автоматизированной системой регламентируются стандартами, такими как ГОСТ 34.003–90 и ГОСТ Р 59535–2021. Эти стандарты устанавливают требования к размещению органов управления, отображению информации, цветовому кодированию, шрифтам и другим параметрам интерфейса, а также учитывают антропометрические данные при проектировании рабочих мест, что особенно важно для предотвращения профессиональных заболеваний и повышения производительности.

Для обеспечения высоких стандартов качества работы человека в системе и минимизации ошибок, связанных с человеческим фактором, необходимо соблюдать соответствующие стандарты и регламенты. ГОСТ Р ИСО 9001:2015 устанавливает общие требования к системам менеджмента качества, применимые и к процессам, связанным с человеческим фактором в ИКУ. В зависимости от области применения ИКУ, могут существовать другие отраслевые стандарты и нормы, регулирующие вопросы безопасности и надежности, например стандарты ICAO и EASA в авиации или стандарты UIC в железнодорожном транспорте. Наконец, на эффективность работы человека в ИКУ оказывают влияние социальные и организационные факторы, такие как организационная культура, коммуникация в коллективе, уровень подготовки персонала, наличие четких инструкций и процедур. Эффективная организация работы и наличие четких инструкций способствуют снижению вероятности человеческой ошибки [18].

Таким образом, эффективная деятельность человека в ИКУ требует учета всех перечисленных ограничений. Оптимизация интерфейсов, улучшение качества представления данных, снижение когнитивной нагрузки, создание комфортных условий труда, а также соблюдение соответствующих стандартов и регламентов являются ключевыми факторами для повышения эффективности и безопасности работы человека в системе (рис. 2).

Ограничения ИИ как коммуниканта в ИКУ

Искусственный интеллект в ИКУ играет роль аналитика, который получает данные от машины и человека, обрабатывает их и генерирует решения. Однако его возможности ограничены качеством и объемом данных, на которых он обучается. Если данные неполные или ис-

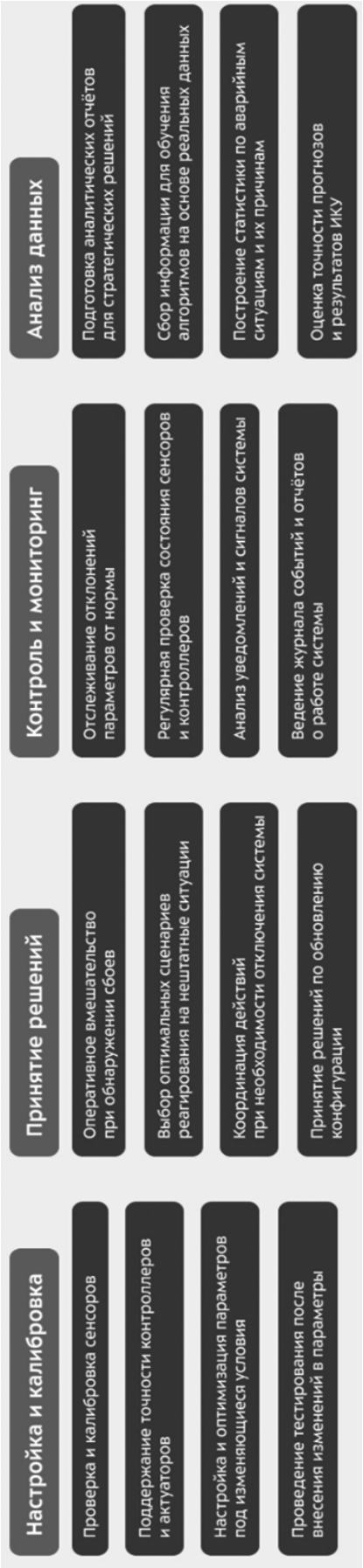


Рис. 2. Функциональная деятельность человека в ИКУ

кажены, точность его решений может снизиться на 10–30 % [19]. Эта зависимость подчеркивает критическую важность качества входных данных для эффективной работы ИИ. Проблема смещения данных представляет собой особую сложность. Неравномерное представление различных классов объектов или ситуаций в обучающей выборке приводит к тому, что алгоритмы отдают предпочтение одним случаям в ущерб другим. Систематические ошибки в обучающей выборке могут привести к дискриминирующим решениям [20], что особенно важно учитывать при разработке систем, влияющих на жизнь людей. Эта проблема особенно актуальна в системах автономного вождения, где искаженные или неполные данные могут привести к аварийной ситуации, а дискриминационные решения могут иметь серьезные последствия, например, при распознавании пешеходов.

Анализ функциональной деятельности ИИ включает оценку влияния качества доступных данных (используя метрики DQM: полнота, точность, согласованность, своевременность) на его ожидаемую производительность. Влияние DQM может быть представлено функцией:

$$PAI = f\left(DQM1, DQM2, ..., DQMn\right),$$

где *PAI* — ожидаемая производительность ИИ, измеряемая как точность принимаемых решений, например, процент правильных классификаций или прогнозов, *DQM* — метрика качества данных, включающая полноту, точность, согласованность и своевременность данных, используемых для обучения и работы ИИ.

Эта зависимость (специфичная для алгоритма и типа данных) позволяет обосновать применимость ИИ в ситуации с данным качеством данных и определить, когда его точность недостаточна, требуя участия человека или альтернативных методов.

Помимо зависимости от данных, существуют и алгоритмические ограничения. Современные модели ИИ, такие как нейронные сети, требуют больших вычислительных мощностей для обработки данных в реальном времени. Например, для обучения модели ResNet-50 требуется не менее 16–32 GB видеопамяти и несколько тысяч процессорных ядер. Это требует использования мощных вычислительных систем, таких как серверы с GPU для быстрого анализа данных [21].

Необходимо учитывать нормативные ограничения, касающиеся качества и надежности программных продуктов. Например, стандарт ISO/IEC 25010 определяет характеристики качества программного обеспечения, включая надежность, безопасность и производительность, устанавливая требования к его разработке и тестированию [22]. Правовое регулирование ИИ необходимо для обеспечения ответственности, прозрачности и подотчетности систем ИИ [23]. Эти нормативные ограничения направлены на обеспечение безопасности и надежности использования ИИ в различных сферах.

Функциональная деятельность ИИ, таким образом, зависит от целого комплекса факторов, включая качество данных, характеристики используемых алгоритмов и доступность вычислительных ресурсов. Ограничения в любой из этих областей оказывают непосредственное влияние на способность ИИ эффективно анализировать данные, что в свою очередь определяет его способность принимать решения на основе этих данных (таблица 1).

Машина как коммуникант ИКУ

Машины, действующие под управлением ИКУ, сталкиваются с рядом ключевых ограничений, среди которых можно выделить вычислительную мощность, точность исполнения, надежность, сложность интерфейса и энергопотребление.

Для анализа аппаратных ограничений вычислительной машины используются модели производительности. Ключевыми параметрами являются пропускная способность и задержка. Ограничения описываются следующими соотношениями:

$$T = N / t,$$

где *T* — пропускная способность, измеряемая в операциях в секунду или объеме данных в секунду (например, ГБ/с), *N* — количество выполненных операций или объем обработанных данных, а *t* — время выполнения.

$$L = t_{end} - t_{start},$$

где *L* — задержка, время от начала до завершения операции, измеряемое в миллисекундах (мс) или наносекундах (нс). Минимизация задержки и максимизация пропускной способности являются ключевыми задачами при проектировании вычислительных систем в ИКУ.

Очевидно, что существуют ограничения по вычислительной мощности:

$$PC_{ap} \leq PC_{max},$$

где PC_{ap} — текущая вычислительная мощность, измеряемая в операциях в секунду, например, TOPS (триллионы операций в секунду), необходимая для обработки данных с датчиков и выполнения алгоритмов управления, PC_{max} — максимальная вычислительная мощность, доступная для машины, зависящая от используемой аппаратной платформы.

Обработка больших объемов данных в режиме реального времени является одной из основных задач ИКУ. Автономные системы, такие как беспилотные автомоби-

Таблица 1.

Функциональная деятельность ИИ в ИКУ

Функция	Описание	Примеры	Преимущества	Ограничения
1	2	3	4	5
Предиктивное обслуживание	Прогнозирование отказов программных и аппаратных компонентов, деградации производительности системы	Анализ логов, метрик производительности, прогнозирование сбоев дисков, перегрузки серверов	Повышение отказоустойчивости, превентивное устранение проблем, оптимизация обслуживания ИТ-инфраструктуры	Требуется сбор больших объемов телеметрии, сложность моделей для нетипичных сбоев
Классификация данных	Автоматическая инспекция	Распознавание дефектов и ошибок, контроль качества	Повышение точности и скорости контроля, снижение ошибок, автоматизация рутинных операций	Сложность распознавания сложных ошибок, трудность внедрения
Оптимизация распределения ресурсов	Динамическое управление вычислительными ресурсами (ЦП, память, сеть) для оптимальной производительности	Управление ресурсами в облаке (Kubernetes), балансировка нагрузки, оптимизация запросов к базам данных	Эффективное использование оборудования, снижение затрат на инфраструктуру, повышение скорости отклика приложений	Сложность моделирования многокомпонентных систем, задержки при перераспределении ресурсов
Принятие решений	Принятие решений в реальном времени на основе анализа потоковых данных без участия человека	Алгоритмический трейдинг, системы рекомендаций, управление сетевым трафиком	Высокая скорость принятия решений, работа в режиме 24/7, обработка сложных зависимостей	Сложность интерпретации решений («черный ящик»), риски каскадных сбоев, необходимость строгого контроля
Мониторинг безопасности	Обнаружение и реагирование на угрозы и аномалии в поведении системы	Распознавание опасных ситуаций	Снижение риска кибератак, ускорение реакции на инциденты, автоматизация анализа угроз	Высокий уровень ложных срабатываний, сложность обнаружения новых (zero-day) атак
Адаптивная визуализация и интерфейсы	Динамическая подстройка пользовательского интерфейса, уровень стресса оператора, его когнитивные предпочтения	Автоматическое выделение критически важных данных, упрощение интерфейса, генерация персонализированных данных	Снижение когнитивной нагрузки, повышение скорости и точности восприятия информации, улучшение пользовательского опыта	Сложность в оценке когнитивного состояния оператора в реальном времени, высокие требования к ресурсам для генерации интерфейса

ли, включают в себя наибольшее количество взаимосвязанных элементов, таких как интерфейсы, механические элементы управления, а также множество датчиков, число которых может превышать 100. В их число входят камеры высокого разрешения (до 8K), лидары с частотой сканирования до 20 Гц и радары, генерирующие в совокупности гигабайты данных каждую секунду [24]. Например, система автопилота Tesla обрабатывает информацию, поступающую с 8 камер, 1 радара и 12 ультразвуковых датчиков. Для эффективной обработки таких объемов данных необходимы высокопроизводительные вычислительные платформы. Примерами таких платформ являются NVIDIA DRIVE PX Pegasus с производительностью до 320 TOPS и системы на базе процессоров Qualcomm Snapdragon Ride, способные обрабатывать сотни TOPS [25]. В этих платформах используются GPU, FPGA и ASIC для ускорения алгоритмов машинного обучения, таких как сверточные и рекуррентные нейронные сети, и обработки сигналов с минимальной задержкой, измеряемой миллисекундами. Постоянное увеличение количества и разнообразия используемых сенсоров, например, добавление тепловизоров или инерциальных измерительных блоков, создает дополнительные вычислительные нагрузки на систему.

Точность исполнения в ИКУ играет критически важную роль для обеспечения безопасности и эффективности. В роботизированных системах, особенно в таких областях, как хирургия и микроэлектроника, требования к точности позиционирования достигают нанометрового диапазона [24]. Хирургические роботы Da Vinci, например, обеспечивают точность позиционирования инструментов до 1 мм, что значительно превосходит возможности человеческой руки. Для достижения необходимой точности в ИКУ используются высокоточные сервоприводы и датчики обратной связи, такие как энкодеры, лазерные интерферометры и датчики силы, обеспечивающие нанометровую точность. Не менее важным фактором является и адекватное моделирование окружающей среды.

Бесперебойная работа ИКУ имеет решающее значение, особенно в критически важных приложениях, таких как транспорт, где требования к вероятности отказа могут составлять менее 10^{-9} на час работы, а также промышленность. Отказы в работе ИКУ могут привести к серьезным последствиям, включая аварии и остановку производственных процессов. Для обеспечения необходимого уровня надежности используются различные методы, включая резервирование компонентов, применение отказоустойчивых алгоритмов, постоянный мониторинг состояния системы и механизмы самовосстановления.

Анализ функциональной деятельности машины включает оценку ее способности физически выполнить требуемое действие (например, переместить объект с заданным весом в определенную точку за установленное время) в текущих условиях эксплуатации, используя эти модели.

Ограничения надежности критичны. Износ может привести к сбоям. Надежность (*R(t)*) описывается функцией:

$$R(t) = exp(-\lambda t),$$

где $R(t)$ — вероятность безотказной работы машины в течение времени *t*, выраженная в долях единицы, например, 0.99 соответствует 99 % надежности, λ — интенсивность отказов, измеряемая как количество отказов в единицу времени, например, 10^{-6} отказов в час, *t* — время эксплуатации, измеряемое в часах. Эта формула позволяет оценить, насколько вероятно, что машина выполнит задачу без сбоев в заданных условиях, например, для беспилотных автомобилей требования к надежности составляют менее 10^{-8} отказов в час, чтобы минимизировать риск аварий. Учет интенсивности отказов, связанной с износом, обосновывает необходимость резервирования компонентов и применения отказоустойчивых алгоритмов для повышения надежности системы. Обучение сложных нейронных сетей может потребовать значительных затрат энергии, достигающих сотен киловатт-часов. В связи с этим разработка энергоэффективных алгоритмов машинного обучения является важным направлением исследований [26].

Наряду с вычислительными ограничениями, критически важную роль играют ограничения, связанные с представлением информации. Эффективность оператора напрямую зависит от того, насколько качественно и своевременно машина способна визуализировать данные. Ключевыми здесь являются:

- Физические характеристики дисплея: разрешение экрана, его размер, частота обновления и качество цветопередачи определяют базовые возможности визуализации. Высокое разрешение позволяет отображать больше данных без загромождения, а точная цветопередача критична для интерфейсов, использующих цветовое кодирование статусов и предупреждений.
- Плотность и сложность информации: эффективность восприятия можно смоделировать через плотность информации на экране как:

$$D_{info} = \frac{I_{elements}}{S_{screen}},$$

где D_{info} — плотность информации, $I_{elements}$ — количество значимых информационных элементов (графиков, индикаторов, текстовых блоков), а S_{screen} — площадь экрана. Превышение оптимального значения D_{info} ведет к росту когнитивной нагрузки на оператора, что напрямую связано с его ограничениями, описанными ранее.

Задержка отображения так же критически важна, она представляет из себя время между моментом, когда система отправляет кадр на дисплей, и моментом его фактического появления на экране. В системах, требующих реакции в реальном времени, даже небольшая задержка отображения может быть критичной, приводя к несвоевременным действиям оператора.

Заключение

Функциональная деятельность интеллектуальных контуров управления является следствием специфических ограничений, которые накладываются на каждый из его компонентов: человека, ИИ и машину. Эти ограничения, будь то когнитивные ограничения человека, вычислительные мощности ИИ или производительность и точность машин, определяют, какие задачи могут быть выполнены эффективно и в какие сроки.

Человек ограничен в своей способности обрабатывать и интерпретировать большие объемы данных, что требует помощи со стороны ИИ, который, в свою очередь, ограничен качеством данных и вычислительными ресурсами. Машины ограничены в своей вычислительной мощности и точности исполнения команд, что ставит определенные требования к их производительности и надежности. Все эти ограничения требуют согласованной работы компонентов ИКУ, где каждый элемент выполняет свою роль, основываясь на своих возможностях и ограничениях.

Таким образом, функциональная деятельность ИКУ всегда вытекает из ограничений и требований, которые накладываются на каждый из компонентов. Понимание этих ограничений позволяет эффективно проектировать и оптимизировать системы ИКУ, минимизируя риски и повышая производительность, надежность и безопасность системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hangos K.M., Lakner R., Gerzson M. Intelligent control systems: an introduction with examples. — Boston, MA: Springer US, 2001.
2. Reason J. Human error. Cambridge University Press, 1990. 320 p.
3. Kelleher J.D., Mac Namee B., D'Arcy A. Fundamentals of machine learning for predictive data analytics: algorithms, worked examples, and case studies. MIT Press, 2020. 856 p.
4. Miller G.A. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information // Psychological review. 1956. V. 63. №2. C. 81–97.
5. Программируемые контроллеры S7-1500. URL: siemens-pro.ru/docs/simatic/s7-1500/04_S7_1500_2015_ru.pdf (accessed: 02.07.2025).
6. Boyer S.A. SCADA: supervisory control and data acquisition. International Society of Automation. Research Triangle Park, NC, United States, 2010. 257 p.
7. Alain Bensoussan, Yiqun Li, Dinh Phan Cao Nguyen, Minh-Binh Tran, Sheung Chi Phillip Yam, And Xiang Zhou Machine learning and control theory, Handbook of Numerical Analysis. Elsevier, 2022, vol. 23. pp. 531–558.
8. Buyya R., Broberg J., Goscinski A. Cloud computing. John Wiley & Sons. 2010. 637 p.
9. Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward // Nature reviews neuroscience. 2003. V. 4. №10. pp. 829–839.
10. Engle R.W. Role of working-memory capacity in cognitive control //Current anthropology. — 2010. — T. 51. — №. S1. — C. S17–S26.
11. Card S.K., Moran T.P., Newell A. The psychology of human-computer interaction. CRC Press, 2018. 48 p.
12. Hockey G.R.J. The physiology of cognitive stress: An ecological perspective. In Handbook of Cognitive Psychology. John Wiley & Sons. 2003, pp. 53–73.
13. Sutton R.S., Barto A.G. (2018). Reinforcement learning: An introduction. Cambridge: MIT press, 1998. V. 1. №1. pp. 9–11.
14. Warm J.S., Dember W.N., Hancock P.A. Vigilance and workload in automated systems. In Engineering psychology and cognitive ergonomics. Elsevier, 1996. pp. 167–183.
15. Wickens C.D. Multiple resources and performance prediction // Theoretical issues in ergonomics science. 2002. V. 3. №2. pp. 159–177.
16. Pashler H. Dual-task interference in simple tasks: data and theory // Psychological bulletin. 1994. V. 116. №2. pp. 220.244.
17. Shneiderman B., Plaisant C. Designing the user interface. URL: goo.su/uzgzS (accessed: 02.07.2025).
18. Mehrabi N., Morstatter F., Saxena N., Lerman K., Galstyan A.A survey on bias and fairness in machine learning // ACM computing surveys (CSUR). 2021. V. 54. №6. pp. 1–35.
19. Barocas S., Selbst A. D. Big data's disparate impact // Calif. L. Rev. 2016. V. 104. pp. 671–732.
20. Kachris C. (2025). A Survey on Hardware Accelerators for Large Language Models. Applied Sciences, 15(2), 586.
21. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council Laying Down Harmonised Rules on Artificial Intelligence (Artificial Intelligence Act) and Amending Certain Union Legislative Acts. URL: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0206 (accessed: 02.07.2025).
22. Badue C., Guidolini R., Carneiro R.V., Azevedo P., Cardoso V.B., Forechi A., Oliveira R.H.C. Self-driving cars: A survey // Expert systems with applications. 2021. V. 165. URL: arxiv.org/pdf/1901.04407 (accessed: 02.07.2025).
23. Kwon Y., Kang D., Kim S., Choi S. Coopetition in the soc industry: The case of qualcomm incorporated // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2020. V. 6. №1. URL: https://www.mdpi.com/2199-8531/6/1/9 (accessed: 02.07.2025).
24. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Force Control. In Robotics: modelling, planning and control. Springer Science & Business Media, 2009. pp. 363–405.
25. Liu T., Qi H., & Ou S. (2025). Assessing the Energy Consumption Impact of Intelligent Driving Technologies on Electric Vehicles: A Comprehensive Review. SAE Technical Paper 2025-01-8598.
26. Han S., Mao H., Dally W.J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization, and Huffman coding. URL: https://arxiv.org/abs/1510.00149 (accessed: 02.07.2025).

© Скрыль Сергей Васильевич (skryl@bmstu.ru); Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru);
Ивченко Даниил Денисович (danyaiv2010@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.37

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРА И ГИРОСКОПА

AUTOMATED ANALYSIS OF THE ICE SURFACE CONDITION BASED ON ACCELEROMETER AND GYROSCOPE DATA

V. Sorokin

Summary. This study proposes a method for automated ice surface quality assessment using accelerometer and gyroscope data from a smartphone. Signals collected during user movement on an ice rink were preprocessed through filtering, segmentation, and feature extraction. Machine learning models—including logistic regression, support vector machine, and random forest—were employed for binary classification of surface condition (smooth/rough). Logistic regression with an optimized classification threshold demonstrated the best performance. The results confirm the feasibility of the proposed method for ice surface monitoring and safety assurance.

Keywords: machine learning, inertial sensors, accelerometer, gyroscope, signal processing, ice surface, classification.

Сорокин Владимир Борисович
ФГБОУ ВО Волгоградский государственный технический университет
vovochka.sorokin.2001@mail.ru

Аннотация. В работе представлена методика автоматизированного анализа состояния ледового покрытия на основе данных акселерометра и гироскопа, встроенных в мобильное устройство. Сигналы инерциальных датчиков, полученные при движении пользователя по катку, подвергались предварительной обработке, включая фильтрацию, сегментацию и извлечение признаков. Для решения задачи бинарной классификации покрытия (ровное/неровное) использовались модели машинного обучения: логистическая регрессия, метод опорных векторов и случайный лес. Наилучшие результаты показала логистическая регрессия с оптимизированным порогом классификации. Результаты подтверждают применимость разработанного подхода для мониторинга и обеспечения безопасности ледовых арен.

Ключевые слова: машинное обучение, инерциальные датчики, акселерометр, гироскоп, обработка сигналов, ледовое покрытие, классификация.

Обеспечение безопасности при эксплуатации ледовых арен и катков требует регулярного и объективного контроля состояния ледового покрытия. Повреждения, трещины и другие неровности на льду могут привести к травмам как у профессиональных спортсменов, так и у рядовых посетителей. Традиционные методы оценки состояния покрытия чаще всего основаны на визуальном осмотре и ручных измерениях, что делает их трудоёмкими, субъективными и не всегда своевременными

Современные исследования демонстрируют высокую эффективность и перспективность применения мобильных сенсорных систем для автоматизированного мониторинга состояния различных типов покрытий. В частности, в работе [1] представлена информационная система, предназначенная для оценки состояния дорожного полотна, в которой используются акселерометры и GPS-модули, установленные на транспортных средствах. В [2] описан аналогичный подход, реализованный с использованием мобильных устройств, регистрирующих вибрационные и инерциальные характеристики при движении по автомобильным дорогам. В исследовании [3] предложены алгоритмы обработки сигналов инерциальных датчиков, направленные на анализ качества транспортной инфраструктуры, включая выявление дефектов покрытия и других аномалий. Приведённые работы демонстрируют потенциал мобильных устройств как доступного и масштабируемого инструмента для задач мониторинга, что обосновывает целесообразность их применения в смежных областях, таких как контроль состояния ледовых поверхностей.

В настоящей работе рассматривается возможность адаптации этих методов для оценки состояния ледового покрытия. В отличие от указанных исследований, в данном случае данные собирались с инерциальных датчиков смартфона, находящегося в кармане пользователя, перемещающегося по катку. Такой подход позволяет не только упростить сбор информации, но и сделать процесс мониторинга менее инвазивным и более доступным. Анализ полученных временных рядов даёт возможность выявлять участки льда с повышенным уровнем вибраций или неровностей, что, в перспективе, может быть использовано для автоматического предупреждения об опасных зонах и своевременного технического обслуживания покрытия.

Для сбора данных использовался смартфон Samsung Galaxy S23 FE, расположенный во внутреннем кармане одежды участника. Приложение Sensor Logger осуществляло непрерывную запись данных с акселерометра и гироскопа. Исходные данные сохранялись в формате CSV и включали временные метки, а также значения ускорений и угловых скоростей по трём осям.

Данные проходили предварительную обработку: синхронизация по времени, фильтрация шума, сегментация по временным окнам и извлечение признаков (включая применение Быстрого Преобразования Фурье — БПФ). Полученные признаки служили входными данными для алгоритма машинного обучения.

Сбор экспериментальных данных осуществлялся с использованием мобильного приложения Sensor Logger, обеспечивающего непрерывную регистрацию сигналов с инерциальных сенсоров, встроенных в смартфон. В процессе эксперимента фиксировались значения линейных ускорений (акселерометр) и угловых скоростей (гироскоп) по трём ортогональным осям (X, Y, Z). Основные технические параметры регистрации включали частоту дискретизации 100 Гц и экспорт данных в формате CSV. Структура выходных данных включала следующие поля: time (абсолютная временная метка), seconds_elapsed (время, прошедшее с начала записи), а также x, y, z — значения измеряемых величин по каждой пространственной оси.

Регистрация данных проводилась в условиях реальной эксплуатации на ледовой арене. Смартфон располагался в боковом кармане одежды испытуемого, что обеспечивало регистрацию вибрационных воздействий, передающихся через тело человека при перемещении по ледовому покрытию. Такой способ размещения сенсора имитирует практическое использование мобильного устройства для мониторинга состояния поверхности в бытовых и спортивных условиях.

Экспериментальная сессия включала траектории движения одного участника по всей поверхности катка с варьируемой интенсивностью и скоростью, включая участки с визуально идентифицированными дефектами ледового покрытия. Целью этапа являлось выявление характерных вибрационных паттернов, обусловленных различиями в микрорельефе ледяной поверхности.

До проведения анализа собранные данные прошли этап предварительной обработки, включавший:

- фильтрацию шумов и устранение выбросов с применением медианного фильтра и методов сглаживания;
- нормализацию значений по осям измерения;
- фрагментацию временного ряда на фиксированные окна;
- синхронизацию данных акселерометра и гироскопа по временным меткам.

Для каждого временного окна осуществлялось извлечение совокупности признаков, охватывающих как статистические, так и спектральные характеристики сигнала, включая:

- среднее значение, максимум и стандартное отклонение;
- энергию сигнала;
- амплитудные пики;
- спектральные параметры, вычисленные посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Полученные признаки были использованы в последующем этапе обучения моделей машинного обучения, направленных на автоматизированную классификацию состояния ледового покрытия (например, «гладкое», «неровное» и др.).

Целью данной работы является разработка метода автоматической классификации состояния ледового покрытия (ровный/неровный лёд) на основе данных инерциальных датчиков (акселерометра и гироскопа), установленных на конькобежце. Для этого необходимо решить задачу бинарной классификации с применением методов машинного обучения.

Пусть имеется множество временных рядов, полученных с акселерометра и гироскопа, установленных на спортсмене. Каждому участку записи сопоставлялась метка ($y \in \{0,1\}$ где $y = 0$ соответствует участку с ровным льдом, а $y = 1$ участку с неровным льдом.

Данные представлены в виде CSV-файлов, каждый из которых содержит трёхосные показания сенсоров (ось x, y, zx, y, zx, y, z) и временные метки. Для совместного анализа данные акселерометра и гироскопа синхронизируются по времени и объединяются в одну выборку.

Этапы решения задачи

1. Загрузка и маркировка данных:

Для каждого CSV-файла определяется принадлежность к классу (ровный или неровный лёд) на основании его имени. Исключаются неклассифицированные или неполные записи.

2. Синхронизация данных акселерометра и гироскопа:

Используется линейная интерполяция для выравнивания временных меток и построения единого синхронизированного дата сета.

3. Оконное разбиение сигнала:

Временные ряды разбиваются на неперекрывающиеся окна фиксированной длины (например, 150 отсчётов). Для каждого окна извлекается набор признаков.

4. Извлечение признаков:

Для каждого сигнала (6 осей: 3 от акселерометра и 3 от гироскопа) извлекаются статистические и спектральные признаки: среднее, стандартное отклонение, максимум, минимум, энергия, автокорреляция, энтропия спектра, частота с наибольшей амплитудой и др. Всего формируется 120 признаков на окно (20 признаков × 6 осей).

5. Аугментация данных:

Для повышения обобщающей способности модели применяется добавление гауссовского шума к сигналам и повторное извлечение признаков из искажённого сигнала.

6. Предобработка:

Выполняется удаление постоянных признаков, нормализация (стандартизация), отбор признаков методом RFE и балансировка классов с использованием метода SMOTE.

7. Обучение моделей:

Используются несколько алгоритмов классификации: логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM) и случайный лес (Random Forest). Подбираются оптимальные гиперпараметры с помощью GridSearchCV и проводится кросс-валидация.

8. Оценка качества моделей:

Производится оценка точности, полноты, F1-меры, а также построение ROC-кривой и PR-кривой для анализа поведения модели при различных порогах.

Результатом работы модели является предсказание ($y \in \{0,1\}$ для каждого окна наблюдения. В дальнейшем возможно применение модели для:

- мониторинга качества ледовой поверхности в реальном времени;
- анализ тренировочных сессий и выявления опасных участков на катке;

Для решения задачи классификации дорожного покрытия на ровный и неровный лед были применены три модели машинного обучения: логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVM) с радиально-базисной функцией (RBF) и случайный лес. Выбор этих моделей обусловлен их эффективностью в задачах бинарной классификации, а также способностью обрабатывать высоко размерные данные с ограниченным объемом выборки.

Логистическая регрессия была выбрана в качестве базовой модели благодаря ее интерпретируемости и устойчивости при работе с небольшими наборами данных. Для оптимизации гиперпараметров использовался поиск по сетке (Grid Search) с перекрестной проверкой (Stratified K-Fold, k=15), что позволило подобрать оптимальные параметры: C=100, штраф L2, решатель liblinear. Для повышения качества предсказаний применялась балансировка классов с использованием параметра class_weight='balanced'. Оптимизация порога классификации проводилась на основе максимизации F1, что позволило улучшить баланс между точностью (Precision) и полнотой (Recall). Оптимальный порог составил 0.42.

Модель SVM с ядром RBF была выбрана для учета нелинейных зависимостей в данных. Параметры модели, включая веса классов (class_weight='balanced'), были настроены для компенсации дисбаланса классов. Вероятностные оценки, полученные с помощью метода predict_proba, использовались для анализа качества классификации. Порог классификации для SVM был установлен на уровне 0.45.

Случайный лес был применен как ансамблевый метод, способный эффективно обрабатывать сложные зависимости в данных и снижать риск переобучения. Для настройки модели использовались параметры: глубина дерева (max_depth=10), количество деревьев (n_estimators=250), минимальное число образцов для разделения узла (min_samples_split=10) и минимальное число образцов в листе (min_samples_leaf=3). Балансировка классов осуществлялась с помощью весов (class_weight= {0:1, 1:3}), что позволило учесть неравномерное распределение классов. Порог классификации для случайного леса был установлен на уровне 0.50. Качество модели оценивалось с использованием перекрестной проверки (5-кратная, метрика F1).

Данные акселерометра и гироскопа подвергались предварительной обработке, включая синхронизацию временных меток, интерполяцию и нормализацию. Для извлечения признаков применялся анализ временной области (среднее, стандартное отклонение, медиана, межквартильный размах, энергия сигнала, асимметрия и др.) и частотной области (энергия высокочастотных, среднечастотных и низкочастотных компонент, доминирующая частота, спектральная энтропия). Для повышения устойчивости модели к шуму в данные добавлялся искусственный шум с фактором 0.02, что способствовало улучшению обобщающей способности моделей.

Для уменьшения размерности и устранения избыточных признаков применялись следующие методы:

- Variance Threshold: удаление признаков с нулевой дисперсией.
- Recursive Feature Elimination (RFE): отбор 30 наиболее значимых признаков на основе логистической регрессии.
- SMOTE: балансировка классов путем генерации синтетических образцов для миноритарного класса (баланс классов после SMOTE: 3567 образцов для каждого класса).

Корреляционный анализ показал, что отобранные признаки имеют умеренную корреляцию с целевой переменной (коэффициенты Пирсона в диапазоне от –0.06 до 0.14). Наиболее коррелирующими оказались признаки на позициях 16, 40 и 56 (корреляции 0.13, 0.13 и 0.14 соответственно).

Качество моделей оценивалось с использованием метрик Accuracy, Precision, Recall и F1-score. Для анализа производительности строились ROC-кривые и матрицы ошибок. Ниже приведены результаты для тестовой выборки (30 % от общего объема данных после применения SMOTE).

По логистической регрессии:
- Accuracy: 0.75 (с исходным порогом); 0.77 (с оптимальным порогом 0.42, вычислено на основе Precision и Recall)
- Precision: 0.75 (с исходным порогом); 0.72 (с оптимальным порогом)
- Recall: 0.75 (с исходным порогом); 0.83 (с оптимальным порогом)
- F1-score: 0.75 (с исходным порогом); 0.77 (с оптимальным порогом

Площадь под ROC-кривой (AUC) составила 0.83, что свидетельствует о хорошей способности модели разделять классы видно на рис. 1. Матрица ошибок с оптимальным порогом показывает, что модель корректно классифицировала 724 примера класса 0 и 891 примера класса 1, допустив 347 ложноположительных и 179 ложноотрицательных ошибок, представлено на рис. 2.

SVM с ядром RBF:
- Accuracy: 0.79
- Precision: 0.79
- Recall: 0.78
- F1-score: 0.78

SVM продемонстрировала стабильные результаты, немного превосходя логистическую регрессию по Accuracy и Precision, но уступая по Recall при использовании оптимального порога для логистической регрессии.

Случайный лес:
- Accuracy: 0.72

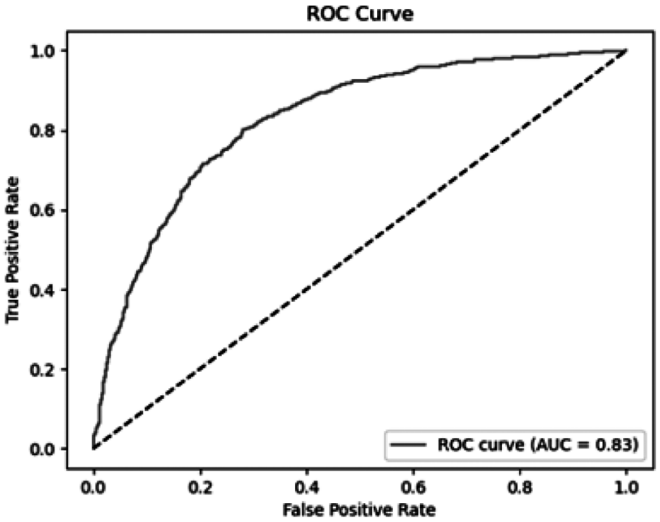


Рис. 1. ROC-кривая для логистической регрессии с AUC = 0.83

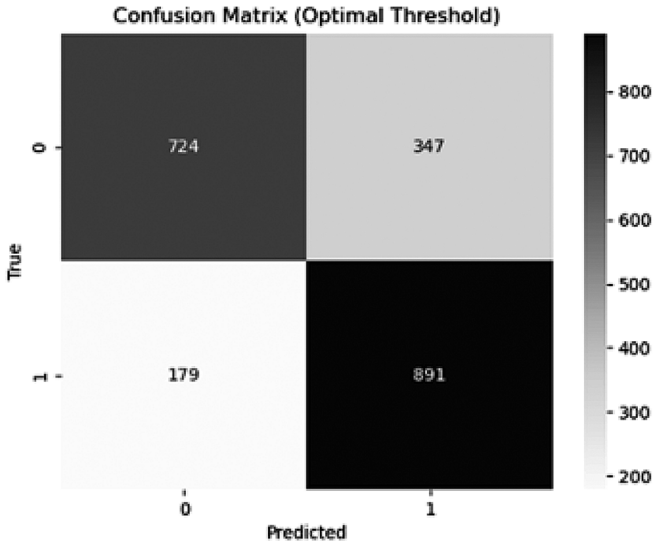


Рис. 2. Матрица ошибок для логистической регрессии с оптимальным порогом 0.42

- Precision: 0.64
- Recall: 0.99
- F1-score: 0.78 (среднее по перекрестной проверке: 0.73 ± 0.01)

Случайный лес показал высокую полноту (Recall), что делает его подходящим для задач, где важно минимизировать ложноотрицательные ошибки. Однако низкая точность (Precision) указывает на большое количество ложноположительных предсказаний.

Сравнительный анализ показал, что модель логистической регрессии с оптимизированным порогом (0.42) демонстрирует наилучший баланс метрик: F1-score 0.77, Accuracy 0.77, с AUC = 0.83. SVM с ядром RBF также показала высокие результаты (Accuracy 0.79 F1-score 0.78), но уступает по Recall (0.78 против 0.83 у логистической регрессии с оптимальным порогом). Случайный лес, не-

смотря на высокую полноту (Recall 0.99), имеет низкую точность (Precision 0.64), что делает его менее предпочтительным для данной задачи.

Для повышения надежности предсказаний применялся метод большинства голосов (majority voting) на основе предсказаний всех трех моделей для тестовых файлов с префиксами «00» (ровный лед) и «111» (неровный лед). Результаты агрегации показали, что для префикса «00» все модели единогласно предсказали класс 0 (ровный лед), а для префикса «111» логистическая регрессия и случайный лес предсказали класс 1 (неровный лед), тогда как SVM ошибочно классифицировал его как 0.

Из пяти предварительных экспериментов с различными конфигурациями моделей (варьирование гиперпараметров и порогов) лучшей оказалась текущая конфигурация логистической регрессии с оптимизированным порогом, так как она обеспечила наилучший баланс между Precision и Recall, что критически важно для задачи классификации покрытия горизонтальной поверхности.

Ограниченный объем данных требовал применения методов аугментации (добавление шума, SMOTE), что позволило улучшить обобщающую способность моделей. Однако дальнейшее увеличение объема данных и включение дополнительных признаков (например, кросс-корреляций между акселерометром и гироскопом) может повысить точность классификации. Также стоит отметить, что оптимизация порогов классификации была критически важной для достижения сбалансированных метрик Precision и Recall. В будущем рекомендуется провести дополнительные эксперименты с более крупным и разнообразным набором данных, а также исследовать влияние различных методов извлечения признаков на качество классификации.

В рамках проведённого исследования разработана и апробирована методика автоматизированного анализа состояния ледового покрытия с использованием данных инерциальных датчиков — акселерометра и гироскопа, встроенных в смартфон. Предложенный подход включает сбор данных в реальных условиях эксплуатации ледовой арены, их предобработку, выделение признаков и обучение моделей машинного обучения для бинарной классификации покрытия на ровный и неровный лёд.

Сравнительный анализ трёх моделей — логистической регрессии, метода опорных векторов (SVM) с ядром RBF и случайного леса — показал, что наилучший баланс метрик качества классификации достигается при использовании логистической регрессии с оптимизированным порогом (0.42). Данная модель обеспечила Accuracy 0.77 F1-score 0.77 и AUC 0.83, что свидетельствует о её способности эффективно различать классы даже при ограниченном объёме данных. Метод большинства голосов, применённый для агрегации предсказаний, подтвердил надёжность классификации: для тестовых данных с префиксом «00» (ровный лёд) все модели единогласно предсказали класс 0, а для префикса «111» (неровный лёд) логистическая регрессия и случайный лес корректно определили класс 1.

Полученные результаты демонстрируют перспективность использования инерциальных датчиков смартфона для мониторинга состояния ледового покрытия. Такой подход может быть интегрирован в системы управления ледовыми аренами для своевременного выявления дефектов покрытия, что повысит безопасность спортсменов и посетителей. Кроме того, методика отличается доступностью, так как не требует специализированного оборудования, и может быть адаптирована для анализа других типов поверхностей.

Тем не менее, ограниченный объём данных и необходимость применения методов аугментации (SMOTE, добавление шума) указывают на потребность в дальнейшем расширении экспериментальной базы. В перспективе планируется увеличение объёма выборки, включение дополнительных признаков (например, кросс-корреляций между данными акселерометра и гироскопа) и исследование более сложных моделей для улучшения качества классификации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eriksson J., Girod L., Hull B., Newton R., Madden S., Balakrishnan H. Automated Sensing System for Monitoring of Road Surface Quality by Mobile Devices // IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2015. — Vol. 14, № 5. — Pp. 1026–1039. — DOI: 10.1109/TMC.2014.2346772.
2. Кузнецов А.С., Петров Д.И., Смирнов Е.А. Распознавание и отслеживание дефектов дорожного полотна в реальном времени на основе комплексного использования стандартных вычислительных процедур и глубоких нейронных сетей // Системы и средства информатики. — 2024. — Т. 34, № 3. — С. 421–430. — URL: https://swsys.ru/files/2024-3/421-430.pdf.
3. Иванов П.К., Сидоров М.В. Разработка информационной системы мониторинга состояния дорожного покрытия // Современные информационные технологии. — 2023. — № 2. — С. 45–52. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-informatsionnoy-sistemy-monitoringa-sostoyaniya-dorozhnogo-pokrytiya.

© Сорокин Владимир Борисович (vovochka.sorokin.2001@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.41

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ЭМУЛЯЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ НА КВАНТОВОМ КОМПЬЮТЕРЕ

OPTIMISATION OF TRADITIONAL METHODS OF EMULATING A CENTRAL PROCESSOR FOR EXECUTION ON A QUANTUM COMPUTER

S. Tyryshkin

Summary. Over the past few years, the field of quantum algorithm optimisation has demonstrated significant development and progress. Scientists have developed advanced methods and approaches that reduce the depth of quantum circuits, minimise the number of gates, and increase the overall performance of quantum computing. At the same time, quantum technology mostly functions at the level of logic and scenarios, where a significant part of the achievements made in the field of traditional computing are inaccessible and very difficult to implement. The aim of this article is to study the possibilities of optimising traditional methods of emulating a central processing unit for execution on a quantum computer. *Research methods* include comparative analysis, formal logic, structuring, grouping, generalisation, and a systematic approach. *Results*: The study analysed some traditional emulation methods, highlighting their advantages and disadvantages, as well as their potential and limitations. In addition, the performance and resource intensity indicators of these methods were formalised. Emphasis is placed on promising areas of development and opportunities for optimising traditional central processing unit instructions for execution on a quantum computer. *Conclusions*. The article demonstrates alternative methods for executing traditional central processing unit commands on a quantum computer. The results obtained allow us to conclude that the integration and combination of various emulation methods will make it possible to increase the accessibility and usability of quantum computers in the transition from traditional computing.

Keywords: quantum computing, emulation, central processing unit, traditional method, circuit, algorithm.

Тырышкин Сергей Юрьевич
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. На протяжении последних нескольких лет сфера оптимизация квантовых алгоритмов демонстрирует значительное развитие и прогресс. Учеными были разработаны передовые методы и подходы, которые позволяют уменьшить глубину квантовых схем, минимизировать количество вентилей и повысить общую производительность квантовых вычислений. В то же время квантовая технология в большинстве своем функционирует на уровне логики и сценариев, где значительная часть достижений, сделанных в области традиционных вычислений, недоступна и сложна для реализации. С учетом отмеченного цель статьи заключается в изучении возможностей оптимизации традиционных методов эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере. *Методы исследования* включают в себя сравнительный анализ, формальную логику, структуризацию, группировку, обобщение, системный подход. *Результаты*: в процессе исследования проведен анализ некоторых традиционных методов эмуляции, что позволило выделить их достоинства и недостатки, возможности и ограничения использования. Кроме того, формализованы показатели эффективности и ресурсоемкости этих методов. Особый акцент сделан на перспективных направлениях развития и возможностях оптимизации традиционных команд центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере. *Выводы*. В статье продемонстрированы общепринятые и альтернативные методы с использованием квантовых схем, которые могут использоваться для эмуляции центрального процессора на квантовом компьютере. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что интеграция и комбинирование различных подходов к эмуляции даст возможность повысить доступность и удобство использования квантовых компьютеров при переходе от традиционных вычислений.

Ключевые слова: квантовые вычисления, эмуляция, центральный процессор, традиционный метод, схема, алгоритм.

Введение

Квантовые вычисления на сегодняшний день вызывают большой интерес у инженеров-программистов, поскольку они намного быстрее традиционных подходов. Например, они способны осуществлять факторизацию и поиск в базах данных более эффективно, чем обычные компьютеры. Криптографические алгоритмы на базе квантовых схем повышают безопасность, предотвращая потерю или кражу информации при передаче данных через Интернет [1]. Продолжающаяся эволюция аппаратного обеспечения для квантовых компьютеров и совершенствование квантовых схем решения задач достаточно убедительно продемонстрировали для конкретных приложений превосходство квантовых вычислений над классическими. Внутренний параллелизм, основанный на принципах суперпозиции квантовых состояний, в сочетании с эффектами интерференции приводит к экспоненциальному росту вычислительных возможностей, что открывает широкие перспективы в области различного рода исследований [2].

Моделирование и решение прикладных проблем с помощью квантовых алгоритмов может продемонстри-

ровать ряд потенциальных преимуществ по сравнению с существующими методами, к числу которых относятся:

1. Ускорение работы существующих классических алгоритмов оптимизации за счет использования специфических квантовых эффектов.
2. Некоторые классы задач могут быть закодированы и решены квантовыми вычислительными схемами более эффективно, чем в ходе применения классических подходов, например задачи неупорядоченного поиска или дискретные логарифмы.
3. Теория и традиционные симуляции показывают, что для некоторых сфер квантовые алгоритмы позволяют применять более эффективные методы к решению определенных классов сложных задач комбинаторной оптимизации.

В таблице 1 представлена статистика, наглядно отражающая преимущества квантовых алгоритмов в задачах оптимизации и анализа.

Современные подходы к квантовым вычислениям используют квантовые системы, такие как фотоны, захваченные ионы или сверхпроводящие цепи. Все эти подходы основаны на поддержании высококогерентного квантового состояния с помощью серии операций с вентилями, чтобы добиться вычислительного преимущества [3]. Подготовка и манипулирование такими системами является довольно сложной задачей, поскольку небольшие взаимодействия с окружающей средой быстро приводят к декогеренции состояния и, как следствие, к значительной потере производительности. Недавнее открытие классических аналогов квантовых систем, позволяет предположить, что эмуляция квантовых вычислений средствами классической архитектуры может быть практически реализуема, технически менее сложна и в значительной степени устойчива к эффектам декогеренции.

Таким образом, можно утверждать, что в отсутствие масштабируемых квантовых компьютеров, квантовые симуляторы являются важными инструментами для проектирования и оценки квантовых алгоритмов и сравнения уровня шума результатов реальных вычислительных устройств с данными симуляции. С учетом отмеченного, очевидным является тот факт, что оценка квантовых алгоритмов, поддерживаемых квантовыми симуляторами, которые работают на классических машинах, является реальной возможностью для расширения участия исследовательских и экспертных сообществ в работе с квантовыми вычислениями.

В то же время необходимо акцентировать внимание на том, что квантовые системы, моделируемые на классических компьютерах, никогда не будут обладать всеми преимуществами реального физического квантового компьютера за полиномиальное время. В данном контексте цель создания симулятора квантового компьютера — сделать его более быстрым, надежным, способным обрабатывать несколько кубитов и моделировать квантовые алгоритмы с более высокой производительностью. Другими словами, задача заключается в создании комплекса средств разработки программного обеспечения, т.е. набора новых технологий, знаний и возможностей, которые будут использоваться для эмуляции традиционного центрального процессора (CPU) для выполнения на квантовом компьютере. Традиционный CPU очень хорош в низкоуровневой логике и математике, тогда как выполнение этих задач на квантовом компьютере чрезвычайно сложно по причине значительно отличающейся архитектуры и необходимости соблюдения квантовыми компьютерами теорем о невозможности клонирования и удаления. Ожидается, что эмуляция традиционного CPU будет способна обеспечить аргументированное доказательство точности и возможностей битовых, математических и логических операций, а также устранит и восполнит некоторые пробелы, присутствующие в конвейере квантовых вычислений.

Таким образом, изучение аспектов, связанных с ключевыми компонентами реализации потенциала кванто-

Таблица 1.

Сравнение производительности квантовых и классических алгоритмов в задачах оптимизации и анализа

Тип задачи / Алгоритм	Квантовый подход	Классический подход	Преимущество квантового подхода
Булевы задачи с ограничениями второго порядка (до 156 переменных)	Решение с использованием квантового алгоритма на 156-кубитном процессоре IBM (время ≈ 0,5 секунды)	Коммерческий решатель CPLEX (30–50 секунд); метод имитации отжига (≈ 1–2 секунды)	До 80 раз быстрее, чем CPLEX; в 3 раза быстрее, чем имитация отжига
Задачи кластеризации данных (свыше 1000 переменных)	Квантовый отжиг на квантовом процессоре D-Wave демонстрирует ускорение порядка 10^8	Имитация отжига на классических компьютерах	Ускорение в миллионы раз в отдельных задачах кластеризации
Факторизация целых чисел	Квантовый алгоритм Шора решает задачу за полиномиальное время $O((\log N)^3)$	Классические методы (например, метод решёток) работают в сверхполиномиальном времени	Теоретическое экспоненциальное ускорение

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

вых вычислений и улучшением удобства использования квантовых компьютеров, которые позволят преодолеть разрыв в доступности между классическими алгоритмами и новой квантовой схемой решения задач, представляет собой актуальное направление научного поиска, которое и предопределило выбор темы данной статьи.

Цель исследования

Изучение возможностей оптимизации традиционных методов эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере.

Материал и методы исследования

Существующие на сегодняшний день исследования в основном сосредоточены на квантовых вычислениях и их приложениях и содержат беглый обзор квантовых симуляторов как одного из классов квантового программного обеспечения. Например, Mohammed Alghadeer, Eid Aldawsari [4], Пелешенко В.А. [5], Nikita Stroev, Natalia G. [6] изучают и классифицируются языки квантового программирования.

Роль различных типов инструментов, таких как компиляторы и симуляторы для эмуляции рассматривают Tian Chen, Weixuan Zhang, Deyuan Zou [7], Karthik Krishnan, Saranyan Vijayaraghavan [8], Милай М.В. [9].

Перспективные подходы к разработке и усовершенствованию структуры новых методов, включающих квантовые схемы, а также возможности их объединения для эмуляции традиционного центрального процессора на квантовом компьютере, нашли свое отражение в публикациях Черемисина Д.Г., Мкртчяна В.Р., Музловой А.Д. [10], Рахимовf Р.Х. [11], Guillem Llodrà, Christos Charalambous [12].

Подходы, благодаря которым возможности квантовых компьютеров могут быть расширены с помощью традиционных логических функций, с фокусировкой внимания на максимально точной эмуляции традиционного центрального процессора, описывают Giuliana Siddi Moreau, Lorenzo Pisani [13], Ульянов С.В., Рябов Н.В., Зрелов П.В., Иванцова О.В., Кореньков В.В. [14].

Несмотря на активный интерес ученых к рассматриваемой проблематике и наличие широкого спектра публикаций, следует отметить, что задача эмуляции классических центральных процессоров на квантовых компьютерах является достаточно сложной и находится на ранних стадиях исследования, поскольку квантовые архитектуры значительно отличаются от традиционных. Это в свою очередь обуславливает наличие широкого спектра дискуссионных и недостаточно освещенных вопросов. Так, например, в дальнейшем развитии нуждаются подходы к созданию симулятора квантового компьютера, которые позволят сделать его более быстрым, надежным, способным обрабатывать несколько кубитов и моделировать квантовые алгоритмы с более высокой производительностью. Кроме того, дополнительного обоснования требуют критерии выбираемых методов квантовой реализации для каждой команды центрального процессора, что позволит пользователю сравнить исходные функциональные методы с новыми оптимизированными подходами.

Методы исследования: сравнительный анализ, формальная логика, структуризация, группировка, обобщение, системный подход.

Результаты исследования и их обсуждение

Прежде всего отметим, что эмуляция центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере заключается в выполнении реального приложения на платформе, которую можно изменить с помощью специального программного или аппаратного обеспечения, чтобы воспроизвести желаемые экспериментальные условия [15]. Часто бывает сложно провести эксперименты в реальной среде, которая соответствует потребностям экспериментатора: доступная инфраструктура может быть недостаточно большой или не обладать необходимыми характеристиками производительности или надежности. Кроме того, изменение экспериментальных условий часто требует административных прав, которые редко предоставляются обычным пользователям платформ. Поэтому эксперименты «in situ» часто имеют относительно ограниченный охват: они, как правило, не поддаются обобщению и предоставляют единственную точку данных, ограниченную данной платформой [7]. Использование эмуляторов может решить эту проблему, позволяя исследователю изменять характеристики производительности платформы. Принимая во внимание тот факт, что для всего эксперимента можно использовать одну и ту же платформу, легко сделать вывод о влиянии измененного параметра.

Методология эмуляции состоит из четырех основных этапов: предварительная настройка, настройка, тестовая платформа и эмуляция в цепи (ICE).

1. Перед началом настройки эмуляции необходимо выполнить предварительную подготовку. На этом этапе собираются все необходимые файлы управления, списки сетей, библиотеки и другие входные данные.
2. На этапе полной конфигурации CPU с помощью поставляемого поставщиком программного обеспечения для конфигурации создается эмуляционная база данных, доступная для загрузки. На этом этапе на основе результатов этапа пред-

варительной подготовки конфигурации генерируется битовый поток, необходимый для программирования эмуляционного оборудования.
3. Подготовка испытательного стенда включает проектирование, планирование и реализацию среды, в которой будет проходить эмуляция. Эта испытательная среда должна обеспечивать все необходимые интерфейсы и ресурсы реального оборудования.
4. Этап эмуляции в цепи объединяет тестовую среду и эмуляцию для создания системы, в которой можно проводить верификацию и отладку.

В настоящее время существует несколько методов и инструментов, позволяющих эмулировать CPU. Некоторые ученые сходятся во мнении относительно того, что традиционные, универсальные подходы эмуляции CPU могут быть также эффективны для выполнения на квантовом компьютере, как если бы стояла задача тестировать приложение или алгоритм в среде с настраиваемым и воспроизводимым уровнем гетерогенности процессоров [1, 6, 9]. При этом необходимо обратить внимание на тот факт, что традиционные способы эмуляции CPU различаются по многим параметрам.

На основании анализа имеющихся на сегодняшний день публикаций можно выделить несколько стандартных подходов к эмуляции, которые различаются на очень фундаментальном уровне, но не являются взаимоисключающими:
1. «Прожиг» CPU
2. Контроль над эмулируемыми процессами
3. Подход с аппаратной поддержкой
4. Подход с поддержкой планировщика

Первая и самая очевидная группа методов заключается в запуске приложения, которое потребляет нужную часть ресурсов CPU, оставляя остальные ресурсы эмулируемой среде. Обычно такая программа запускает цикл, интенсивно использующий ресурсы CPU, и периодически переходит в режим ожидания [5]. Одного этого недостаточно, поскольку нет гарантии, что планировщик не прервет работу приложения. Основной способ обеспечить это — использовать класс планирования реального времени для «программы, перегружающей CPU», чтобы программа отбирала все другие эмулируемые процессы, и сама не отбиралась. Другой, более радикальный подход — перегружать CPU на уровне ядра, чтобы иметь прямой контроль над планированием. Это дает большую свободу, но вызывает вопросы об обслуживаемости решения.

Следующий подход заключается в прямом управлении эмулируемыми процессами. Это можно сделать, запрашивая текущее использование CPU процессами и принимая решение о их остановке или возобновлении.

Для управления процессами, в частности, находит свое широкое применение следующий интерфейс: сигналы POSIX; управление приоритетами планирования; подсистема cgroup freezer.

Аппаратная группа методов использует возможности базового процессора. Эти методы опираются на способность некоторых процессоров контролировать собственную скорость выполнения. Однако у них есть некоторые ограничения: они зависят от модели процессора и допускают только ограниченный набор возможных уровней частоты [12].

Подходы с помощью планировщика используют некоторые расширенные возможности. Например, можно контролировать аффинность процессов к процессору или их долю времени процессора на очень высоком уровне, даже выше, чем сам планировщик.

Хотя описанные выше методы универсальны, широко известны и достаточно просты в использовании, они, по мнению автора, не подходят для выполнения на квантовом компьютере.

Во-первых, эти методы основаны на детерминированной последовательной логике и классических бинарных операциях, которые не имеют прямых аналогов в унитарной, обратимой природе квантовых вычислений. Квантовые компьютеры оперируют с кубитами и квантовыми вентилями, что делает эмуляцию классических логических схем крайне неэффективной сточки зрения затрат ресурсов.

Во-вторых, классическая архитектура CPU требует частого ветвления, состояний и регистров, что весьма затруднительно масштабируется на квантовом уровне из-за ограничений глубины схем, числа кубитов и проблем декогеренции.

Кроме того, традиционная эмуляция имитирует все функции CPU, но выполняется в программном обеспечении, а не в аппаратном. Интерфейс CPU позволяет проводить параллельное сравнение физического аппаратного обеспечения с кодом эмуляции. Поэтому важно отличать традиционную эмуляцию от эмуляции, спроектированной для выполнения на квантовом компьютере, чтобы можно было проверить каждую команду/функцию в отдельности. Кроме того, вызовы API к квантовому компьютеру на порядок медленнее, чем локальное выполнение кода. Поэтому важно, чтобы как можно больше разработки и тестирования проводилось локально, прежде чем переопределять методы написания кода для выполнения на квантовом компьютере.

В ряде других публикаций описываются более целевые методы, которые разработаны специально для пря-

мого моделирования CPU с помощью квантовых схем. К числу таких методов относятся следующие.

1. Использование квантовой запутанности, формируемой при помощи вентиля Адамара, в качестве основы для построения схемы-защелки. Эта схема выполняет базовые логические операции над отдельными разрядами: проверку значения бита, установку бита в единицу и сброс в ноль. Такая схема может функционировать как квантовый аналог классической логики управления отдельными битами регистра [4]. Путём последовательного применения этих операций возможно формирование более сложных логических инструкций, например операции загрузки значения в регистр. Использование запутанности позволяет сохранить и управлять состояниями квантовых разрядов, обеспечивая потенциальное квантовое ускорение при выполнении логических и регистровых инструкций.
2. Создание квантовой схемы с недостаточным количеством элементов, которые объединяют необходимые логические вентили в одну схему. Для практической реализации более крупных 8- или 16-разрядных инструкций предлагается создать несколько 4-разрядных вариантов, в которых шум или количество доступных кубитов не позволяют реализовать полную версию. Проведенные испытания свидетельствуют о том, что этот метод значительно сократил время выполнения, поскольку большинство команд (за исключением повторяющихся, таких как CPIR, LDIR и т.д.) могут быть выполнены с использованием одной или двух схем [10,15]. Недостатком данного метода является то, что он требует больше кубитов, однако учеными в настоящее время предпринимаются меры, чтобы не допустить необоснованных накладных расходов.
3. Базовая версия комплекта средств разработки программного обеспечения реализуется с помощью квантовых схем, которые используются для представления традиционных логических вентилей. Эти квантовые логические вентили соединяются для построения более крупных схем, таких как сумматоры, вычитатели и защелки. Эксперты отмечают, что в ходе использования данного метода необходимо следить за тем, чтобы начальное состояние каждого кубита в квантовом эквиваленте логического вентиля было чистым, т.е. не было определено или чтобы входной сигнал вентиля был установлен на известное значение из другой схемы (при построении более крупных логических схем, таких как сумматор) [2]. Однако несмотря на то, что данная техника является удобным руководством и убедительным доказательством концепции выполнения битовых, логических и арифметических функций на квантовом компьютере, она не использует основные преимущества квантовых вычислений, такие как возможность обработки нескольких состояний в одном кубите.

Систематизация достоинств и недостатков некоторых традиционных методов эмуляции CPU представлена в таблице 2.

Используя данные опытов и экспериментов с эмуляцией CPU для выполнения на квантовом компьютере, которые получены учеными в разных странах мира, на рис. 1 приведено сравнение эффективности традиционных методов.

На рис. 1 темно-серые столбцы представляют собой условную эффективность метода (%), другими словами, относительную способность метода реализовать функциональность классического процессора с минимальными затратами квантовых ресурсов. Эффективность выражена в процентном эквиваленте по следующим критериям:

— корректность выполнения логики (эмулируются ли инструкции ISA как есть?)— 40 %;
— объём требуемых ресурсов (кубиты, глубина схемы) — 30 %;
— скорость выполнения / время на схеме (в квантовых циклах) — 20 %;
— гибкость/масштабируемость (можно ли перенести на другую архитектуру?) — 10 %.

Общий балл по этим критериям нормируется на 100 %.

Серая кривая — это ресурсоёмкость метода (относительные единицы): чем выше значение, тем больше требуется квантовых ресурсов (кубитов, глубина схем и т.п.).

Приведенные на рис. 1 данные свидетельствуют о том, что квантовые виртуальные машины и LLVM/IR-трансляция показывают хорошее соотношение между эффективностью и потреблением ресурсов, в то же время, логическая эмуляция вентилей является наименее эффективной и наиболее ресурсоёмкой. Прямая трансляция машинного кода имеет значительный теоретический интерес, но крайне затратна по ресурсам.

Представленные выше результаты свидетельствуют об актуальной необходимости развития и улучшения традиционных методов эмуляции CPU для выполнения на квантовом компьютере. Развиваемые на сегодняшний день наработки включают оптимизацию эмуляции традиционных логических вентилей, методы упрощения нескольких вентилей, уменьшение количества необходимых кубитов и т.д. Ключевые направления исследований и перспективные способы решения проблем представлены в таблице 3.

Таблица 2.

Описание традиционных методов эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере

Метод эмуляции	Описание подхода	Преимущества	Ограничения
Трансляция машинного кода в квантовые логические элементы	Прямое преобразование инструкций CPU в эквивалентные квантовые схемы	Позволяет в теории воссоздать поведение конкретной архитектуры процессора	Требует большого количества кубитов и глубокой схемы, что ограничивает масштабируемость
Квантовые интерпретаторы	Создание логических структур, интерпретирующих команды на квантовом уровне	Гибкость: возможность адаптации под различные архитектуры набора команд	Высокая сложность реализации, значительные накладные вычисления
Моделирование логических вентилей («и», «или», «искл.или»)	Аппроксимация работы логических схем с помощью универсальных квантовых вентилей	Подходит для демонстрационных и образовательных целей	Эффективность крайне низкая для практического моделирования современных CPU
Использование схем обратной компиляции	Восстановление CPU-алгоритмов и их реализация через квантовые субрутины	Позволяет анализировать уязвимости и поведение процессоров на низком уровне	Метод нестандартизирован, требует большого объёма ручной работы
Квантовые виртуальные машины	Виртуальные программные среды, имитирующие CPU с использованием квантовой вычислительной платформы	Обеспечивает переносимость кода и абстракцию архитектуры	Необходим мощный классический сопроцессор, квантовая часть выполняет лишь ограниченные задачи
Трансляция промежуточного представления в квантовые инструкции	Преобразование промежуточного кода в квантовые схемы с использованием квантового промежуточного представления	Совместимость с современными компиляторами, возможность автогенерации квантовых программ	На данный момент применяется только для специализированных задач, не полноценно эмулирует CPU

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

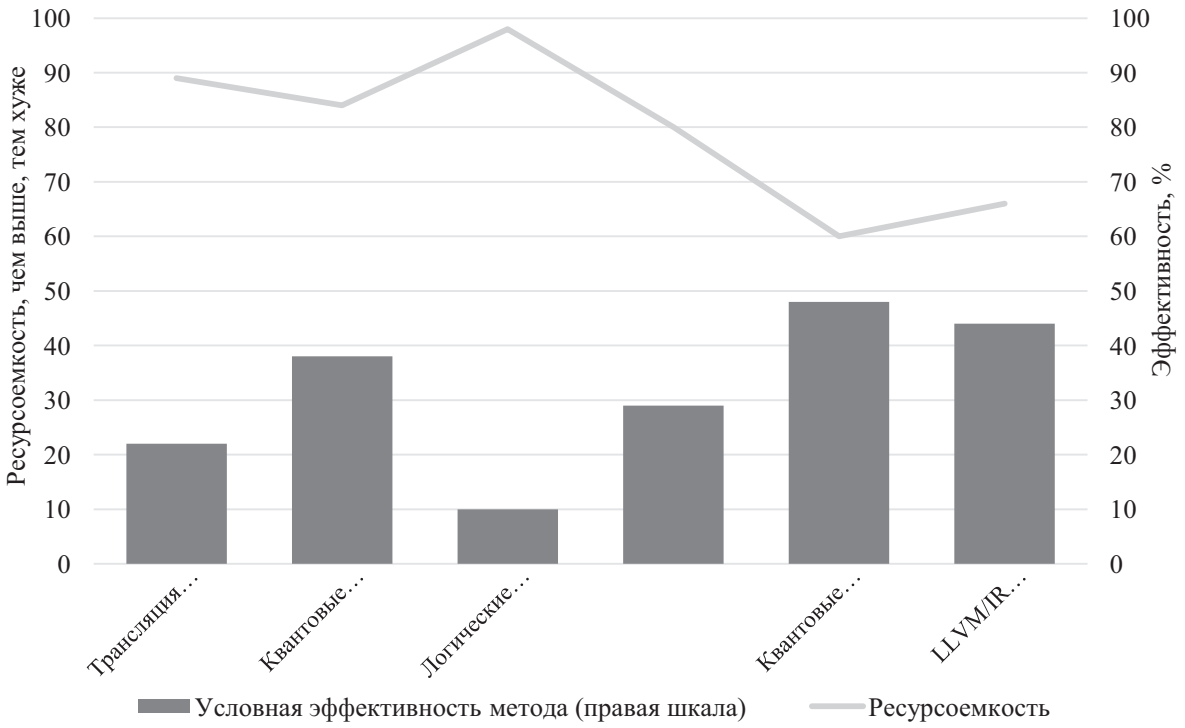


Рис. 1. Сравнение эффективности традиционных методов эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере (составлено автором)

Таблица 3.

Систематизация перспективных подходов оптимизации традиционных методов эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере (составлено автором).

Аспект сравнения	Традиционные методы эмуляции	Адаптация / Проблемы для квантового компьютера	Методы оптимизации	Принцип работы
Основной принцип эмуляции	Интерпретация: построчное исполнение инструкций целевой архитектуры. Динамическая/JIT-компиляция: перевод блоков инструкций целевой архитектуры в нативный код хост-системы во время выполнения	— несоответствие архитектур: классические инструкции (последовательные, битовые) не имеют прямого квантового аналога; — проблема состояния: классический CPU оперирует детерминированными битовыми состояниями; квантовый — суперпозициями и запутанностью; — измерение/декогеренция: каждое чтение состояния кубита вызывает коллапс волновой функции, нарушая квантовые свойства;	1. Квантовая интерпретация: создание квантовых вентилей для эмуляции логики классических инструкций. 2. Квантовая компиляция (транспиляция): перевод классических инструкций в эквивалентные квантовые схемы (квантовые вентили и операции).	— квантовый вентиль как логическая операция: каждая классическая логическая операция («и», «или», «нет») может быть реализована с помощью обратимых квантовых вентилей; — ограниченные ресурсы: задача состоит в минимизации количества вентилей и глубины цепи для каждой эмулируемой инструкции; — избыточность кубитов: для представления N битов классической информации требуется N кубитов.
Представление данных и состояний	Битовые регистры, оперативная память как массив битов	Проблема: эффективное кодирование классических битов в кубиты и управление классической памятью на квантовой системе	1. Бинарное кодирование $1 \rightarrow \vert 1\rangle$	$0 \rightarrow \vert 0\rangle$ $1 \rightarrow \vert 1\rangle$
Выполнение инструкций / операции	Последовательное выполнение микроопераций (чтение регистра, ALU-операция, запись в память).	1. Проблема: выполнение сложных арифметических и логических операций, циклов, ветвлений на квантовом уровне. 2. Обратимость: большинство классических операций необратимы, квантовые вентили должны быть обратимыми. 3. Условные операции: реализация условных переходов в квантовой логике сложна	1. Квантовые арифметические схемы: реализация сложения, умножения и других ALU-операций с помощью квантовых вентилей (например, квантовые сумматоры). 2. Квантовые управляющие вентили: для условных операций 3. Применение специализированных квантовых алгоритмов: для ускорения некоторых операций	— квантовая арифметика: например, схемы на основе QFT (квантового преобразования Фурье) для быстрого сложения/умножения; — условная логика: комбинация контролируемых вентилей для эмуляции классического ветвления. Требует копирования состояния для условного выполнения, что нарушает теорему о не клонировании, если не использовать вспомогательные кубиты или специфические подходы.

Окончание табл. 3

Аспект сравнения	Традиционные методы эмуляции	Адаптация / Проблемы для квантового компьютера	Методы оптимизации	Принцип работы
Управление памятью / ввод-вывод	Адресное пространство, кэш, стеки, аппаратные прерывания.	1. Проблема: эффективная адресация и доступ к квантовой памяти; синхронизация классического ввода-вывода с квантовыми вычислениями. 2. Доступ к данным: каждое измерение кубита коллапсирует его состояние, что затрудняет многократный доступ к одним и тем же данным без переинициализации	1. Квантовые схемы адресации: на основе QFT или специализированных методов для доступа к данным, закодированным в квантовых регистрах. 2. Вспомогательные кубиты: для временного хранения результатов или выполнения операций без коллапса основного состояния. 3. Гибридные подходы: использование классического компьютера для управления основной памятью и планирования квантовых вычислений для отдельных инструкций/блоков	— ограниченная квантовая память: текущие квантовые компьютеры имеют мало кубитов и короткое время когерентности, что делает эмуляцию больших объемов памяти непрактичной; — гибридные архитектуры: наиболее реалистичный подход, где квантовый компьютер выступает в роли копроцессора для выполнения специфических, — вычислительно сложных частей классической программы.
Масштабируемость и производительность	Конвейеризация инструкций и распараллеливание на уровне команд	1. Проблема: низкое количество кубитов (NISQ-эра), высокая частота ошибок, короткое время когерентности, отсутствие квантовой коррекции ошибок 2. «Квантовое ускорение»: для большинства классических задач квантовый компьютер не дает ускорения, а эмуляция классического CPU может быть медленнее.	1. Фокус на «квантово-ускоряемых» блоках: идентификация фрагментов кода, которые могут получить квантовое ускорение. 2. Кодирование высокой плотности: попытки закодировать более одного бита в один кубит 3. Оптимизация квантовых схем: минимизация глубины цепей вентилей для уменьшения влияния декогеренции.	— NP-полные проблемы: для задач, где классическое решение экспоненциально по времени, квантовое может быть полиномиальным, однако эмуляция CPU в целом не является такой задачей; — вариационный квантовый собственный решатель или алгоритм квантовой приближенной оптимизации: могут быть использованы для оптимизации квантовых схем эмуляции.

Итак, несмотря на значительные успехи, достигнутые за последнее десятилетие, масштабируемость симуляции больших квантовых схем (с точки зрения их ширины и глубины) на классических машинах остается основной проблемой. Поскольку ни один подход не является на сегодняшний день панацеей от проблемы масштабируемости, наиболее оптимальный результат позволяет получить сочетание несколько методов оптимизации.

Выводы

В статье представлен обзор литературы и описание различных подходов к эмуляции центрального процессора для выполнения на квантовом компьютере. Взаимосвязь между классическим и квантовым программированием еще не получила своего должного освещения в современных публикациях, и, хотя научно-экспертное сообщество осознает потенциал повышения эффективности, который открывает использование квантовых компьютеров, построение простых схем/функций представляет на сегодняшний день сложную задачу.

В процессе исследования описаны некоторые традиционные методы эмуляции, выделены их достоинства и недостатки, возможности и ограничения использования. Также приведены показатели эффективности и ресурсоемкости этих методов, которые систематизированы на базе проведенных учеными и экспертами экспериментов. Отдельное внимание уделено перспективным направлениям развития и возможным вариантам оптимизации традиционных инструкций CPU для выполнения на квантовом компьютере. По мнению автора, подход, основанный на использовании нескольких методов, улучшает доступность/удобство использования квантовых компьютеров при переходе от традиционных вычислений.

Полученные результаты позволяют сравнить традиционные методы с более эффективными квантовыми подходами к выполнению эмуляции CPU. Перспективы дальнейших исследований связаны с преодолением проблем, обусловленных ограниченной доступностью кубитов и непредсказуемым механизмом очередей. Предполагается, что это приведёт к созданию новых решений, которые позволят повысить эффективность работы квантовых систем даже при ограниченных ресурсах и сократить влияние задержек и очередей на процесс выполнения программ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков П.Е., Хабовец Ю.Ю., Пилипенко И.А., Кравченко В.О., Черкесова Л.В. Инструменты для выполнения и эмуляции квантовых вычислений // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18. № 2. С. 43–53. https://doi.org/10.25205/1818-7900-2020-18-2-43-53
2. Тырышкин С.Ю. Эмуляция квантовых вычислительных процессов для автоматизированных систем управления на классическом ПК // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2024. № 12. С. 130–134. https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.12.36
3. Hoa T. Nguyen, Muhammad Usman iQuantum: A toolkit for modeling and simulation of quantum computing environments // Software: Practice and Experience. 2024. Volume 54, Issue 6. P. 23–29. https://doi.org/10.1002/spe.3331
4. Mohammed Alghadeer, Eid Aldawsari Psitrum: An open-source simulator for universal quantum computers // IET Quantum Communication. 2024. Volume 5, Issue 4. P. 49–53. https://doi.org/10.1049/qtc2.12101
5. Пелешенко В.А. Реализация квантовых вычислений на базе персональных квантовых компьютеров с использованием ядерно-магнитного резонанса // Мягкие измерения и вычисления. 2024. Т. 76. № 3. С. 14–34. https://doi.org/10.36871/2618-9976.2024.03.002
6. Nikita Stroev, Natalia G. Berloff Analog Photonics Computing for Information Processing, Inference, and Optimization // Advanced Quantum Technologies. 2023. Volume 6, Issue 9. P. 105–113. https://doi.org/10.1002/qute.202300055
7. Tian Chen, Weixuan Zhang, Deyuan Zou Engineering Topological States and Quantum-Inspired Information Processing Using Classical Circuits // Advanced Quantum Technologies. 2025. Volume 8, Issue 6. P. 89–93. https://doi.org/10.1002/qute.202400448
8. Karthik Krishnan, Saranyan Vijayaraghavan Unraveling the Atomic Redox Process in Quantum Conductance and Synaptic Events for Neuromorphic Computing // Advanced Electronic Materials. 2022. Volume 8, Issue 11. P. 56–66. https://doi.org/10.1002/aelm.202200509
9. Милай М.В. Квантовая телепортация сверхпроводящих кубитов в квантовых компьютерах открытого проекта IBM QUANTIUM EXPERENCE // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2023. № 1–1. С. 131–135. EDN: DXGSNI
10. Черемисин Д.Г., Мкртчян В.Р., Музлова А.Д. Развитие квантовых компьютеров: перспективы для вычислительной мощности и решения сложных задач // Символ науки: международный научный журнал. 2024. № 1–2. С. 49–51. EDN: XVHDEE
11. Рахимов Р.Х. Потенциал импульсного туннельного эффекта (ИТЭ) для преодоления технических барьеров квантовых компьютеров // Computational Nanotechnology. 2024. Т. 11. № 3. С. 11–33. https://doi.org/10.33693/2313-223X-2024-11-3-11-33
12. Guillem Llodrà, Christos Charalambous Benchmarking the Role of Particle Statistics in Quantum Reservoir Computing // Advanced Quantum Technologies. 2022. Volume 6, Issue 1. P. 105–110. https://doi.org/10.1002/qute.202200100
13. Giuliana Siddi Moreau, Lorenzo Pisani Quantum Artificial Intelligence Scalability in the NISQ Era: Pathways to Quantum Utility // Advanced Quantum Technologies. 2025. № 197. P. 44–49. https://doi.org/10.1002/qute.202400716
14. Ульянов С.В., Рябов Н.В., Зрелов П.В., Иванцова О.В., Кореньков В.В. Оценка возможностей классических компьютеров при реализации симуляторов квантовых алгоритмов // Программные продукты и системы. 2022. № 4. С. 618–630. https://doi.org/10.15827/0236-235X.140.618-630
15. Кирилюк М.А., Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Суминов К.А. Разработка и оценка эффективности метода организации вычислений на специализированных вычислительных системах с квантовым сопроцессором // Приборы. 2024. № 3 (285). С. 12–20. EDN: TPQGGM

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.43

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧЕ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ИЗОПЕРИМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

OPTIMAL PROGRAM CONTROL IN A PROBLEM WITH ISOPERIMETRIC TYPE CONSTRAINTS

D. Khrychev
A. Vinogradova

Summary. The work is devoted to the construction of optimal program control of a stochastic dynamic system containing a random parameter, in the presence of an isoperimetric type of constraint. The solution is based on the method of discretization of the distribution of random parameters, the essence of which consists in approximating the original stochastic problem with deterministic optimal control problems obtained because of replacing the random parameters of the original problem with discrete random variables converging to these parameters according to the distribution. Deterministic problems, in turn, are solved using known standard methods, both analytical and numerical. The results obtained for different distributions of the random parameter are compared in terms of the rate of convergence of solutions of approximate deterministic problems and the behavior of optimal control functions.

Keywords: optimal control, program control, distribution discretization method.

Хрычев Дмитрий Аркадьевич
кандидат физико-математических наук, доцент,
Российский технологический университет МИРЭА
dakford@yandex.ru
Виноградова Арина Николаевна
Российский технологический университет МИРЭА
arina.airina@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена построению оптимального программного управления стохастической динамической системой, содержащей случайный параметр, при наличии ограничения изопериметрического типа. В основе решения лежит метод дискретизации распределения случайных параметров, суть которого состоит в аппроксимации исходной стохастической задачи детерминированными задачами оптимального управления, получаемыми в результате замены случайных параметров исходной задачи дискретными случайными величинами, сходящимися к этим параметрам по распределению. Детерминированные задачи, в свою очередь, решаются с помощью известных стандартных методов, как аналитических, так и численных. Результаты, полученные для разных распределений случайного параметра, сравниваются с точки зрения скорости сходимости решений приближённых детерминированных задач и поведения оптимальных управляющих функций.

Ключевые слова: оптимальное управление, программное управление, метод дискретизации распределения.

Введение

Задачам оптимального управления стохастическими системами посвящена огромная литература, однако лишь незначительная часть ее относится к изучению программного, т.е. зависящего только от времени, управления. Так, например, различные аспекты программного управления, прежде всего необходимые условия оптимальности, рассматривались в работах [1–4]. В работе [5] доказано существование оптимального программного управления для достаточно широкого круга задач, там же предложен метод аппроксимации исходной стохастической задачи детерминированными задачами, основанный на дискретизации распределений входящих в систему случайных параметров. Еще один метод построения оптимального программного управления, основанный на усреднении уравнений управляемой динамической системы и усечении полученной системы моментных уравнений, рассмотрен в работе [6]. Указанные методы были применены для нахождения оптимального программного управления различными стохастическими системами в работах [7] и [8].

Гораздо более обширной является литература, посвященная управлению с обратной связью при неполной информации о состоянии системы, предельным случаем которого, когда информация о состоянии системы вообще отсутствует, является программное управление (см., например, [9–12] и др.). Однако при таком подходе результаты, касающиеся именно программного управления, естественно, не обладают достаточной проработанностью.

Целью настоящей работы является решение задачи оптимального программного управления стохастической динамической системой, содержащей случайный параметр, при наличии ограничения изопериметрического типа. Используется упомянутый выше метод дискретизации распределения случайных параметров [5]. Полученные в результате применения дискретизации детерминированные задачи решаются с помощью комбинации аналитических и численных методов, в результате получаем приближенные решения исходной стохастической задачи. При этом точность аппроксимации исходной стохастической задачи приближенными детерминированными задачами оценивается экспери-

ментально, поскольку результаты [5] гарантируют лишь сходимость оптимальных управлений для приближенных задач к оптимальному программному управлению для исходной задачи, но не дают оценку их близости. В работе рассматриваются различные распределения случайного параметра и полученные результаты сравниваются с точки зрения скорости сходимости решений приближённых детерминированных задач и поведения оптимальных управляющих функций.

Постановка задачи

Рассматривается дифференциальное уравнение

$$\dot{x}(t) = -kx(t) + u(t), t \in [0,T], \tag{1}$$

где k — случайная величина непрерывного типа, $u(t)$ — управляющая функция, T фиксировано. Уравнению (1) удовлетворяет, например, скорость материальной точки единичной массы, движущейся в среде со случайным коэффициентом сопротивления k под воздействием силы $u(t)$; возможны и другие физические интерпретации.

Уравнение (1) дополняется начальным условием

$$x(0) = 0. \tag{2}$$

Накладывается ограничение на амплитуду управляющей функции

$$|u(t)| \le U \forall t \in [0,T], \tag{3}$$

а также ограничение изопериметрического типа

$$\int_0^T u^2(t)dt = A, \tag{4}$$

где $U, A = \text{const}$. На параметры T, U и A накладывается естественное условие $A < U^2T$, невыполнение которого, как легко видеть, приводит к несовместимости ограничений (3) и (4).

Наконец, введем функционал качества

$$J(u) = \mathrm{E}x(T) \to \sup, \tag{5}$$

где E — оператор математического ожидания.

Ставится задача отыскания управляющей функции $u = u(t)$, удовлетворяющей указанным выше ограничениям и доставляющей максимум функционалу качества (5).

Решение задачи

Применим метод дискретизации распределения, описанный в работе [5], для решения задачи (1)–(5).

Пусть $k_n, n = 1,2,\ldots$ — дискретные случайные величины, сходящиеся к случайному параметру k по распределению, $k_n^m, m = 1,\ldots,n$ — значения с. в. k_n, $p_m = \mathrm{P}(k_n^m)$. Ниже будет описано построение случайных величин k_n для каждого из рассматриваемых в работе распределений.

Заменим в уравнении (1) с. в. k на k_n:

$$\dot{x}(t) = -k_n x(t) + u(t).$$

Тогда случайная функция $x(t)$ совпадает с одной из n неслучайных функций $x_m(t)$, являющихся решениями задачи Коши

$$\begin{cases} \dot{x}_m(t) = -k_n^m x_m(t) + u(t), \\ x_m(0) = 0, m = 1,\ldots,n, \end{cases} \tag{6}$$

причем $x(t) = x_m(t)$ с вероятностью p_m. Поэтому функционал качества приобретает вид

$$J_n(u) = \mathrm{E}x(T) = \sum_{m=1}^{n} p_m x_m(T) \to \sup. \tag{7}$$

Таким образом, для $n = 1,2$ и т.д. мы получили детерминированную задачу оптимального управления (6), (3), (4), (7). Из результатов [5] следует, что при $n \to \infty$ решения (оптимальные управляющие функции) этих задач сходятся к решению исходной стохастической задачи по функционалу, т.е. образуют максимизирующую последовательность управлений для функционала качества исходной задачи.

Перейдем к решению приближенной детерминированной задачи (6), (3), (4), (7). Из необходимых условий оптимальности [13] следует, что оптимальная управляющая функция $\hat{u}(t)$ имеет вид

$$\hat{u}(t) = \begin{cases} U, \text{ если } \dfrac{\sum_{m=1}^{n}\gamma_m(t)}{2\beta} \ge U, \\ \dfrac{\sum_{m=1}^{n}\gamma_m(t)}{2\beta} \text{ при } \left|\dfrac{\sum_{m=1}^{n}\gamma_m(t)}{2\beta}\right| < U, \\ -U, \text{ если } \dfrac{\sum_{m=1}^{n}\gamma_m(t)}{2\beta} \le -U, \end{cases} \tag{8}$$

где $\beta > 0$ — числовой, а $\gamma_1(t),\ldots,\gamma_n(t), t \in [0,T]$, — функциональные множители Лагранжа, причем $\gamma_m(t)$ удовлетворяют уравнениям Эйлера $-\dot{\gamma}_m(t) + k_n^m\gamma_m(t) = 0, m = 1,\ldots,n$, и начальным условиям $\gamma_m(T) = p_m$ (условия трансверсальности), откуда

$$\gamma_m(t) = p_m e^{-k_n^m(T-t)}. \quad (9)$$

Далее, множитель Лагранжа β находится из изопериметрического условия (4) как корень уравнения

$$F(\beta) = \int_0^T u^2(t)dt - A = 0, \quad (10)$$

где $\hat{u}(t) = \hat{u}(t,\beta)$ задается формулой (8). Уравнение (10) решается численно, при этом предварительно устанавливается единственность его корня и локализация его на отрезке

$$[\beta_1,\beta_2], \text{где } \beta_1 = \frac{\min\limits_{t\in[0;T]}\sum_{m=1}^n \gamma_m(t)}{2U},$$

$$\beta_2 = \frac{\max\limits_{t\in[0;T]}\sum_{m=1}^n \gamma_m(t)}{2\sqrt{\frac{A}{T}}}.$$

Как видим, одновременно с нахождением значения β вычисляется оптимальное управление $u = \hat{u}(t)$, которое далее подставляется в задачу Коши (6). Последняя, ввиду структуры (8) функции $\hat{u}(t)$, уже не допускает аналитического решения, и потому решается численно. На последнем этапе находится значение функционала качества (7).

В заключение поясним критерий выбора числа значений n приближенной дискретной с. в. k_n. Это число подбирается экспериментально из соображений стабилизации значения функционала качества $J_n(u)$: разность значений $J_n(u)$ для двух последующих значений n не должна превышать некоторого порогового значения τ, которое в работе было выбрано равным 10^{-6}.

Результаты

В работе рассматривались три различных распределения случайного параметра k: равномерное, смещенное показательное и нормальное. Опишем процесс дискретизации распределения для каждого из этих трех случаев.

Для равномерного распределения на отрезке $[a,b]$ с плотностью

$$f_k(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, x \in [a,b], \\ 0, x \notin [a,b], \end{cases} \quad (11)$$

значения приближенной с. в. k_n задаются как

$$k_n^m = a + hm - \frac{h}{2}, m = 1,\ldots,n, \quad (12)$$

где $h = \frac{b-a}{n}$, а вероятность, с которой принимается каждое из значений k_n^m, $p_m = \mathrm{P}(k_n^m) = \frac{1}{n}$.

Для смещенного показательного распределения с плотностью

$$f_k(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda(x-a)}, x \geq a, \\ 0, x < a, \end{cases} \quad (13)$$

сначала находим число b из условия малости вероятности попадания в интервал $[b,+\infty)$ значения случайной величины k: $\int_b^{+\infty}\lambda e^{-\lambda(x-a)}dx = \varepsilon$. Далее определяем дискретную с. в. k_n со значениями (12) и вероятностями принятия этих значений

$$p_m = \mathrm{P}(k_n^m) = \frac{1}{1-\varepsilon}\int_{s_m}^{s_{m+1}}\lambda e^{-\lambda(x-a)}dx, m = 1,\ldots,n,$$

где $s_i = a + hi, i = 0,\ldots,n$. Согласно [5] при $\varepsilon \to 0$ и $n \to \infty$ случайная величина $k_n = k_{n,\varepsilon}$ стремится к с. в. k по распределению.

Аналогично аппроксимируется нормально распределенный параметр k с плотностью

$$f_k(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}, \quad (14)$$

только здесь на первом шаге приходится отрезать «хвосты» распределения, уходящие как на $+\infty$, так и на $-\infty$, т.е. находить a и b такие, что

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_b^{+\infty}e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{a}e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}}dx = \varepsilon,$$

после чего на отрезке $[a,b]$ повторять уже известную нам процедуру.

Приведем результаты вычисления значений функционала качества $J_n(u)$. Для всех распределений вычисления проводились при значениях параметров $T = 5, U = 1$Ł $A = 4$. Далее, параметры распределений: для равномерного распределения (11) $a = 1, b = 2$; для показательного распределения (13) $a = 1, \lambda = 2$; наконец, для нормального распределения (14) $M = 1.5$ и $\sigma = 0.25$.

Как видно из таблицы, быстрее всего стабилизация значения J_n происходит в случае равномерно распреде-

Таблица 1.

Зависимость значения функционала качества $J_n\left(\hat{u}\right)$ от числа значений n приближенной дискретной с. в.

Равномерное распределение		Показательное распределение		Нормальное распределение	
n	J_n	n	J_n	n	J_n
30	0.68996950	300	0.71833773	200	0.88007631
40	0.68998403	400	0.71834758	500	0.88012908
50	0.68999075	500	0.71835213	1000	0.88014722
60	0.68999441	600	0.71835461	1500	0.88015333
70	0.68999661	700	0.71835610	2000	0.88015639
80	0.68999804	800	0.71835707	3000	0.88015947
90	0.68999902	900	0.71835774	4000	0.88016101
100	0.68999972	1000	0.71835821	5000	0.88016193

ленного параметра, медленнее всего — для нормального распределения. Объяснение видится в ограниченности носителя плотности распределения вероятностей для равномерно распределенной с. в. и в отсутствии таковой в остальных случаях.

В заключение приведем график оптимальной управляющей функции $u = \hat{u}(t)$ для случая равномерно распределенного параметра.

Отметим, что для всех рассмотренных в работе распределений оптимальные управляющие функции отличаются друг от друга столь незначительно, что графики их практически неразличимы. В принципе, близость друг другу оптимальных управляющих функций для различных распределений случайного параметра является эффектом ожидаемым. Действительно, в силу (8) и (9) график $\hat{u}(t)$ вне зависимости от распределения должен иметь вид, как на рис.1, а ввиду жесткости условий (3) и (4) отличие функций $\hat{u}(t)$ друг от друга для различных распределений в метрике, скажем, пространства $C[0,T]$, должно быть незначительным. В то же время, столь малое отличие (не более 10^{-2} в метрике $C[0,5]$), которое показал численный эксперимент, оказалось несколько неожиданным.

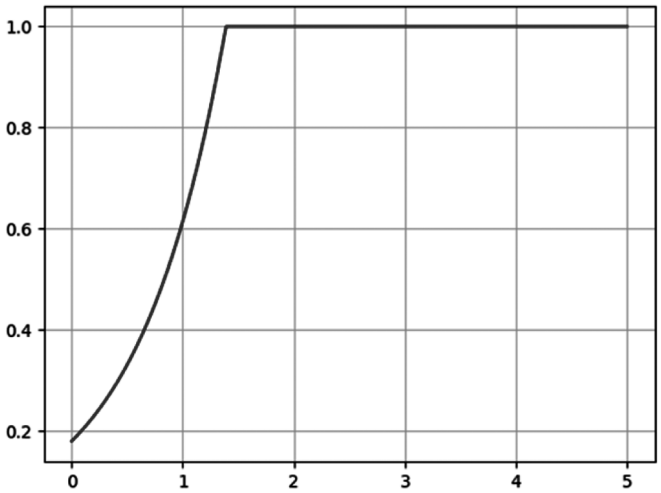


Рис. 1. Оптимальная управляющая функция $\hat{u}(t)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Warfield V.A stochastic maximum principle. / Ph. D. Thesis, Brown University, Providence, RI, 1971.
2. Holland C. Gaussian open loop control problems. / SIAM J. Control, 1975, N 13, p. 545-551.
3. Колмановский В.Б. Квазиоптимальное программное управление некоторыми стохастическими системами. / Дифференц. уравнения, 1980, т. 16, № 5, с. 795–805.
4. Докучаев Н.Г., Якубович В.А. Принцип максимума для стохастических дифференциальных уравнений с детерминированным управлением. / Кибернетика и вычислительная техника, 1982, № 54, с. 72–78.
5. Хрычев Д.А. Оптимальное программное управление: существование и аппроксимация. / Матем. сб., 2001, т. 192, № 5, с. 125–144.
6. Хрычев Д.А. Моменты решений эволюционных уравнений и субоптимальные программные управления. / Матем. сб., 2007, т. 198, № 7, с. 123–160.
7. Башаримов А.Н. Нелинейное оптимальное программное управление: метод дискретизации распределения. / Математические методы в технологиях и технике, 2021, № 1, с. 24–29.
8. Khrychev D.A. Optimal programmed control in energy minimisation problem. E3S Web of Conferences. 2023; Vol. 458 (01028). https://doi.org/10.1051 / e3sconf/202345801028.
9. Bensoussan A. Stochastic Control of Partially Observable Systems. / Cambridge University Press, Cambridge, 1992 — 352 p.
10. Рыбаков К.А., Сотскова И.Л. Оптимальное управление нелинейными системами со случайной структурой при неполной информации о векторе состояния. / Автоматика и телемеханика, 2006, № 7, с. 62–75.
11. Рыбаков К.А. Оптимальное управление стохастической системой со случайным периодом квантования. / Труды МФТИ, 2015, т. 7, № 1, с. 145–165.
12. Wang G.C., Xiong J., Zhang S.Q. Partially observable stochastic optimal control. / Int. J. Numer. Anal. Mod., 2016, v. 13, N 3, p. 493–512.
13. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. — Москва: Физматлит, 2018–384 с.

© Хрычев Дмитрий Аркадьевич (dakford@yandex.ru); Виноградова Арина Николаевна (arina.airina@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.44

АНАЛИЗ ОШИБОК МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ SSRF

ERROR ANALYSIS IN MACHINE LEARNING FOR SSRF DETECTION

Gabriela Guadalupe Chavez Quiroz
N. Voinov

Summary. This study analyzes systematic errors in machine learning models for SSRF vulnerability detection. Key findings reveal: (1) confusion between basic and advanced SSRF variants (38 % of errors) associated with HTTP 403 responses and 2800–3200-byte payloads; (2) false positives in legitimate traffic (42 %) triggered by ≥2 redirects or PUT/POST methods; and (3) synthetic dataset limitations (20 %) when processing internal API requests to non-standard ports (8080/8443). The stacking ensemble model achieved optimal performance (96.3 % accuracy), reducing false positives to 1.2 %. SHAP analysis informed three key improvements: multi-level traffic verification, prioritized cloud metadata features (SHAP >0.15), and a new response-to-request size ratio feature. The research highlights the necessity of hybrid datasets combining synthetic and real-world data, particularly for edge cases in classes 4, 5, and 11. Proposed solutions address feature ambiguity while preserving the advantages of automated detection systems.

Keywords: SSRF vulnerabilities (Server-Side Request Forgery), machine learning, vulnerability detection, error analysis, synthetic dataset.

Чавес Кирос Габриэла Гуадалупе
Аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
chaveskiros.g@edu.spbstu.ru
Воинов Никита Владимирович
Кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
voinov@ics2.ecd.spbstu.ru

Аннотация. Данное исследование анализирует систематические ошибки моделей машинного обучения при обнаружении SSRF-уязвимостей. Основные проблемы включают: (1) путаницу между базовыми и продвинутыми вариантами SSRF (38 % ошибок), связанную с HTTP-кодом 403 и размером ответа 2800–3200 байт; (2) ложные срабатывания в легитимном трафике (42 %) при ≥2 редиректах или HTTP PUT/POST методах; (3) ограничения синтетических данных (20%) для запросов к внутренним API с портами 8080/8443. Ансамблевый метод Stacking показал наилучшие результаты (96.3 % точности), сократив ложные срабатывания до 1.2 %. На основе SHAP-анализа предложены улучшения: многоуровневая верификация трафика, приоритезация метаданных облачных сервисов (SHAP >0.15) и новый признак — отношение размера ответа к запросу. Исследование подчёркивает необходимость комбинирования синтетических и реальных данных, особенно для edge-случаев классов 4, 5 и 11.

Ключевые слова: SSRF-уязвимости, машинное обучение, обнаружение уязвимостей, анализ ошибок, синтетический набор данных.

Введение

Server-Side Request Forgery (SSRF) представляет собой уязвимость, возникающую при некорректной валидации серверных запросов, что позволяет осуществлять несанкционированный доступ к внутренним и внешним ресурсам [1]. Данная уязвимость включена в список OWASP Top 10–2021 [2] и представляет существенную угрозу для облачных инфраструктур. Одним из наиболее масштабных инцидентов, связанных с эксплуатацией SSRF, стал взлом Capital One в 2019 году [3], в результате которого было скомпрометировано свыше 100 миллионов записей пользователей.

В научной литературе предлагаются различные подходы к обнаружению уязвимостей SSRF. Исследование Wessels et al. [4] посвящено методам статического анализа потоков данных в PHP-приложениях, в то время как Wang et al. [5] разработали инструмент SSRFuzz, основанный на фаззинге и позволяющий выявлять ранее неизвестные уязвимости. Параллельно, работы Al-talak [6] и Kulkarni [7] сосредоточены на детектировании активных атак с использованием методов глубокого обучения и специализированных архитектур защиты.

В предыдущем исследовании [8] проведена комплексная оценка алгоритмов машинного обучения, включая Random Forest, XGBoost, LightGBM и ансамблевые методы. Наилучшие результаты показал Stacking Ensemble с точностью 96.3 %, F1-score 0.963 и ROC AUC 0.999. Тем не менее, даже в наиболее эффективных моделях сохраняются систематические ошибки классификации.

Анализ выявил два основных типа ошибок. Во-первых, наблюдается путаница между базовыми и продвинутыми вариантами SSRF, особенно в случаях совпадения характеристик запросов, таких как код состояния HTTP 403 или аналогичные диапазоны размера ответа. Во-вторых, отмечаются случаи ложной классификации легитимного трафика, содержащего атипичные паттерны, например, множественные редиректы или редко используемые HTTP-методы.

Настоящее исследование направлено на детальный анализ остаточных ошибок классификации. Особое внимание уделяется как алгоритмическим ограничениям применяемых методов, так и потенциальным смещениям, обусловленным использованием сбалансированного синтетического набора данных. Результаты исследования легли в основу предложенных усовершенствований, позволяющих сохранить преимущества автоматизированного подхода при значительном снижении частоты ошибочных классификаций.

Методология

Исследование проводилось на трех предварительно обученных моделях машинного обучения: Random Forest, XGBoost и Stacking Ensemble. В работе использовался синтетический набор данных из предыдущего исследования [8], содержащий 15 категорий запросов — от базовых вариантов SSRF до сложных техник эксплуатации в облачных средах.

Методология исследования включала три последовательных этапа. На первом этапе выполнялась количественная оценка ошибок классификации с разбивкой по типам и классам. Второй этап был посвящен анализу интерпретируемости моделей с использованием SHAP-значений и оценки важности признаков. На заключительном этапе проводилась статистическая валидация выявленных закономерностей с применением корреляционного анализа и проверки статистических гипотез.

Для обеспечения надежности результатов на всех этапах исследования применялась стратегия стратифицированной кросс-валидации. Особое внимание уделялось классам с наиболее высокими показателями ошибок классификации. Такой подход позволил минимизировать потенциальные смещения и обеспечить воспроизводимость результатов.

Анализ ошибок

Модели продемонстрировали систематические паттерны ошибочной классификации, которые можно разделить на три основные группы.

Наибольшая доля ошибок (38 %) связана с трудностями различения базовых (Класс 5) и продвинутых (Класс 4) сценариев SSRF, особенно при обработке запросов с HTTP-кодом 403 и размером ответа 2800–3200 байт. Анализ SHAP-значений выявил систематическое завышение важности порта назначения (SHAP 0.07) при недостаточном учете более надежных признаков, таких как метаданные облачных заголовков (SHAP 0.19).

Ложные срабатывания при анализе легитимного трафика (42 % ошибок) преимущественно относились к Классу 0 и были связаны с атипичными характеристиками: цепочками из ≥2 редиректов (встречались в 82 % ошибочных случаев), методами HTTP PUT/POST (на 35 % чаще вызывали ошибки по сравнению с GET) и аномально коротким временем ответа (<200 мс). Использование Stacking Ensemble позволило значительно снизить количество таких ошибок с 2.1 % до 1.2 %.

Оставшиеся 20 % ошибок, затрагивающие преимущественно Классы 4, 5 и 11 (запросы к внутренним API), выявили ограничения синтетического набора данных. Наибольшие сложности возникли при обработке редких комбинаций параметров, таких как использование нестандартных портов (8080, 8443) с определенными HTTP-методами, где искусственная природа данных проявилась наиболее явно. В Таблице 1 представлено детальное распределение ошибок с указанием характерных признаков и затронутых классов, что обеспечивает наглядное представление выявленных закономерностей.

Таблица 1.

Распределение ошибок по категориям

Тип ошибки	% от общего числа ошибок	Ключевые характеристики	Наиболее затронутые классы
Путаница SSRF (базовый/ продвинутый)	38 %	— Коды HTTP 403 — Размер ответа 2800–3200 байт	Класс 4 против Класса 5
Ложные срабатывания (легитимный трафик)	42 %	— ≥2 перенаправления — Методы PUT/POST — Время отклика <200 мс	Класс 0
Ограничения синтетического датасета	20 %	— Редкие комбинации атрибутов — Нестандартные порты (8080, 8443)	Классы 4, 5, 11

Проведенный стратифицированный анализ демонстрирует, что возникающие ошибки носят не случайный, а систематический характер и связаны с тремя ключевыми факторами: (1) частичным совпадением характеристик между функционально схожими классами, (2) наличием статистически аномальных паттернов в легитимном трафике, и (3) ограничениями охвата при генерации синтетических данных. Четкое определение данных закономерностей открывает возможности для разработки адресных корректирующих мер, направленных на устранение ошибок каждой конкретной категории.

Рекомендации

Для решения проблемы ложных срабатываний в легитимном трафике (Класс 0) рекомендуется внедрить многоуровневую систему верификации. Особое внимание следует уделить анализу полных цепочек перена-

правлений и вычислению соотношения времени ответа к размеру запроса. Экспериментальные данные показывают, что пороговое значение этого параметра ниже 0.05 мс/байт обеспечивает точность идентификации нормального трафика на уровне 89 %. Дополнительно следует учитывать частоту использования методов PUT/POST и аномально короткие времена отклика.

Для улучшения классификации сложных SSRF-сценариев (Класс 4) предлагается модификация модели по двум направлениям. Во-первых, необходимо расширить набор анализируемых признаков, включив специфические паттерны перенаправлений, характерные для SSRF. Во-вторых, требуется увеличить значимость метаданных облачных сервисов в процессе принятия решений, установив минимальный порог SHAP-значений для этих признаков на уровне 0.15.

Отдельный комплекс мер направлен на снижение взаимной путаницы между классами. Наиболее эффективным решением представляется введение нового признака — отношения размера ответа к размеру запроса. Статистический анализ подтвердил значимые различия этого показателя между базовыми SSRF (1.8±0.4) и обращениями к внутренним API (3.2±0.7). Реализация данного подхода позволит улучшить точность классификации без существенного увеличения вычислительной нагрузки.

Выводы

Проведенный всесторонний анализ остаточных ошибок выявил их систематический характер, обусловленный двумя ключевыми факторами: внутренней неоднозначностью определенных характеристик запросов и ограничениями используемого синтетического набора данных. Хотя синтетический датасет обеспечивает точный контроль переменных, он создает пробелы в обработке крайних случаев (edge cases), особенно затрагивающих классы с наиболее сложным поведением (Классы 4, 5 и 11).

В качестве приоритетных направлений для улучшения определены: (1) контекстуализированная обработка временных характеристик и перенаправлений, (2) внедрение постклассификационных правил для неоднозначных случаев, и (3) расширение набора данных дополнительными примерами сложных облачных конфигураций. Stacking Ensemble продемонстрировал особую эффективность, сократив долю ложных срабатываний до 1.2 %, что подтверждает преимущество стратегического комбинирования нескольких моделей для компенсации индивидуальных ограничений каждого алгоритма.

Перспективы дальнейших исследований

Основным направлением будущих исследований станет разработка гибридного подхода к формированию datasets, сочетающего синтетически сгенерированные данные с реальными образцами сетевого трафика. Особый акцент будет сделан на тех сценариях, где искусственная природа существующего набора данных не позволяет адекватно отразить сложные поведенческие паттерны, характерные для реальных условий эксплуатации. Такой комбинированный подход сохранит преимущества контролируемой среды синтетических данных, одновременно устраняя их ключевые ограничения в сложных edge-cases.

Дополнительные перспективные направления включают разработку специализированных методов аугментации данных, ориентированных на проблемные классы (4, 5 и 11), где текущая модель демонстрирует наибольшее количество ошибок классификации. Особое внимание будет уделено интеграции современных языковых моделей для семантического анализа заголовков HTTP-запросов в спорных случаях, что позволит существенно повысить точность распознавания сложных SSRF-сценарий. Параллельно планируется исследование новых подходов к обработке временных характеристик и сложных цепочек перенаправлений, которые показали свою значимость в текущем исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krishnaraj N., Madaan C., Awasthi S., Subramani R., Avinash H., Mukim S. Common vulnerabilities in real world web applications // Doors. 2023. Pp. 9–22.
2. OWASP OWASP Top Ten [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://owasp.org/Top10/ (дата обращения: 12.03.2025).
3. InsiderSecurity Capital One Data Breach: How SSRF Vulnerability Exposed 100 Million Customer Records [Электронный ресурс]. 2025. URL: https://insidersecurity.co/capitalone-data-breach-how-ssrf-vulnerability-exposed-100-million-customer-records/ (дата обращения: 12.03.2025).
4. Wessels M., van der Kouwe E., Groot J. de, Bos H. SSRF vs. Developers: A Study of SSRF-Defenses in PHP Applications // Proc. of 33rd USENIX Security Symposium (USENIX Security 24). 2024. Pp. 6777–6794.
5. Wang E., Chen L., Zhang M., Li X. Where URLs Become Weapons: Automated Discovery of SSRF Vulnerabilities // Proc. of 2024 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). IEEE, 2024. Pp. 239–257.
6. Al-talak K., Abbass O. Detecting server-side request forgery (SSRF) attack by using deep learning techniques // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2021. Vol. 12, No 12. Pp. 12.
7. Kulkarni K., Kaur K., Torvi N., Singh A., Annapurna D. Mitigating SSRF Threats: Integrating ML and Network Architecture // Proc. of International Conference on Paradigms of Communication, Computing and Data Analytics. Springer, 2024. Pp. 1–15.
8. Quiroz G.G.C., Voinov N.V., Drobintsev P.D., Zajtsev I.V. Supervised Machine Learning for SSRF Vulnerability Detection // Proc. of XXVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2025. Pp. 206–209.

© Чавес Кирос Габриэла Гуадалупе (chaveskiros.g@edu.spbstu.ru); Воинов Никита Владимирович (voinov@ics2.ecd.spbstu.ru)

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.45

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ЗАЩИЩЁННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

DEVELOPMENT OF A MODULAR MULTI-AGENT ARCHITECTURE OF THE INFORMATION SYSTEMS SECURITY TESTING SYSTEM

R. Chikaev

Summary. The article emphasizes the importance of penetration testing in the light of a growing number of cyber threats and rapid technological advancements. The use of artificial intelligence (AI) in pentesting is relevant due to the complexity of attacks, technology evolution, significant financial risks of data leaks and compliance with regulatory standards. Integration of artificial intelligence into automation testing of security of information systems significantly improves the efficiency and accuracy of the testing, provides adaptation to new challenges, and a competitive advantage in the cybersecurity market by quickly identifying and responding to emerging threats. The article substantiates the concept of distributing roles between specialized agents, each of which implements a specific stage of the attack scenario — from reconnaissance and vulnerability analysis to exploitation and consolidation in the system. A model for typifying agent actions is proposed based on the MITRE ATT&CK guide to classifying and describing cyberattacks and intrusions, which allows formalizing the behavior of system components and increasing the accuracy of results verification. The developed system demonstrates stability, scalability, and practical applicability in complex secure information systems.

Keywords: modular multi-agent system, automation of penetration testing, information security, intelligent agents, coordination of actions, MITRE ATT&CK, typing of techniques, agent architecture, efficiency evaluation, pentest, autonomy.

Чикаев Руслан Александрович
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва
Chikaev.r@edu.rea.ru

Аннотация. Статья подчеркивает важность тестирования на проникновения (пентестинга) в условиях роста киберугроз, стремительного развития технологий. Использование искусственного интеллекта в пентесте является актуальным из-за сложности атак, эволюции технологий, существенных финансовых рисков утечек данных и соблюдения нормативных стандартов. Взаимодействие и интеграция искусственного интеллекта в процессы автоматизации проведения тестирования защищенности информационных систем существенно позволяет повысить эффективность и точность тестирования, адаптируясь к новым вызовам и обеспечивая конкурентное преимущество на рынке кибербезопасности, а также оперативно выявлять и реагировать на возникшие угрозы. В статье обоснована концепция распределения ролей между специализированными агентами, каждый из которых реализует конкретный этап атакующего сценария — от разведки и анализа уязвимостей до эксплуатации и закрепления в системе. Предложена модель типизации действий агентов на основе руководства по классификации и описанию кибератак и вторжений — MITRE ATT&CK, позволяющая формализовать поведение компонентов системы и повысить точность верификации результатов. Разработанная система демонстрирует устойчивость, масштабируемость и практическую применимость в условиях сложных защищённых информационных системах.

Ключевые слова: модульная мультиагентная система, автоматизация тестирования на проникновение, информационная безопасность, интеллектуальные агенты, координация действий, MITRE ATT&CK, типизация техник, архитектура агентов, оценка эффективности, пентест, автономность.

Введение

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новой модели автоматизированного тестирования на проникновение, которая способна не просто механически выполнять запрограммированные действия, но и гибко адаптироваться к различным условиям, обучаться на предыдущем опыте и эффективно взаимодействовать с окружающей средой.

Объектом исследования является система тестирования защищенности информационных систем. Предмет исследования составляют процессы тестирования защищенности информационных систем.

Цель работы заключается в разработке общей модели мультиагентной системы для повышения эффективности процессов тестирования защищенности информационных систем. Для достижения поставленной цели в рамках исследования решается несколько вопросов: проведение анализа существующих моделей автоматизированного тестирования на проникновение информационных систем, определение архитектурных принципов построения мультиагентных систем, разработка общей концепции собственной системы, создание прототипов специализированных агентов и проведение сравнительного тестирования их эффективности. Гипотеза исследования основывается на предположении,

что построение мультиагентной системы позволит существенно повысить производительность тестирования на проникновение, осуществить расширение функционала в сравнении с существующими централизованными и монолитными решениями.

Научная новизна данного исследования заключается в формализации подхода к типизации сценариев атак с целью выявления и систематизации функциональных ролей и компетенций программных агентов, задействованных в процессе оценки защищенности информационных систем. Необходимо сформировать типовые агенты для реализации интегрированного сценария атак.

Практическая значимость работы проявляется в возможности прямого применения разработанных моделей и методик при построении комплексных систем оценки защищенности. Актуализация знаний агентов может основываться на открытых фреймворках, таких как руководство по классификации и описанию кибератак и вторжений *MITRE ATT&CK*, а также на аналитических материалах ряда коммерческих и научных организаций в области киберугроз.

Методологическую основу исследования составили: обзор актуальных научных и практических источников в сфере автоматизированного тестирования ИБ, методы функционального и архитектурного моделирования мультиагентных систем, практическая реализация и отладка прототипов AI-агентов, а также проведение эмпирических тестов в контролируемой среде. Для анализа эффективности решений применялся сравнительный метод с акцентом на измерение временны́х затрат и полноты анализа в реальных сценариях.

1. Анализ тестирования защищенности информационных систем

Стремительная эволюция ИТ-архитектуры и возникновение инновационных методов кибератак обуславливают критическую значимость систематической проверки защищенности цифровых ресурсов. Сценарное моделирование занимает лидирующую позицию среди методологий оценки безопасности. Данный подход базируется на применении специализированных программ испытаний, включающих последовательность действий по выявлению уязвимостей инфраструктуры.

Практическая реализация сценарного подхода выявляет существенные ограничения методологии. Фиксированный характер тестовых сценариев, основанных на известных векторах проникновения, затрудняет своевременное реагирование на возникновение новых угроз безопасности. Актуальность проблемы возрастает в условиях динамично развивающихся инфраструктур, характеризующихся регулярным обновлением компонентов.

Современные технологии предлагают инновационное решение существующих проблем в виде мультиагентных систем тестирования. Данные системы характеризуются способностью оперативной реконфигурации стратегии проверок при обнаружении изменений в инфраструктуре, осуществляя автоматическую модификацию механизмов тестирования на основе актуальных данных.

Функциональные возможности мультиагентных систем существенно превосходят потенциал классических методологий оценки защищенности информационных комплексов. Принципиальное отличие заключается в реализации механизма обработки информации в режиме реального времени, позволяющего оптимизировать векторы тестирования соответственно модификациям инфраструктуры, что недостижимо при использовании статических шаблонов.

Внедрение мультиагентного подхода обеспечивает качественно новый уровень гибкости процедур тестирования. Автоматизированная система осуществляет мгновенную адаптацию поведения агентов, основываясь на результатах мониторинга состояния инфраструктуры. Подобная архитектура гарантирует всестороннюю проверку защищенности с учетом динамической природы современных информационных систем, значительно повышая результативность пентестинга.

Ключевым преимуществом мультиагентных систем выступает встроенный механизм самообучения, обеспечивающий непрерывное совершенствование алгоритмов анализа сетевой инфраструктуры. Расширенная функциональность включает углубленное исследование межузлового взаимодействия, постоянный контроль сетевых потоков данных, автоматическую идентификацию нестандартного поведения системы. Применение передовых технологий минимизирует риск необнаружения критических уязвимостей, существенно повышая достоверность оценки уровня информационной безопасности в условиях эволюционирующего ландшафта киберугроз.

Мультиагентные системы (МАС) выступают инновационным направлением развития искусственного интеллекта и программной инженерии, базирующимся на принципах кооперации автономных интеллектуальных агентов. Понятие «агент» определяет программный модуль, обладающий высокой степенью самостоятельности, способностью анализировать трансформации окружающей среды и реализовывать целенаправленные действия в рамках установленных параметров функционирования [1–2].

Самостоятельность выступает фундаментальным принципом функционирования агентов. Программ-

ные модули реализуют процесс принятия решений независимо от внешнего управления, корректируя поведенческие паттерны на основе целевых установок и накопленных данных. Подобная автономность обеспечивает оперативное реагирование на модификации инфраструктуры без необходимости постоянного административного контроля.

Оперативное восприятие изменений окружающей среды характеризует реактивные свойства агентов. Способность мгновенной перестройки алгоритмов функционирования обеспечивает своевременное обнаружение возникающих угроз, многократно увеличивая продуктивность системы безопасности.

Коммуникативные возможности агентов реализуются через механизмы межагентного взаимодействия. Интеграция индивидуальных модулей в единую операционную систему достигается посредством координации действий и обмена информационными потоками. Встроенные механизмы адаптации и машинного обучения позволяют агентам совершенствовать рабочие алгоритмы в процессе эксплуатации. Непрерывная обработка поступающей информации стимулирует эволюцию поведенческих паттернов, повышая результативность системы. Способность извлекать уроки из предыдущего опыта и модифицировать стратегии соответственно трансформациям целевой среды гарантирует устойчивую эффективность комплекса при динамичном развитии инфраструктуры.

Сфера практического применения мультиагентных систем охватывает широкий спектр направлений: от координации производственных комплексов и оптимизации логистических цепочек до моделирования экономических процессов и автоматизации биржевых операций [5].

Особую ценность мультиагентный подход демонстрирует в области кибербезопасности, обеспечивая параллельную обработку масштабных информационных потоков, своевременную идентификацию угроз и мгновенное реагирование на инциденты безопасности, что критически важно в условиях эволюционирующего ландшафта киберугроз. Внедрение МАС в процедуры пентестинга значительно расширяет возможности тестирования благодаря специализации агентов на различных аспектах анализа безопасности.

Централизованная архитектура представляет собой наиболее доступный вариант реализации МАС. Координационные функции возлагаются на специализированный элемент — управляющий узел, осуществляющий распределение задач, мониторинг состояния агентов и стратегическое планирование. Применение централизованного подхода в системах безопасности требует внедрения комплексных мер защиты координационного центра при отсутствии жестких требований к отказоустойчивости. Децентрализованные системы исключают наличие единого центра управления. Автономные агенты реализуют независимые алгоритмы принятия решений, осуществляя прямой информационный обмен. Подобная организация усложняет процессы разработки, требуя решения задач целевой синхронизации и обеспечения согласованности действий в условиях распределенной информации. Однако архитектура демонстрирует максимальную устойчивость, сохраняя работоспособность при выходе отдельных компонентов. Данное свойство критически важно при тестировании защищенности информационных систем, когда нейтрализация отдельных агентов не прерывает процесс тестирования [3].

Интеллектуальный потенциал агентов выступает критическим фактором эффективности системы. Базовые реактивные агенты функционируют по принципу «стимул-реакция», реализуя предопределенные алгоритмы без учета контекстуальной информации. Подобные модули характеризуются простотой реализации и стабильностью работы, однако демонстрируют низкую эффективность в условиях неопределенности [22–24].

Архитектурная концепция разрабатываемой мультиагентной системы базируется на принципе модульности. Функциональная организация системы предполагает специализацию агентов по конкретным направлениям пентестинга. Центральным элементом выступает Управляющий агент, реализующий функции координации компонентов, консолидации информационных потоков, администрирования жизненного цикла и оптимизации распределения задач внутри мультиагентного комплекса. функционирует как интеллектуальный медиатор, обеспечивающий интеграцию агентских модулей с внешними интерфейсами и централизованное управление информационными потоками. Функциональность агента включает системы сетевого мониторинга, менеджмент криптографических ключей и администрирование централизованного хранилища данных, аккумулирующего результаты тестирования и метаданные о проведенных атаках. Фундаментальным аспектом архитектуры выступает надежная система сетевых коммуникаций, реализованная на базе высокопроизводительной библиотеки *ZeroMQ* с интеграцией криптографического модуля *CurveZMQ*. Выбор технологического стека обусловлен требованиями к безопасности информационного обмена, минимизации латентности и обеспечению устойчивости к деструктивным воздействиям. Реализация криптографической защиты на уровне сетевых сокетов гарантирует конфиденциальность и целостность передаваемых данных.

2. Разработка основных компонентов модульной мультиагентной системы тестирования защищенности информационных систем

Архитектура разрабатываемой мультиагентной системы строится на принципе микросервисной организации: каждый агент реализован как автономный микро-сервис, функционирующий в изолированной среде (*Docker*-контейнера). Подобная структура обеспечивает эффективное масштабирование системы и возможность независимой модернизации компонентов.

Ключевым элементом архитектуры разрабатываемой мультиагентной системы выступает интеграция интеллектуального модуля *DeepSeek Code v2*, предназначенного для автоматизированной генерации, исследования и оптимизации эксплойтов. Данный компонент, базирующийся на современных языковых моделях, обеспечивает тесное взаимодействие с Управляющим Агентом, позволяя системе динамически адаптировать стратегии атак в соответствии с изменениями целевой инфраструктуры и поступлением новых данных. Механизм обработки информации в режиме реального времени обеспечивает формирование оптимальных стратегических решений, существенно повышая точность и оперативность реагирования мультиагентной системы. Данная функциональность позволяет осуществлять мгновенную адаптацию тактики тестирования в ответ на модификации сетевой инфраструктуры, максимизируя эффективность пентестинга. Автоматизированная настройка параметров функционирования оптимизирует использование вычислительных ресурсов и повышает результативность тестирования. Динамическая природа системы обеспечивает прецизионное реагирование на трансформации целевой среды, гарантируя высокую адаптивность процессов тестирования. Структурная организация разрабатываемой мультиагентной системы базируется на современных принципах *DevSecOps*, интегрируя технологии контейнеризации, оркестрации и методологии *CI/CD*. Стандартизация процессов развертывания и администрирования реализована посредством *Docker* и *Docker Compose*, автоматизация сборки осуществляется через конфигурационные файлы и *Makefile*. Межкомпонентное взаимодействие организовано через систему разделяемых директорий с многоуровневым контролем доступа и централизованным управлением ключами, обеспечивая максимальную защищенность и эффективность администрирования. Автоматизированная генерация криптографических ключей интегрирована в процесс развертывания, гарантируя безопасность информационного обмена и строгую авторизацию доступа к агентским модулям. Архитектура модульной мультиагентной системы реализует принципы масштабируемости и адаптивности к эволюционирующим требованиям информационной безопасности. Система поддерживает интеграцию дополнительных агентов, имплементацию инновационных методологий анализа и эксплуатации, внедрение передовых решений машинного обучения и искусственного интеллекта. Данные возможности обеспечивают автоматическую генерацию сценариев атак и динамическую адаптацию к изменениям условий тестирования.

2.1. Типизация сценария действия агентов на основе руководства по классификации и описанию кибератак и вторжений (*MITRE ATT&CK*)

Создание сценариев тестирования на проникновение в условиях, приближенных к реальным, создает необходимость системного подхода к описанию действий каждого из агентов. В основе анализа лежит концепция типизации агентов [11], при которой каждый агент формализуется как исполнитель конкретных техник из базы знаний *MITRE ATT&CK*. Предложенная модель опирается на трехуровневое представление мультиагентной системы в виде ориентированного графа G (A, T, I), где:

A — множество агентов (Агент_сканер_портов, Агент, сканирующий уязвимости и др.),

T — множество техник и тактик (например, T1046, T1210 и др.),

I — множество инструментов, обеспечивающих реализацию (например, *nmap*, *Metasploit, Kerberoast*).

Использование данной модели дает возможность формализовать логику поведения агентов для обеспечения сопоставимости с индустриальными стандартами и задать методологическую основу, которая затем будет использоваться для осуществления масштабирования, проектирования и верификации действий агентов в рамках атакующих сценариев. Типизация представляет собой процесс взаимосвязи действий агентов к строго определенным техникам и тактикам, которые описаны в рамках матрицы *MITRE ATT&CK*. Данный подход позволяет обеспечить не только формальное поведение агентов, но и связать каждый шаг атаки с конкретной стадией жизненного цикла злоумышленника, начиная от разведки и заканчивая техниками повышения привилегий при закреплении в системе, а также этапами постэксплуатации. Данный шаг позволяет повысить эффективность действий агентов, упростить контроль и адаптацию к различным условиям сетевой инфраструктуры.

В архитектуре мультиагентной системы каждый агент обладает закрепленным за ним набором техник и тактик, которые в свою очередь соотносятся с их функциональным профилем.

Для примера: агент, отвечающий за сканирование портов, действует согласно техникам T1046 (Network

Таблица 1.

Матрица инцидентности W_{AT} — соответствие агентов реализуемым техникам руководства по классификации и описанию кибератак и вторжений (*MITRE ATT&CK*)

Агент	T1046	T1018	T1203	T1068	T1059	T1210	T1003	T1558
Агент сканирования портов	1	1	0	0	0	0	0	0
Агент анализа уязвимостей	0	0	1	1	0	0	0	0
Агент эксплуатации	0	0	0	0	1	1	0	0
Агент атак на Active Directory	0	0	0	0	0	0	1	1

Service Discovery) и T1018 (Remote System Discovery), суть которых заключается в действиях по сбору информации об открытых портах, удаленных хостах, определении типа операционных систем.

Агент, осуществляющий анализ уязвимостей, использует технику T1203 (*Exploitation for Client Execution*) в совокупности с T1068 *(Exploitation for Privilege Escalation),* которые ориентируются на данные, полученные в ходе разведки, что позволяет эффективно выявлять уязвимые сервисы, уязвимости которых подвержены эксплуатации.

Агент, отвечающий за эксплуатацию уязвимостей, действует на основе техник *T1059 (Command and Scripting Interpreter)* и *T1210 (Exploitation of Remote Services)*. В его задачи входит реализация активных фаз атаки, а именно: выполнение кода на целевой системе, эксплуатация эксплоитов на основе обнаруженных уязвимостей, а также инициирование взаимодействия с удаленными сервисами. Типизация в данном случае позволяет задать ограничения по допустимым действиям, исключив нежелательное или случайное отклонение от обозначенных сценариев.

Агент, который реализует атаки на Active Directory, осуществляет свои действия в рамках техник *T1003 (Credential Dumping)* и *T1558 (Steal or Forge Kerberos Tickets),* что дает возможность моделировать реальные угрозы, которые связаны с компрометацией AD-инфраструктуры. Типизация действий данного агента необходима как для автоматизации, так и для соблюдения ограничений в рамках регулируемой среды. Это создает возможность для гибкого расширения мультиагентной системы, интеграцию с другими инструментами и платформами.

Наличие типизированных моделей существенно упрощает аудит и тестирование агентов, позволяя осуществить формализованное и ожидаемое поведение, задействованное в процессе атаки.

3. Оценка эффективности использования модульной мультиагентной системы по критерию покрытия

Для осуществления оценки эффективности взят один из ключевых показателей эффективности мультиагентной системы — полнота покрытия техник, которая соответствует реальной атакующей активности, осуществляемой командой тестировщиков на проникновение. В отличие от классических, статических средств анализа использование мультиагентной системы предполагает распределение ролей между автономными агентами, каждый из которых реализует определенный сценарий, аналогичный действиям специалистов наступательной безопасности. В подобных условиях имеется возможность достаточно полно оценить масштаб охвата техник и тактик, задействованных системой, и соотнести его с допустимым уровнем, который соответствует ручной работе опытной команды пентестеров.

Для оценки полноты покрытия функционала пентест-команды вводим коэффициент покрытия σ, который определяет соотношение количества реализуемых агентами техник с числом техник, которые могут быть реализованы в реальной инфраструктуре командой из восьми специалистов наступательной безопасности:

$$\sigma = \frac{|T_{realized}|}{|T_{expected}|},$$

где: T(realized) — количество техник, покрытых агентами системы, T(expected) — ориентировочный минимум техник, реализуемый командой из восьми специалистов в реальной инфраструктуре.

Следующая формула позволяет оценить относительную эффективность автоматизации:

$$E = \frac{K_a \cdot T_r}{T_x}$$

где: K_a — число одновременно работающих агентов, T_r — среднее время выполнения задачи вручную (в минутах), T_x — среднее время выполнения задачи агентом.

Пример:

если $K_a = 6$; $T_r = 45$ мин; $T_x = 5$ мин, то E = 54.

Формула учитывает количество одновременно работающих агентов, средний показатель времени продолжительности выполнения задачи при ручном тестировании, а также среднее время выполнения задачи в автоматическом режиме. Таким образом, введенная в рамках данного исследования метрика эффективности — E демонстрирует совокупность эффектов от масштабируемости и скорости реакции агентов мультиагентной системы, которые действуют в рамках координируемого сценария.

Пример расчета демонстрирует, что при наличии шести действующих агентов общая эффективность достигает более чем 50-кратного значения. Иными словами, это означает, что мультиагентная система обеспечивает более чем пятикратное ускорение на каждого агента, что в совокупности подтверждает значительное преимущество разработанного подхода.

3.1 Оценка эффективности использования модульной мультиагентной системы по временному покрытию

В рамках данного исследования при оценке эффективности мультиагентной системы важным значением является временно́й аспект функционирования агентов. В условиях реального тестирования на проникновение атаки выполняются в ограниченном промежутке времени, в течение которого должны пройти основные этапы сценария, включая разведку, где осуществляется сбор информации о целевой системе, эксплуатация уязвимостей, получение привилегированного доступа и закрепление в инфраструктуре. По этой причине важна не только полнота покрытия техник, но и способность системы работать синхронно и без задержек, что является критически важной характеристикой.

Для осуществления формализованной оценки поведения системы в зависимости от охвата техник и времени выполнения сценария целесообразно введение функции плотности вероятности успешной атаки, которая отражала бы устойчивость системы к усложнению инфраструктуры и ограниченности времени.

Данный график построен для разных значений параметра t, который отражает сложность инфраструктуры (и соответственно — продолжительность тестирования). Чем выше значение t, тем плавнее рост ее функции и ниже ее максимум, что демонстрирует влияние усложнения инфраструктуры на снижение эффективности при фиксированном покрытии. Функция также демонстрирует типичное затухание, а именно при малых значениях σ вероятность мала, затем наблюдается пик эффективности, а после него — экспоненциальное снижение.

Иными словами, применима формула, основанная на плотности охвата графа техник:

$$P(\sigma, t) = \frac{\sigma^2}{t^2} \cdot e^{-\sigma/(2t^2)},$$

где σ отражает коэффициент покрытия техник, которые реализованы агентами, а t — временно́й показатель, от-

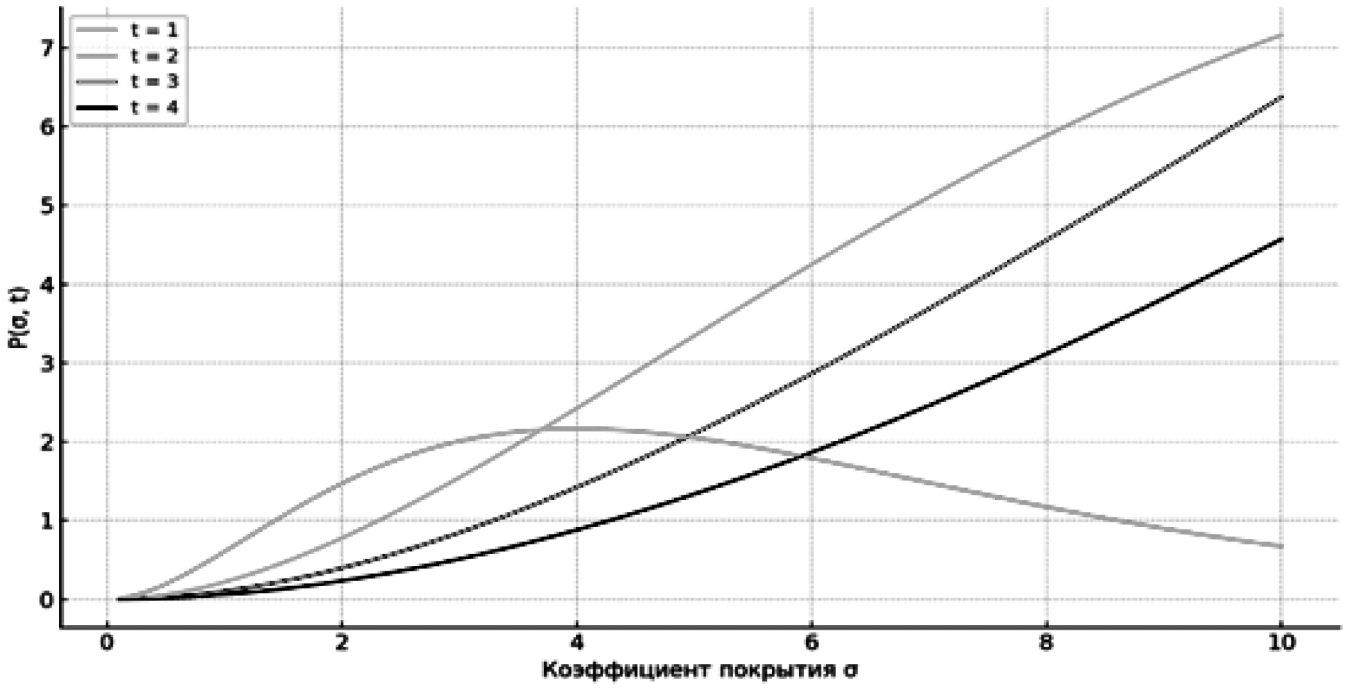


Рис. 1. График функции вероятности успешной атаки

ражающий затраченное системой время на осуществление проводимого тестирования.

Показатель t отражает условную оценку времени, которое необходимо для реализации сценария тестирования, пропорционален сложности атакуемой инфраструктуры и включает в себя совокупность факторов, а именно: объем используемых сервисов, количество целевых узлов, глубину сети, наличие защитных механизмов и иных ограничений, которые влияют на продолжительность выполнения атаки.

$P(\sigma,t)$ — функция плотности вероятности успешной атаки, моделирующая эффективность системы в условиях заданного покрытия техник и сложности атакуемой инфраструктуры. Чем выше значение этой функции, тем больше вероятность, что агенты смогут успешно атаковать целевую систему. **e** — основание натурального логарифма, используемое для экспоненциального затухания функции при увеличении сложности инфраструктуры.

$\frac{\sigma^2}{2t^2}$ — экспоненциальный член, который моделирует резкое снижение вероятности успешной атаки при недостаточном покрытии техник (малое значение σ) или при высокой сложности инфраструктуры (большое значение t). На практике значение t может быть установлено экспертно, на основании числа целевых хостов, глубины сети, наличия механизмов защиты и среднего времени, которое затрачивается на компрометацию аналогичных сред. Эта функция моделирует устойчивость системы по аналогии с вероятностной плотностью распределения Гаусса: при недостижении критического σ система не обеспечивает достаточной устойчивости.

Таким образом, типизация агентов и соответствие их функций техникам *MITRE ATT&CK* позволяют провести комплексную оценку эффективности разрабатываемой мультиагентной системы. За счет параллельности, модульности и интеграции с генеративным интеллектом *DeepSeek Code v2* платформа демонстрирует показатели, сравнимые и в ряде сценариев превосходящие работу группы специалистов. Система формализует знания, адаптируется к инфраструктуре и по метрике σ покрывает до 88–94 % ключевых техник атак на типовые корпоративные сети.

Таким образом, разработанная мультиагентная система может не только эффективно воспроизводить действия команды из более чем восьми пентестеров, но и формировать базу знаний для дальнейшего обучения и масштабируемой адаптации, что делает ее полноценной интеллектуальной *offensive*-платформой.

Заключение

Исследование фокусируется на разработке инновационной мультиагентной платформы, обеспечивающей динамическую адаптацию к изменениям операционной среды и автономное выполнение задач посредством интеграции с DeepSeek Code v2 для интеллектуальной генерации эксплойтов. Также возможно интеграция и с иными интеллектуальными модулями, либо создания собственного, основанного на принципах глубокого машинного обучения. Концептуальная архитектура разработанной в рамках данного исследования мультиагентной системы существенно превосходит традиционные подходы к автоматизации тестирования на проникновение, реализуя принципы мультиагентной организации с распределением функциональных ролей и централизованным интеллектуальным управлением. Функциональная специализация агентов обеспечивает четкую сегментацию задач и зон ответственности компонентов системы. Применение микросервисной архитектуры и контейнерной изоляции гарантирует отказоустойчивость, адаптивность к инфраструктурным изменениям и надежность межагентных коммуникаций. Реализованный подход минимизирует критические точки отказа, повышая устойчивость системы к непрогнозируемым модификациям сетевой среды.

Экспериментальные исследования демонстрируют исключительную производительность системы, обеспечивая 50-кратное увеличение эффективности по сравнению с традиционным подходом к пентесту. Количественные показатели подтверждают: при задействовании шести агентских модулей длительность выполнения стандартных операций сократилась с 45 до 5 минут, формируя уникальные характеристики производительности и адаптивности разработанной мультиагентной системы. Комплексное тестирование в условиях, моделирующих реальные корпоративные инфраструктуры, подтверждает существенные преимущества данной модульной мультиагентной системы. Реализуемая мультиагентная система демонстрирует превосходные показатели автоматизации процессов, интеллектуальной эволюции поведенческих паттернов агентов и адаптивности к трансформациям целевой среды. По ключевым метрикам эффективности — оперативность реагирования, глубина аналитики, динамическая адаптация — разработанная мультиагентная система демонстрирует значительное превосходство над существующими решениями при сохранении открытой архитектуры, обеспечивающей возможности модификации и масштабирования функционала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Michael Wooldridge. An Introduction to MultiAgent Systems. ISBN 978-0471496915.
2. Katia Sycara. Multiagent Systems. DOI: 10.1145/220605551.
3. Shlomo Zilberstein. Decentralized Partially Observable Markov Decision Processes (Dec-POMDPs).
4. Magnus Egerstedt. Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks. ISBN 978-1107070945.
5. Alessio Lomuscio. MCMAS: A Model Checker for the Verification of Multi-Agent Systems.
6. Frank Dignum. Socially Aware Agents. DOI: 10.1007/978-3-319-91848-8_10.
7. Leon van der Torre. Deontic Logic and Normative Multiagent Systems. ISBN 978-3030402921.
8. Jakob Foerster, Shimon Whiteson. Counterfactual Multi-Agent Policy Gradients. arXiv:1705.08926.
9. Mikayel Samvelyan et al. The StarCraft Multi-Agent Challenge. arXiv:1902.04043.
10. Stefano V. Albrecht et al. Deep Reinforcement Learning for Multi-Agent Interaction. arXiv:2208.01769.
11. Сизов В.А., Киров А.Д. Разработка модели актуализации профессиональных компетенций специалиста по кибербезопасности в условиях информационного противоборства. УДК 372.8, 004.056. DOI 10.54835/18102883_2023_34_6. URL: https://old.aeer.ru/files/io/m34/art_6.pdf
12. ГОСТ Р 56875–2016. Информационные технологии (ИТ). Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200132478.
13. Приказ ФСБ России от 11 мая 2023 г. № 213 «Об утверждении порядка осуществления мониторинга защищенности информационных ресурсов». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406876800/.
14. Приказ ФСТЭК России от 14 апреля 2023 г. № 64 «Требования по безопасности информации». URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/trebovaniya-po-bezopasnosti-informatsii-utverzhdeny-prikazom-fstek-rossii-ot-14-aprelya-2023-g-n-64.
15. Приказ ФСБ России от 18 марта 2025 г. № 117 «Об утверждении Требований о защите информации, содержащейся в государственных информационных системах». URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/411649021/.
16. Приказ ФСТЭК РФ от 11 февраля 2013 г. № 17 «Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах». URL: https://normativ.kontur.ru/document?documentId=481221&moduleId=1.
17. ГОСТ Р 53114–2008. Защита информации. Обеспечение информационной безопасности в организации. Основные термины и определения. URL: https://meganorm.ru/Data/484/48411.pdf.
18. ГОСТ Р 59516–2021. Информационные технологии (ИТ). Страхование рисков информационной безопасности. Рекомендации по выбору и применению. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200179668.
19. Приказ ФСТЭК России от 27 октября 2022 г. № 187 «Требования по безопасности информации». URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/trebovaniya-po-bezopasnosti-informatsii-utverzhdeny-prikazom-fstek-rossii-ot-27-oktyabrya-2022-g-n-187.
20. Приказ ФСТЭК России от 30 июля 2018 г. № 131 «Требования по безопасности информации, устанавливающие уровни доверия к средствам технической защиты информации и средствам обеспечения безопасности информационных технологий». URL: https://docs.cntd.ru/document/565278856.
21. Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры РФ». URL: https://fstec.ru/dokumenty/vse-dokumenty/prikazy/prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239.
22. Лихтенштейн В.Е., Конявский В.А., Росс Г.В., Лось В.П. Мультиагентные системы: самоорганизация и развитие. — М.: Финансы и статистика, 2018. — 264 с.
23. Бессмертный И.А. Искусственный интеллект. Введение в многоагентные системы. — М.: Юрайт, 2024. — 148 с.
24. Радченко И.А. Интеллектуальные мультиагентные системы: учебное пособие. — СПб.: БГТУ, 2016.
25. Ивашкин Ю.А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3. — М.: 2024.
26. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. — М.: Эдиториал, 2002.
27. Белов Е.Б., Лось В.П., Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А. Основы информационной безопасности: учебное пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2020.
28. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам: учебное пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2005. — 416 с.
29. Запечников С.В., Милославская Н.Г., Толстой А.И. Информационная безопасность открытых систем. Часть 1: учебник для вузов. — М.: 2019.
30. Граймс Р. Как противостоять хакерским атакам. Уроки экспертов по информационной безопасности. — М.: 2021.
31. Скабцов Н. Kali Linux в действии. Аудит безопасности информационных систем. — М.: 2020.
32. Кукшкина Н.С., Воронкин Е.Ю. Исследование возможности применения мультиагентных систем для организации работы технической поддержки внутри организации. — 2023. URL: https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2023/tom-6/148-152.pdf.
33. Гриценко В.И., Гладун А.Я., Журавлев Ю.Д., Несен М.В. Модель мультиагентной системы для е-бизнеса и технология ее программной реализации. — 2016. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/38331895.pdf.
34. Матвеева А.А., Ким Ю.В., Викснин И.И. Методы обеспечения информационной безопасности коммуникационных каналов в мультиагентных робототехнических системах. — 2022. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-obespecheniya-informatsionnoy-bezopasnosti-kommunikatsionnyh-kanalov-v-multiagentnyh-robototehnicheskih-sistemah.
35. Печеркин С.А. Взаимодействие агентов в мультиагентных системах. — 2021. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimodeystvie-agentov-v-multiagentnyh-sistemah.
36. Лахтер М.Д. Мультиагентные технологии как инструмент перехода к экономике знаний. — 2020. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/multiagentnye-tehnologii-kak-instument-perehoda-k-ekonomike-znaniy.
37. Колесникова Г.И. Искусственный интеллект: проблемы и перспективы. — 2023. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-problemy-i-perspektivy.
38. Капустин Ф.А. Информационная безопасность и защита информации в современном обществе. — 2021. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-bezopasnost-i-zaschita-informatsii-v-sovremennom-obschestve-1.
39. Журнал «Информационная безопасность». Различные статьи по информационной безопасности. — 2025. URL: https://www.itsec.ru/articles.

© Чикаев Руслан Александрович (Chikaev.r@edu.rea.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.46

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

METHODS FOR ASSESSING MEASUREMENT UNCERTAINTY IN TECHNICAL SYSTEMS

P. Sharonov

Summary. Carrying out measurements in technical systems often requires solving complex metrological problems, which entail the need to develop high-tech measuring instruments and lead to large additional material costs. As is well known, the measurement process is characterized by inaccuracies and errors associated with the unavoidable presence of several factors affecting measurement accuracy. The purpose of the article is to consider approaches to estimating measurement uncertainty in real measurement tasks typical of technical systems. The subject of the research is methods and approaches to checking measurement uncertainty in practice. Scientific novelty: substantiation of ways to reduce measurement inaccuracy in technical systems using adaptive machine learning.

Keywords: measurement, accuracy, technical system, training.

Шаронов Павел Александрович
Аспирант, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
stalker-scharonov@mail.ru

Аннотация. Проведение измерений в технических системах зачастую требует решения сложных метрологических задач, которые влекут за собой необходимость разработки наукоемких средств измерения и ведут к большим дополнительным материальным затратам. Как известно, измерительному процессу присущи неточности и погрешности, связанные с неизбежным присутствием ряда факторов, влияющих на точность измерения. Цель статьи — рассмотреть подходы к оценке неопределенности измерений в реальных измерительных задачах, характерных для технических систем. Предмет исследования — методы и подходы к проверке неопределенности измерений на практике. Научная новизна: обоснование направлений уменьшения неточности при измерениях в технических системах за счет использования адаптивного машинного обучения.

Ключевые слова: измерение, точность, техническая система, обучение.

Введение

При разработке, внедрении, эксплуатации и поверке технических систем зачастую возникают неопределенности, обусловленные отсутствием информации о фактических показателях исследуемого процесса и параметрах используемых измерителей. Неопределенность в измерительной информации возникает на всех этапах жизненного цикла технических систем и, таким образом, оказывает решающее влияние на характеристики конечного результата [1]. С развитием Четвертой промышленной революции, стремительным развертыванием и использованием цифровых инновационных технологий, технические системы значительным образом усложняются, соответственно процесс их моделирования становится столь же, если не более, сложным. К традиционным проблемам анализа неопределенности в процессе натурного или имитационного моделирования — исследованию точностных характеристик, необходимости поиска приближенных решений — добавляются новые вызовы, связанные с возникновением неадекватного поведения, обусловленного как алеаторной, так и эпистемической неопределенностью [2]. Понимание этой неопределенности в технических системах требует анализа данных, как обо всей системе в целом, так и ее отдельных подсистемах, и элементах. В особенности данная проблема обостряется, учитывая риски и убытки, которые способна повлечь за собой неопределенность в измерениях (см. табл. 1).

Необходимость минимизации неопределенности измерений в технических системах и важность разработки действенных методов управления ею четко обозначены в различных нормативных документах и руководствах национальных и международных [3], [4], [5], [6].

Осознавая значимость и серьезность рассматриваемой проблемы, ученые и эксперты во многих странах мира стремятся количественно оценить неопределенность измерений, присущую многочисленным данным, которые влияют на работоспособность и надежность технических систем. Эти данные могут иметь форму неопределенности в отношении угроз, операционной среды, для которой была разработана система, или самой системы через технические характеристики, тактическое внедрение и приобретение программ [7]. Очевидным является тот факт, что, если неопределенность не была учтена, такие специалисты, как аналитики требований, разработчики концепций и тестировщики, рискуют начать разработку системы, которая не готова справиться с типичными угрозами или работать в типичной среде.

Таблица 1.

Влияние неточных измерений на технические системы

Отрасль	Пример измерений	Последствия неточности	Реальный эффект / результат
Авиация	Неточная калибровка датчиков давления и высотомеров	Ошибки в определении высоты и скорости	Катастрофы (например, 189 и 157 жертв в инцидентах с Boeing); вывод сотен самолётов из эксплуатации; прямые убытки компаний сотни млрд руб.
Энергетика	Ошибки в измерении параметров вибрации и температуры турбин	Несвоевременное выявление дефектов подшипников и лопаток	Внезапные поломки турбин; незапланированный простой энергоблока стоит до 50–100 млн руб./сутки; ремонт турбины — от 200 млн до 1 млрд руб.
Нефтегазовый сектор	Некорректные данные расходомеров и датчиков давления	Неверное управление подачей сырья и давлением в трубопроводе	Разгерметизация и пожары; штрафы и ликвидация последствий — от сотен млн руб. до десятков млрд руб.; утечка свыше 1000 т нефти
Машиностроение	Неточные геометрические измерения при контроле качества	Неправильная сборка, ускоренный износ механизмов	Выход из строя узлов за 1–2 года вместо расчётных 5–7; гарантийные расходы на серию машин — десятки млн руб.
Ж/д транспорт	Ошибки в измерении параметров колёсных пар и рельсов	Нарушение соосности, повышенный износ и вибрации	Сходы поездов; замена рельсовой решётки на участке 10 км — около 500 млн руб.
Строительство	Неверные результаты геодезических измерений при возведении сооружений	Нарушение проектной геометрии, осадки и перекосы	Устранение дефектов — до 20 % стоимости проекта; снос и повторное строительство — от сотен млн руб. до десятков млрд руб.
Медицина	Некорректная калибровка диагностического оборудования	Ошибки диагностики и неверное назначение лечения	Сбои в работе аппаратов МРТ и КТ — ремонт до 20 млн руб.; судебные иски от пациентов — десятки млн руб.

Таким образом, вопросы, связанные с развитием и уточнением подходов к моделированию, которые позволяют генерировать и оценивать возможные воздействия пространства неопределенности измерений на пространство выходных результатов работы технических систем в формате ансамбля вычислительных экспериментов, являются актуальными, теоретически и практически значимыми, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Материалы и методы

Исследования уровня интервалов неопределенности измерений в зависимости от того, на каком этапе жизненного цикла разработки системы находится технический проект, основываясь на отраслевой практике, отраженной в статье [8].

Недостатки промышленных руководящих принципов, такие как VDA 5 и AIAG-MSA, которые часто используют упрощенные методы для оценки погрешности измерений, уделяя особое внимание сбалансированному соотношению между экономическими затратами и выгодами от оценки погрешности, детально рассматривают в публикациях [9], [10].

Сферы применения, достоинства и недостатки различных подходов к моделированию неопределенности измерений, начиная от простой математической зависимости, такой как закон идеального газа, и заканчивая сложным численным алгоритмом, позволяющим обнаруживать пики в сигнале и определять параметры пиков, описывается в трудах [11].

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, следует отметить, что в рассматриваемом предметном поле существует еще широкий спектр нерешенных и спорных вопросов, которые заслуживают отдельного внимания. Так, в более углубленном исследовании нуждается проблема проверки неопределенности измерений в агрегированных моделях технических систем, которые могут приводить к несоответствиям в данных между интерфейсами моделей отдельных компонентов системы. Дальнейшего обоснования требует модель измерения определенного технического параметра, описывающая взаимосвязь между всеми влияющими факторами и измеряемой величиной.

Цель статьи заключается в рассмотрении подходов к проверке неопределенности измерений в реальных измерительных задачах, характерных для различных технических систем.

Методы исследования включают в себя статистический анализ неопределённости измерений, численное моделирование методом Монте-Карло, аналитический метод чувствительности, машинное обучение и стратегии адаптивного обучения, систематизацию, группировку и обобщение.

Результаты

Оценка неопределённости измерений в технических системах является неотъемлемой частью работы, связанной с их эксплуатацией, обслуживанием и ремонтом, она направлена на определение значения исследуемой величины (измеряемой величины) вместе с количественной оценкой её неопределённости [12].

Согласно международным стандартам и руководствам, определение модели измерения является необходимым условием для оценки неопределенности измерения [13]. Для разработки моделей измерения существуют различные стратегии. В то время как аналитическое моделирование основано на математическом описании зависимостей, например, физической, химической или биологической природы, в процессе измерения и опирается на глубокое знание процесса измерения и всех влияющих факторов, экспериментальное моделирование может быть использовано, если зависимости неизвестны. При экспериментальном подходе модель измерения строится с применением данных измерений и соответствующих значений факторов, влияющих на процесс измерения [14]. Таким образом, определение модели измерения в большинстве своем рассматривается как задача регрессии. В последние годы все большую популярность приобретают экспериментальные подходы к определению моделей измерения.

Стандартная комбинированная неопределенность измерения u_c рассчитывается, если на погрешность измерения влияют несколько компонентов. Степень влияния соответствующих компонентов на комбинированную погрешность измерения может быть выражена с помощью коэффициентов чувствительности.

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 u_{x_1^2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 u_{x_2^2} + \ldots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k}\right)^2 u_{x_k^2}}$$

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}, i = 1 \ldots k\, u_c = \sqrt{c_1^2 u_{x_1^2} + c_2^2 u_{x_2^2} + \ldots + c_k^2 u_{x_k^2}}$$

где c_i коэффициент чувствительности определяемой величины x_i, он выражает степень влияния соответствующего компонента на комбинированную неопределенность измерения. Расширенная погрешность измерения U является произведением стандартной погрешности измерения и коэффициента охвата (k). Коэффициент охвата имеет значения в интервале от $\sqrt{3}$ до 3 [15].

На основе изучения имеющихся публикаций, экспертных отчетов и результатов экспериментов, в табл. 2 автором систематизирована информация об основных методах проверки неопределённости измерений в технических системах, их достоинствах и недостатках, а также сферах применения.

С ростом объема доступных данных и увеличением сложности измерительных систем сегодня особенно ак-

Таблица 2.

Методы проверки неопределённости измерений в технических системах (составлено автором)

Метод	Суть метода	Достоинства	Ограничения	Области применения
Статистический анализ (по ISO/IEC Guide 98–3, GUM)	Обработка серий измерений, оценка дисперсии и доверительных интервалов	Простота реализации, высокая достоверность при больших выборках	Требует значительного объёма данных; плохо применим при единичных измерениях	Калибровка средств измерений, контроль качества
Монте-Карло моделирование	Многократное случайное моделирование процесса измерения	Универсальность, возможность учёта сложных распределений и нелинейностей	Высокие вычислительные затраты, чувствительность к выбору распределений	Метрология, моделирование сложных систем (авиация, энергетика)
Метод чувствительности (аналитический подход)	Расчёт вклада каждого параметра в общую неопределённость	Позволяет выявить «критические» параметры; высокое объяснительное значение	Требует точного знания модели процесса	Техническая диагностика, инженерные расчёты
Байесовский анализ	Учет как априорной информации, так и экспериментальных данных	Возможность обновления оценок при поступлении новых данных	Сложность вычислений; требует математической подготовки	Системы с высокой степенью неопределённости (медицина, военные системы)
Метод границ (наихудший случай)	Оценка неопределённости по максимальным допускам и возможным отклонениям	Простота и надёжность; применяется без статистики	Чрезмерный консерватизм, завышение неопределённости	Проектирование критически важных систем (ядерная энергетика, авиация)
Сравнительные испытания (межлабораторные)	Сопоставление результатов независимых измерений	Высокая практическая значимость, возможность внешней проверки	Затратность, необходимость координации	Сертификация, стандартизация, испытательные лаборатории

тивно стало использоваться машинное обучение (МО) для проверки неопределённости измерений. По мнению автора, данное направление исследований представляет значительный интерес, поэтому рассмотрим его более подробно.

Как правило, фундаментальный подход к использованию нейронных сетей для решения задач анализа неопределённости измерений предполагает в первую очередь создание замещающей модели для эмуляции фактической функции производительности или модели конечных элементов. Затем эта замещающая модель интегрируется с классическими методами анализа надежности, такими как метод надежности первого порядка (FORM), метод надежности второго порядка (SORM) или MCS [16], среди прочих, для проведения анализа отклонений. Обличительной особенностью данного подхода является то, что он следует одноэтапной стратегии выборки. При этом его существенным недостатком в приложениях машинного обучения является неспособность гарантировать вычислительную точность результатов анализа надежности. Для преодоления этой сложности в качестве эффективного решения представляется целесообразным использовать стратегию адаптивного обучения. Эта стратегия улучшает и совершенствует модели МО путем итеративного включения вновь выявленных образцов в качестве дополнительных обучающих данных на протяжении всего процесса анализа надежности до достижения заданного уровня точности.

В рамках адаптивного обучения стандартное нормальное пространство входных выборок подвергается разделению на несколько подпространств. Новые обучающие выборки распознаются с помощью специальных функций обучения, установленных для каждого подпространства на основе функций плотности вероятности необучающих выборок и расстояний между обучающими и необучающими выборками. Кроме того, количество новых обучающих выборок в каждой итерации подвергается адаптивной корректировке в зависимости от точности прогнозирования построенной в данный момент искусственной нейронной сети в каждом подпространстве. Это приводит к появлению адаптивной структуры, характеризующейся разделением входного пространства и регулируемой стратегией многоточечного добавления.

Что касается разделения входного пространства, процесс начинается с генерации N_{Total} общего количества выборок. Затем эти выборки трансформируются в стандартное нормальное пространство посредством преобразования эквивалентной вероятности. После этого они реорганизуются в порядке убывания на основе значений совместных функций плотности вероятности каждой выборки. Реорганизованные выборки и соответствующие совместные функции плотности вероятности обозначим следующим образом:

$$u^{(k)} = \left[u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \ldots, u_n^{(k)}\right]^T \left(k = 1,2,\ldots,N_{total}\right)$$

$$\phi_U\left(u^{(k)}\right) = \prod_{i=1}^{n} \phi\left(u_i^{(k)}\right)\left(k = 1,2,\ldots,N_{total}\right)$$

чем меньше значение индекса k, тем выше значение соответствующей совместной функции плотности вероятности.

Следующий шаг заключается в последовательном разделении выборок на отдельные подпространства, т.е. $\Omega_1, \Omega_2, \ldots, \Omega_{n_{sub}}$, причем количество выборок в каждом подпространстве обозначается соответственно $N_{Total1}, N_{Total2}, \ldots, N_{Totaln_{sub}}$. Сумма количества выборок во всех подпространствах равна общему количеству выборок, т.е. $\sum_{s=1}^{n_{sub}} N_{Totals} = N_{total}$.

После эффективного разбиения входного пространства исходные обучающие данные определяются путем выбора наиболее влиятельных выборок в каждом подпространстве на основе общего количества выборок N_{Total}. Рекомендуем начинать этот процесс с первого подпространства, а затем последовательно определять обучающие выборки в остальных подпространствах. Для определения обучающей выборки формулируется функция обучения.

$$u_{News} = \\ = argmax\left\{ D_{min}^T\left(u^{(k)}\right)\left[\phi_U^T\left(u^{(k)}\right)\right]^{\frac{1}{2s-1}} \middle| k = 1 + \sum_{p=1}^{s-1} N_{Totalp,2} + \sum_{p=1}^{s-1} N_{Totalp,p}, \ldots, \sum_{p=1}^{s} N_{Totalp} \right\}$$

где $D_{min}^T\left(u^{(k)}\right)$ представляет собой нормализованное минимальное евклидово расстояние между текущими обучающими выборками и k-й общей выборкой, а ϕ_U^T означает нормализованные совместные функции плотности вероятности k-й общей выборки.

Обсуждение

Апробация предложенного авторского подхода с проведена на примере системы измерения расхода рабочей жидкости в трубопроводе энергетической установки. В качестве базовой модели использовалась зависимость расхода Q от перепада давления на сужающем устройстве и плотности среды. Реальные измерения параметров (P_i, P_{out}, ρ) выполнялись на стенде гидравлических испытаний с применением датчиков давления класса точности 0,25 и вибрационной плотнометрии. В таблице 3 представлены результаты апробации.

Данные, приведенные в таблице 3, наглядно показывают тот факт, что адаптивная стратегия добавления

Таблица 3.
Результаты апробации адаптивного обучения (составлено автором)

Параметр	Значение / пояснение
Номинальное Q	250 (условные единицы)
Начальная обучающая выборка N_{init}	200
Валидационная выборка N_{val}	5000
Суррогат (тип)	Полиномиальная регрессия 2-го порядка
Начальный RMSE суррогата	2,00
Итераций адаптации	3
Добавлено точек за итерацию	200 (каждая итерация)
RMSE после 1 итерации	0,95
RMSE после 2 итерации	0,62
RMSE после 3 итерации	0,45
Оценка $\sigma(Q)$ по Монте-Карло (эталон, $N=10^5$)	4,75
Оценка $\sigma(Q)$ суррогатом (после адаптации)	4,60
Относительная ошибка σ (суррогат vs МС)	3,2 %
Снижение вычислительных затрат (оценочно)	~10–50× по сравнению с прямым МС при тех же точностях
Вывод по точности	после 3-х итераций суррогат даёт оценку распределения Q с ошибкой <5% по σ и RMSE <0,5

целевых обучающих точек резко снижает ошибку суррогатной модели (RMSE) при относительно небольшом общем числе высококачественных выборок. Это позволяет суррогату корректно аппроксимировать нелинейную модель измерения и адекватно воспроизводить статистику выходной величины (σ, среднее).

Выводы

На фоне усложнения современных технических систем и оснащения их последними достижениями науки и техники, несоизмеримо возрастает роль измерений и метрологии, которые необходимы для обеспечения качества на производстве. Однако каждый результат измерения подвержен неопределенности, что актуализирует задачи использования передовых методов обнаружения этих неопределенностей, их предупреждения и устранения. В статье проанализированы различные подходы к проверке неопределенности измерений на реальных задачах в технических системах. Обозначены достоинства и недостатки каждого метода, сферы их использования.

С целью усовершенствования имеющихся подходов предложено использовать методы МО с алгоритмом адаптивной настройки для повышения надежности результатов. Предложенный подход протестирован на примере системы измерения расхода рабочей жидкости в трубопроводе энергетической установки. Полученные результаты свидетельствуют о том, что адаптивное обучение с итеративным добавлением информативных обучающих точек позволяет существенно повысить качество проверки неопределенности измерений при минимальном числе дорогостоящих вычислительных запусков физической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов А.А. Применимость теории бифуркаций в задаче оценки состояния и анализа надежности технических систем // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2024. Т. 20. № 4 (38). С. 66–72.
2. Калашников П.В. Применение сценарного подхода к анализу и управлению рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях интервальной неопределенности // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13. № 3. С. 224–236.
3. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. — Geneva: ISO, 1995. — 118 p.
4. ISO/IEC Guide 98-1:2024 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement — Part 1: Introduction, 1998. — 13 p.
5. ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. Uncertainty of Measurement — Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. — Geneva: ISO, 2010. — 120 p.
6. ГОСТ Р 34100.1–2017/ ISO/IEC Guide 98-1:2009. Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения. — М.: Стандартинформ, 2018. — 22 с.
7. Sho Maruyama Evaluation of the measurement accuracy and uncertainty of a solid-state detector under diagnostic x-ray beam conditions // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2024. Volume 25, Issue 9. P. 134–149.
8. Борисов В. В., Курилин С. П., Жарков А. П., Соколов А. М. Многомерное прогнозирование состояния неоднородных электромеханических систем для управления рисками нарушения их работоспособности на основе нечетких темпоральных онтологических и когнитивных моделей // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 83–102. DOI: 10.24412/2410–9916-2022-4-83-102
9. Пантелеев А.В., Яковлева А.А. Приближенный синтез H∞ — регуляторов в нелинейных динамических системах на полубесконечном промежутке времени. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2025;25(2):152–164.

10. Новиков В.А., Барменков Е.Ю., Бобрышев Е.Б., Борисова Е.В. Новое FMEA-руководство — универсальная система управления цепочками поставок // Компетентность / Competency (Russia). — 2023. — № 1. DOI: 10.24412/1993-8780-2023-1-46–52.
11. Гоголевский А.С., Романов А.В., Трепкова С.А., Методика оценки производительности аппаратно-программного комплекса информационно-управляющей системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №10.
12. Weiyong Yu., Dongxing Pei., Tiehua Ma. Global output feedback control for large-scale time-delay systems with inherent nonlinearities and measurement uncertainty // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2023. Volume 33, Issue 6. P. 91–96.
13. ГОСТ Р 54500.1–2011/Руководство ИСО/МЭК 98–3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. — М.: Стандартинформ, 2011. — 57 с.
14. Дмитриев В.А. Комбинированный подход к детектированию неисправностей в сложных технических системах на основе модели бонд-графа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25. № 3. С. 536–544.
15. Raqib Hussain A. Optimal location of micro-phasor measurement units in distribution system control, monitoring, and protection using hybrid technique // Optimal Control Applications and Methods. 2023. Volume 44. P. 76–81.
16. Зенин С.А., Кузеванов Д.В., Кудинов О.В., Петров А.М. Исследование и анализ методов выполнения вероятностных расчетов строительных конструкций. Вестник НИЦ «Строительство». 2020;24(1):46–53.

© Шаронов Павел Александрович (stalker-scharonov@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.47

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ДИЗАЙНА ИСКУССТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

GEOMETRIC EXAMPLES OF ARTIFICIAL OBJECT DESIGN

V. Shvetsova
O. Leonova

Summary. Modern approaches to knowledge transfer and skill development among students studying descriptive geometry in higher education are constantly evolving. Thanks to global communication tools and the display of information through the internet, have developed common approaches to teaching the basics of artificial object design, relying on readily available tools such as MS Power Point and visual geometric examples. Students were given a lecture course introducing them to the definition and classification of curves; surfaces and methods of their formation; surface classification; ruled surfaces; surfaces of revolution; points on surfaces; intersection of surfaces with planes. After the lectures, a series of workshops were conducted on the following topics: plane, intersection of surfaces with planes, intersection of lines with surfaces, geometric body with cutouts. The individual learning pace of students, as well as the interactive visual representation of the geometric examples provided, allowed for the resolution of some problems in displaying complex artificial objects by breaking them down into simpler and more understandable geometric shapes. This teaching approach has shown its advantages, as students who quickly grasped the material and were ready to solve practical tasks in artificial object design were immediately identified. Students who fell behind the learning schedule were able to grasp the minimum program material. Students were also shown design tools based on artificial intelligence. Thus, a simple and accessible methodological tool has been proposed to professors teaching descriptive geometry, which has shown good results among students.

Keywords: Power Point (PP), geometric examples, artificial objects, artificial intelligence.

Швецова Виктория Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
vikt.schvetzova2012@yandex.ru
Леонова Ольга Николаевна
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
onl60@mail.ru

Аннотация. Современные подходы к передаче знаний, формированию навыков и умений у студентов, изучающих начертательную геометрию в высшей школе, находятся в постоянном развитии. Благодаря средствам глобальной коммуникации и отображения информации через сеть интернет преподаватели вузов, сформировали общие подходы к преподаванию основ дизайна искусственных объектов, опираясь на общедоступные для учащихся инструменты MS Power Point и наглядные геометрические примеры. Студентам прочитаны курс лекции, знакомящие с определением кривых линий и их классификацией; с поверхностями и способами их образования; с классификацией поверхностей; с линейчатыми поверхностями; с поверхностями вращения; с точками на поверхности; с пересечением поверхности плоскостью. После лекций прошла серия практикумов по темам: плоскость, пересечение поверхности плоскостью, пересечение прямой с поверхностью, геометрическое тело с вырезом. Индивидуальная скорость обучения студентов, а также интерактивная наглядность приводимых геометрических примеров позволили разрешить некоторые проблемы при отображении сложных искусственных объектов за счёт их разложения на ряд более простых и понятных геометрических фигур. Данный подход в преподавании показал свои преимущества, поскольку сразу были выявлены студенты, быстро усвоившие материал и готовые решать практические задачи по дизайну искусственных объектов. Студенты, которые отстали от графика обучения, смогли усвоить учебный материал по минимуму программы. Студентам были продемонстрированы инструменты дизайна на основе искусственного интеллекта. Таким образом, преподавателям кафедр, преподающих начертательную геометрию, предложен простотой и доступный методический инструмент, показавший хороший результат у студентов.

Ключевые слова: Power Point (PP), геометрические примеры, искусственные объекты, искусственный интеллект.

Введение

Начертательная геометрия (НГ), преподаваемая в архитектурном вузе, чрезвычайно важна как дисциплина, закладывающая фундамент для профессии будущего специалиста, который будет определять облик нашей планеты для последующих поколений. НГ затрагивает как область воображения, так и область логических умозаключений, которые сейчас взаимосвязаны с современными информационными технологиями (ИТ), а особенно, с технологиями искусственного интеллекта (ИИ), который в последнее время также стал широко использоваться для решения творческих задач. В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете сформированы общие подходы к преподаванию основ дизайна искусственных

объектов, опираясь на общедоступные для учащихся инструменты MS Power Point и наглядные геометрические примеры.

Студентам, находящимися на дистанционном обучении, в интерактивном режиме прочитаны курсы лекции, знакомящие с определением кривых линий и их классификацией; с поверхностями и способами их образования; с классификацией поверхностей; с линейчатыми поверхностями; с поверхностями вращения; с точками на поверхности; с пересечением поверхности плоскостью.

После лекций прошла в удалённом режиме серия практикумов по темам: плоскость, пересечение поверхности плоскостью, пересечение прямой с поверхностью, геометрическое тело с вырезом. Индивидуальная скорость обучения студентов, а также интерактивная наглядность приводимых геометрических примеров позволила разрешить некоторые проблемы при отображении сложных искусственных объектов за счёт их разложения на ряд более простых и понятных геометрических фигур.

Следует отметить, что в рамках одной специальности неуклонно растёт количество новых вводимых дисциплин за счет сокращения количества часов, отводимых на традиционные дисциплины, в том числе, на НГ, а студенты не получают в полном объёме знания за ограниченное время. Однако, интерактивный режим позволил частично парировать временной дефицит, и подогреть интерес у студентов к нашей дисциплине.

Предмет исследования: совершенствование интерактивного метода преподавания дисциплины НГ у студентов архитектурных вузов.

Объект исследования: свойства РР как инструмента интерактивного обучения студентов архитектурных вузов.

Цель исследования: сформировать инструментарий интерактивного обучения студентов архитектурных вузов на основе РР.

Задача исследования: реализовать инструментарий интерактивного обучения студентов архитектурных вузов на основе РР.

Методы исследования: методы графического отображения объектов; методы логического анализа, MS PP, технология искусственного интелекта.

База исследования кафедры начертательной геометрии и графики Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета и Омского государственного технического университета.

Результаты

В процессе научного исследования сформированы результаты в виде инструментария интерактивного обучения студентов архитектурных вузов на основе РР, которые представлены в виде лекционных разделов.

Раздел 1. Кривые линии. Классификация.

Раздел 2. Поверхности. Способы образования поверхностей.

Раздел 3. Классификация поверхностей.

Раздел 4. Линейчатые поверхности.

Раздел 5. Поверхности вращения.

Раздел 6. Точка на поверхности.

Раздел 7. Пересечение поверхности плоскостью.

В Разделе 1 отображаются в цвете плоские цветные линии, чтобы обучить студентов находить их на искусственных объектах (Рис. 1). Показано, как кривые могут быть представлены аналитическим или графическим способом [1].

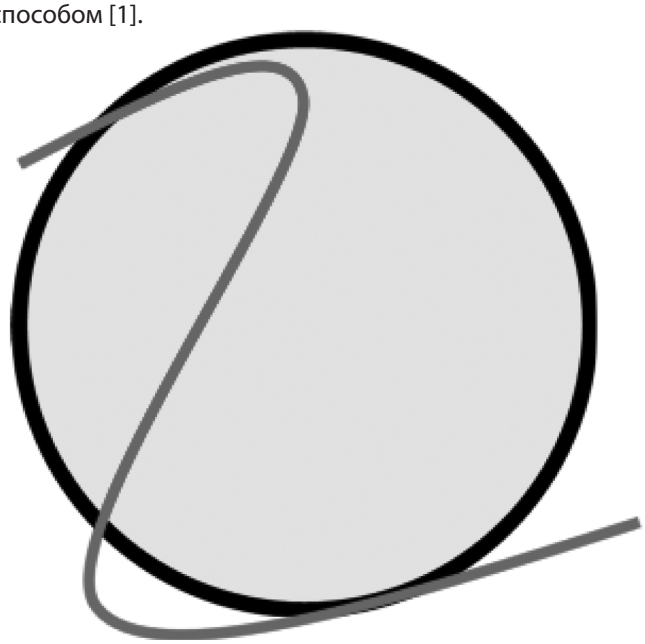


Рис. 1. Примеры плоских кривых линий

Каждому разделу (Таблица 1) определяются его подразделы, которые реализуются в виде отдельных проектов. Далее, с постепенным усложнением материала, приводятся трансцендентные и пространственные кривые, что закладывает основу для изучения поверхностей [2]. С первого по четвёртый раздел студенты знакомятся с геометрическими фигурами, которые они будут вскоре находить в составе искусственных объектов.

Таблица 1.

Раздел 1. Кривые линии. Классификация

Подразделы	Наименование проектов
1.1. Определение кривых линий	1.1. Definition of Curves
1.2. Аналитическое или графическое определение кривых	1.2. Analytical or Graphical Definition of Curves
1.3. Алгебраические и трансцендентные кривые	1.3. Algebraic and Transcendental Curves
1.4. Цилиндрические и конические винтовые линии	1.4. Cylindrical and Conical Helical Lines

После знакомства с поверхностями, заданными кинематически, — линейчатыми и цилиндрическими поверхностями, слушатели стали их находить в искусственных объектах. Под *искусственными объектами* понимаются объекты неприродного происхождения, созданные при участии человека [3] (Рис. 2–5).

В зависимости от предпочтений дизайнера и потребностями заказчика для нового искусственного объекта выбираются цилиндрические, конические поверхности или формы параллелепипеда, как наиболее распространенные в реализации [4]. Реже на практике используются поверхности вращения в виде шара или тора (Рис. 4).

Многогранные асимметричные поверхности (Рис. 5) становятся более популярные, чем классические симметричные формы, что является отпечатком эпохи, как бы освобождающей человека от классических форм, таких как колонны или столбы, купола или шпили и т.д.

Благодаря мощному программному аппарату автоматического проектирования и новым материалам для строительства студенты могут создавать новые геометрические формы для искусственных объектов, в том числе, комбинации из известных форм или их сечение другими фигурами. В любом случае, такая форма должна быть узнаваемой в регионе строительства с точки зрения её реализации и последующей эксплуатации [5].

Примеры значимых в историческом и социальном плане искусственных объектов помогут студентам развивать творческие способности по обнаружению в таких объектах простых геометрических фигур. Студенты смогут видеть и находить эстетически прекрасные композиции, совмещая их с функциональностью и экономической целесообразностью возведения искусственных объектов. Имея набор простых геометрических фигур, будущие специалисты учатся создавать из них полезные для различных категорий населения проекты объектов, которые гармонично вписываются в окружающую среду, благотворно влияют на восприятие, оказывают положительное визуальное воздействие на людей и послужат обществу многие годы [6].

Особенности культуры территориального этноса накладывает некоторые требования на геометрические формы и узоры, применяемые в дизайне искусственных объектов. Известно, что методами геометрии можно создавать визуальные эффекты, которых на практике нет, к примеру, увеличение внутреннего пространства помещения или добавления глубины какого-либо элемента.

Повышая уровень индивидуального мастерства по дизайну искусственных объектов, будущие специалисты успешно работают в творческих коллективах, взаимодействуя при этом с искусственным интеллектом. Так, к примеру, делая запрос у ChatGPT&Midjourney/AI bot на создание дизайна отеля, который будет иметь средневековую архитектуру, но с панорамными окнами, мы получили несколько рисунков таких зданий, с которыми можно работать дальше, уточняя требования заказчиков, и учитывая бюджет проекта (Рис.6). Таких отелей ре-

Рис. 2. Пример использования цилиндрических поверхностей в искусственном объекте

Рис. 3. Примеры использования цилиндрических поверхностей в искусственном объекте исторической значимости и в современных объектах

Рис. 4. Примеры использования поверхностей вращения в искусственном современном объекте

Рис. 5. Примеры использования многогранных асимметричных поверхностей в искусственном современном объекте

ально не существует, но мы получили вполне реалистичные изображения зданий, как бы они где-то существуют.

Привлекая искусственный интеллект, студенты могут сосредоточиться на поиске оптимальных с точки зрения заказчиков геометрических форм, которые полнее всего подходить к рельефу местности, культурному коду населения и учитывать потребности будущих пользователей.

Расширяя кругозор студентов, мы получаем при выпуске из вузов квалифицированных специалистов, которые способны творчески и необычно приступать к решению поставленных перед ними дизайнерских задач.

Рис. 6. Примеры генерации искусственным интеллектом дизайна отелей в средневековом стиле с панорамными окнами

На Рис.7 приведены примеры генерации искусственным интеллектом дизайна торговых центров, которых нет в реальности, с цилиндрическими и коническими поверхностями вращения, которые были изучены студентами на лекции и в форме практических занятий.

Выводы

Таким образом, нами сформулирован педагогический подход при преподавании студентам дисциплины НГ на основе простых геометрических форм с выходом на дизайн искусственных объектов по индивидуальным запросам с привлечением технологии искусственного интеллекта ChatGPT & Midjourney /AI bot. Важно при этом, развивать творческие способности будущих специалистов при поиске ими нестандартных и необычных решений.

Рис. 7. Примеры генерации искусственным интеллектом дизайна торговых центров с цилиндрическими и коническими поверхностями вращения

ЛИТЕРАТУРА

1. Букушева А.В. Системы компьютерной математики в учебных проектах по геометрии. [Текст] / А.В. Букушева // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия «Информационные компьютерные технологии в образовании». — 2016. — Т. 1. — № 12. — С. 20–28. — Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-kompyuternoy-matematiki-v-uchebnyh-proektah-po-geometrii (дата обращения: 16.02.2024).
2. Воронина М.В. «Перевёрнутый» курс инженерной геометрии и компьютерной графики [Текст] / М.В. Воронина, О.Н. Мороз // Геометрия и графика. — 2017. — Т. 5. — № 4. — С. 52–67.
3. Иванов В.Н. Основы разработки и визуализации объектов аналитических поверхностей и перспективы их использования в архитектуре и строительстве [Текст] / В.Н. Иванов, С.Н. Кривошапко, В.А. Романова // Геометрия и графика. — 2017. — Т. 1. — № 4. — С. 3–14.
4. Игнатьев С.А. Дополненная реальность в начертательной геометрии [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 41–50.
5. Игнатьев С.А. Опыт разработки электронных средств обучения для преподавания геометро-графических дисциплин [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, А.И. Фоломкин, О.Н. Мороз // Геометрия и графика. — 2017. — Т. 5. — № 2. — С. 84–92.
6. Игнатьев С.А. Технологии дополненной реальности в проектной деятельности студентов [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 51–57.

© Швецова Виктория Викторовна (vikt.schvetzova2012@yandex.ru); Леонова Ольга Николаевна (onl60@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.48

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИЙ «2D → 3D» И «3D → 2D» В ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF POSSIBILITIES AND CONDITIONS OF APPLICATION OF CONCEPTS «2D → 3D» AND «3D → 2D» IN DESIGN ACTIVITIES

V. Shvetsova
O. Leonova

Summary. The article contains issues related to design procedures and presentation formats of the results at the design (architectural and construction) solutions. The requirements of modern regulatory and technical documents regarding the composition and presentation at the design documentation are considered.
The analysis at the genesis of automation for design procedures was carried out and characteristics of the levels states in digital (information) technologies at the modern architectural and construction activities are presented. The impact of the quality for design information platforms on the efficiency of design development is shown.
Characteristic features for the use in the concepts of «2D→3D» and «3D→2D» design as the main formats of representations the design solutions have been identified.

Keywords: architectural and construction facilities, design activities, information technologies, design documentation, formats presentation the results, methods and techniques, regulatory and technical documents, genesis of automation design procedures, state levels.

Швецова Виктория Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
vikt.schvetzova2012@yandex.ru
Леонова Ольга Николаевна
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
onl60@mail.ru

Аннотация. В статье приведены вопросы, связанные с процедурами проектирования и форматами представлений результатов проектных (архитектурно-строительных) решений. Рассмотрены требования современных нормативно-технических документов в отношении состава и представления проектной документации. Проведен анализ особенностей генезиса автоматизации проектных процедур и приведена характеристика уровней состояний цифровых (информационных) технологий в современной архитектурно-строительной деятельности. Показано влияние качества информационных платформ проектирования на эффективность разработки проектных решений.
Выявлены характерные особенности применения концепций «2D→3D» и «3D→2D» проектирования, как основных форматов представлений проектных решений.

Ключевые слова: архитектурно-строительные объекты, проектная деятельность, информационные технологии, проектная документация, форматы представления результатов, методы и приёмы, нормативно-технические документы, генезис автоматизации процедур проектирования, уровни состояний.

Введение

Поступательное движение от творческого замысла к началу формирования реальных свойств архитектурного образа принято характеризовать, как этапы проектной деятельности или процесса проектирования объекта капитального строительства (строительной продукции). Разработка проектных решений является важнейшим этапом подготовки к реализации задуманного архитектурного образа [1,2].

Процедура архитектурно-строительного проектирования подразумевает одновременное присутствие творческой фантазии, знаний действующей нормативно-технической базы и эффективного инструмента, без которых невозможны рациональные, в значительной мере, компромиссные решения прикладных проектных задач и/или проблемных ситуаций [3]:

— под «хорошим» качеством проекта можно предположить результат принятия (формальной фиксации) логичных мыслей и решений;
— под «плохим» качеством проекта можно предположить результат принятия неудачных или крайне ограниченных мыслей и решений;
— под «замечательным» качеством проекта можно предположить результат многомерного и итерационного анализа разнообразных факторов влияния, учета их взаимодействия и отображения в виде принятия комплекса гармоничных, целостных, эффективных мыслей и решений.

Качество проектирования свойств и состояний является важнейшим этапом формирования качества архитектурно-строительных объектов и связано, прежде всего, с созданием и представлением в некоторой установленной форме особенностей свойств и состояний еще не состоявшегося материального объекта.

В соответствии с положениями нормативно-правового документа [5]:

«Архитектурно-строительное проектирование осуществляется путем подготовки проектной документации, рабочей документации (в том числе путем внесения в них изменений в соответствии с настоящим Кодексом) применительно к объектам капитального строительства и их частям…».

Проектная документация представляет собой установленную совокупность текстовых и графических данных (информации, документов), характеризующих архитектурно-строительные, функционально-технологические, конструктивные, организационные и инженерно-технические решения в отношении формирования свойств и состояний объекта проектирования.

На рисунке 1 представлена обобщенная структура (схема) проектной документации, которая разрабатывается в рамках архитектурно-строительной деятельности, по формированию свойств и состояний объекта капитального строительства определенного функционально-технологического назначения.

Рис. 1. Схема (структура) проектной документации

Количественный и качественный состав, а также сложность, стоимость и трудоёмкость разработки проектной документации в отношении конкретного архитектурно-строительного объекта зависят от следующих основных факторов:

— ответственности и уникальности архитектурно-строительного объекта;
— доступных методов и способов разработки проектных решений и составления разделов проектной документации;
— квалификации специалистов, привлекаемых к разработке проектной документации.

Одной из наиболее заметных особенностей современного подхода к разработке проектных решений (разделов проектной документации) является создание и применение цифровых (виртуальных) моделей архитектурно-строительных объектов, в которых предусматривается разработка, анализ и отображение определенного количества информационных данных [6,7].

Современные технологии цифрового (информационного) моделирования находятся в состоянии поступательного развития, а также являются одной из наиболее обсуждаемых тем и направлений в отечественной и зарубежной архитектурно-строительной деятельности.

Основная цель

Современную концепцию технологии информационного моделирования можно охарактеризовать, как логическое продолжение или генезис «традиционных» (канонических) приемов разработки проектных решений (проектной документации) прошедших исторических эпох, направленных на отображение особенностей свойств и состояний архитектурно-строительных объектов посредством графических и символьных отождествлений [8,9].

Традиционные методы архитектурно-строительного проектирования «докомпьютерных» периодов остаются востребованными в качестве фундаментальной платформы и практической базы знаний для анализа и разработки прогрессивных и инновационных цифровых (информационных) технологий.

Результаты генезиса и совершенствования многочисленных приемов и методов традиционного проектирования, в конечном итоге, адаптированы к современным форматам и технико-технологическим возможностям информационных технологий проектной, архитектурно-строительной деятельности.

На рисунке 2 представлена диаграмма уровней состояний и генезиса цифровых (информационных) технологий архитектурно-строительного проектирования по основным структурным составляющим: сложности технологии (отображаемой посредством «D»-измерений), форматом обмена данными и особенностями организации совместной работы.

Пояснения к Рисунку 2: «D» – измерение формата проектного решения; «2D» – проектное решение, отображаемое в двумерном формате (на плоскости, на проекции: вертикальной или горизонтальной); «3D» – проектное решение, отображаемое в трёхмерном формате (объёмное или пространственное изображение); «n» – число возможных измерений формата проектного решения; «m» – число возможных (конкурентных) вариантов проектного решения, отображаемых посредством «2D», «3D» или «nD» форматов. «CAD, CAM, CAE, BIM» – цифровые (информационные) технологии проектирования, ориентированные на обработку и взаимодействие форматов проектных решений с различным уровнем отображения («2D», «3D», «nD»).

Уровень 1 (см. Рисунок 2) отображает особенности свойств и состояний форматов представления проектных решений с использованием технологии CAD-проектирования, преимущественно в «2D»-формате.

Обмен информационными данными, которые составляют количественный и качественный состав проектных решений, осуществляется, главным образом, на уровне геометрических символьных представлений в «2D»-форматах и текстовых данных. Возможности дополнения или расширения основного «2D»-формата проектных решений «3D»-представлением (концепция «2D → 3D») являются ограниченными.

Основной особенностью рассматриваемого уровня является возможность автоматизации разработки графической части для повышения технологичности и производительности разработки архитектурно-строительных решений.

Уровень 2 (см. Рисунок 2) отображает особенности свойств и состояний форматов представления проектных решений с использованием более широкого (по сравнению с состоянием Уровня 1) диапазона информационных технологий (CAD,CAM,CAE-проектирования, BIM-моделирования), ориентированных, преимущественно, на «3D»-формат отображения проектных решений и/или его дополнения элементами «2D»-представлений (концепция «3D → 2D»). Информационные технологии моделирования рассматриваемого уровня являются комбинацией возможностей «3D»-представлений CAD/BIM-моделей (для пространственного отображения и информационного сопровождения особенностей архитектурно-строительного объекта) и «2D» CAD/BIM-представлений (формализация и нормализация принятых решений в виде проектной и рабочей доку-

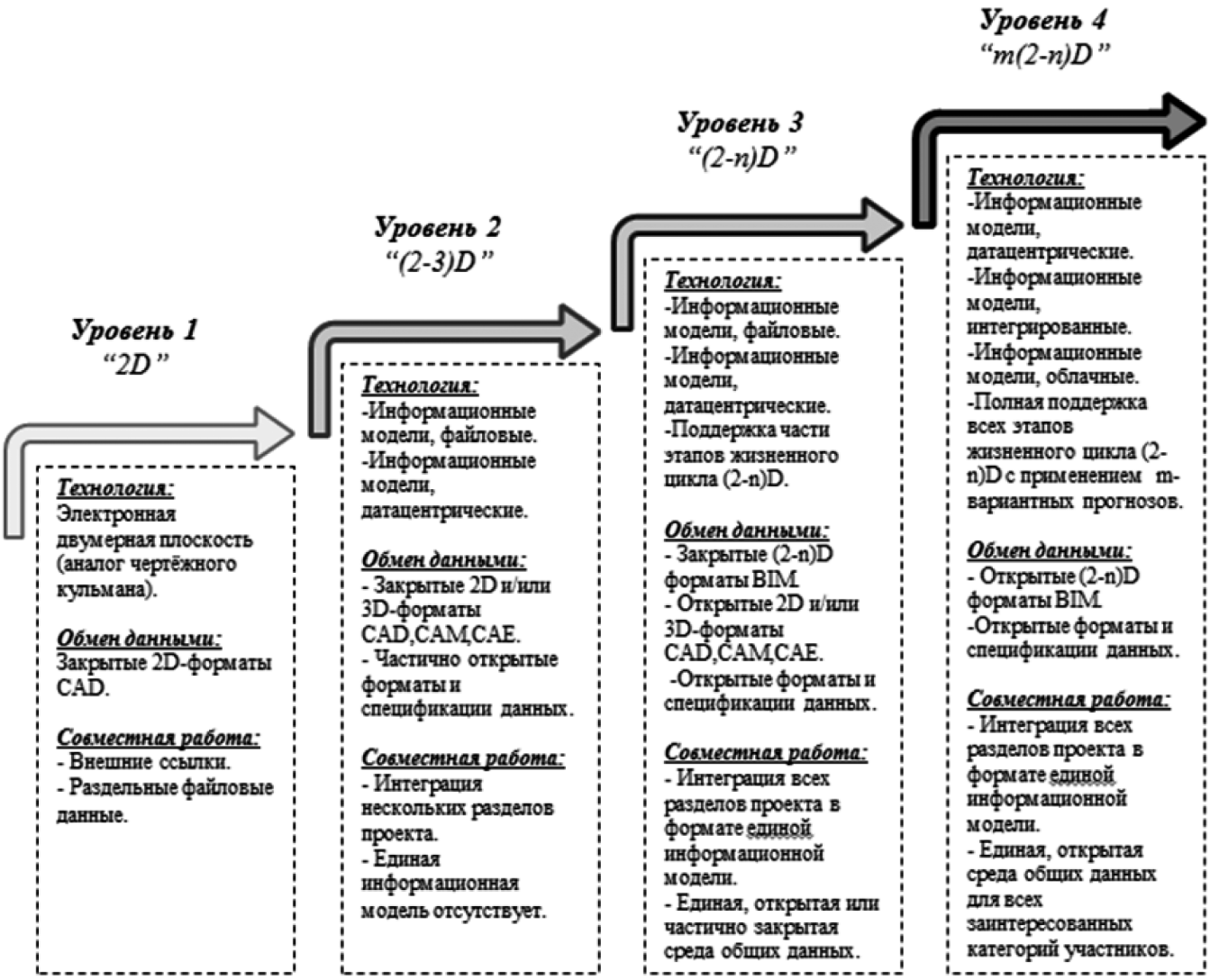


Рис. 2. Схема развития и возможных уровней состояния цифровых (информационных) технологий

ментации) — с применением централизованных форматов (моделей) хранения, анализа и управления информационными потоками проектных данных.

Основной особенностью рассматриваемого уровня является возможность практически полной автоматизации архитектурно-проектной деятельности, включая возможность создания и развития первоначальной BIM-модели. Рассматриваемый уровень характерен для абсолютного большинства организаций, занятых в современной архитектурно-строительной деятельности.

Уровень 3 (см. Рисунок 2) отображает особенности свойств и состояний форматов представления проектных решений с использованием информационных технологий, реализующих возможности многомерного или «(2-n) D»-представлений BIM-моделей или аналогичных концепций. В данных концепциях именно пространственное отображение является не исчерпывающим и определяющим, а одним из ряда многочисленных аспектов проектного решения. Рассматриваемый «(2-n) D»-формат представлений проектного решения является основой для многофакторного, многокритериального отображения и информационного сопровождения особенностей архитектурно-строительного объекта. Для данного формата концепции «3D → 2D» и «2D → 3D» являются равнозначными.

Основной особенностью рассматриваемого уровня является возможность и даже потребность расширения форматов «D»-измерений за счет учета особенностей формирования и актуализации свойств и состояний архитектурно-строительного объекта для периодов жизненного цикла, например, включением в анализ формата «4D» (время строительства) и/или «5D» (стоимость материально-технических ресурсов). Дополнительные, по отношению к первоначальным форматам «2D» и «3D» измерений, характеристики, способствуют получению более точной и разносторонней оценки базовых проектных решений.

Уровень 4 (см. Рисунок 2) отображает особенности свойств и состояний форматов проектных решений с использованием разнообразных, перспективных, инновационных платформ и сервисов, например, посредством глобального информационного пространства, обеспеченного поддержкой элементами искусственного интеллекта или нейросетей [10,11].

Организация проектного процесса реализуется в виде оптимизированной системы взаимодействия всех категорий участников инвестиционно-строительной деятельности (не только специалистов архитектурно-строительного направления). Среда общих данных предусматривает исключительное использование данных, включенных в состав единой и целостной BIM-модели или аналогичной концепции.

Основной особенностью рассматриваемого уровня является возможность использования формата m(2-n) D (в котором параметр m устанавливает количество принятых к анализу вариантов решений) описаний для всех обязательных и возможных периодов жизненного цикла архитектурно-строительного объекта с применением различных вариантов и прогнозов изменений свойств и состояний. Такой подход способствует разностороннему пониманию проектных решений всеми участниками проекта и является основным преимуществом применения технологии многомерного и многовариантного информационного проектирования свойств и состояний архитектурно-строительных объектов.

Рассматриваемые проблемы

Требования действующих положений нормативно-технических документов в отношении разработки архитектурно-строительного раздела проекта и оформления графической и текстовой части проектной документации не устанавливают приоритет или непременную обязательность исполнения какой-либо из двух рассматриваемых концепций: «2D → 3D» и «3D → 2D». Другими словами, каждый творческий коллектив (или специалист), применяет определенную концепцию, исходя из установленного «корпоративного» регламента или субъективных предпочтений.

Например, на рисунке 3 приведен пример реализации концепции вида «3D → 2D» для разработки и оформления проектных решений архитектурного объекта с применением информационной технологии Autodesk Revit [12].

Из представленных на рисунке 3 данных следует, что характерные и обязательные (с точки зрения действующих нормативных требований к составу и оформлению рассматриваемого раздела проекта) элементы проектной документации вида «фасад», «план этажа», «разрез», представленные в «2D»-форматах (см. рисунок 3а,б,в), являются программной интерпретацией первоначального «3D»-формата (см. рисунок 3а) рассматриваемого архитектурного объекта. Соответственно, качество представления, а также возможность внесения изменений на «2D»-форматах фасада, плана, разреза становится прямо зависимым от соответствующего качества и возможностей редактирования исключительно первоначального «3D»-формата.

Важно отметить, что формирование первоначального «3D»-формата, осуществляется на рабочей «подоснове» из «2D»-формата (см. рисунок 3г): таким образом, качество рабочей «подосновы» оказывает влияние на качество первоначального «3D»-формата объекта, а концепция проектирования трансформируется к более сложному виду: «2D → 3D → 2D».

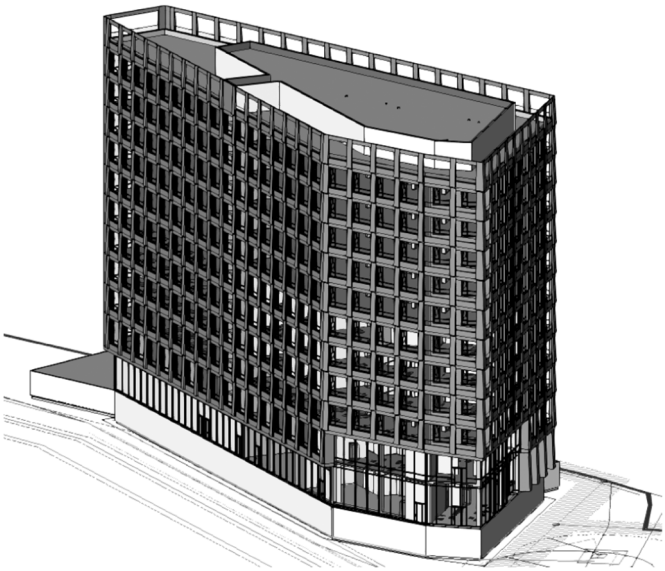
Процедуры внесения необходимых изменений именно в первоначальный «3D»-формат объекта являются значительно более сложными и затратными в отношении использования ресурсов, по сравнению с аналогичными изменениями, которые можно внести в элементы проектной документации вида «фасад», «план этажа», «разрез», представленные в «2D»-форматах. Центральный и определяющий предмет архитектурной деятельности или, собственно, «3D»-формат или «3D»-модель архитектурного объекта не является предметом нормативно-технического регулирования в контексте соответствия установленным требованием к проектной и тем более, рабочей документации по объекту.

Рассмотренный пример дает объяснение тому обстоятельству, что каждый переход, на каждый последующий уровень состояния и развития цифровых (информационных) технологий («D»-измерений, см. рисунок 2) состоит и находится в сложной, нелинейной и неоднозначной зависимости от возможностей и условий его внедрения и применения в практической деятельности.

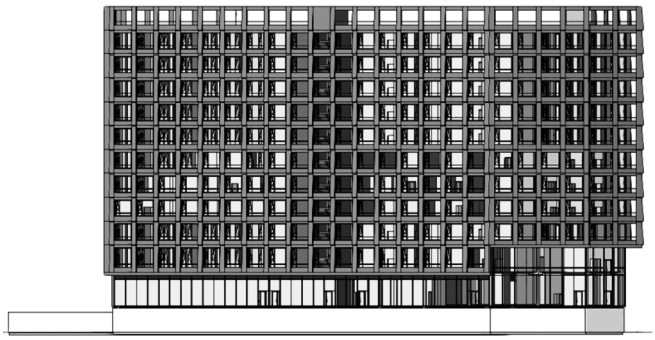
Выводы

Технология информационного моделирования свойств и состояний архитектурно-строительных объектов является одной из наиболее распространенных современных платформ, практически вытеснив традиционные технологии «бумажного» или «макетного» проектирования. Возможно, что уже в ближайшем обозримом будущем именно современные инновационные технологии перейдут в категорию традиционных знаний и умений специалистов, а также станут общепринятым стандартом в архитектурно-строительной деятельности, но на более высоком интеллектуальном и технологическом уровне.

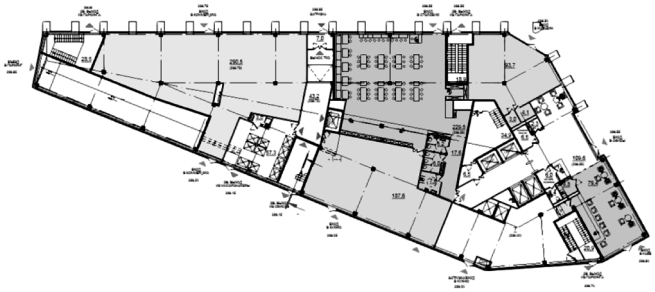
Тем не менее, можно утверждать, что возможности информационных (цифровых) технологий проектирова-



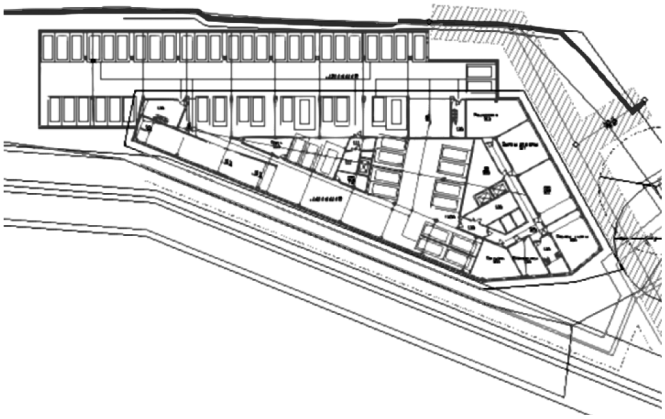
а) первоначальный «3D»-формат архитектурного объекта



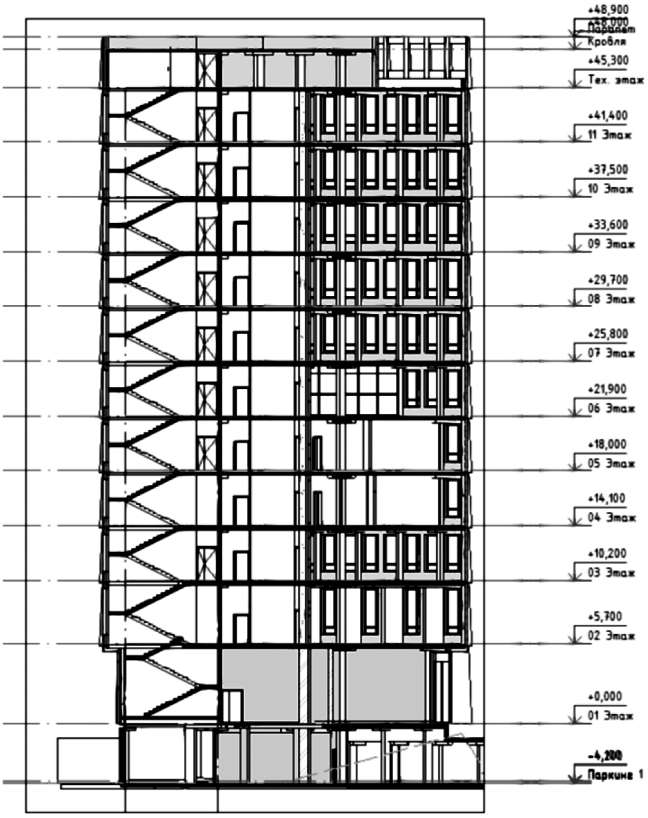
б) рабочий «2D»-формат главного фасада, полученный из первоначального «3D»-формата



в) рабочий «2D»-формат плана этажа, полученный из первоначального «3D»-формата



г) рабочая «подоснова» из «2D»-формата, необходимая для разработки первоначального «3D»-формата архитектурного объекта



д) рабочий «2D»-формат разреза, полученный из первоначального «3D»-формата

Рис. 3. Пример реализации концепции вида «3D → 2D» для разработки и оформления проектных решений архитектурного объекта

ния архитектурно-строительных объектов не исчерпаны. Например, к настоящему времени, так и не реализован уровень 4 (состояния технологий информационного моделирования, см. рисунок 2) даже на уровне отдельных проектов, а нормативно-техническое регулирование представления и анализа результатов проектной деятельности «застряло» в некотором промежуточном состоянии: на переходе от уровня 2 к уровню 3.

Потребность в сборе, обработке и передачи информации, как необходимом ресурсе для современной инженерно-строительной деятельности привела к радикальному изменению форматов разработки и представления результатов решения проектных задач и проблемных ситуаций в архитектурно-строительной деятельности.

Использование информационных технологий позволяет достаточно эффективно сформировать функциональную цифровую модель в каждой из рассмотренных концепций вида «2D → 3D» и «3D → 2D», а также преобразовать ее в случае необходимости изменения первоначального целевого признака или обеспечения условий достижения требуемого качества и результата проектных процедур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капустин П.В. К критическому переосмыслению генезиса архитектурного проектирования: Проектирование вчера, сегодня и завтра // Архитектурные исследования. 2018. № 4(16). С. 4–11.
2. Geoffrey Makstutis. Design Process in Architecture: From Concept to Completion. London. Laurence King Publishing. 2018. 192 p.
3. Адонина А.Д., Каленюк М.А. Роль проектирования в формировании ресурса безопасности архитектурных объектов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2017 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 3074–3077.
4. Emmitt S. Architectural Technology: Research and Practice. London: Wiley-Blackwel. 2013. 266 p.
5. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 N 190-ФЗ (редакция от 25.12.2023) (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.02.2024). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 08.02.2024).
6. Ширинян Е.А. Данные, информация, знание в современном процессе архитектурного проектирования // Архитектура и современные информационные технологии. 2011. № 3 (16). С. 13–18.
7. Абакумов Р.Г., Наумов А.Е., Зобова А.Г. Преимущества, инструмента и эффективность внедрения технологий информационного моделирования в строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 171–181.
8. Сардаров А.А. Архитектура как процесс (о проблемах развития архитектурной науки) // Архитектура и строительство. 2011. №4 (222). С.12—16.
9. Метленков Н.Ф. Парадигмальная динамика архитектурного метода (монография). М.: Архитектура и строительство России, 2018. 428 с.
10. Jeremy Bailenson. Experience on Demand: What Virtual Reality Is, How It Works, and What It Can Do. New York: W. W. Norton & Company. 2018. 304 p.
11. Максимова О.М. Нейропрогнозирование с использованием пакетов программ моделирования нейронных сетей при исследовании строительных конструкций // Нейрокомпьютеры, разработка и применение. 2007. № 9. С.426—439.
12. Revit for architecture. URL: https://www.autodesk.com/products/revit/architecture (дата обращения: 08.02.2024).

© Швецова Виктория Викторовна (vikt.schvetzova2012@yandex.ru); Леонова Ольга Николаевна (onl60@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.49

КЛАССИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СФЕРЕ ПРОВЕДЕНИЯ УЧЕНИЙ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ

CLASSIFICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN THE FIELD OF CONDUCTING EXERCISES OF FIRE PROTECTION UNITS

M. Shkitronov

Summary. The topic relevance is due to the growing need to improve the effectiveness of training of fire protection units by optimizing the planning and conduct of exercises.
The research goal is to develop a classification of machine learning algorithms applicable to solving problems that arise in the process of conducting exercises of fire protection units.
To achieve this goal, the following tasks were solved: an analysis of the regulatory framework and methodological recommendations for the organization of fire protection exercises was carried out; the key factors of the effectiveness of the exercises were identified. The existing machine learning algorithms are considered in the context of their applicability to solving problems related to planning, modeling, and analyzing the results of exercises.
The following research methods are used: analysis of scientific literature on the organization of exercises and the use of machine learning, systematization and classification of the data obtained, expert assessment of the applicability of algorithms.
Based on the study, a classification of machine learning algorithms is proposed, which makes it possible to optimize the process of choosing the most suitable algorithm for solving a specific task within the framework of fire protection unit exercises. We also revealed that reinforcement learning algorithms have the greatest potential for automating the process of developing exercise scenarios and adapting tactical decisions in real time.

Keywords: machine learning, artificial intelligence algorithms, fire protection, fire extinguishing, innovative technologies.

Шкитронов Михаил Евгеньевич
кандидат педагогических наук, доцент,
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева
shkitronov@mail.ru

Аннотация. Актуальность темы исследования обусловлена возрастающей потребностью в повышении эффективности подготовки подразделений пожарной охраны посредством оптимизации планирования и проведения учений.
Целью исследования является разработка классификации алгоритмов машинного обучения, применимых для решения задач, возникающих в процессе проведения учений подразделений пожарной охраны.
Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ нормативно-правовой базы и методических рекомендаций по организации учений пожарной охраны; выявлены ключевые факторы эффективности учений; рассмотрены существующие алгоритмы машинного обучения в контексте их применимости для решения задач, связанных с планированием, моделированием и анализом результатов учений.
В качестве методов исследования используются: анализ научной литературы по вопросам организации учений и применения машинного обучения, систематизация и классификация полученных данных, экспертная оценка применимости алгоритмов.
По итогам исследования предложена классификация алгоритмов машинного обучения, позволяющая оптимизировать процесс выбора наиболее подходящего алгоритма для решения конкретной задачи в рамках проведения учений подразделений пожарной охраны. Выявлено, что алгоритмы обучения с подкреплением обладают наибольшим потенциалом для автоматизации процесса разработки сценариев учений и адаптации тактических решений в режиме реального времени.

Ключевые слова: машинное обучение, алгоритмы искусственного интеллекта, пожарная охрана, пожаротушение, инновационные технологии.

Введение

Актуальность исследования обусловлена насущной необходимостью повышения эффективности подготовки личного состава подразделений пожарной охраны в условиях возрастающих требований к оперативности и безопасности. Традиционные методы обучения, не учитывающие индивидуальные особенности обучающихся, вариативность условий учений и динамику развития пожаров, демонстрируют ограниченную эффективность. В этой связи применение алгоритмов машинного обучения (МО) открывает принципиально новые возможности для персонализации обучения, оптимизации сценариев учений и, как следствие, повышения боеготовности личного состава в экстремальных ситуациях [11, с. 274].

Внедрение машинного обучения в процесс подготовки подразделений пожарной охраны нацелено на решение следующих стратегически важных задач:

алгоритмы МО позволяют осуществлять углубленный анализ больших объемов данных, полученных в ходе учений, с целью выявления устойчивых закономерностей, определяющих эффективность действий личного состава. Кроме того, с помощью алгоритмов машинного обучения анализируются тактические решения, время выполнения задач, эффективность использования оборудования и другие ключевые параметры.

Полученные данные служат основой для формирования персонализированных рекомендаций, адресованных каждому обучающемуся, направленных на коррекцию выявленных недостатков и развитие сильных сторон. Машинное обучение также предоставляет возможность создания адаптивных сценариев учений, учитывающих уровень предварительной подготовки обучающихся, текущие метеорологические условия, особенности моделируемого пожара и другие существенные факторы. Такой подход, в свою очередь, обеспечивает повышение реалистичности и эффективности процесса обучения, максимально приближая его к условиям реальных пожаров [6, с. 246]. Помимо обозначенных направлений, алгоритмы машинного обучения можно применять для автоматизированной оценки действий личного состава в ходе учений, обеспечивая объективную оценку уровня готовности каждого обучающегося и своевременное выявление потребности в дополнительной подготовке.

Исследования в области применения машинного обучения в пожарной безопасности подтверждают высокий потенциал данного подхода. В частности, в работе А.В. Андреева и А.С. Доронина [1] представлен алгоритм прогнозирования распространения пожара в зданиях на основе МО, учитывающий такие факторы, как тип здания, наличие горючих материалов и направление ветра. Авторы показывают, что данная информация может быть использована для разработки более эффективных тактических планов и повышения безопасности личного состава. В свою очередь, Э.Е. Жиляева [6] предложила систему, использующую машинное обучение для раннего обнаружения дыма и огня, что позволяет своевременно принять меры по тушению пожара. Интеграция подобных систем в процесс учений способствует подготовке личного состава к эффективным действиям в условиях быстро меняющейся обстановки.

Внедрение алгоритмов машинного обучения в процесс подготовки подразделений пожарной охраны требует комплексной стратегии, включающей сбор и анализ данных об учениях, разработку и адаптацию алгоритмов машинного обучения к специфике деятельности пожарных, а также обучение личного состава работе с новыми инструментами и методами обучения. Тем не менее, такие потенциальные выгоды от применения машинного обучения в сфере подготовки подразделений пожарной охраны, как повышение эффективности обучения, снижение риска травматизма и улучшение результатов тушения пожаров, безусловно, оправдывают усилия по внедрению данного подхода в работу Государственной противопожарной службы Российской Федерации.

Таким образом, применение алгоритмов машинного обучения в сфере проведения учений подразделений пожарной охраны представляет собой многообещающее направление, способное обеспечить значительное повышение качества подготовки личного состава, снижение рисков при выполнении боевых задач и повышение общей эффективности деятельности пожарной охраны.

Материалы и методы

Теоретико-методологические основы исследования составили постулаты и тезисы, изложенные в фундаментальных работах таких авторов, как И.А. Бондаренко, С.Я. Нагибин [2], Д. Братухин [3], В.Я. Вилисов [4] и др.

Ключевые методологические аспекты исследуемой темы были проанализированы на основе материалов работ таких авторов, как Э.Е. Жиляева [6], И.А. Малый, В.В. Булгаков, И.Ю. Шарабанова, О.И. Орлов [7], И.Н. Пожаркова, С.Г. Цариченко, С.Г. Немчинов [8] и др.

В исследовании были также использованы материалы Государственной противопожарной службы Российской Федерации [5].

В рамках современных зарубежных исследований проводится систематический анализ применимости различных классов алгоритмов машинного обучения (МО) в задачах повышения эффективности пожарной охраны. В частности, в работах Бин Ван, Бодун Цай, Цзиньфан Шэн, Вэньчжэ Цзяо [9], В. Грабисс, Д. Фойтл [10], Цзяминь Цзян [11], А. Скляр, М. Вайлер [12] рассматриваются ключевые направления, где МО может внести существенный вклад, включая прогнозирование развития пожаров, оптимизацию стратегий эвакуации и рациональное распределение ресурсов для тушения.

Зарубежный научный дискурс темы охватывает как алгоритмы обучения с учителем (деревья решений и метод опорных векторов (SVM), так и методы обучения без учителя (кластеризация и снижение размерности). Также уделяется внимание алгоритмам обучения с подкреплением, что, по мнению Чжаньфэн Ван, Лиша Яо [13], позволяет разрабатывать адаптивные системы управления в динамичных условиях пожара.

Методология исследования включает в себя ряд общенаучных методов: синтез, анализ, систематизация, описательный анализ, сопоставление, а также формально-логический метод. В рамках исследования темы были

также применены историографический анализ научного дискурса и анализ возможностей внедрения технологий искусственного интеллекта на этапах проведения учений подразделений пожарной охраны в России.

Результаты и обсуждения

Классификация алгоритмов машинного обучения в сфере пожаротушения проводится нами на основе ряда ключевых критериев, определяющих их применимость к конкретным задачам в пожарной охране. К этим критериям относятся: тип решаемой задачи (классификация, регрессия, кластеризация), объем и структура данных, необходимых для обучения модели, вычислительная сложность алгоритма, определяющая скорость обучения и прогнозирования, а также интерпретируемость результатов, необходимая для принятия обоснованных решений. Например, для прогнозирования распространения огня на основе спутниковых данных о растительности и погодных условий оправдано использование таких методов регрессионного анализа, как «Gaussian Process Regression» (GPR), учитывая способность искусственного интеллекта к моделированию неопределенностей.

На основе анализа научной литературы полученные нами результаты легли в основу классификации, представленной в таблице 1.

Алгоритмы машинного обучения, применимых для пожаротушения, классифицируются по множеству критериев, включая тип обучения и целевую задачу. Рассмотрим каждый критерий более подробно.

I. Классификация по типу обучения.

1. *Обучение с учителем («Supervised Learning»)* представляет собой класс алгоритмов обучается на размеченных данных, где каждый входной вектор соответствует известному целевому значению. В контексте пожарной охраны, такие алгоритмы могут быть использованы для исторического контекста учений, где для каждого сценария зафиксирована оценка эффективности.

В ряду таких алгоритмов выделяются: линейная регрессия, которая применяется для прогнозирования непрерывных величин, например, для расчета времени прибытия пожарного расчета на основе входных параметров, например расстояния и погодных условий. В адаптации к задачам пожаротушения линейная регрессия может быть использована для оценки необходимого времени развертывания оборудования или прогнозирования скорости распространения огня в зависимости от типа горючих материалов и условий окружающей среды.

В этом классе алгоритмов логистическая регрессия используется для классификации объектов в два или более классов. Например, оценка вероятности успешного тушения пожара до определенного момента времени на основе данных о типе пожара, доступных ресурсах и времени начала тушения. В сфере пожарной безопас-

Таблица 1.

Классификация и применение алгоритмов машинного обучения в пожарной охране

Алгоритм	Тип обучения	Задача	Преимущества	Недостатки	Примеры применения
Деревья решений	С учителем	Классификация, регрессия	Простота интерпретации, высокая скорость обучения	Склонность к переобучению, нестабильность	Прогнозирование риска возникновения пожара на основе погодных условий и типа растительности.
Метод опорных векторов (SVM)	С учителем	Классификация, регрессия	Высокая точность, эффективность в многомерных пространствах	Сложность интерпретации, высокая вычислительная сложность для больших объемов данных	Классификация пожаров по причине возникновения (естественные, техногенные).
Кластеризация (K-means)	Без учителя	Кластеризация	Простота реализации, высокая скорость работы	Требует предварительного знания количества кластеров, чувствительность к выбросам	Выделение регионов с повышенным риском возникновения пожаров на основе исторических данных.
Снижение размерности (PCA)	Без учителя	Снижение размерности	Уменьшение вычислительной сложности, визуализация данных	Потеря информации, сложность интерпретации преобразованных признаков	Снижение размерности спутниковых данных для анализа растительности и выявления очагов возгорания.
Q-learning	С подкреплением	Оптимизация	Адаптивность к изменяющимся условиям, возможность обучения без модели среды	Высокая вычислительная сложность, необходимость большого количества итераций обучения	Оптимизация маршрутов эвакуации в зависимости от распространения огня и задымления.

ности логистическая регрессия может классифицировать здания по уровню пожароопасности, определяемому по архитектурным особенностям и соблюдению норм безопасности.

Также применяется метод опорных векторов (SVM), который эффективен для решения задач классификации и регрессии, особенно в пространствах высокой размерности. В контексте пожарной охраны SVM может быть использован для классификации типов возгораний по данным с датчиков и камер, обеспечивая быстрое определение характера пожара и выбор оптимальной стратегии тушения. Этот метод также находит применение в анализе и классификации данных дистанционного зондирования для оценки масштабов природных пожаров.

Метод деревьев решений и ансамблевые методы («Random Forest, Gradient Boosting») подходят для задач классификации и регрессии, отличаются высокой точностью и устойчивостью к переобучению. В задачах пожарной охраны они могут использоваться для прогнозирования риска возникновения пожара в определенном районе на основе анализа исторических данных, погодных условий и других факторов. Метод деревьев решений, в частности, применяется в моделях оценки ущерба от пожара, когда точность прогноза критически важна для оптимизации распределения ресурсов и страховых выплат.

2. *Обучение без учителя («Unsupervised Learning»)*. Алгоритмы данного типа работают с неразмеченными данными, выявляя скрытые структуры и закономерности.

В данном классе алгоритмов выделяется кластеризация (K-means, DBSCAN) для группировки объектов по схожим признакам. В контексте пожарной охраны кластеризация может применяться для группировки зданий с похожими характеристиками (например, тип конструкции, материалы, возраст) для разработки дифференцированных планов пожарной безопасности. Алгоритмы кластеризации могут быть использованы для идентификации потенциально опасных зон в городе на основе анализа частоты пожаров и социо-экономических характеристик района.

Понижение размерности (PCA), которое позволяет уменьшить количество признаков, сохраняя при этом наиболее важную информацию. В контексте пожарной охраны PCA может быть использован для уменьшения количества параметров, необходимых для моделирования распространения пожара, что упрощает анализ и снижает вычислительные затраты. PCA может использоваться для анализа изображений с дронов, обнаруживая критические участки распространения огня.

Ассоциативные правила («Apriori, FP-growth») позволяют выявить закономерности в данных, например, какие факторы чаще всего приводят к возникновению пожаров. В рамках задач пожарной охраны такие алгоритмы позволяют проводить анализ данных о причинах пожаров для выявления наиболее распространенных ошибок и разработки превентивных мер.

3. *Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning)* — это алгоритмы искусственного интеллекта, которые обучаются путем взаимодействия с окружающей средой, получая вознаграждение за правильные действия и «штрафы» за неправильные.

Среди данного класса алгоритмов, с позиций применимости в учениях подразделений пожарной охраны, можно выделить следующие: Q-learning, алгоритм, обучающийся оптимальной стратегии действий путем оценки качества каждой пары «состояние-действие». В контексте учений подразделений пожарной охраны Q-learning можно применять для обучения управления роботом-пожарным, который должен самостоятельно принимать решения о тушении пожара в сложной обстановке.

Алгоритм SARSA аналогичен Q-learning, но, в отличие от него, обучается на основе фактических действий, а не оптимальных. В контексте SARSA может быть адаптирован для обучения алгоритмов, оптимизирующих маршруты эвакуации зданий во время пожара на основе симуляций и обратной связи.

Глубокое обучение с подкреплением (DRL): Комбинация обучения с подкреплением и глубоких нейронных сетей, позволяющая решать сложные задачи с высокой размерностью пространства состояний. Данный алгоритм может быть применен для создания продвинутых виртуальных тренажеров для подготовки пожарных, где алгоритм управляет поведением виртуальных пожарных и окружающей среды.

II. Классификация по решаемой задаче.

1) Задача идентификации класса объекта: классификация пожароопасности зданий на основе материалов, планировки и возраста; определение уровня готовности пожарного расчета к выполнению конкретной задачи.
2) Прогнозирование непрерывного значения (регрессия), которая может быть применения для прогнозирования времени прибытия пожарного расчета на место вызова с учетом трафика и расстояния; оценка необходимого количества воды для тушения пожара в зависимости от его масштаба и типа горящих материалов.
3) Кластеризация (группировка объектов по схожим признакам). Например, на базе искусственного интеллекта возможна кластеризация пожаров по причинам возникновения (например, неосторожное обращение с огнем, короткое замыкание, поджог); выявление групп зданий с повышенным

риском пожара на основе анализа статистических данных и факторов риска.

4) Прогнозирование временных рядов также может быть применено в ходе учений подразделений пожарной охраны. Например, в ходе учебного пожаротушения возможно прогнозирование будущих значений на основе анализа исторических данных: прогнозирование количества пожаров в зависимости от времени года и погодных условий; прогнозирование динамики распространения пожара на основе данных о температуре, влажности и направлении ветра.

На основе приведенной выше классификации возможны следующие направления применения алгоритмов машинного обучения в учениях пожарной охраны:

1. Оптимизация сценариев учений на этапе планирования учебной деятельности, выбор наиболее эффективных тактических приемов и распределение ресурсов, используя данные о предыдущих учениях и моделирование различных сценариев.
2. Автоматическая оценка действий пожарных, выявление ошибок и слабых мест, а также предоставление рекомендаций по улучшению подготовки на основе анализа данных, собранных во время учений (например, время выполнения задач, расход ресурсов, соблюдение правил безопасности).
3. Применение алгоритмов обучения с подкреплением для создания реалистичных виртуальных тренажеров, позволяющих пожарным оттачивать навыки в различных ситуациях без риска для жизни и здоровья.
4. Выявление тенденций и закономерностей, а также прогнозирование будущих результатов на основе анализа данных о предыдущих учениях, что позволяет улучшать процесс подготовки и повышать эффективность работы пожарных подразделений.

Выводы

На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы: многообразие алгоритмов машинного обучения открывает широкие перспективы для повышения эффективности и безопасности в сфере пожарной охраны. От предиктивного анализа рисков возникновения пожаров до оптимизации тактических решений в реальном времени машинное обучение предоставляет ценные инструменты для анализа данных, автоматизации процессов и поддержки принятия решений.

Интеграция алгоритмов машинного обучения в практику пожарной охраны позволяет существенно улучшить планирование учений, предоставляя возможность моделирования разнообразных сценариев и автоматизированной оценки действий пожарных. Применение ансамблевых методов для оценки ущерба от пожаров и глубокого обучения с подкреплением для создания продвинутых виртуальных тренажеров способствует более эффективному распределению ресурсов и повышению квалификации личного состава.

Таким образом, мы можем констатировать, что внедрение машинного обучения в пожарную охрану — это не просто технологический тренд, а необходимость минимизации рисков в ходе пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.В., Доронин А.С. Прототип технического устройства обнаружения пожара, построенный на принципах искусственного интеллекта // Вестник МАНЭБ. — 2024. — № 2. — С. 5–10.
2. Бондаренко И.А., Нагибин С.Я. Методы классификации пожаров со спутниковых снимков // Интернаука. — 2024. — № 18–1 (335). — С. 27–28.
3. Братухин Д. Сегментация пламени на изображении с использованием сверточной нейронной сети U-net // Norwegian Journal of Development of the International Science. — 2021. — № 64. — С. 31–38.
4. Вилисов В.Я. Моделирование уровня риска решений, принимаемых при управлении ликвидацией пожаров // Пожаровзрывобезопасность. — 2019. — № 3. — С. 36–49.
5. Государственная противопожарная служба Российской Федерации // МЧС России. — URL: https://вдпо.рф/enc/gosudarstvennaya-protivopozharnaya-sluzhba (дата обращения: 01.05.2024).
6. Жиляева Э.Е. Способы и пути подавления пожаров с помощью искусственного интеллекта // Петербургские пенитенциарные конференции. материалы комплекса международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург, 2025. — С. 245–246.
7. Малый И.А., Булгаков В.В., Шарабанова И.Ю., Орлов О.И. Применение цифровых технологий для подготовки курсантов в области пожаротушения // Открытое образование. — 2021. — № 2. — С. 51–60.
8. Пожаркова И.Н., Цариченко С.Г., Немчинов С.Г. Использование машинного обучения в задачах управления пожарными роботами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2023. — № 12. — С. 19–25.
9. Bin Wang, Bodong Cai, Jinfang Sheng, Wenzhe Jiao. AAGCN: a graph convolutional neural network with adaptive feature and topology learning // Scientific Reports. — 2022. — Vol. 14 (1). — pp. 78–92.
10. Grabiss, V., Voitl, D. Fire hazard prevention with AI: machine learning models // International Sociological Journal. — 2021. — № 7. — pp. 68–79.
11. Jiamin Jiang. The eye of artificial intelligence — Convolutional Neural Networks // Applied and Computational Engineering. — 2022. — № 76 (1). — pp. 273–279.
12. Skliar A., Weiler M. Hyperbolic Convolutional Neural Networks // Frontiers in Artificial Intelligence. — 2022. — № 7. — pp. 102–124.
13. Zhanfeng Wang, Lisha Yao. Expression Recognition Method Based on Convolutional Neural Network and Capsule Neural Network // Computers, Materials & Continua. — 2023. — № 79(1). — pp. 1–10.

© Шкитронов Михаил Евгеньевич (shkitronov@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.50

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ НА ЯЗЫКЕ PYTHON В АНАЛИТИКЕ ДАННЫХ ИНДУСТРИИ E-COMMERCE

ALGORITHM FOR OPTIMAL TOOL SELECTION FOR DATA ANALYSIS IN PYTHON IN THE E-COMMERCE ANALYTICS INDUSTRY

I. Shkokov

Summary. Article addresses the problem of selecting the optimal data analysis tool for e-commerce web analytics. A comparative performance study of four popular Python libraries—Pandas, Polars, DuckDB, and PySpark—is conducted using typical business queries. Based on the experimental results measuring data processing time, the strengths of each library are identified according to task complexity and data volume. As a result, a decision tree algorithm is proposed to help data specialists choose the fastest tool for a specific analytical task, thereby significantly increasing workflow efficiency.

Keywords: data analysis, Python, optimization, web analytics, e-commerce, data libraries, performance.

Шкоков Игорь Олегович
Политехнический Институт Передовых Наук, г. Париж, Франция
igor.shkokov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема выбора оптимального инструмента для анализа данных в области веб-аналитики электронной коммерции. Проведено сравнительное исследование производительности четырех популярных библиотек языка Python: Pandas, Polars, DuckDB и PySpark на примере типичных бизнес-запросов. На основе результатов экспериментов, измеряющих время обработки данных, выявлены сильные стороны каждой библиотеки в зависимости от сложности задачи и объема данных. Предложен алгоритм в виде дерева решений, который помогает специалистам по данным выбирать наиболее быстрый инструмент для конкретной аналитической задачи, что позволяет значительно повысить эффективность работы.

Ключевые слова: анализ данных, Python, оптимизация, веб-аналитика, e-commerce, библиотеки для данных, производительность.

Введение

Согласно прогнозам, общий объем сгенерированных данных в мире продолжает стабильно расти и вырастет до 291 зеттабайта в 2027 году [1]. При таком бурном росте количество специалистов, занятых в индустрии data science и в анализе произведённых данных, будет соответственно неуклонно расти [2].

Современный анализ данных требует знания большого количества инструментов. Изобилие возможностей для процессинга наборов данных формируют «Парадокс выбора», при котором специалисты в области обработки данных используют неоптимальные инструменты и прикладывают усилия для переключение между ними.

В то же время, быстродействие скриптов обработки данных современных библиотек (написанных, в основном, для языка Python) достаточно предсказуемо и зависит от сложности запроса к базе данных, объема и формата данных и эффективности в манипуляциях с информацией самих библиотек. Перечисленные факторы позволяют представить себе возможным алгоритм для оптимального выбора необходимого инструмента. Данный алгоритм по вводным параметрам может определять, какая именно библиотека должна быть использована для конкретной задачи.

Для показательности исследования может быть рассмотрена аналитика крупного веб-сайта в индустрии e-commerce, как одна из наиболее репрезентативных областей в индустрии.

Литературный обзор

В работе [3] авторами приводится очень релевантное исследование похожего типа, которое концентрируется на большом числе параметров. Затронуты 7 популярных библиотек для анализа данных и исследованы многие показатели на нескольких наборах публичных данных. При этом, статья не имеет целью выработку алгоритма выбора оптимального инструмента для анализа данных, а также не затрагивает во всех экспериментах библиотеку DuckDB, показывающую достойные результаты в сравнительных анализах, опубликованных в профессиональной прессе.

В работе [4] авторы производят похожее исследование на синтетических датасетах. При этом, в сравнение попадают только Pandas и Polars, обходя стороной дру-

гие популярные в индустрии библиотеки для анализа данных.

Работа [5] оценивает уровень расхода энергии — кореллирующую, но не напрямую связанную с временем процессинга запроса метрику. В работе [6] автор исследования концентрируется на библиотеке Modin — достаточно быстрой для анализа, но недостаточно часто используемой в индустрии анализа данных. Целью работы [7] является сравнение разрабатываемой компанией Microsoft библиотеки PyFroid, которая призвана заменить Pandas и лучше использует ресурсы отдельно взятого процессора.

Таким образом, в научной литературе последних лет, в основном, имеются только частичные сравнения данных библиотек, не направленные на практические результаты. Также стоит отметить, что индустрия веб-аналитики с характерными для неё аспектами недостаточно затронута в подобных исследованиях.

Материалы и методы

Для создания оптимального алгоритма выбора инструмента было решено произвести ряд экспериментов на определение быстродействия работы нескольких библиотек обработки данных в Python. Были учтены современные реалии индустрии e-commerce и выбраны наиболее используемые метрики, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Метрики, используемые для эксперимента на быстродействие процессинга данных

Название запроса	Краткое описание запроса	Бизнес-применение и полезность
Количество просмотров карточек продуктов	Подсчет просмотра товаров: количество страниц, открытых пользователями.	Используется для оценки активности клиентов и как начальный этап воронки конверсии. Показывает вовлеченность пользователей.
MAU (Месячная активная аудитория)	Подсчет уникальных пользователей, проявивших активность в течение календарного месяца.	Одна из основных метрик для оценки клиентской базы. Используется для выявления сезонности, планирования развития веб-сайта и отчетности инвесторам.
Анализ воронки конверсии	Анализ пользовательского пути от просмотра товара до покупки, расчет коэффициентов конверсии на каждом этапе (просмотр ⟶ корзина ⟶ покупка).	Используется для оптимизации электронной конверсии: выявление товаров с лучшей конверсией в покупку, определение точек фрустрации пользователей.

Во время проведения экспериментов были проанализированы 4 современные библиотеки на языке Python:

- **Pandas:** самая популярная и устоявшаяся для работы с данными библиотека. Структуры данных, используемые для работы в этой библиотеке (DataFrame, Series) стали де-факто стандартом индустрии. Имея широкий набор инструментов для очистки и трансформации данных, pandas используется как для научных разработок, так и для промышленных применений. Особенное преимущество pandas в её легкой интеграции с другими современными элементами экосистемы языка Python, такими как NumPy, matplotlib и scikit-learn. При этом главное ограничение pandas в том, что она работает преимущественно в оперативной памяти на одном ядре (CPU) и плохо масштабируется для работы с большим объемом данных.
- **Polars:** относительно новая библиотека для работы с данными, написанная на языке Rust. Данная библиотека позиционируется как современная замена Pandas, предлагая низкое потребление памяти и использование колоночного формата хранения данных (Arrow), а также возможности использования привычного синтаксиса в стиле pandas.
- **DuckDB:** изначально задуманная как небольшой исследовательский проект, эта библиотека быстро набрала популярность благодаря своей легкости, понятному синтаксису и производительности. DuckDB позволяет почти полноценно использовать язык SQL в среде Python и не требует отдельного сервера. При этом она может работать с данными прямо в файлах, что представляет собой огромное преимущество по сравнению с другими библиотеками.
- **PySpark:** это библиотека и фреймворк, созданные специально для работы с большим объемом данных. По сути, PySpark представляет собой Python-интерфейс к программному продукту Apache Spark. PySpark изначально спроектирован для распределенных вычислений, что выгодно выделяет его в сравнении с другими подобными библиотеками. Он позволяет предсказуемо обрабатывать терабайты данных, используя кластеры серверов. PySpark активно применяется в корпоративной среде, где важна отказоустойчивость и масштабируемость.

В целях создания репрезентативных условий, максимально приближенных к современным условиям анализа реляционных таблиц в индустрии веб-аналитики, для создания алгоритма были использованы следующие ограничения:

- Все использованные инструменты (библиотеки, языки, среда программирования) были с открытой лицензией (open-source)

- Все манипуляции с данными производились в среде программирования Jupyter Notebook с ядром на языке Python
- Среда программирования была запущена локально, а не в облачном хранилище

Для симулирования необходимых для эксперимента данных был использован классический датасет платформы RetailRocket, опубликованный в открытом доступе на агрегаторе наборов данных Kaggle [8]. Он представляет собой анонимизированные таблицы с такими полями, как идентификатор продукта, дата открытия страницы с этим продуктом, идентификатор пользователя, время покупки, и т.д. Схема набора данных представлена на рисунке 1.

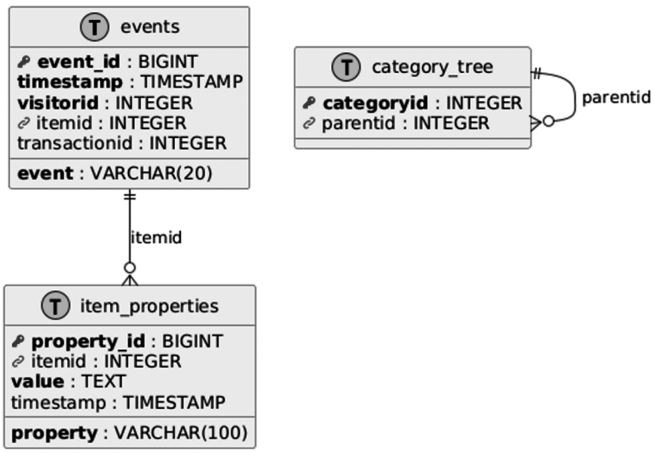


Рис. 1. Схема набора данных RetailRocket, использованного для экспериментов

Данные вычислительной техники, на которой проводился анализ, были специально подобраны для того, чтобы симулировать стандартную локальную среду рабочего ноутбука на Windows 11:

- Оперативная память: 8Gb RAM LPDDR3
- Процессор: Intel Core i5 8265U 1.6 GHz
- Накопитель: 256GB SSD

С помощью среды программирования Jupyter Notebook на языке Python был разработан необходимый код и произведены замеры быстродействия библиотек для каждого представленного запроса. Примеры запроса и ответа приведены в листинге 1 и в листинге 2.

```
import duckdb
import time
con = duckdb.connect()
start_time = time.time()
mau_duckdb = con.execute(f»»»
        SELECT
strftime(TO_TIMESTAMP(CAST(timestamp/1000 AS BIGINT)), ‘%Y-%m’) AS month,
COUNT(DISTINCT visitorid) AS mau
FROM read_csv_auto(‘{csv_path}’)
GROUP BY month
ORDER BY month
«»»).df()
end_time = time.time()
duckdb_runtime = float(f»{end_time — start_time:.3f}»)
print(«DuckDB runtime:», duckdb_runtime, «s»)
print(mau_duckdb.head())
```

Листинг 1. Пример использования библиотеки duckdb для анализа быстродействия запроса месячной активной аудитории

```
DuckDB runtime: 1.064 s
      month   mau
0 2015-05 306454
1 2015-06 313649
2 2015-07 377238
3 2015-08 311167 4 2015-09 174956
```

Листинг 2. Пример ответа библиотеки duckdb после выполнения запроса

Для уменьшения влияния случайных факторов каждый замер был сделан несколько раз. Таким образом, по результатам замеров было выявлено среднее время обработки запроса каждой библиотекой. После проведения экспериментов была получена сравнительная таблица 2, где по каждому запросу к базе данных приведено среднее время обработки запроса библиотекой в секундах.

Результаты

Таблица 2.

Среднее время обработки запроса к данным различными библиотеками

Тип запроса	Pandas, секунд	PySpark, секунд	DuckDB, секунд	Polars, секунд
Количество просмотров карточек продуктов	4,619	2,242	1,195	0,558
Месячная активная аудитория	3,814	2,347	1,365	0,694
Анализ воронки конверсии	10,778	14,103	2,309	7,142

Анализируя полученные данные, были выявлены следующие закономерности:

- Библиотека Polars проявляет наибольшее быстродействие с простыми запросами, но при тяжелых аналитических задачах, таких как анализ конверсии, наиболее быстра DuckDB.
- Библиотека PySpark работает гораздо медленнее для такого типа задач. При этом, как это было опи-

сано выше, только данная библиотека может стабильно работать при объеме данных, превышающем доступную оперативную память.

- Библиотека Pandas, являясь по сути стандартом индустрии, показывает гораздо более низкое быстродействие в сравнении с DuckDB и Polars.

Таким образом, благодаря выявленным при эксперименте закономерностям автором предлагается алгоритм оптимального выбора инструмента для анализа информации на языке Python при аналитике веб-данных, представленный на рисунке 2.

Используя данный алгоритм, специалисты в области работы с данными могут заметно ускорить сроки анализа информации. Применение этого алгоритма может позволить аналитику данных при повседневных задачах сократить сроки анализа данных на 20–30 %, что эквивалентно освобождению 1–1.5 часов рабочего дня и заметному повышению производительности труда.

Заключение

Эксперименты, проведенные с наиболее популярными библиотеками для анализа данных на языке программирования Python, позволили оценить быстродействие типичных запросов к базе данных, полученной от e-commerce сервиса. На основе данных экспериментов был разработан алгоритм, который позволяет быстро осуществить выбор библиотеки с помощью простого дерева решений. Разработанный алгоритм позволяет сократить время процессинга типичных запросов и оптимизировать ресурсы для анализа данных.

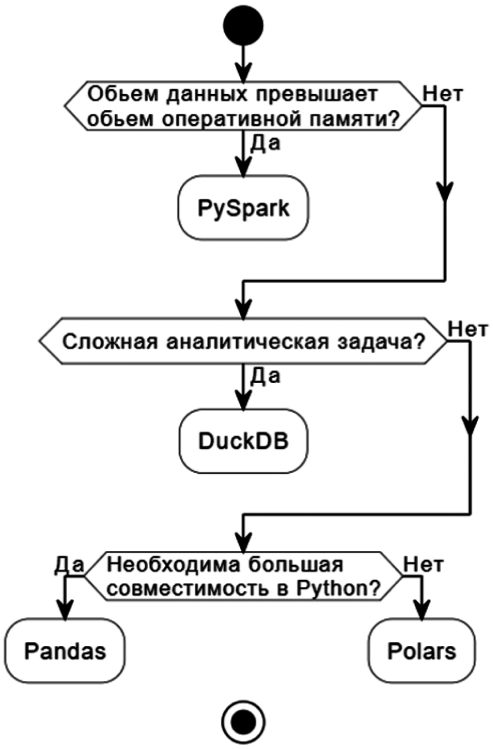


Рис. 2. Алгоритм оптимального выбора инструмента для анализа информации на языке Python при аналитике веб-данных

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Alshemaimri, A. Badshah, A. Daud, A. Bukhari, R. Alsini, and O. Alghushairy, «Regional computing approach for educational big data», Scientific Reports, vol. 15, no. 1, p. 7619, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-92120-7.
2. Data Strategy Pros. «Data management job projections». (2024), [Online]. Available: https://www. datastrategypros.com/resources/data-management-job-projections (visited on 08/08/2025).
3. A. Mozzillo, L. Zecchini, L. Gagliardelli, A. Aslam, S. Bergamaschi, and G. Simonini, «Evaluation of dataframe libraries for data preparation on a single machine», in Proceedings of the 28th International Conference on Extending Database Technology (EDBT), Barcelona, Spain, Mar. 2025, pp. 337–349.
4. F. Nahrstedt, M. Karmouche, K. Bargie, P. Banijamali, A.P.K. Nalini, and I. Malavolta, «An empirical study on the energy usage and performance of pandas and polars data analysis python libraries», in Proceedings of the 28th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE 2024), Salerno, Italy, Jun. 2024, p. 10.
5. S. Shanbhag and S. Chimalakonda, «On the energy consumption of different dataframe processing libraries — an exploratory study», arXiv:2209.05258, 2022.
6. D. Petersohn et al., «Flexible rule-based decomposition and metadata independence in modin: A parallel dataframe system», Proceedings of the VLDB Endowment, vol. 15, no. 3, pp. 739–751, 2021.
7. V. Emani, A. Floratou, and C. Curino, «Pyfroid: Scaling data analysis on a commodity workstation», in Proceedings of the 2024 Conference on Extending Database Technology (EDBT), 2024.
8. R. Zykov. «Retailrocket recommender system dataset». (2022), [Online]. Available: https://www.kaggle. com/datasets/retailrocket/ecommerce-dataset (visited on 08/08/2025).

© Шкоков Игорь Олегович (igor.shkokov@gmail.com)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.03

ГИГАНТСКАЯ ЮВЕНИЛЬНАЯ ФИБРОАДЕНОМА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ: КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ И ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

GIANT JUVENILE BREAST FIBROADENOMA: CLINICAL CASE AND LITERATURE REVIEW

R. Akhmedov
E. Bit-Sava
D. Ivanov
A. Belousov
G. Dashyan
A. Lazakovich
L. Shaykhelislamova

Summary. Fibroadenomas are the most common breast tumors in children and adolescents, accounting for between 30 and 70 % of all palpable tumors in patients of this age group, according to various data. Giant juvenile fibroadenoma is a rare benign neoplasm of the breast, most often diagnosed in girls aged 10 to 18 years. Unlike conventional fibroadenomas, which are small in size and characterized by slow growth, giant fibroadenomas are characterized by a rapid significant increase in volume, often reaching a size of more than 5 cm and replacing up to 80 % of the volume of the breast. Often, the development of this disease occurs due to dishormonal disorders against the background of puberty. The diagnosis of giant juvenile fibroadenoma and the determination of therapeutic tactics necessarily requires a trepanation biopsy, since they are difficult to distinguish from other neoplasms, such as phylloid tumors, during physical and instrumental examinations. To date, a small number of cases of treatment of these diseases have been described in Russian and foreign literature. The article presents a literature review of current data on the pathogenesis, diagnosis, and treatment of giant juvenile fibroadenoma, as well as describes a clinical case of successful surgical treatment of this disease in a 14-year-old patient.

Keywords: fibroadenoma, giant juvenile fibroadenoma, breast tumors, children, adolescents, diagnosis, treatment, trepanation biopsy, dishormonal disorders, surgical treatment.

Ахмедов Руслан Мерзиалиевич
врач-онколог, Клиника высоких медицинских технологий имени Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского Государственного Университета
Little-doctor1989@yandex.ru
Бит-Сава Елена Михайловна
доктор медицинских наук, профессор, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; заведующая отделением, врач-онколог, ГБУЗ Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) имени Н.П. Напалкова
bit-sava@mail.ru
Иванов Дмитрий Олегович
доктор медицинских наук, профессор, главный неонатолог Минздрава России, ректор, ФГБО ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
gpmu_priem@mail.ru
Белоусов Александр Михайлович
доктор медицинских наук, заместитель главного врача по медицинской части, Клиника высоких медицинских технологий имени Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского Государственного Университета
info@aleksandrbelousov.ru
Дашян Гарик Альбертович
доктор медицинских наук, врач-онколог, заведующий онкологическим отделением № 1 клиники высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)
Лазакович Алина Алексеевна
врач-онколог клиники высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)
Шайхелисламова Ляйсан Фидагиевна
врач пластических хирург клиники высоких медицинских технологий им. Н.И. Пирогова, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия)

Аннотация. Фиброаденомы являются самыми распространенными опухолями молочной железы у детей и подростков, составляя по разным данным от 30 до 70 % всех пальпируемых образований у пациенток этой возрастной группы. Гигантская ювенильная фиброаденома — редкое доброкачественное новообразование молочной железы, чаще всего диагностируемое у девочек в возрасте от 10 до 18 лет. В отличие от обычных фиброаденом, которые имеют небольшие размеры и характеризуются медленным ростом,

гигантские фиброаденомы отличаются быстрым значительным увеличением в объеме, часто достигая размеров более 5 см и замещая до 80 % объема молочной железы. Зачастую развитие данного заболевания происходит в связи с дисгормональными нарушениями на фоне полового созревания. Постановка диагноза гигантской ювенильной фиброаденомы и определения лечебной тактики в обязательном порядке требует проведения трепанационной биопсии, поскольку при физикальном и инструментальном обследованиях они трудноотличимы от других новообразований, таких как филлоидные опухоли. На сегодняшний день в русскоязычной и иностранной литературе описано небольшое число случаев лечения данных заболеваний. В статье представлен литературный обзор современных данных о патогенезе, диагностике и лечении гигантской ювенильной фиброаденомы, а также описан клинический случай успешного хирургического лечения данного заболевания у 14-летней пациентки.

Ключевые слова: фиброаденома, гигантская ювенильная фиброаденома, опухоли молочной железы, дети, подростки, диагностика, лечени, трепанационная биопсия, дисгормональные нарушения, хирургическое лечение.

Введение

Фиброаденомы являются распространенными опухолями молочной железы у детей и подростков, составляя более 30 % пальпируемых образований в молочной железе и 44–94 % от числа хирургически удаляемых опухолей молочной железы у пациентов этой возрастной группы [1, 2]. В случае если фиброаденома диагностируется у пациентов в возрасте от 10 до 18 лет, она определяется как ювенильная [3]. Клинико-морфологическая характеристика этих опухолей схожа с фиброаденомами у взрослых, но обладает некоторыми особенностями клинического течения. Понимание течения данного заболевания у детей и подростков имеет ключевое значение в оптимизации методов диагностики и лечения, что требует комплексного подхода на основе современных данных и клинических рекомендаций.

Клинический случай публикуется в соответствии с критериями CARE для представления клинических случаев, разработанными D.S. Riley et al. в 2017г.

Клиническая картина

Возникновение гигантской фиброаденомы зачастую связано с фазой полового созревания и активной гормональной перестройкой. Повышение уровня эстрогена, повышенная чувствительность эстрогеновых рецепторов и снижение уровня антагонистов эстрогена, считаются важными факторами в патогенезе данного заболевания [4]. Чаще всего опухоль выявляется в процессе самодиагностики или при профилактическом осмотре и представляет собой плотное, безболезненное образование правильной округлой формы [5, 6]. Обычно фиброаденомы имеют размер от 1 до 5 см, однако, могут быть и значительно больше. Фиброаденома может быть охарактеризована как гигантская, если её диаметр превышает 5 см, а её вес составляет более 500 г, или она замещает более четырех пятых объема молочной железы. Зачастую эти опухоли характеризуются быстрым экспансивным ростом [7]. Ювенильная фиброаденома молочной железы — доброкачественное новообразование, которое обычно имеет благоприятное течение и не сопровождается развитием метастазов [8]. Тем не менее, несмотря на отсутствие яркой симптоматики, фиброаденомы могут представлять собой косметическую проблему и вызывать субъективный дискомфорт, а также ощущение давления в области молочной железы. Соответственно, эффективная диагностика и адекватное лечение необходимы не только для достижения оптимального клинического результата, но и улучшения качества жизни пациенток [9].

Диагностика ювенильной фиброаденомы молочной железы включает клиническое обследование, использование визуализационных методик и гистологическое исследование. Первичный диагноз обычно ставится на основании физикального обследования, при котором, как правило, выявляется безболезненное, подвижное образование с четкими границами. При нетипичной картине заболевания крайне важно провести дифференциальную диагностику с другими заболеваниями молочных желез [10]. Ультразвуковое исследование (УЗИ) является основным визуализационным методом исследования. Фиброаденомы на УЗИ, как правило, определяются как гипоэхогенное, гомогенное образование с четкими контурами и иногда с четко выраженной капсулой, тем не менее, ультразвуковая картина этого новообразования часто неотличима от таковой при других заболеваниях молочной железы, таких как филлоидные опухоли [11]. Маммография может быть менее эффективной у молодых пациентов из-за плотности тканей молочной же-

лезы, однако в редких случаях может быть использована для оценки размера и распространенности опухоли [12]. Крайне информативным визуализационным методом обследования является магнитно-резонансная томография (МРТ). МР-картина при ювенильной фиброаденоме аналогична таковой при простой фиброаденоме. Сигналы от опухоли на Т1-взвешенных изображениях гипоизоинтенсивны, тогда как на Т2-взвешенных изображениях обычно гиперинтенсивны, что связано с гиперцеллюлярностью, при внутривенном контрастировании визуализируются неконтрастирующиеся внутренние гипоинтенсивные септы [12].

Для постановки окончательного диагноза в обязательном порядке показано выполнение биопсии с последующим гистологическим исследованием. Данный тип опухоли характеризуется наличием плотной стромальной ткани и эпителиальных структур, часто с наличием гладко очерченных, хорошо дифференцированных клеток и, зачастую, периканаликулярным ростом [13,14]. Морфологическая оценка позволяет подтвердить диагноз и исключить злокачественные изменения.

Лечение ювенильной фиброаденомы молочной железы зависит от размера, симптомов и общего состояния пациента. Основными методами являются хирургическое вмешательство и наблюдение. Наиболее эффективным и радикальным методом лечения является хирургическое удаление опухоли. Быстрый рост опухоли, размеры более 5 см являются показаниями к радикальному хирургическому лечению. Как правило, для достижения радикального объема операции достаточно проведения секторальной резекции в пределах здоровой ткани [15, 16]. В случае рецидива или сложного неоднородного строения опухоли может потребоваться обширная резекция, в том числе с последующей реконструкцией для достижения оптимального косметического результата [17]. Как правило, фиброаденомы небольшого размера (до 5 см), имеют бессимптомный характер лечения, кроме того, в 10–59 % случаев может наблюдаться регресс небольших ювенильных фиброаденом — для таких пациентов может быть избрана стратегия наблюдения [18, 19]. В этих случаях пациентам рекомендуется регулярные ультразвуковой контроль и физикальный осмотр. В целом, такой подход может быть оправдан при фиброаденомах небольших размеров без признаков злокачественного роста.

Прогноз при ювенильной фиброаденоме молочной железы как правило благоприятный. В большинстве случаев, после успешного удаления опухоли не наблюдается рецидивов, при этом качество жизни пациенток после операции не снижается [20]. Важно, чтобы пациентки находились под регулярным медицинским наблюдением для раннего выявления возможных рецидивов и оценки состояния молочных желез.

Клинический случай

Представленный ниже случай публикуется в соответствии с критериями CARE (D.S. Riley et al., 2017г.)

Пациентка В., 14 лет в июне 2024 года самостоятельно пальпаторно выявила у себя узловое образование в правой молочной железе. При физикальном обследовании правая молочная железа субтотально замещена опухолью плотной консистенции, приблизительными размерами 9*8*5 см (Рисунок 1).

По данным ультразвукового исследования молочных желез, выявлено новообразование правой молочной

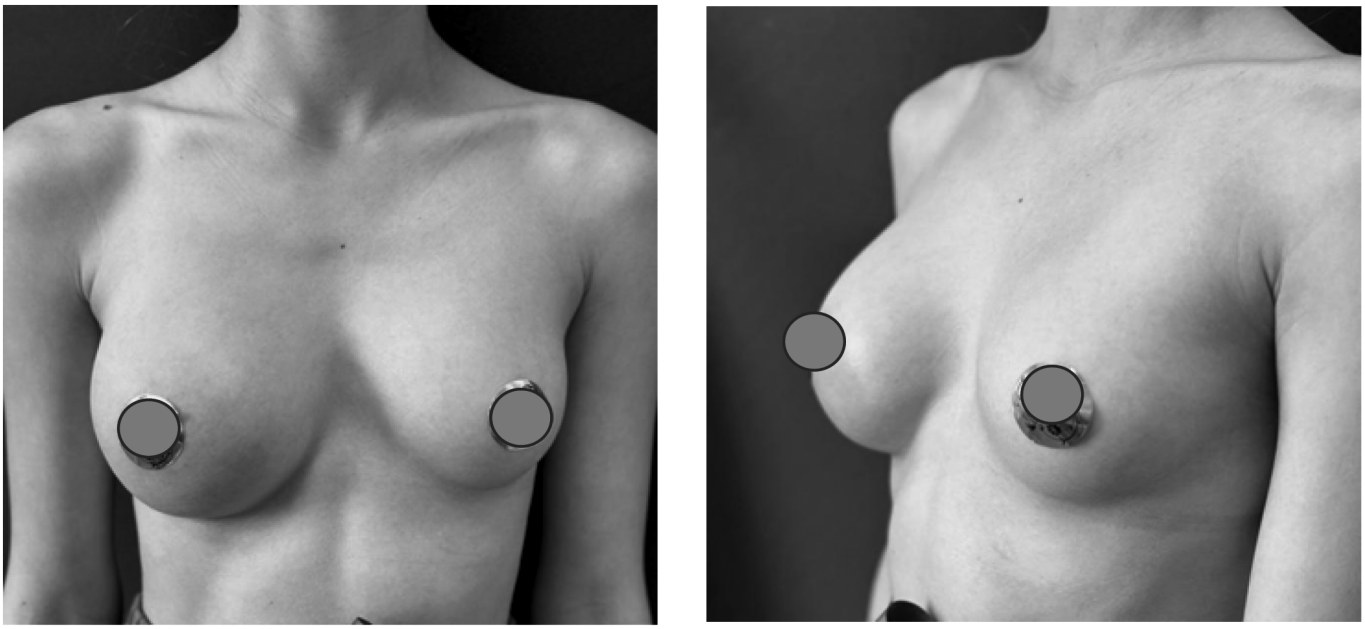


Рис. 1. Фотография до операции

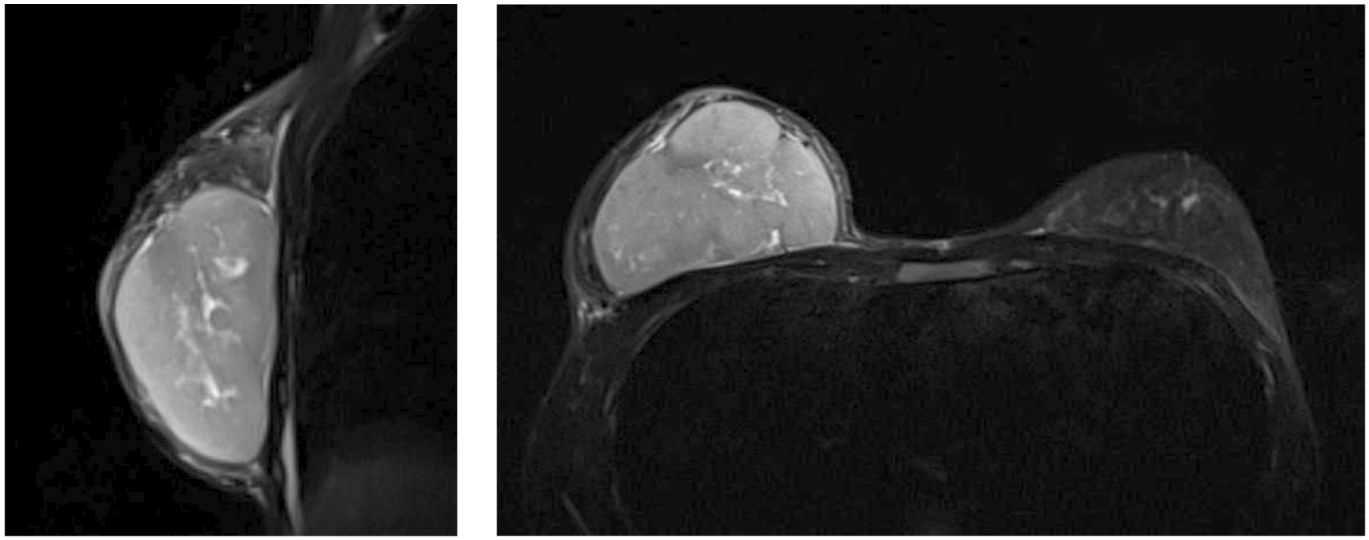


Рис. 2. МРТ-картина до операции

железы овально-вытянутой формы, с четкими, ровными контурами, размером 67х31мм, васкуляризация новообразования незначительна. По данным УЗИ увеличения регионарных лимфоузлов отмечено не было. Дополнительно пациентке была выполнена магнитно-резонансная томография молочных желез с внутривенным контрастированием (Рисунок 2), по данным которой молочная железа субтотально замещена объёмным образованием, размером 95х87х56мм, слабо накапливающее контрастное вещество, что наиболее вероятно соответствует фиброаденоме. Аксиллярные лимфоузлы не увеличены. Выполнена трепанационная биопсия новообразования, по данным которой оно было верифицировано как ювенильная фиброаденома правой молочной железы.

В июле 2024 года пациентке была выполнена секторальная резекция молочной железы через субмаммарный доступ (Рисунок 3,4).

Рис. 3. Интраоперационная картина

По данным макроскопического исследования опухолевого материала определялся серый дольчатый узел в капсуле 10,5х9,5×5,5 см (Рисунок 5). На разрезе серый,

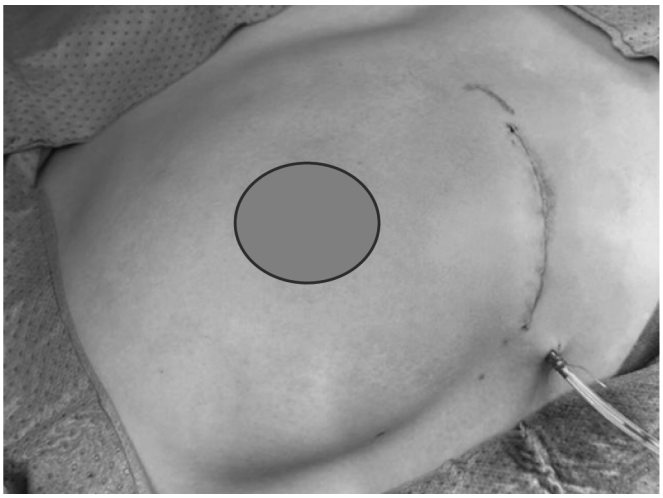


Рис. 4. Интраоперационная картина

Рис. 5. Опухоль, препарат

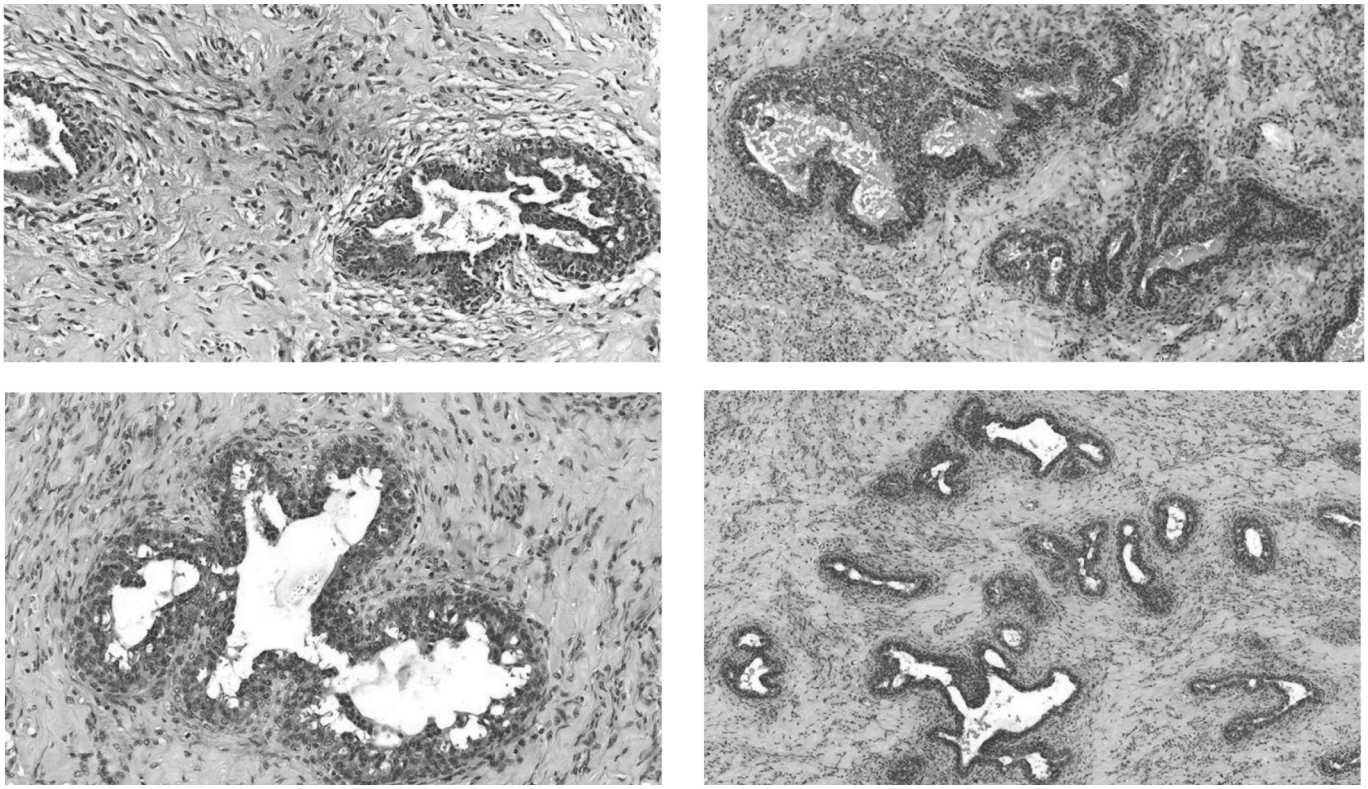


Рис. 6. Гистологическая картина опухоли

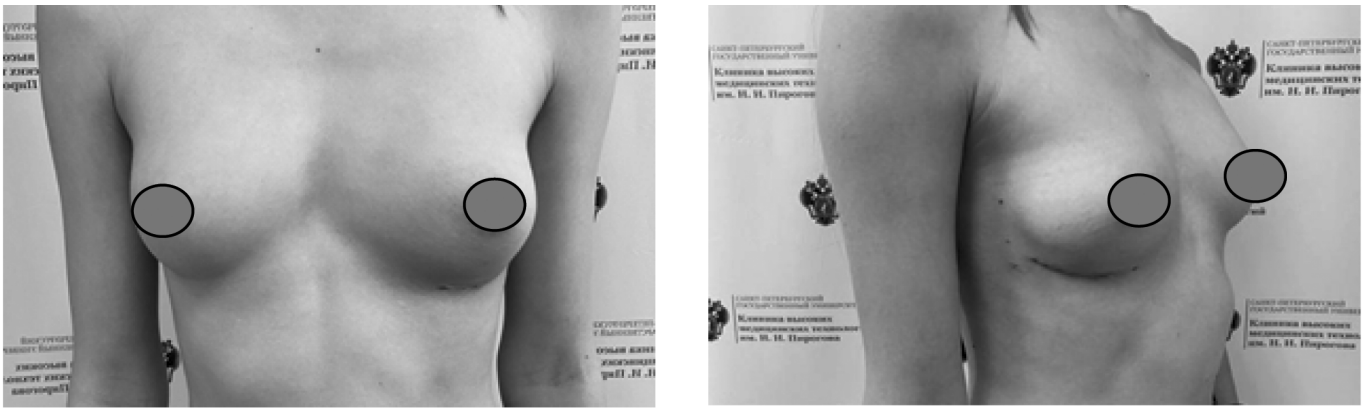


Рис. 7. Через месяц после операции

волокнистый. Капсула не повреждена. По данным гистологического исследования выявлена бифазная опухоль, с фиброзным стромальным компонентом, преимущественно, периканаликулярным; с очаговым миксоидным отеком, без митотической активности; протоковый компонент с очаговой типичной гиперплазией. В строме очаговый слабый лимфоцитарный компонент (Рисунок 6).

Послеоперационный период протекал гладко, без осложнений и на 3-и сутки после операции пациентка в удовлетворительном состоянии была выписана на амбулаторное лечение. Рана заживала удовлетворительно, первичным натяжением. К моменту контрольного осмотра через месяц после операции симметричность молочных желез практически была восстановлена (Рисунок 7).

Обсуждение

На сегодняшний день в мировой литературе представлено ограниченное количество данных о лечении гигантских ювенильных фиброаденом, при этом для корректного лечения данной патологии требуется особенно тщательный подход в отношении определения тактики лечения и диагностики. В большинстве случае выявления данного заболевания требуется проведение дифференциальной диагностики с такими патологиями как филлоидная опухоль, гипертрофия молочных желез, абсцесс молочной железы, киста молочной железы, липома, гамартома и аденокарцинома. Правильная постановка диагноза является ключевым моментом для определения дальнейшей тактики лечения, от которой будет впоследствии зависеть прогноз и адекватное про-

должение развития молочных желез. И так как варианты лечения и прогнозы для всех этих заболеваний различны, хирург должен быть абсолютно уверен в корректности установленного диагноза перед началом лечения, так как от этого будет зависеть не только краткосрочный результат лечения, но и адекватное продолжение развития молочных желез в будущем. В представленном клиническом случае 14-летняя девочка обратилась с гигантской ювенильной фиброаденомой в правой молочной железе, которая была диагностирована до операции с помощью УЗИ, МРТ и трепанационной биопсии с гистологическим исследованием. Эта быстрорастущая опухоль не только доставляла дискомфорт ребенку, но и наносила ей психологический и эмоциональный вред из-за ее внешнего вида. Такая большая опухоль сдавливает и искажает нормальную архитектуру груди, что приводит к нарушению её развития. Таким образом, лечение данного заболевания было направлено не только на радикальное удаление опухоли, но и на сохранение как можно большего количества ткани молочной железы для будущего нормального развития. Кроме того, перед командой врачей стояла задача сделать результат операции косметически приемлемым. Диагностическое обследование, давшее полную оценку клинических и анамнестических данных, включая визуализационные методы исследования и патоморфологическое исследование, является основой для правильного диагноза и выбора оптимальной тактики лечения. хирургический метод лечения данного заболевания с последующим регулярным наблюдением. Накопление клинического опыта, совершенствование диагностических технологий и лечебных подходов способствуют развитию клинических подходов к лечению заболевания, а также улучшению прогноза и качества жизни пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee E.J., Chang Y.-W., Oh J.H., Hwang J., Hong S.S., Kim H.-J. Breast Lesions in Children and Adolescents: Diagnosis and Management. Korean J. Radiol. 2018; 19:978–991. doi: 10.3348/kjr.2018.19.5.978.
2. Jayasinghe Y., Simmons P.S. Fibroadenomas in adolescence. Curr. Opin. Obstet. Gynecol. 2009; 21:402–406.
3. Schnitt S.J., Collins L.C. Pathology of benign breast disorders. In: Harris J.R., Lippman M.E., Morrow M., Osborne C.K., editors. Diseases of the Breast. 4th ed. Wolters Kluwer-Lippincott Williams & Wilkins; Philadelphia, PA, USA: 2010. p. 69.
4. Nikumbh D.B., Desai S.R., Madan P.S., Patil N.J., Wader J.V. Bilateral giant juvenile fibroadenomas of breasts: A case report. Patholog Res Int. 2011; 2011:482046.
5. Roveda Júnior D., Badan G.M., Campos M.S.D.D.A., Maragno B., Pessanha L.B. Juvenile fibroadenoma. Radiol Bras. 2018;51(2):136–137. doi:10.1590/0100-3984.2016.0162.
6. de Vasconcelos Gaspar A., Melo L., Geraldes F., Belo J., Águas F. Breast pathology in adolescence. Breast Dis. 2021;40(4):269–274. doi:10.3233/BD-201043.
7. Mubarak F., Malick A., Sattar A.K. Breast development and disorders in children and adolescents. Curr Probl Pediatr Adolesc Health Care. 2023;53(7):101441. doi: 10.1016/j.cppeds.2023.101441.
8. Ezer S.S., Oguzkurt P., Ince E., Temiz A., Bolat F.A., Hicsonmez A. Surgical treatment of the solid breast masses in female adolescents. J Pediatr Adolesc Gynecol. 2013;26(1):31–35. doi: 10.1016/j.jpag.2012.09.004.
9. Mareti E., Vatopoulou A., Spyropoulou G.A., et al. Breast Disorders in Adolescence: A Review of the Literature. Breast Care (Basel). 2021;16(2):149–155. doi:10.1159/000511924.
10. Kim S.J., Park Y.M., Jung S.J., et al. Sonographic appearances of juvenile fibroadenoma of the breast. J Ultrasound Med. 2014; 33:1879–84.
11. Goel N.B., Knight T.E., Pandey S., Riddick-Young M., de Paredes E.S., Trivedi A. Fibrous lesions of the breast: imaging-pathologic correlation. Radiographics. 2005;25(6):1547–1559. doi:10.1148/rg.256045183.
12. Zhang M., Compton L., Hwang H., Hayes J.C. Radiologic-Pathologic Correlation of Fibroepithelial Lesions: A Pictorial Review. J Breast Imaging. 2022;4(5):513–519. doi:10.1093/jbi/wbac026.
13. Lerwill M.F., Lee A.H.S., Tan P.H. Fibroepithelial tumours of the breast-a review. Virchows Arch. 2022;480(1):45–63. doi:10.1007/s00428-021-03175-6.
14. Zmora O., Klin B., Iacob C., Meital A., Mendlovic S., Karni T. Characterizing excised breast masses in children and adolescents-Can a more aggressive pathology be predicted? J Pediatr Surg. 2020;55(10):2197–2200.
15. Zhang M., Arjmandi F.K., Porembka J.H., et al. Imaging and Management of Fibroepithelial Lesions of the Breast: Radiologic-Pathologic Correlation. Radiographics. 2023;43(11): e230051. doi:10.1148/rg.230051.
16. Ng W.K., Mrad M.A., Brown M.H. Juvenile fibroadenoma of the breast: treatment and literature review. Can J Plast Surg. 2011; 19:105-7.
17. Sosin M., Pulcrano M., Feldman E.D., et al. Giant juvenile fibroadenoma: a systematic review with diagnostic and treatment recommendations. Gland Surg. 2015; 4:312–21.
18. Jayasinghe Y., Simmons P.S. Fibroadenomas in adolescence. Curr Opin Obstet Gynecol. 2009; 21:402-6.
19. Greenberg R., Skornick Y., Kaplan O. Management of breast fibroadenomas. J Gen Intern Med. 1998; 13:640-5.
20. Eleftheriades A., Tsarna E., Toutoudaki K., et al. Giant Juvenile Fibroadenoma: Case Report and Review of the Literature. J Clin Med. 2023;12(5):1855. doi:10.3390/jcm12051855.

© Ахмедов Руслан Мерзиалиевич (Little-doctor1989@yandex.ru); Бит-Сава Елена Михайловна (bit-sava@mail.ru);
Иванов Дмитрий Олегович (gpmu_priem@mail.ru); Белоусов Александр Михайлович (info@aleksandrbelousov.ru);
Дашян Гарик Альбертович; Лазакович Алина Алексеевна; Шайхелисламова Ляйсан Фидагиевна
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.11

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ПАЛЛИАТИВНОЙ РАДИОТЕРАПИИ: РОЛЬ ГЕНЕТИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ У БОЛЬНЫХ С КОСТНЫМИ МЕТАСТАЗАМИ

PERSONALIZED APPROACH TO PALLIATIVE RADIOTHERAPY: THE ROLE OF GENETIC MARKERS IN PATIENTS WITH BONE METASTASES

M. Dankov
V. Provolukin

Summary. *Goal*. To determine the role of genetic markers in predicting the effectiveness of palliative radiotherapy in patients with bone metastases.
Materials and methods. A prospective randomized trial conducted at the Republican Cancer Center in Makhachkala (September 2023 — February 2025) included 26 patients with symptomatic bone metastases. All patients underwent a single palliative radiotherapy at a dose of 8 Gy; pain syndrome was assessed according to the BPI scale, and new generation sequencing (Oncomine Focus) was used for genetic analysis. Statistical processing included the χ2-test, the Cochran–Mantel–Hensel method, and multivariate modeling using LASSO.
Results. A complete or partial response to therapy was noted in 34.6 % of patients, while 37 variants were identified that were statistically significantly associated with radiosensitivity. The variants of the TNFRSF11B, XRCC2, and CDH11 genes made the greatest contribution to the prognosis, which is consistent with the pathogenetic mechanisms of DNA repair and bone remodeling.
Conclusions. Genetic markers can serve as a reliable tool for patient stratification and individualization of palliative radiotherapy, which opens prospects for a personalized approach in oncology. The results indicate the need to include molecular genetic profiling in clinical decision-making algorithms. The introduction of such approaches will optimize the choice of therapy, increase the effectiveness of treatment, and reduce the risk of complications. Our data can serve as a basis for the development of national recommendations on the integration of genetic markers into the practice of palliative radiotherapy.

Keywords: palliative radiotherapy, bone metastases, genetic markers, personalized approach, treatment prognosis.

Данков Максим Валерьевич
ФГБОУ ВО Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
dankovmaksim5@gmail.com
Проволукин Владимир Евгеньевич
ФГБОУ ВО Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко
provolukin.vova@mail.ru

Аннотация. *Цель*. Определить роль генетических маркеров в прогнозировании эффективности паллиативной радиотерапии у пациентов с костными метастазами.
Материалы и методы. В проспективное рандомизированное исследование, проведённое в Республиканском онкологическом центре г. Махачкала (сентябрь 2023 — февраль 2025), были включены 26 пациентов с симптомными костными метастазами. Всем пациентам проведена однократная паллиативная радиотерапия дозой 8 Гр; оценка болевого синдрома выполнялась по шкале BPI, а для генетического анализа использовано секвенирование нового поколения (Oncomine Focus). Статистическая обработка включала χ^2-тест, метод Кокрана–Мантела–Хензеля и многофакторное моделирование с применением LASSO.
Результаты. Полный или частичный ответ на терапию отмечен у 34,6 % пациентов, при этом выявлено 37 вариантов, статистически значимо связанных с радиочувствительностью. Наибольший вклад в прогноз оказали варианты генов TNFRSF11B, XRCC2 и CDH11, что согласуется с патогенетическими механизмами репарации ДНК и костного ремоделирования.
Выводы. Генетические маркеры могут служить надёжным инструментом для стратификации пациентов и индивидуализации паллиативной радиотерапии, что открывает перспективы персонализированного подхода в онкологии. Полученные результаты указывают на необходимость включения молекулярно-генетического профилирования в алгоритмы клинического принятия решений. Внедрение таких подходов позволит оптимизировать выбор терапии, повысить эффективность лечения и снизить риск осложнений. Наши данные могут послужить основой для разработки национальных рекомендаций по интеграции генетических маркеров в практику паллиативной радиотерапии.

Ключевые слова: паллиативная радиотерапия, костные метастазы, генетические маркеры, персонализированный подход, прогноз лечения.

Введение

Паллиативная радиотерапия традиционно занимает важное место в лечении пациентов с метастатическим поражением костей, так как позволяет существенно снизить выраженность болевого синдрома, предупредить развитие патологических переломов и улучшить качество жизни больных [1]. Однако существующие подходы к облучению в большинстве случаев носят стандартизированный характер и не учитывают индивидуальные особенности течения опухолевого процесса. В связи с этим всё более актуальным становится переход к персонализированной медицине, где особое внимание уделяется молекулярно-генетическим факторам, способным влиять на чувствительность пациентов к терапии [2–4].

Костные метастазы представляют собой одну из наиболее серьёзных проблем современной онкологии. Их появление сопровождается тяжёлыми осложнениями — патологическими переломами, компрессией спинного мозга, выраженным болевым синдромом и развитием гиперкальциемии, что не только ухудшает качество жизни, но и значительно утяжеляет прогноз заболевания [5–6]. По данным клинических наблюдений, именно кости являются наиболее частой мишенью метастазирования большинства солидных опухолей, особенно при раке молочной железы и предстательной железы [7–10]. Так, у больных распространённым раком молочной железы метастазы в костях выявляются примерно в 75 % случаев, при этом медиана выживаемости варьирует от 12 до 53 месяцев в зависимости от клинического течения заболевания и характера проводимого лечения [3,11]. Важно отметить, что структура костных метастазов при РМЖ может быть смешанной и включать как остеолитические, так и остеобластические компоненты.

Если рассматривать проблему в более широком масштабе, то ежегодно в мире фиксируются сотни тысяч новых случаев костного метастазирования, что делает её одной из глобальных медицинских и социальных задач [12]. В Российской Федерации также наблюдается устойчивая тенденция к росту онкологической заболеваемости, а вместе с ней увеличивается и число пациентов с костными метастазами [2]. Это ещё раз подтверждает необходимость поиска новых подходов к лечению и мониторингу таких больных.

В настоящее время в клинической практике широко применяются бисфосфонаты и анти-RANKL антитела (деносумаб), которые позволяют снижать риск осложнений и продлевать жизнь пациентам. Однако данные методы не решают вопроса индивидуализации терапии, так как не учитывают молекулярные особенности опухоли и костной микросреды [7]. Именно поэтому усилия исследователей сосредоточены на поиске генетических и биомолекулярных маркеров, способных не только прогнозировать риск костного метастазирования, но и определять тактику лечения. Уже сегодня имеются данные о том, что амплификация гена MAF связана с высоким риском поражения костей, а экспрессия белков CAPG, GIPC1 и DOCK4 может играть ключевую роль в развитии метастатического процесса [10]. Кроме того, перспективным направлением является изучение циркулирующих продуктов ремоделирования костного матрикса, включая С-терминальный пропептид коллагена I типа, а также микро-РНК, регулирующих взаимодействие опухолевых клеток и костной микросреды [9]. Последние рассматриваются как потенциальные неинвазивные биомаркеры, позволяющие раннее выявление и более точное прогнозирование течения болезни.

Таким образом, всё вышесказанное подчёркивает актуальность перехода от стандартных схем паллиативной радиотерапии к персонализированным подходам, основанным на молекулярно-генетическом профиле пациента. Это открывает перспективу не только для повышения эффективности лечения, но и для снижения риска осложнений, улучшения качества жизни и увеличения продолжительности выживаемости. В этой связи цель настоящего исследования заключается в изучении роли генетических маркеров у пациентов с костными метастазами для разработки персонализированных стратегий паллиативной радиотерапии.

Материалы и методы

В проспективное рандомизированное исследование, проведённое в Республиканском онкологическом центре г. Махачкала в период с сентября 2023 г. по февраль 2025 г., были включены пациенты с симптомными костными метастазами. Все участники исследования получали однократную паллиативную радиотерапию в дозе 8 Гр с целью облегчения болевого синдрома. Перед включением все участники подписали информированное согласие. Оценка болевого синдрома проводилась с помощью опросника Brief Pain Inventory (BPI), где фиксировались максимальные значения боли по шкале от 0 до 10, а также ежедневное потребление опиоидных анальгетиков. Пациенты заполняли дневники в течение первых 14 дней после облучения и дополнительно на 6-й и 8-й неделях наблюдения, что позволило более детально проследить динамику болевого ответа. Классификация эффективности терапии осуществлялась в соответствии с критериями Международной рабочей группы по костным метастазам, где пациенты с полным или частичным ответом считались респондерами.

Для генетического анализа у всех участников были собраны образцы периферической крови в день проведения ЛТ. Секвенирование нового поколения выполнялось с использованием панели Oncomine Focus (Thermo Fisher Scientific), охватывающей более 4 тысяч клинически значимых генов. Выравнивание данных проводилось с помощью инструмента Bowtie2, а вариации определялись с применением пакета Strelka2, после чего аннотация вариантов выполнялась в программе VEP (Variant Effect Predictor). Дополнительно для контроля качества использовалась программа FastQC, а фильтрация артефактов проводилась в соответствии с обновлёнными принципами GATK Best Practices.

Для статистического анализа ассоциации генетических вариантов с клиническим ответом применялся χ^2-тест и метод Кокрана–Мантела–Хензеля, а для построения многофакторных моделей — пакет R (glmnet) с использованием регуляризации LASSO. Каждый SNV кодировался в аддитивной модели (0, 1 или 2), после чего формировался интегральный прогностический индекс ответа на терапию. На его основе пациенты были

разделены на три подгруппы риска: низкую, промежуточную и высокую, что позволило выявить значимые различия в вероятности достижения обезболивающего эффекта к 8-й неделе лечения.

Результаты

В таблице (табл. 1) представлены исходные демографические и клинические характеристики 26 пациентов, включённых в исследование. Средний возраст участников составил 68 лет, а межквартильный размах находился в пределах от 55 до 74 лет. Женщины составили 38,5 % когорты, тогда как мужчины — 61,5 %. Наиболее частым первичным очагом опухоли была предстательная железа (34,6 %), далее следовали молочная железа (26,9 %) и лёгкие (19,2 %).

Таблица 1.

Исходные характеристики пациентов

Характеристика	Значение
Количество пациентов	26
Медиана возраста (Межквартильный размах)	68 лет (55–74)
Женщины	38,5 %
Мужчины	61,5 %
Первичный рак: предстательная железа	34,6 %
Первичный рак: молочная железа	26,9 %
Первичный рак: лёгкие	19,2 %
Шкала Карновского (наиболее частый диапазон)	70–80
Исходная интенсивность боли	7–10 баллов
Локализация ЛТ: таз/бедро	38,5 %
Локализация ЛТ: рёбра/грудина/ключица	26,9 %
Локализация ЛТ: пояснично-крестцовый отдел	19,2 %
Ответившие на ЛТ	9 (34,6 %)
Не ответившие на ЛТ	17 (65,4 %)

Большинство больных имели показатель по шкале Карновского в пределах 70–80 баллов, что указывало на умеренное ограничение жизненной активности. По интенсивности исходного болевого синдрома преобладали высокие значения: от 7 до 10 баллов по числовой рейтинговой шкале. Чаще всего паллиативное облучение проводилось в области таза и бедренных костей (38,5 %), реже — в области рёбер, грудины или ключицы (26,9 %), а также в пояснично-крестцовом отделе позвоночника (19,2 %).

Из 26 пациентов, вошедших в исследование, положительный ответ на паллиативную радиотерапию продемонстрировали 9 человек (34,6 %). Остальные 17 пациентов (65,4 %) либо не продемонстрировали значимого снижения боли, либо имели лишь минимальный эффект.

Полное экзомное секвенирование, охватывающее 4 965 генов, позволило выявить 37 вариантов, статистически значимо связанных с ответом на паллиативную радиотерапию при однофакторном анализе (табл. 2).

Таблица 2.

Варианты, ассоциированные с ответом на паллиативную радиотерапию

Ген	Хромосома / позиция	Вариант (SNV/ делеция)	Размер эффекта	P-значение
TNFRSF11B	Chr11:67894521	Делеция	2,34	<0,001
XRCC2	Chr7:22387415	Интронный SNV	2,10	0,0003
CDH11	Chr16:rs351762	Val178Ala	1,95	0,001
CDH11	Chr16:rs352104	Leu402Met	1,82	0,002
PTPRK	Chr6:rs2290012	Синонимичный SNV	1,77	0,004
RLBP1	Chr15:rs1052437	Синонимичный SNV	1,55	0,008

При многофакторной оценке с использованием модели LASSO в итоговый предиктивный набор вошло 12 однонуклеотидных вариантов (SNV). Согласно результатам анализа группы риска по статусу ответа, проведённого с применением χ^2-критерия, было установлено, что в когорте пациентов с высокой прогностической оценкой 84,6 % ответили на лечение ($p < 0{,}001$, Таблица 3). Среди выявленных вариантов наибольший вклад в эффект имела делеция в позиции 67894521 на 11-й хромосоме в области гена TNFRSF11B, кодирующего остеопротегерин, который участвует в регуляции ремоделирования костной ткани; размер эффекта составил 2,34.

Вторым по значимости оказался интронный вариант в положении 22387415 на хромосоме 7, соответствующий гену XRCC2, вовлечённому в механизмы репарации ДНК, что подчёркивает связь между радиочувствительностью и нарушениями в системе восстановления повреждений ($p=0{,}0003$). Кроме того, наша модель выявила два SNV, принадлежащие гену клеточной адгезии CDH11, играющему важную роль в межклеточных взаимодействиях и метастатическом каскаде. Первый из них, rs351762, обусловливал замену аминокислоты в позиции 178 с валина на аланин, а второй, rs352104, вызывал замену в позиции 402 с лейцина на метионин.

Два других варианта имели опубликованные в литературе ассоциации. Так, синонимичный SNV rs2290012 гена PTPRK, кодирующего рецепторную тирозинфосфатазу, ранее связывали с риском развития неходжкинских

лимфом [6]. Этот ген играет ключевую роль в передаче сигнала MAPK, влияющего на клеточную пролиферацию и ангиогенез, и рассматривается как потенциальный ген-супрессор опухолей. Ещё один вариант — rs1052437 в гене RLBP1, участвующем в метаболизме ретиноидов в сетчатке, — был описан Herraiz et al. [8] как фактор риска пигментного ретинита. В то же время исследование Zhang et al. показало [7] его связь с повышенной вероятностью развития болезни Альцгеймера позднего начала, однако достоверность этой ассоциации в последующих работах не подтвердилась.

Таким образом, совокупный анализ показал, что наряду с новыми потенциальными маркерами радиочувствительности, значимость сохраняют и варианты, ранее описанные в контексте других заболеваний, что подчёркивает сложность молекулярных взаимодействий в ответе опухоли на облучение.

Обсуждение

Полученные результаты продемонстрировали, что индивидуальные генетические варианты могут существенно влиять на эффективность паллиативной радиотерапии у больных с костными метастазами. Наши данные согласуются с результатами работы Furfari et al. [9], где также была показана роль генетических маркеров в предсказании ответа на лечение, однако в нашем исследовании значимость имели другие гены, в частности TNFRSF11B и XRCC2. В то время как исследования Herraiz и соавт. [8], выявляли связь PTPRK с лимфомами, мы впервые показали его возможную роль в контексте радиочувствительности при метастазах в кости. Подобные различия могут объясняться как спецификой выборки, так и различиями в используемых методологиях секвенирования и статистического анализа.

Схожесть наших результатов с исследованиями Zhang et al. [7], где PTPRJ рассматривался как ген-супрессор опухолей, подтверждает, что тирозинфосфатазы могут играть важную роль в радиочувствительности опухолей. В то же время отличие от данных Waqar et al. [10], которые не нашли значимости для варианта RLBP1 при болезни Альцгеймера, подчёркивает контекст-зависимость генетических ассоциаций. Таким образом, наши результаты указывают на то, что одни и те же варианты могут иметь различное клиническое значение в зависимости от нозологии и терапевтической ситуации.

Практическая значимость исследования заключается в том, что выявленные маркеры могут использоваться для стратификации пациентов на группы риска и прогнозирования ответа на паллиативное облучение. Это открывает перспективу внедрения персонализированного подхода, при котором выбор режима радиотерапии будет зависеть не только от клинических характеристик, но и от генетического профиля пациента. С учётом ограниченного числа включённых больных рекомендуется проведение многоцентровых исследований с расширенными когортами для подтверждения полученных данных.

Заключение

Проведённое исследование показало, что генетические варианты могут оказывать существенное влияние на эффективность паллиативной радиотерапии у пациентов с костными метастазами. Выявленные маркеры, включая SNV в генах TNFRSF11B, XRCC2 и CDH11, обладают потенциалом для прогнозирования ответа на лечение. Сравнение с литературными данными подтверждает важность интеграции молекулярно-генетических факторов в персонализированный подход. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших многоцентровых исследований для расширения доказательной базы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большакова С.А., Бычков Ю.М. Биомаркеры при метастазах в кости рака молочной железы: современные направления разработки и поиска с целью индивидуализации подходов в лечении / С.А. Большакова, Ю.М. Бычков // Вестник Российского научного центра рентгенорадиологии Минздрава России. — 2021. — Т. 21. — № 4. — С. 1–27.
2. Бычкова Н.М., Хмелевский Е.В. Современные подходы к лучевой терапии метастатических поражений скелета / Н.М. Бычкова, Е.В. Хмелевский // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. — 2019. — Т. 8. — № 4. — С. 295–302.
3. Герасимов В.А., Плавник Р.Н., Даценко П.В. Алгоритм послеоперационной лучевой терапии с предписанной дозой 3 Гр при глиомах высокой степени злокачественности / В.А. Герасимов, Р.Н. Плавник, П.В. Даценко // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. — 2018. — Т. 7. — № 3. — С. 24–31. — DOI: 10.17116/onkolog20187324.
4. Снеговой А.В., Ларионова В.Б., Кононенко И.Б. Различия во взаимодействии с костным микроокружением между солидными опухолями и множественной миеломой: патогенетические аспекты. Возможности и эффективность остеомодифицирующих агентов при множественной миеломе / А.В. Снеговой, В.Б. Ларионова, И.Б. Кононенко // Онкогематология. — 2021. — Т. 16. — № 1. — С. 64–72.
5. Кобылецкая Т.М., Чугуев А.С., Герасимов В.А., Каприн А.Д., Даценко П.В. Ранняя химиотерапия между хирургическим вмешательством и лучевой терапией при глиомах 4-й степени злокачественности / Т.М. Кобылецкая, А.С. Чугуев, В.А. Герасимов, А.Д. Каприн, П.В. Даценко // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. — 2024. — Т. 13. — № 5. — С. 12–17.
6. Notarangelo L.D., Kim M.S., Walter J.E., et al. Human RAG mutations: biochemistry and clinical implications / L.D. Notarangelo, M.S. Kim, J.E. Walter, et al. // Nature Reviews Immunology. — 2016. — Vol. 16. — P. 234–246.

7. Zhang X.F., Tu R., Li K., et al. Tumor Suppressor PTPRJ Is a Target of miR-155 in Colorectal Cancer / X.F. Zhang, R. Tu, K. Li, et al. // Journal of Cellular Biochemistry. — 2017. — Vol. 118. — P. 3391–3400.
8. Herraiz C., Garcia-Borron J.C., Jiménez-Cervantes C., et al. MC1R signaling: intracellular partners and pathophysiological implications / C. Herraiz, J.C. Garcia-Borron, C. Jiménez-Cervantes, et al. // Biochimica et Biophysica Acta. — 2017. — Vol. 1863. — P. 2448–2461.
9. Furfari A., Wan B.A., Ding K., et al. Genetic biomarkers associated with response to palliative radiotherapy in patients with painful bone metastases / A. Furfari, B.A. Wan, K. Ding, et al. // Annals of Palliative Medicine. — 2017. — Vol. 6. — Suppl. 2. — P. S233–S239. — DOI: 10.21037/apm.2017.09.03.
10. Waqar M., Roncaroli F., Lehrer E.J., et al. Rapid early progression (REP) of glioblastoma is an independent negative prognostic factor: results from a systematic review and meta-analysis / M. Waqar, F. Roncaroli, E.J. Lehrer, et al. // Neuro-Oncology Advances. — 2022. — Vol. 4. — № 1. — Article: vdac075. — DOI: 10.1093/noajnl/vdac075.
11. Malmström A., Poulsen H.S., Grønberg B.H., et al. Postoperative neoadjuvant temozolomide before radiotherapy versus standard radiotherapy in patients 60 years or younger with anaplastic astrocytoma or glioblastoma: a randomized trial / A. Malmström, H.S. Poulsen, B.H. Grønberg, et al. // Acta Oncologica. — 2017. — Vol. 56. — № 12. — P. 1776–1785. — DOI: 10.1080/0284186X.2017.1332780.
12. Shenouda G., Souhami L., Petrecca K., et al. A phase 2 trial of neoadjuvant temozolomide followed by hypofractionated accelerated radiation therapy with concurrent and adjuvant temozolomide for patients with glioblastoma / G. Shenouda, L. Souhami, K. Petrecca, et al. // International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. — 2017. — Vol. 97. — № 3. — P. 487–494. — DOI: 10.1016/j.ijrobp.2016.11.006.

© Данков Максим Валерьевич (dankovmaksim5@gmail.com); Проволукин Владимир Евгеньевич (provolukin.vova@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.12

СТРЕСС-ИНДУЦИРОВАННАЯ НЕИШЕМИЧЕСКАЯ КАРДИОМИОПАТИЯ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, СОБСТВЕННОЕ КЛИНИЧЕНСКОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

STRESS-INDUCED NON-ISCHEMIC CARDIOMYOPATHY: LITERATURE REVIEW, OWN CLINICAL OBSERVATION

A. Janibekova
M. Uzdenov
F. Aibazova
L. Janibekova

Summary. For many years, various forms of coronary heart disease (CHD), unlike other forms of cardiovascular diseases (CVD), have been the leading reason for adults to go to medical institutions. The high incidence rates of coronary heart disease and acute coronary syndrome (ACS) are probably also due to the difficulties of differential diagnosis of coronary heart disease, its acute forms with other diseases masquerading as ACS. Stress-induced cardiomyopathy (CMI) is one of such diseases that cardiologists who treat ACS face. According to statistics, stress-induced CMP is diagnosed in 0.7–2.5 % of patients hospitalized with suspected ACS, however, due to the above reasons, the true prevalence is unknown [5]. The results of recent studies have supplemented the information on the epidemiology of CMP and its prevalence. However, this diagnosis is still not always established, which leads to a late diagnosis of the disease. Further research is needed to clarify the factors involved in the early diagnosis of the disease in patients with this pathology.

Keywords: stress-induced cardiomyopathy, takotsubo cardiomyopathy, epidemiology, pathogenesis, echocardiography.

Джанибекова Асият Рамазановна
кандидат медицинских наук,
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
asia.janibekova@mail
Узденов Марат Борисович
кандидат медицинских наук, доцент,
ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
f_inostr_mi@ncsa.ru
Айбазова Фатима Унуховна
кандидат биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
fat8149@yandex.ru
Джанибекова Лейла Рамазановна
кандидат медицинских наук, врач-кардиолог,
«Карачаево-Черкесская республиканская клиническая больница»;
главный внештатный специалист-кардиолог,
Министерства здравоохранения Карачаево-Черкесской Республики;
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
lady.djanibekova@mail.ru

Аннотация. На протяжении многих лет различные формы ишемической болезни сердца (ИБС) в отличие от других форм сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) являются ведущей причиной обращения взрослых в медицинские учреждения. Высокие показатели заболеваемости ИБС и острого коронарного синдрома (ОКС), вероятно, обусловлены также и трудностями дифференциальной диагностики ИБС, ее острых форм с другими заболеваниями, маскирующимися как ОКС. Стресс-индуцированная кардиомиопатия (КМП) относится к числу таких заболеваний, с которым сталкиваются врачи-кардиологи, занимающиеся лечением ОКС. Согласно статистике, стресс-индуцированная КМП диагностируется у 0,7–2,5 % пациентов, госпитализированных с подозрением на ОКС, однако в связи с указанными выше причинами, истинная распространенность неизвестна [5]. Результаты последних исследований дополнили информацию об эпидемиологии КМП, ее распространенности. Однако до сих пор этот диагноз устанавливается не всегда, что приводит к поздней диагностике заболевания. Необходимо дальнейшие исследования для выяснения факторов, участвующих в ранней диагностике заболевания у пациентов с данной патологией.

Ключевые слова: стресс-индуцированная кардиомиопатия, кардиомиопатия такоцубо, эпидемиология, патогенез, эхокардиография.

В последние годы возрос интерес к новым нозологическим формам приобретенной кардиомиопатии. Особой формой которой является стресс-индуцированная кардиомиопатия, известная также как КМП такоцубо (КТ) или синдром «такацубо» (СТ). В научной литературе предложены также и другие дефиниции данного заболевания, например такие как: синдром «разбитого сердца», синдром «транзиторной дисфункции левого желудочка», синдром «раздутого сердца», синдром «апикального баллонирования».

Впервые такая уникальная форма КМП была описана в 1990 г. японскими коллегами H. Sato и соавторами [1]. Своё необычное название «такоцубо» получило от наименования специального кувшина или горшка, который использовали для ловли осьминогов (tako-tsubo дословно в переводе с японского «ловушка для ловли осьминога»). По форме такой кувшин имеет узкое горлышко и широкое основание. Известно, что именно при данном варианте КМП во время эхокардиографии (ЭхоКГ) и вентрикулографии по форме левый желудочек (ЛЖ) у пациентов напоминает данный кувшин. Причинами, приводящими к таким изменениям конфигурации сердца, являются гипокинез или акинезия верхушки ЛЖ при наличии гиперкинеза его базальных отделов. В связи с этим ЭхоКГ играла одну из существенных методов исследования в постановке диагноза КТ наряду с данными ЭКГ, КАГ и клинической картины заболевания.

В 2006 г. нашими зарубежными коллегами согласно классификации Американской ассоциации сердца стресс-индуцированная кардиомиопатия была включена в группу приобретенных первичных кардиомиопатий [23]. В дальнейшем, в 2018 г. «Международный экспертный документ Европейского общества кардиологов» на основании проведенных исследований был дополнен новыми данными по стресс-индуцированной кардиомиопатии [3].

За последние годы наблюдается очевидный рост интереса в медицинском сообществе к данной редко диагностируемой патологии. Вероятно, это обусловлено сходством по клинической картине с инфарктом миокарда (ИМ) и острым коронарным синдромом (ОКС) а также настораживающий развитием весьма неблагоприятных, а иногда и с высоким риском для жизни, осложнений [4].

Установлено, что в 20 % случаев у пациента развиваются такие осложнения как: сердечная недостаточность, нарушения ритма и проводимости, кардиоэмболический вариант инсульта. Рядом некоторых исследователей выявлено, что полное клиническое выздоровление может наблюдаться в 95,9 % случаев, а случаи летального исхода по разным данным составляют 1–3,2 % [5, 6].

Эпидемиология

В настоящее время нет точных данных о распространенности данной патологии. В то же время, согласно показателям статистики по данным различных регистров заболевание диагностируется у 1,0–2,5 % пациентов, госпитализированных с подозрением на острый коронарный синдром [3,7]. Также имеются данные, что КТ гораздо чаще встречается у женщин, чем у мужчин, особенно в период менопаузы. Существует мнение, что женщины более уязвимы из-за меняющегося гормонального фона в данный период. По данным Murakami T., Yoshikawa T. риск развития заболевания у женщин старше 55 лет в 4,8 раз выше, чем у лиц более молодого возраста [8]. К сожалению, в настоящее время появляются и данные о выявлении случаев КМП и у детей. По мнению некоторых исследователей это связанно с «незрелостью» функции надпочечников вплоть до подросткового периода и как следствие некорректный ответ на стресс [9,10]. Существует гипотеза о генетической предрасположенности к КТ, однако эти данные противоречивы и требуется проведение дальнейших исследований и более углубленного изучения [11,12].

Патогенез

Сегодня существует ряд теорий патогенеза КТ, к числу которых относится повышенная симпатоадреналовая активность, спазм коронарных микрососудов, прямое негативное влияние избытка катехоламинов (КХ) на миокард, а также опосредованное негативное влияние через ß-1 рецепторы миокарда. Немало важная роль принадлежит также вегетативному дисбалансу, оксидативному стрессу, воспалительным и метаболическим нарушениям в миокарде [13]. Этиологическими факторами возникновения КТ могут выступать стресс как эмоциональный, так и физический, переохлаждение. Описаны случаи развития данного состояния вследствие травмы, инвазивных манипуляции в том числе хирургических методов лечения, беременности и т.д. [14,15]. Согласно провоцирующим факторам, существует также этиологическая классификация КТ, которая подразделяется на первичный и вторичный варианты. Причиной развития первого варианта является стресс, при этом заболевание развивается остро, и пациенты госпитализируются с подозрением на ОКС или ТЭЛА. Список нескольких причин вторичной КТ представлен в таблице 1, и он постоянно пополняется.

Клиническая картина

Клиническая картина СТ может проявляться следующими синдромами: острая загрудинная боль, одышка, тахикардия, а также симптомами расстройства мозгового кровообращения в виде эпизодов синкопэ, тошноты, рвоты, головокружения, тревоги, повышенной потливости [16].

Таблица 1.
Основные причины развития вторичного СТ

Причины	Клинические признаки
Эндокринные	Феохромоцитома, тиреотоксикоз, гипотиреоз, болезнь Аддисона, гипонатриемия, синдром Пархона, синдром Сиппла
Неврологические и нейрохирургические	Субарахноидальное кровоизлияние, черепно-мозговая травма, спинальная травма, судорожный синдром, ишемический инсульт, myastheniagravis, синдром задней обратимой лейкоэнцефалопатии, энцефалит, синдром Гийена–Барре
Респираторные	Тромбоэмболия легочной артерии, пневмоторакс, обострение бронхиальной астмы или хронической обструктивной болезни легких
Акушерские	Самопроизвольное патологическое прерывание беременности, роды, операция кесарева сечения по экстренным показаниям
Психиатрические	Панические атаки, попытка самоубийства, синдром отмены наркотиков, электросудорожная терапия
Желудочно-кишечные	Острый холецистит, печеночная колика, рвота, диарея, псевдомембранозный колит, перитонит
Инфекционные	Сепсис, бабезиоз (пироплазмоз)
Кардиологические	Стресс Эхо КГ с использованием добутамина, радиочастотная абляция, имплантация электрокардиостимулятора, электрическая кардиоверсия; синдром такоцубо, развившийся после остановки сердца, включая желудочковую тахикардию

Диагностика КТ

За последние годы произошли значимые изменения в понимании причинно-следственной связи и соответственно в диагностике КТ. Сегодня существует рабочая шкала стратификации риска КТ, разработанная Комитетом экспертов Европейского общества, которую необходимо учитывать при алгоритме диагностики КТ, и она отражена в экспертном документе по КТ (InterTAK, 2018) (табл. 2) [17].

В результате суммации полученных баллов определяется степень вероятности развития КТ.

Помимо указанной выше шкалы стратификации риска в экспертном документе по КТ (InterTAK, 2018) представлена классификация КТ по классам, отраженная в таблице 3.

Актуальными в настоящее время являются обновленные международные критерии диагностики КТ (Inter TAK DiagnosticCriteria, 2018), представленные следующим образом.

Таблица 2.
Шкала стратификации риска CTInterTAK (2018)

Показатель	Баллы
Женский пол	25
Эмоциональный стресс	24
Физический стресс	13
Отсутствие депрессии сегмента ST на ЭКГ	12
Психические нарушения	11
Неврологические нарушения	9
Удлинение интервала Q–T	6
Интерпретация:	>70 баллов — вероятность СТ низкая/промежуточная; <70 баллов — вероятность СТ высокая.

Таблица 3.
Классификация КТ по классам

Класс КТ	Триггерные факторы
Класс I:	СТ в связи с эмоциональным стрессом
Класс II:	СТ в связи с физическим стрессом
Класс IIa:	СТ после физической активности, медицинских вмешательств или процедур
Класс IIb:	СТ после неврологических осложнений
Класс III:	СТ без выявленного пускового фактора

1. Транзиторная дисфункция миокарда ЛЖ в виде гипо-, а- или дискинезии, с баллонированием верхушки, срединных, базальных или локальных участков. Может вовлекаться правый желудочек. Возможны переходы между разными типами движения стенок. Зона нарушения сократимости обычно крупнее зоны кровоснабжения одной коронарной артерии, но иногда может соответствовать ей (локальный СТ).
2. Пусковым механизмом, предшествующим развитию СТ, может оказаться эмоциональный, физический или комбинированный стресс.
3. Неврологические нарушения (субарахноидальное кровоизлияние, инсульт, транзиторная ишемическая атака или судороги), феохромоцитома могут стать пусковым механизмом СТ.
4. Наблюдаются новые нарушения ЭКГ (элевация/депрессия сегмента ST, инверсия зубца T и удлинение интервала Q–Tc); редко изменения на ЭКГ отсутствуют.
5. Умеренно повышены уровни биомаркёров (тропонины и креатинкиназа); содержание МНУП (BNP

или NT-proBNP) в сыворотке крови часто значительно увеличено.
6. СТ не противоречит значительное поражение коронарных артерий.
7. Для исключения инфекционного миокардита и подтверждения диагноза СТ рекомендуется проведение МРТ сердца.
8. Заболевают преимущественно женщины в постменопаузе [3,5].

Инструментальным методом диагностики при КТ являются Эхо-КГ (оценка сократимости и локальных нарушений), КАГ (для исключения ОКС, ОИМ), вентикулография, компьютерной томографии (ангиографии) сердца с контрастированием, возможно использование магнитно-резонансной томографии сердца (для исключения острого миокардита и подтверждения диагноза КТ), эмиссионная компьютерная томография (при условии стабильного состояния больного), перфузионнаясцинтиграфия. Так, например, одним из важнейших неинвазивных инструментальных методов диагностики стресс-индуцированной КМП является Эхо-КГ. В соответствии с ультразвуковой картиной отмечается дилатация левого желудочка, снижение систолической функции и нарушение диастолической функции преимущественно по рестриктивному типу, также отмечаются зоны гипокинезия миокарда сегментах левого желудочка [18,19].

Лечение

Специальных методов лечения КМП такоцубо на сегодняшний день не определено, поэтому лечение направлено на восстановление систолической функции ЛЖ и включает ингибиторы АПФ, β-блокаторы, антиагреганты, диуретики и антагонисты Ca^{2+} кальция [20,21,22].

В целом, заболевание характеризуется благоприятным прогнозом и 2/3 пациентов имеют нормальную продолжительность жизни с относительно низким уровнем осложнений и общей смертности вследствие причин, обусловленных ГКМ [3, 4]

Клинический случай

Больная А., 53 лет, экономист, доставлена 16 июня 2025 г. в отделение неотложной кардиологической помощи бригадой Скорой медицинской помощи с диагнозом: «ОКС с подъемом сегмента ST». При поступлении пациентка отмечала жалобы на пекущие боли в области сердца с иррадиацией в спину, ощущение нехватки воздуха в покое, слабость, потливость.

Из анамнеза заболевания: Появление симптомов связывает с перенесенным стрессом. По прошествии суток после стресса почувствовала резкую нарастающую боль в груди на протяжении более 3 часов. Самостоятельно принимала ибупрофен, валилол, однако боль не купировалась. В связи с этим обратилась за медицинской помощью в скорую медицинскую помощь (СМП). После приёма двух доз нитратов болевой синдром сохранялся. Из анамнеза также известно, что ранее аналогичных болей в области сердца не отмечала, и такое состояние возникло впервые. Около 5 лет страдает артериальной гипертонией в связи, с чем регулярно принимает ингибитор АПФ, тиазидный диуретик, пероральный антиагрегант. В анамнезе: язвенная болезнь антрального отдела желудка, ассоциированная с Helicobacter Pylori. Последнее обострение отмечалось в марте текущего года, по поводу чего успешно была проведена эрадикационная терапия первой линии.

При поступлении в отделение неотложной кардиологии состояние средней степени тяжести. Кожные покровы и видимые слизистые обычной окраски, чистые. Сознание ясное. В легких дыхание везикулярное, хрипы не выслушиваются, частота дыхательных движений 22 в мин. Тоны сердца ритмичны, приглушены. Патологических шумов нет. АД 115/70 мм.рт.ст. Ps=ЧСС 98 уд/мин. Глотание не затруднено. Язык влажный, не обложен налетом. Живот мягкий, безболезненный. Печень и селезенка не пальпируются. Память сохранена. Менингеальных знаков нет. В позе Ромберга устойчив. Состояние чувствительной сферы без изменений. Поясничная область при поколачивании безболезненная. Периферических отеков нет. Физиологические отправления в норме.

Клинический анализ крови: Hb-128 г/л, лейкоциты $7{,}8*10^9$/л, эритроциты — $4{,}7*10^{12}$/л, тромбоциты — $389*10^9$/л. Лейкоформула без особенностей.

Коагулограмма: протромбин — 1,24 %, МНО — 1,11, АЧТВ — 38%. без особенностей.

Общий анализ мочи: без особенностей: белок — 0,08 г/л, лейкоциты — 2–3 в п/з., эритроциты 0–1 в п/з.,

Биохимический анализ крови: Тропонин I — 54 нг/мл (норма 0–29 нг/мл). Уровень МВ-КФК — 32 Единиц (нормальные значения 5–28). Уровень общего холестерина — 4,91 ммоль/л, уровень ХС ЛНП — 1,9 ммоль/л, общий белок — 68 г/л, креатинин 53 мкмоль/л, билирубин — 7,1ммоль/л, АСТ 28, ммоль/л, АЛТ 21 ммоль/л, глюкоза крови 4,8 ммоль/л, уровень ProBNP — 1720 нг/мл.

ЭКГ: Синусовая тахикардия. ЧСС 98 уд/мин. Элевация сегмента ST до 3 мм в I, aVL, V1-V6.

На серии КАГ пациентки А. от 16.06.2025 г. все коронарные артерии проходимы, атеросклеротические изменения не определяются.

При ЭхоКГ исследовании выявлен гиперкинез базальных и гипокинез верхушечных сегментов. Зон аки-

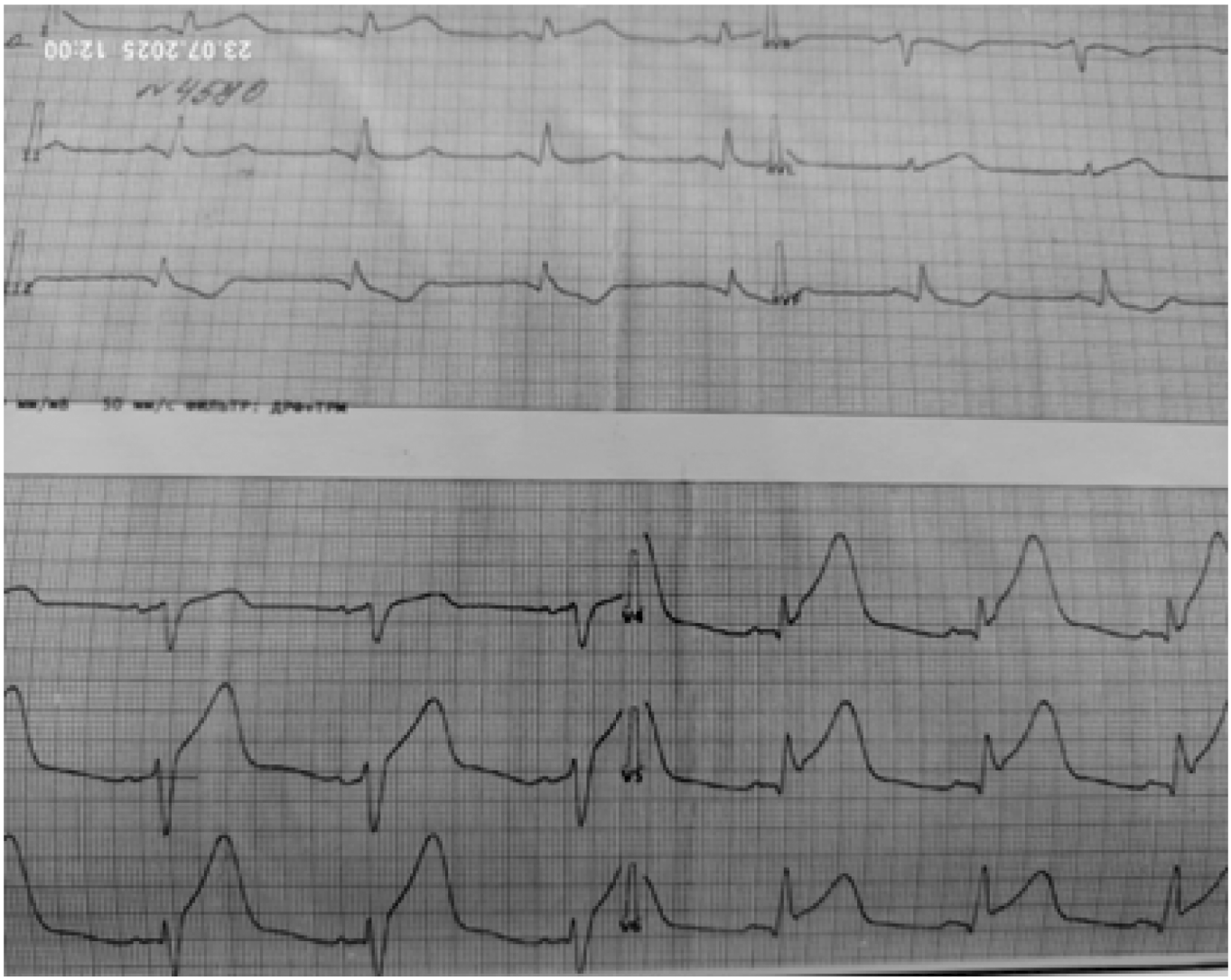


Рис. 1. Электрокардиограмма больной на момент госпитализации при поступлении

Рис. 2, 3. Коронароангиография (КАГ): ЛКА контуры ровные, ПКА без стенозов

неза левого желудочка выявлено не было. Снижение систолической функции левого желудочка фракция выброса (ФВ) до 41 %. При контрольном обследовании ЭхоКГ с 7 дня после госпитализации отмечалась тенденция к повышению уровня ФВ и уменьшению патологических изменении. Нормализация ФВ наблюдалась к концу 3 недели после госпитализации и составила 58 %.

Результаты

С учетом предложенных действующих международных критериев диагностики КТ (InterTAKDiagnosticCriteria, 2018) диагностирован диагноз КТ. В нашем клиническом наблюдении главными из таких критериев являлись: интактные коронарные артерии по данным КАГ; преходящий гипокинез средних и верхушечных сегментов левого желудочка по данным ЭхоКГ; не выраженное повышение в крови уровня сердечных тропонинов и кардиоспецифических ферментов, стресс в качестве пускового механизма заболевания; появление на ЭКГ элевации сегмента ST с восстановлением исходной ЭКГ за период 15 дней. На основании совокупности полученных данных диагноз «Инфаркт миокарда» был исключен. Медикаментозная терапия на начальном этапе проводилась согласно действующим клиническим рекомендациям по ведению пациентов с Острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST по данным электрокардиограммы: антикоагулянты, антиагреганты, статины, диуретики, ингибиторы АПФ и ß-блокаторы. Доза препаратов титровалась под контролем ЧСС, АД, а также данных ЭКГ, ЭхоКГ и физикального обследования. Проведение тромболитической терапии противопоказано в связи с наличием противопоказаний. Восстановление функции желудочков сердца по данным инструментальных методов исследования в динамике в данном клиническом случае наблюдалось примерно к началу 3 недели заболевания.

Заключение

За последние годы значительно возросла актуальность стресс-индуцированной КМП в современной кардиологической практике, параллельно с повышением осведомленности врачей о данном заболевании. Активно обсуждаются причины, патогенетические механизмы, особенности развития и течения КМП. Ранняя диагностика позволит снизить риск развития неблагоприятных серьезных осложнений, как острая сердечная недостаточность и жизнеугрожающих нарушений ритма. Однако, имеющиеся в настоящее время данные, являются в определенной степени противоречивыми, что подтверждает оправданность и необходимость дальнейшего детального изучения механизмов развития заболевания, усовершенствование методов диагностики и лечения, а также создания рекомендации для практического здравоохранения в плане прогнозирования риска развития данного заболевания и его осложнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sato H., Tateishi H., Uhida T. Takotsubo-type cardiomyopathy due to multivessel spasm. In: Kodama K., Haze R., Hon M., et al, editors. Clinical aspect of myocardial injury: from ischemia to heart failure. Tokyo: Kagakuhyournsha, 1990.
2. Boldueva S.A., Evdokimov D.S. Takotsubo cardiomyopathy. Literature review: concept, epidemiology, pathogenesis. Part I. Russian Journal of Cardiology. 2022;27(3S):4993. doi:10.15829/1560-4071-2022-4993. EDN BQQYSD (In Russ.) Болдуева С.А., Евдокимов Д.С. Кардиомиопатиятакоцубо. Обзор данных литературы: понятие, эпидемиология, патогенез. Часть I. Российский кардиологический журнал. 2022;27(3S):4993. doi:10.15829/1560 4071-2022-4993. EDN BQQYSD
3. Ghadri J.-R., Wittstein I.S., Prasad A., et al. International Expert Consensus DocumentonTacotsubo Syndrome (Part I): Clinical Characteristics, Diagnostic Criteria, and Pathophysiology. EurHeart J. 2018;39(22):2032-46. DOI:10.1093/eurheartj/ehy076
4. Okada T., Miyata S., Hashimoto K. et al. Takotsubo cardiomyopathy associated with torsades de pointes and long QT interval: a case report. J. Cardiol. 2007; 50 (1): 83–8.
5. Gianni M., Dentali F., Grandi A.M. et al. Apical ballooning syndrome or takotsubo cardiomyopathy: a systematic review. Eur. Heart J. 2006; 27: 1523–9.
6. Bybee K.A., Prasad A. Stressrelated cardiomyopathy syndromes. Circulation. 2008; 118: 397–409.
7. Prasad A., Lerman A., Rihal C.S. Apical ballooning syndrome (TakoTsubo or stress cardiomyopathy): A mimic of acute myocardial infarction. Am. Heart. J. 2008; 155 (3): 408–17.
8. Murakami T., Yoshikawa T. Gender differences in patients with takotsubo cardiomyopathy: multi-center registry from Tokyo CCU network. Eur. Heart J. 2013; 34 (Suppl. 1). doi: 10.1093/eurheartj/ eht309.P2981
9. Berton E., Vitali-Serdoz L., Vallon P., Maschio M., Gortani G., Benet toni A. Young girl with apical ballooning heart syndrome. International Journal of Cardiology. 2012; 161(1): e4–6. DOI: 10.1016/j. ijcard.2012.03.012.
10. Otillio J.K., Harris J.K., Tuuri R. A 6-Year-Old Girl with Undiag nosed HemophagocyticLymphohistiocytosis and Takotsubo Car diomyopathy: A Case Report and Review of the Literature. PediatricEmergencyCare. 2014;30(8):561–5. DOI: 10.1097/ PEC.0000000000000189
11. Rawish E., Stiermaier T., Santoro F., et al. Current Knowledge and Future Challenges in Takotsubo Syndrome: Part 1-Pathophysiology and Diagnosis. J Clin Med. 2021;10(3):479. doi:10.3390/jcm10030479.
12. Citro R., Radano I., Parodi G., et al. Long-term outcome in patients with Takotsubo syndrome presenting with severely reduced left ventricular ejection fraction. Eur J Heart Fail. 2019;21(6):781-9. doi:10.1002/ejhf.1373.

13. Ghadri J.-R., Wittstein I.S., Prasad A., Sharkey S., Dote K., Akashi Y.J. et al. International Expert Consensus Document on Takotsubo Syndrome (Part II): Diagnostic Workup, Outcome, and Management. European Heart Journal. 2018;39(22):2047–62. DOI: 10.1093/ eurheartj/ehy077.
14. Osuorji I., Williams C., Hessney J. et al. Acute stress cardiomyopathy following treatment of status asthmaticus. South Med. J. 2009; 102 (3): 301—3.
15. Arora S., Alfayoumi F., Srinivasan V. Transient left ventricular apical ballooning after cocaine use: is catecholamine cardiotoxicity the pathologic link? Mayo Clin. Proc. 2006; 81 (6): 829–32.
16. Schlossbauer S.A., Ghadri J.-R., Templin C. TakotsuboSyndrom — einhäufigverkanntes Krankheitsbild. Praxis. 2016;105(20):1185–92. DOI: 10.1024/1661-8157/ a002434.
17. Ghadri J.R., Cammann V.L., Jurisic S., Seifert B., Napp L.C., Diekmann J. et al. A novel clinical score (InterTAK Diagnostic Score) to differenti ate takotsubo syndrome from acute coronary syndrome: results from the International Takotsubo Registry. EuropeanJournalofHeartFailure. 2017;19(8):1036–42. DOI: 10.1002/ejhf.683
18. Ghadri J.-R., Wittstein I.S., Prasad A., Sharkey S., Dote K., Akashi Y.J. et al. International Expert Consensus Document on TakotsuboSyndrome (Part II): Diagnostic Workup, Outcome, and Management. European Heart Journal. 2018;39(22):2047–62. DOI: 10.1093/ eurheartj/ehy077
19. Ghadri J.R., Dougoud S., Maier W., Kaufmann P.A., Gaemper li O., Prasad A et al. A PET/CT-follow-up imaging study to differentiate takotsubo cardiomyopathy from acute myocardial in farction. The International Journal of Cardiovascular Imaging. 2014;30(1):207–9. DOI: 10.1007/s10554-013-0311-x
20. Матвеева М.Г., Гогин Г.Е., Алехин М.Н. Кардиомиопатия такоцубо. Клин.мед. 2017; 95 (7): 663–668. DOI http://dx.doi.org/10.18821/00232149201795766366 8
21. Izumi Y., Okatani H., Shiota M. et al. Effects of metoprolol on epinephrine induced takotsubo-like left ventricular dysfunction in non-human primates. Hypertens Res. 2009; 32 (5): 339–46.
22. Fazio G., Pizzuto C., Barbaro G. et al. Chronic pharmacological treatment in takotsubo cardiomyopathy. Int. J. Cardiol. 2008; 127 (1): 121–3.
23. Maron B.J., Towbin J.A., Thiene G., Antzelevitch C., Corrado D., Arnett D., Moss A. J., Seidman C.E., Young J.B.; American Heart Association; Council on Clinical Cardiology, Heart Failure and Transplantation Committee; Quality of Care and Outcomes Research and Functional Genomics and Translational Biology Interdisciplinary Working Groups; Council on Epidemiology and Prevention. Contemporary definitions and classification of the cardiomyopathies: an American Heart Association Scientific Statement from the Council on Clinical Cardiology, Heart Failure and Transplantation Committee; Quality of Careand Outcomes Researchand Functional Genomics and Translational Biology Interdisciplinary Working Groups; and Council on Epidemiology and Prevention // Circulation. 2006. Vol. 113, N14. P. 1807–1816.

© Джанибекова Асият Рамазановна (asia.janibekova@mail); Узденов Марат Борисович (f_inostr_mi@ncsa.ru);
Айбазова Фатима Унуховна (fat8149@yandex.ru); Джанибекова Лейла Рамазановна (lady.djanibekova@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.13

НЕКОТОРЫЕ КЛИНИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРИ БОЛЕЗНИ ФАБРИ, АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ

SOME CLINICAL MANIFESTATIONS OF FABRY'S DISEASE, ASPECTS OF DIAGNOSIS AND TREATMENT

A. Janibekova
M. Uzdenov
F. Aibazova
L. Janibekova

Summary. The article is devoted to the topic of mitochondrial diseases, which are among the most common genetic metabolic disorders. A special group consists of lysosomal storage diseases, one of the variants of which is Fabry disease (CF). This is a progressive orphan hereditary metabolic disease linked to the X chromosome in the GLA gene encoding the alpha GalA enzyme, leading to its absence or insufficient activity, resulting in an abnormal accumulation of hereditary metabolic disease /(and PKP-glycophospholipids of two types: globotriaosylceramide (Gb3) to a greater extent and its derivative globotriaosylsphingosine (Lizo-Gb3) in lysosomes of cells of various body tissues (vascular endothelium, kidneys, heart, CNS (central nervous system), peripheral nervous system, etc.), as well as in serous body fluids [1,2]. The results of recent studies have supplemented information on the epidemiology of Fabry disease and its prevalence. However, this diagnosis is still not always established, which leads to a late diagnosis of the disease and the absence of pathogenetic therapy. Further research is needed to clarify the factors involved in the early diagnosis of the disease in patients with Fabry's disease.

Keywords: hereditary metabolic disease, lysosomal storage diseases, Fabry disease, epidemiology, alpha galactosidase A, enzyme replacement therapy.

Джанибекова Асият Рамазановна
кандидат медицинских наук, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
asia.janibekova@mail
Узденов Марат Борисович
кандидат медицинских наук, доцент, ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
f_inostr_mi@ncsa.ru
Айбазова Фатима Унуховна
кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
fat8149@yandex.ru
Джанибекова Лейла Рамазановна
кандидат медицинских наук, врач-кардиолог, «Карачаево-Черкесская республиканская клиническая больница»; главный внештатный специалист-кардиолог, Министерства здравоохранения Карачаево-Черкесской Республики; ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск
lady.djanibekova@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена теме митохондриальных заболевании, которые являются одними из наиболее распространённых генетических нарушений обмена веществ. Особую группу составляют лизосомальные болезни накопления, одним из вариантов которого является болезнь Фабри (БФ). Это прогрессирующее орфанное наследственное заболевание обмена веществ, сцепленное с Х-хромосомой в GLA гене, кодирующий фермент α GalA, приводящее к его отсутствию или недостаточной активности, приводящее в последствии к аномальному накоплению наследственное заболевание обмена веществ /(а РКР-гликофосфолипидов двух видов: глоботриаозилцерамид (Gb3) в большей мере и его производного глоботриаозилсфингозина (лизо-Gb3) в лизосомах клеток различных тканей организма (эндотелий сосудов, почки, сердце, ЦНС (центральная нервная система), периферическая нервная система и тд.), а также в серозных жидкостях организма [1,2]. Результаты последних исследований дополнили информацию об эпидемиологии болезни. Фабри, ее распространенности. Однако до сих пор этот диагноз устанавливается не всегда, что приводит к поздней диагностике заболевания и отсутствию патогенетической терапии. Необходимо дальнейшие исследования для выяснения факторов, участвующих в ранней диагностике заболевания у пациентов с болезнью, Фабри.

Ключевые слова: наследственное заболевание обмена веществ, лизосомные болезни накопления, болезнь Фабри, эпидемиология, альфа галактозидаза А, ферментная заместительная терапия.

Болезнь Фабри: определение, классификация, эпидемиология

В последнее годы возрос интерес к новым нозологическим формам наследственной моногенной патологии, относящееся к группе лизосомных болезней накопления (ЛБН), а именно все чаще приходится слышать о болезни Фабри, известной также как болезнь Андерсона-Фабри. В то же время этот диагноз устанавливается не всегда своевременно, что приводит к поздней диагностике заболевания и отсутствию патогенетической терапии. Принимая во внимание имеющийся большой объем информации в настоящее время по проблеме БФ и множество дискуссионных вопросов, возникла необходимость проанализировать данные литературы. Проведен систематический поиск в базе данных PubMed по следующим ключевым словам: «Fabry'sdisease», «Alpha-galactosidaseA», «lysosomalstoragedisease», «Globotriaosylceramide (GL-3)», «Fabrydisease», «Anderson-Fabrydisease», «диффузная ангиокератома туловища» за период с 1 января 2015 г. по 1 января 2025 г. По результатам поиска было проанализировано 155 источников литературы: согласительные документы, метаанализы, обзоры литературы, статьи, клинические случаи. Таким образом, целью обзора является анализ современных данных, касающихся механизмов развития, клинических проявлений, диагностики и лечения БФ, выполненных в последние годы.

Болезнь Фабри — редкое прогрессирующее наследственное заболевание обмена веществ, опосредованное мутацией гена GLA сцепленного с Х-хромосомой, кодирующий фермент α GalA, в результате наблюдается отсутствие или недостаточность его активность, которая приводит в последствии к аномальному накоплению гликосфинголипидов /(а РКР-гликофосфолипидов двух видов: глоботриаозилцерамид (Gb3) в большей мере и его производного глоботриаозилсфингозина (лизо-Gb3) в лизосомах клеток различных тканей организма (эндотелий сосудов, почки, сердце, ЦНС (центральная нервная система), периферическая нервная система и т.д.), а также в серозных жидкостях организма [1,2].

Данные изменения приводят к мультисистемному проявлению заболевания, влекущее за собой прогрессирующее поражение органов и как следствие снижение качества и продолжительности жизни. При отсутствии надлежащего лечения летальный исход наступает от сердечно-сосудистых, цереброваскулярных осложнений и почечной недостаточности может наблюдаться в возрасте 40–50 лет.

Из краткой исторической справки впервые признаки болезни Фабри были описаны в 1898 году двумя дерматологами: доктором Уильямом Андерсоном (1842—1900) в Великобритании и доктором Иоганном Джон Фабри (1860—1930) в Германии. (Beck M. Fabry disease: clinical manifestations, diagnosis, and therapy; 2007 (2nd edition)).

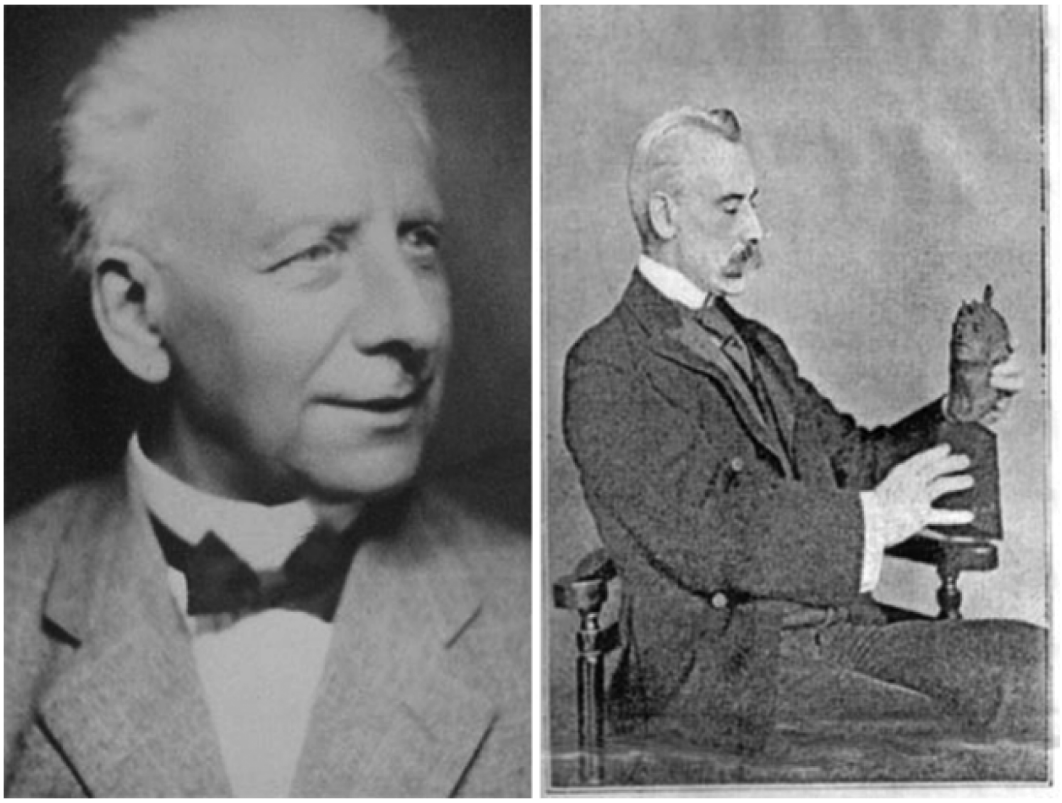


Рис. 1. Доктор Иоганн Фабри (слева) и доктор Уильям Андерсон (справа)

Они независимо друг от друга опубликовали статьи, в которых описали пациентов с кожными изменениями, известными под называнием ангиокератомы, которые сейчас считаются частым признаком болезни Фабри. В 1947 г. A.W.M. Pompenetal. обнаружили аномальные вакуоли в клетках кровеносных сосудов и было предположение, что это заболевание связанно с их накоплением. В 1950 г. было установлена жировая природа данных накоплений. В 1953 г. Hornbostel & Scribaдиагноз БФ впервые подтвержден по результатам биопсии кожи. В 1962–1965 годах исследователи Opitz с соавторами и Wiseet. al. установили наследственный, семейный характер заболевания, а в 1967 г. R.O. Bradyetal. открыли первичный биохимический дефект — недостаточность церамидтригексозидазы (α-галактозидазы А — α-ГАЛ А) [3]. Позднее, в 1989 г., удалось секвенировать ген α-ГАЛ А, что дало возможность синтезировать этот фермент in vitro и использовать его для проведения ферментозаместительной терапии (ФЗТ) у больных БФ [1]

Классификация болезни Фабри. Выделяют две формы заболевания: с классическим фенотипом и не классическим фенотипом (также известный как с поздним началом), иными словами, атипичный вариант.

В первом случае признаки и симптомы БФ могут наблюдаться с раннего детства и носят полиорганный характер. К таким признакам относятся невропатическая боль, вертициллярная роговица, желудочно-кишечные симптомы, гипогидроз и ангиокератома. К отсроченным проявлениям болезни относятся хронической болезни почек (ХБП) с почечной недостаточностью, гипертрофическая кардиомиопатия, нарушения ритма и проводимости, тугоухость (брадиакузия или гипоакузия), нарушение мозгового кровообращения. В данном варианте характерно отсутствие или значимое снижение (менее 3 % от ожидаемого значения) от α GalA.

Во втором случае признаки и симптомы БФ формируются в более позднем возрасте, это более легкий вариант течения заболевания. Одномоментное поражение всех выше указанных органов мишеней может быть незначительным или отсутствовать вовсе, но при этом наблюдается преимущественное поражение одного органа и, как правило, тяжелое. При неклассическом варианте БФ чаще идет поражение головного мозга, сердца или почек. В данном варианте характерно не значительное снижение уровня α GalA. Однако же поражение сердца является одной из самых распространенных клинических проявлений у пациентов с обоими вариантами БФ.

Какова же эпидемиология данного заболевания? Безусловно, БФ относится к редким прогрессирующим заболеваниям. Показатели статистики о распространенности данного заболевания варьирует в широких пределах, и напрямую зависят от фенотипа заболевания. Известно, что у пациентов с классическим фенотипом от 1 на 117 000 до 1 на 476 000 среди населения в целом. [5,15] При этом наблюдается преобладание распространенности у мужчин: 1 на 40 000 и 1 на 60 000. С учетом фенотипов с поздним началом, очевидно, предполагается более высокая фактическая распространенность данной патологии. Так по данным европейского многоцентрового исследования, проведенного Эллиотом и соав. из 1386 пациентов с ГКМ у 0,5 % были выявлены патогенные мутации галактозидазы. В другом исследовании, проведенном Eng C.M., Germain D.P. и соавт. частота патогенных мутации во время скринига составила 1 %. Интересные данные получены по результатам скрининговых исследований в Италии, это до 1 на 8800 новорожденных. В Тайване в ходе аналогичного исследования получены результаты это 1 на 1600 новорожденных мальчиков. [3, 15]

Установлено, что средний возраст постановки диагноза у мужчин и женщин составляет 24 и 31 год соответственно. В то же время не диагностированный или не леченный типичный вариант БФ может сократить продолжительность жизни до 15 лет у мужчин и до 20 лет у женщин.

Интересные данные также получены при анализе распространенности БФ с ранним инсультом у мужчин и женщин 4,2 % и 2,15 % соответственно, у пациентов с ГКМ неясного происхождения 0,9 % и 3,9 %, а у пациентов с терминальной почечной недостаточностью 0,33 % и 0,10 % [11,13,14].

Кодирование заболевания или состояния по Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем.

В категории МКБ — Е 75.2 — Другие сфинголипидозы (болезнь Фабри).

Болезнь Фабри: клиническая картина, диагностика и лечение

БФ многолика и имеет разнообразные проявления даже у членов одной семьи. Клиническая картина варьирует от полного отсутствия симптомов или легкой формы до тяжелой. Спектр возможных жалоб весьма разнообразен и зависит от ряда таких причин как, например: форма заболевания, гендерной принадлежности, возраста манифестации и т.д.

Сердечно-сосудистые проявления. Установлено, что повреждение миокарда является прогностически неблагоприятным и частым проявлением БФ. Согласно данным статистики у 34 % мужчин и 57 % женщин именно поражение сердца стоит на первом месте среди причин летального исхода. Механизмы поражения ССС является

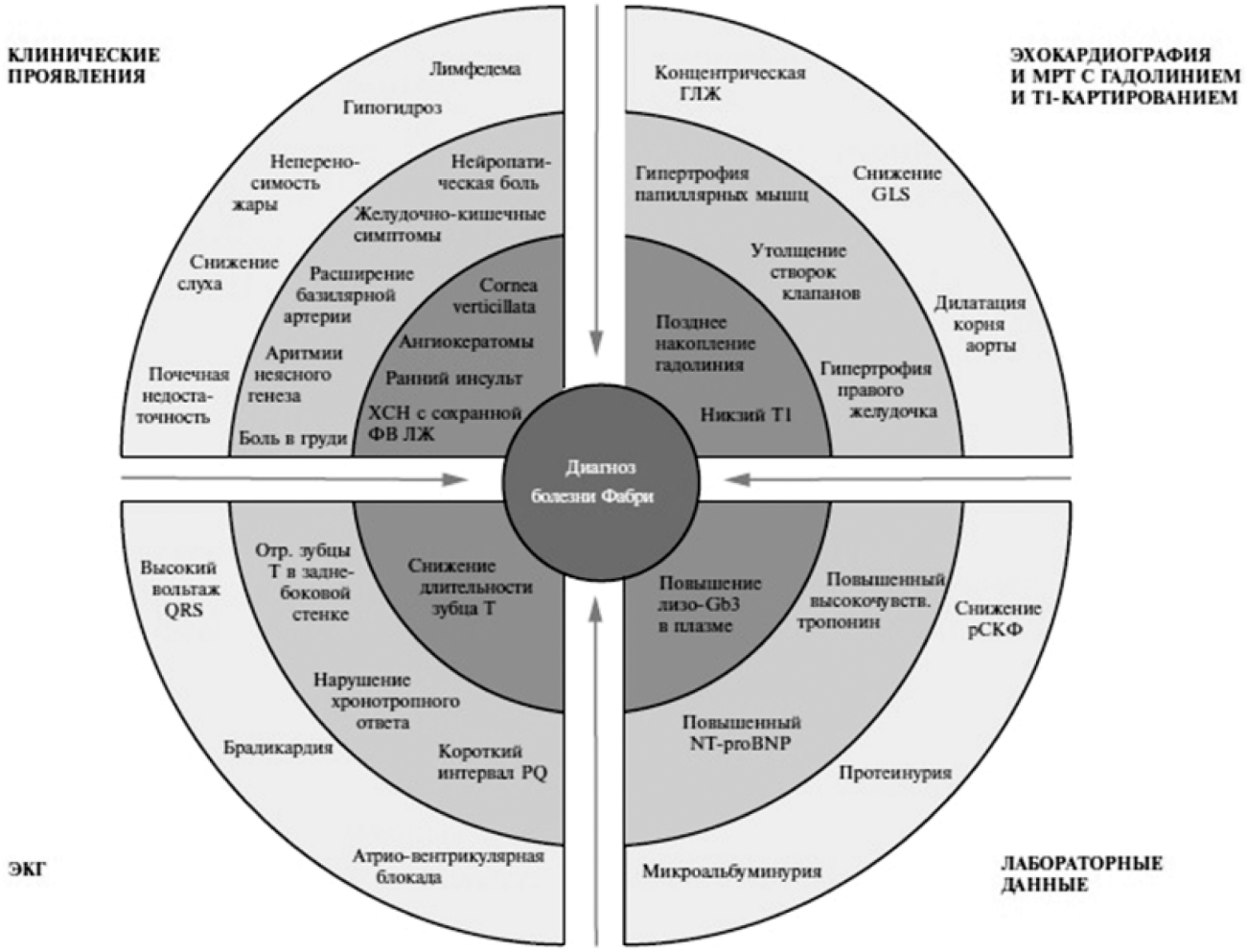


Рис. 2. Клинические проявления и результаты лабораторных и инструментальных исследований, которые могут указывать на болезнь Фабри [4,5] Более темным цветом обозначены более характерные признаки заболевания. рСКФ — расчетная скорость клубочковой фильтрации, ХСН — хроническая сердечная недостаточность

следствием отложения гликосфинголипидов в кардиомиоцитах, эндотелиальных и гладкомышечных сосудов, клетках эндокарда и проводящей ткани, фибробластах клапанов [5, 11]. Все это приводит к формированию ГЛЖ, диастолической дисфункции, ишемии миокарда и возникновению нарушений ритма и проводимости. Однако в патогенезе участвуют также механизмы воспаления миокарда и аутоиммунные реакции.

Согласно данным исследований при скрининге на БФ среди более 5400 пациентов с ГЛЖ и/или ГКМП неясной этиологии частота патогенных мутации составила 0,93 % и 0,90 %. [13,14]. Другими проявлениями данного заболевания являются нарушения ритма и проводимости. Проявление ИБС в виде инфаркта миокарда встречается у 2 % пациентов с БФ, а в виде стенокардии у 13–20 % пациентов и чаще в сочетании с гипертрофией миокарда левого желудочка. Поражение клапанного аппарата при БФ встречается часто, но не имеет особого клинического значения. И как было указанно выше, при неклассической форме с моносимптомным течением поражение сердца является единственным проявлением БФ.

Поражение почек. Возможно, как изолированное поражение почек при неклассическом варианте БФ, так и в совокупности с другими синдромами при классическом его варианте. Чаще всего поражение почек формируется в подростковом периоде пациента и манифестирует нефритическим вариантом мочевого синдрома с последующим переходом в нефротический синдром, снижением функции почек вплоть до терминальной хронической почечной недостаточности, которая служит одной из основных причин летального исхода пациентов [17,18].

Гастроэнтерологические проявления. Клиническими проявлениями вовлечения в патологический процесс ЖКТ, являются такие мало специфичные симптомы как снижение аппетита, снижение массы тела, периодические схваткообразные боли в животе, вздутие живота, неустойчивый стул, тошнота, рвота. Манифестация га-

строэнтерологических проявлений БФ наблюдается чаще в детском и юношеском возрасте [11,15].

Поражение нервной системы. Возможны поражения периферической и центральной нервной системы. Полиневропатии проявляется, как результат повреждение периферической нервной системы и относятся к сравнительно частым клиническим синдромам при БФ. Встречается у пациентов в 60–80 % случаев в виде хронической выраженной, порой изнуряющей невропатическим болевым синдромом в конечностях, акропарастезиями, аллодинией, гиперпатией. По характеру длительного болевого синдрома различают следующие варианты: жгучая, стреляющая, пронзающая. В патогенезе невропатии выделяют два механизма: центральный, периферический и вегетативный. В первом случае за счет кальцификации таламуса при БФ. В остальных случаях за счет накопления глоботриаозилцерамида в аксонах нервов, ганглиях задних корешков и в сосудах нервов (лат. vasanervorum), вегетативных нервных волокнах и как следствие структурные повреждения тонких нервных волокон. Также по причине скопления глоботриаозилцерамида, но уже в потовых железах и в стенках, кровоснабжающих их сосудов в большинстве случаев встречается гипогидроз или ангидроз.

В виде болезни малых сосудов (артериол и артерий) наблюдаются поражение центральной нервной системы, оно проявляется такими сосудистыми катастрофами как ТИА, ишемический или геморрагический инсульт в возрасте от 20 до 50 лет. Мозговой инсульт может быть одной из форм моносимптомного варианта атипичной форма БФ. Распространенность инсульта при этом около 6,9 % и 4,3 % у мужчин и женщин соответственно. Последствием хронической ишемии мозга является сосудистая деменция, включающая снижение памяти, концентрации внимания и поведенческие нарушения [11,18].

Поражение лимфатической системы. В некоторых случаях может наблюдаться лимфедема, (патологическое накопление богатой белком жидкости в интерстициальном пространстве, которое происходит из-за нарушения транспорта лимфы и сопровождается увеличением объёма поражённого органа). Лимфедема может быть следствием врождённого или приобретённого нарушения транспорта лимфы по лимфатическим сосудам за счет отложения гликолипидов в стенках лимфатических сосудов. [10,11]. В научной литературе описаны случаи осложнения лимфедемы с развитием трофических нарушений и как следствие изъязвление кожных покровов.

Оториноларингологические проявления. Проявлениями, вовлечения в патологический процесс органов слуха и вестибулярного аппарата являются шум и/или звон в ушах (одно- или двухсторонний), нейросенсорная тугоухость, головокружение.

Кожные проявления. Ангиокератомы являются проявлением поражения кожи у пациентов БФ. Это четко окантованные папулы красного, темно-красного, бордового, лилового или сине-черного цвета в размере 0,2–1,0 см. преимущественно расположены на симметричных участках в паховой области, на ягодицах, бедрах, в области пупка, на ладонях. На начальном этапе ангиокератомы появляются в детском возрасте более светлые, плоские, легче поддаются сжатию, но с возрастом увеличивается их количество, размеры и они становятся темнее, тверже, более возвышены над поверхностью кожи. Описаны случаи развития ангиоэктазий в слизистой рта и конъюктиве. Кожные проявления не относятся к обязательным клиническим признакам.

Офтальмологические проявления. Поражение хрусталика и роговицы встречается в более чем 50 % у пациентов с БФ. Типичным симптомом является помутнение роговицы в виде завитков (70 %–90 % больных). Редко встречается помутнение хрусталика в виде радиальной задней субкапсулярной катаракты, т.н. «катаракты Фабри» и двусторонней передней капсулярной и подкапсулярной катаракты но относятся к патогномоничным признакам [7,8].

Внешние проявления. При гемизиготных мужчинах часто наблюдаются внешние признаки сходные с признаками акромегалии — выступающие надбровные дуги и лобные бугры выступающая нижняя челюсть увеличенные губы и запавшая переносица.

Особенности клинической картины в детском и подростковом возрасте.

По большей части симптомы БФ встречаются в подростковом и юношеском возрасте и тоже время верификация диагноза БФ у детей затруднительна в силу не специфичности синдромов заболевания. Так, например, гастроэнтерологические проявления заболевания могут служить лишь косвенным маркером в силу своей малой специфичности. Ангиокератомы в детском возрасте чаще единичные и могут наблюдаться в нетипичной локализации на грудной клетке, слизистых полости рта, ушах.

Также мало специфичны проявления поражения сердечно-сосудистой системы в виде периодического не значительного снижения и/или повышения уровня АД, бессимптомные или малосимптомные формы аритмий по типу вегетативных нарушений. Затруднительна своевременная диагностика поражения почек при БФ, так это состояние может проявляться лишь транзиторной микоальбуминурией. [11,15]. К более редким малоспецифичным проявлениям БФ в указанном возрасте можно отнести глоссит, гранулематозный хейлит, остеопения, остеопороз, гипотиреоз, утолщение концевых фаланг, анемия, нарушение дыхания и тд.

Диагностика заболевания

В постановке диагноза БФ имеют значение данные анамнеза и клинико-лабораторных (молекулярно-генетические и биохимические) методов исследования. Для верификации классического варианта БФ имеет значение совокупность поражения различных органов, при этом верификация атипичных вариантов возможна при скрининге групп риска. Важно отметить, что у всех пациентов с инсультом в молодом возрасте и гипертрофией миокарда левого желудочка неясной этиологии необходимо предположить БИ.

Лабораторные диагностические исследования

1. Ферментный тест: определение активности АГАЛ в пятнах крови, высушенных на фильтровальной бумаге или в лейкоцитах крови всем пациентам мужского и женского пола, однако у трети пациенток с БФ данный показатель может оказаться в пределах нормы.
2. Выявление мутации в гене, кодирующим АГАЛ для мужчин со сниженной активностью фермента и для женщин с клиническими признаками БФ с применением секвенирования всех экзонов и приэкзонных участков интронов по Сенгеру. Данный метод также необходим для выявления семейной мутации гена GLA у родственников пробанда, с целью пренатальной и преимплантационной диагностики, а также для выявления гетерозиготных носительниц БФ.
3. Количественное определение глоботриаозилсфингозина (лизо-Gb3) в пятнах высушенной крови или плазме крови проводится всем пациентам, как с целью биохимического подтверждения диагноза БФ, так и целью биохимического мониторинга терапии с учетом того, что данный метаболит не достигает нормальных значений у пациентов с ФБ.
4. Проведение лабораторных исследований согласно клиническим рекомендациям по ведения пациентов с ХПН (не реже 1 раза в 6 месяцев), гипертрофической КМП при наличии клинических появлении поражении почек и сердца.
5. Все пациентам с целью выявления патологии почек рекомендуется регулярное (не реже 1 раза в 6 месяцев) определение уровня белка и альбумина в моче и определение СКФ.
6. Проведение биопсии и патологоанатомического исследования тканей почек и сердца рекомендуется только лишь в сложных дифференциально-диагностических случаях. [6,10,11].

Инструментальные диагностические исследования

С целью выявления гипертрофии миокарда левого желудочка показано проведение ЭКГ, ЭхоКГ (и допплер ЭхоКГ), МРТ. Также рекомендуется проведение МРТ головного мозга для выявления возможного поражения белого вещества головного мозга (лейкоареоз), серого вещества (кальцификация заднего таламуса), ишемических очагов, внутримозговых гематом, сосудистые мальформации. Дополнительно рекомендовано проведение тональной аудиометрии каждые 3 года для обнаружения снижения слуха.

В план обследования пациента также входит консультации кардиолога (не реже 1 раза в 6 месяцев) и окулиста (не реже 1 раза в 3 года) [11,14].

Лечение, включающее медикаментозную и немедикаментозную терапию. Выделяют патогенетическое, симптоматическое и хирургическое лечение. Это ферментозаместительная терапия, шаперонная терапия. На стадии клинических испытаний находятся другие методы лечения, такие как субстратная терапия, другие ферментозаместительные средства, генная терапия.

I. Патогенетическая терапия. В рамках патогенетической терапии рассматривается ферментная заместительная терапия, которая представлена двумя препаратами на российском фармацевтическом рынке на данный период времени: агалсидаза-α и агалсидаза-ß. Эффективность терапии оценивалась в более чем 48 проспективных исследованиях, в результате которых отмечался с положительный эффект на фоне лечения в виде уменьшение массы миокарда, снижение уровняCb3 в тканях почек, уменьшение невропатической боли, улучшение слуха и качества жизни. Также рассматривается применение шаперона (мигаластат), который в Российской Федерации на данный момент не зарегистрирован. К новым вариантам лечения субстрат-редуцирующей терапии относятся луцерастат и венглустат, которые проходят 2–3 фазы исследования. В настоящее время также разрабатываются новые пегилированные формы α-Гал-А (пегунигалсидаза — α) препараты для генной терапии и терапии мРНК [9,11]. Успешность терапии напрямую зависит от формы заболевания, сроков начала терапии, дозы препаратов, возможного развития антител к компонентам препарата и ряда других факторов.

II. Симптоматическая терапия. В связи с отсутствием данных по рандомизированным контролируемым исследованиям есть ссылки лишь на мнение экспертов и опыт лечения разных групп пациентов из разных стран. Таким образом, симптоматическая терапия может быть назначена по решению врачебной комиссии [11]. Так для лечения болевого синдрома рекомендуется избегать триггерные факторы, например, интенсивные физические нагрузки, колебания температурного режима (холодная и/или жаркая погода), эмоциональный стресс, повышение температуры тела. При наличии у пациентов фибрилляции предсердий рекомендуется назначение

антикоагулянтной терапии с применением Варфарина. У пациентов с диспепсическим синдромом допускается применение ингибиторов протонной помпы или H_2-гистаминовых рецепторов. При наличии протеинурии и синдрома артериальной гипертензии рекомендуется подключение с нефропротективной целью ингибиторов АПФ или блокаторов ангиотензина II.

III. Хирургическое лечение. В случае формирования терминальной почечной недостаточности необходима терапия гемодиализом и/или трансплантация почки согласно стандартам и клиническим рекомендациям по ведению данной патологии.

При регистрации у пациентов с БФ атрио-вентрикулярной блокады в соответствии с действующими клиническими стандартами и рекомендациями имплантация водителя ритма, а при наличии жизне -угрожающих аритмии — имплантация кардиовертера-дефибриллятора соответственно [11]. При наличии кожных проявлении по согласованию с пациентом рекомендуется удаление ангиокератом с помощью аргонового лазера.

Заключение

Результаты проанализированных источников литературы: согласительных документов, метаанализы, обзоры литературы, статьи, клинические случаи указывают на то, что за последние годы благодаря более глубокому изучению данной патологии значительно усовершенствовались подходы к диагностике и лечению болезни Фабри. Однако остаются проблемы поздней диагностики БФ и, как следствие, поздня инициация специфической терапии, что влияет на прогноз и качество жизни пациентов. Дальнейшее углубленное изучение сложных вопросов патофизиологии заболевания позволит усовершенствовать и улучшить этапы диагностики и лечения данной патологии и соответственно оптимизировать индивидуальный подход ведения данных категории пациентов в реальной клинической практике.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Germain D.P. Fabry disease//Orphanet J Rare Dis. 2010. V.22. P. 5–30.
2. Sakuraba H., Togawa T., Tsukimura T. et al. Plasma lyso-Gb3: a biomarker for monitoring Fabry patients during enzyme replacement therapy// ClinExpNephrol. 2018. V.22. №4. P. 843–9.
3. Ortiz A., Germain D.P., Desnick R.J. et al. Fabry disease revisited: Management and treatment recommendations for adult patients// Molecular Genetics and Metabolism. 2018. V.123. №4. P. 416–27. 30
4. Limongelli G, Monda E, Tramonte S, et al. Prevalence and clinical significance of red flags in patients with hypertrophic cardiomyopathy. Int J Cardiol. 2020; 299:186–91.
5. Pieroni M., Moon J.C., Arbustini E., et al. Cardiac involvement in Fabry disease. J Am CollCardiol 2021; 77:922–33.
6. Polo G., Burlina A., Ranieri E. et al. Plasma and dried blood spot lysosphingolipids for the diagnosis of different sphingolipidoses: a comparative study// Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM). 2019. V.57. №12. P.1863–74.
7. Körver S. et al. Development and clinical consequences of white matter lesions in Fabry disease: a systematic review //Molecular genetics and metabolism. 2018. V. 125. № 3. P. 205–216.
8. Spada M., Baron R., Elliott P.M. et al. The effect of enzyme replacement therapy on clinical outcomes in paediatric patients with Fabry disease — A systematic literature review by a European panel of experts// Mol Genet Metab. 2019. V.126. №3. P.212–23.
9. Germain D.P., Elliott P.M., Falissard B. et al. The effect of enzyme replacement therapy on clinical outcomes in male patients with Fabry disease: A systematic literature review by a European panel of experts// Mol Genet Metab Rep. 2019. V.19. P.100454.
10. Germain D.P., Arad M., Burlina A. et al. The effect of enzyme replacement therapy on clinical outcomes in female patients with Fabry disease — A systematic literature review by a European panel of experts// Mol Genet Metab. 2018. V.126. №3. P.224–35.
11. Болезнь Фабри: клинические рекомендации / Ассоциация медицинских генетиков; Союз педиатров России. — 2019. — 53 с. [Bolezn' Fabri: Clinicalguidelines. Association of Medical Genetics; Union of Pediatricians of Russia. 2019. 53 p. (In Russ).]
12. Моисеев С.В., Тао Е.А., Моисеев А.С. и др. Клинические проявления и исходы болезни Фабри у 150 взрослых пациентов. Клинфармаколтер 2021;30(3):43-51 [Moiseev S, Tao E, Moiseev A, et al. Clinical manifestations and outcomes of Fabry disease in 150 adult patients. Klinicheskayafarmakologiyaiterapiya = ClinPharmacolTher 2021;30(3):43–51 (In Russ.)].
13. Моисеев С.В., Тао Е.А., Моисеев А.С. и др. Болезнь Фабри как причина гипертрофической кардиомиопатии. Клинфармаколитер 2023;32(1):36-41 [Moiseev S, Tao E, Moiseev A, etal. Fabry disease as a cause of hypertrophic cardiomyopathy. Klinicheskaya farmakologiya i terapiya = ClinPhamacolTher 2023;32(1):36–41 (In Russ.)].
14. Моисеев А.С., Мершина Е.А., Сафарова А.Ф. и др. Поражение сердца при болезни Фабри: особенности течения и диагностическое значение магнитно-резонансной томографии и speckle-tracking эхокардиографии. Клинфармаколтер 2022;31(3):22-29 [Moiseev A., Mershina E., Safarova A., et al. Heart involvement in Fabry disease: clinical features, cardiac MRI and speckletracking echocardiography. Klinicheskayafarmakologiyaiterapiya = ClinPharmacolTher 2022;31(3):22–29 (In Russ.)].

15. Рушкевич Ю.Н., Труханова И.С.*Тао Е.А., Моисеев А.С., Новиков П.И. и др. Эффективность семейного скрининга при болезни Фабри в Российской популяции. Клинфармаколтер 2020;29(2):34–39 [TaoE, MoiseevA, NovikovP, et al. Efficacy of family screening in Fabry disease in the Russian population.ClinPharmacolTher = Klinicheskayafarmakologiyaiterapiya 2020;29(2):34–39 (In Russ.)].
16. Тао Е.А., Моисеев А.С., Буланов Н.М. и др. Хроническая почечная недостаточность при болезни Фабри: общая выживаемость при использовании различных методов заместительной почечной терапиию. Клинфармаколтер 2023;32(4):58–63 [TaoE, MoiseevA, BulanovN, etal.Chronic renal failure in Fabry disease: the long-term survival on renal replacement therapy. Klinicheskayafarmakologiyaiterapiya = Clin Phar macolTher 2023;32(4):58–63 (In Russ.).
17. Тао Е.А., Моисеев А.С., Буланов Н.М. и др. Клинические фенотипы болезни Фабри у 219 взрослых пациентов. Клинфармаколтер 2024;33(2):56–62 [Tao E, Moiseev A, Bulanov N, et al.Clinical phenotypes of Fabry disease in 219 adult patients. Klinicheskaya farmakologiya i terapiya = ClinPharmacolTher 2024;33(2):56–62 (In Russ.)].

© Джанибекова Асият Рамазановна (asia.janibekova@mail); Узденов Марат Борисович (f_inostr_mi@ncsa.ru);
Айбазова Фатима Унуховна (fat8149@yandex.ru); Джанибекова Лейла Рамазановна (lady.djanibekova@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.15

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ДЕСТРУКЦИИ МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ 8 ВАТТ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1560 Н.М. ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ГЕМОРРОЕ ТРЕТЬЕЙ СТАДИИ

RESULTS OF LASER DESTRUCTION WITH AN EMISSION POWER OF 8 WATTS AND A WAVELENGTH OF 1560 NM IN THE TREATMENT OF STAGE 3 CHRONIC HEMORRHOIDS

A. Zasorin
D. Sozonov

Summary. *Introduction*. Laser destruction is used as a minimally invasive method for treating chronic hemorrhoids; however, the influence of radiation power has not been sufficiently studied.
Objective. To study the morphological changes in hemorrhoidal tissue in vitro and the clinical outcomes of laser destruction (8 W, 1560 nm) for chronic stage III hemorrhoids.
Materials and methods. A morphological study of 15 specimens of hemorrhoidal nodes after exposure to laser radiation in vitro was conducted. The short-term and long-term outcomes of laser destruction were studied in 45 patients with chronic stage III hemorrhoids.
Results. The depth of coagulative necrosis was 4 mm. The technique demonstrated low pain intensity (2.5 points on the VAS) and a pain duration of 3.1±0.3 days. The frequency of short-term complications was 2.2 %. Long-term follow-up revealed recurrences in 7.7 % of patients after 2 years and in 20 % after 3 years.
Conclusion. Laser exposure at a power of 8 W (1560 nm) causes coagulative necrosis of hemorrhoidal tissue up to 4 mm deep. The low pain intensity and favorable long-term outcomes allow this technique to be recommended for the treatment of chronic stage III hemorrhoids.

Keywords: hemorrhoids, laser destruction, morphology, coagulation, radiation power.

Засорин Александр Александрович
Доктор медицинских наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный медицинский университет», г. Екатеринбург
zas.aleksander2015@yandex.ru
Созонов Дмитрий Мстиславович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный медицинский университет», г. Екатеринбург
saur0n620@gmail.com

Аннотация. *Введение*. В качестве малоинвазивного метода лечения хронического геморроя применяется лазерная деструкция, однако влияние мощности излучения изучено недостаточно.
Цель: изучить морфологические изменения геморроидальной ткани in vitro и клинические результаты лазерной деструкции (8 Вт, 1560 нм) при хроническом геморрое III стадии.
Материалы и методы. Проведено морфологическое исследование 15 препаратов геморроидальных узлов после воздействия лазерного излучения in vitro. Изучены ближайшие и отдаленные результаты лазерной деструкции у 45 пациентов с хроническим геморроем третьей стадии.
Результаты. Глубина коагуляционного некроза составила 4 мм. Технология показала низкую интенсивность болевого синдрома (2,5 балла по ВАШ) и его продолжительность 3,1±0,3 суток. Частота ближайших осложнений составила 2,2 %. Отдаленные наблюдения выявили рецидивы у 7,7 % пациентов через 2 года и у 20 % через 3 года.
Заключение. Лазерное воздействие мощностью 8 Вт (1560 нм) вызывает коагуляционный некроз геморроидальной ткани глубиной до 4 мм. Низкая интенсивность болевого синдрома и благоприятные отдаленные результаты позволяют рекомендовать данную методику для лечения хронического геморроя третьей стадии.

Ключевые слова: геморрой, лазерная деструкция, морфология, коагуляция, мощность излучения.

Введение

Хронический геморрой сохраняет статус социально значимого заболевания в структуре проктологической патологии, занимая одно из ведущих мест в хирургической практике [1, 2]. Несмотря на существенные достижения в изучении молекулярно-генетических и патофизиологических механизмов его развития [3, 4], а также внедрение современных терапевтических и хирургических стратегий, проблема оптимизации лечения остаётся актуальной [5, 6]. Особый интерес представляет поиск методов, сочетающих радикальность вмешательства с минимальной инвазивностью.

В последнее десятилетие наблюдается прогрессивное развитие малоинвазивных технологий, среди которых лазерная деструкция (лазерная геморроидопластика) демонстрирует многообещающие результаты при

II–III стадиях заболевания [7, 8]. Метод основан на селективной коагуляции паренхимы геморроидального узла под контролем лазерного излучения, что обеспечивает его абляцию и последующую фиксацию слизистой оболочки [9, 10]. Однако, несмотря на растущую популярность, в литературе отсутствует консенсус относительно оптимальных параметров излучения (длины волны, мощности, экспозиции), что обусловлено как техническими особенностями различного лазерного оборудования, так и недостаточной изученностью морфологических коррелятов воздействия [11, 12].

Ключевой проблемой является преимущественно эмпирический подбор режимов лазерного воздействия. Контроль эффективности процедуры часто ограничивается интра- и послеоперационной визуальной оценкой, в то время как гистологические изменения в тканях, определяющие отдалённые результаты, изучены фрагментарно [13, 14]. Отсутствие систематизированных данных о глубине и характере коагуляционного некроза в зависимости от применяемой энергии затрудняет стандартизацию методики и прогнозирование её эффективности, особенно при III стадии заболевания, где требования к радикальности воздействия возрастают [15].

Указанные обстоятельства определили цель настоящего исследования: комплексный морфологический анализ изменений геморроидальной ткани in vitro под воздействием лазерного излучения с определёнными параметрами и оценка отдалённых результатов его клинического применения.

Цель исследования изучить морфологические изменения геморроидальной ткани in vitro и клинические результаты лазерной деструкции с параметрами мощность 8 Вт и длина волны 1560 нм при хроническом геморрое III стадии.

Материалы и методы исследования

В исследование вошли 45 пациентов мужского и женского пола с диагнозом хронического геморроя третьей стадии. Отбор проводился на основании критериев включения: соответствие стадийности заболевания и отсутствие сопутствующих заболеваний аноректальной зоны. Из исследования исключались лица с сахарным диабетом, психиатрическими расстройствами и другой проктологической патологией (трещины заднего прохода, свищи прямой кишки, воспалительные заболевания кишечника и т.д.). Перед началом исследования от всех участников было получено подписанное информированное согласие, разрешающее их участие, обработку персональных данных и анонимную публикацию полученных результатов. Возрастные характеристики когорты представлены значением 51,4 ± 7,9 лет, а длительность анамнеза заболевания — 6,9 ± 2,7 лет.

Лазерная деструкцияция геморроидальных узлов была проведена с использованием хирургического лазерного комплекса «Ире-Полис» с длиной волны излучения 1560 нм. Вмешательство выполняли в импульсном режиме с выходной мощностью 8 Вт. Коагуляция ткани осуществлялась посредством торцевого световода по веерообразной траектории с шагом между точками воздействия 3–5 мм. Длительность импульса (1–2 с) и межимпульсный интервал (0,5–1 с) были стандартизированы для всех групп наблюдения и титровались индивидуально в соответствии с объемом целевого узла. Выбор параметров мощности основывался на анализе современных научных публикаций и паспортных данных оборудования. Ключевым независимым параметром исследования являлась общая поглощенная энергия, значение которой в исследуемой когорте составило M ± SD = 141,05 ± 20,25 кДж (диапазон: 119–208 кДж). Во всех случаях наблюдался непосредственный визуальный эффект в виде сокращения объема геморроидальных узлов в среднем на 50 %.

Для оценки болевого синдрома применялась визуально-аналоговая шкала (ВАШ). Пациенты самостоятельно фиксировали интенсивность болей на стандартизированных бланках. Анализировались следующие параметры: интенсивность болевого синдрома в первые 24 часа (в баллах по ВАШ), продолжительность болевого синдрома в сутках и потребность в назначении наркотических анальгетиков в послеоперационном периоде.

Послеоперационные осложнения классифицированы в соответствии со шкалой Clavien-Dindo. К учитываемым осложнениям были отнесены: рефлекторная задержка мочеиспускания, интра- и послеоперационное кровотечение, тромбоз геморроидальных узлов, а также длительное не заживление ран анального канала.

Отдаленные результаты лазерной деструкции при хроническом геморрое III стадии оценивались путем клинического осмотра и сбора жалоб в сроки 6 месяцев, 1, 2 и 3 года после вмешательства.

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета прикладных программ Biostat. Нормальность распределения количественных переменных проверялась с помощью критерия Шапиро-Уилка. Поскольку распределение не отличалось от нормального, для описания данных использовались параметрические методы: данные представлены как среднее арифметическое (M) ± стандартное отклонение (SD).

Результаты

При исследовании болевого синдрома на первые сутки после операции средние показатели интенсивности по визуально-аналоговой шкале составили 2,5 ± 0,2 бал-

ла, а продолжительность болевого синдрома при использовании мощности 8 Вт при длине волны 1560 нм составила 3,1 ± 0,3 суток. Показатель значений среднего уровня болевой чувствительности в послеоперационного периоде на первые сутки составил 2,5 ± 0,3 балла по визуально-аналоговой шкале, снижаясь до 1,5 ± 0,4 ко вторым и 1,0 ± 0,4 балла к третьем суткам, а к моменту выписки достигал 0,3 ± 0,1 балла.

При анализе хирургических осложнений ко классификации Clavien-Dindo. Все осложнения относились к первому классу. Из спектра осложнений, характерных для лазерной деструкции наблюдался один случай рефлекторной задержки мочеиспускания, что составило 2,2 %. Других осложнений, включая кровотечения из зоны операции и тромбоз геморроидальных узлов, длительно незаживающих ран анального канала не было зарегистрировано. В общей сложности было выявлено одно осложнение, что соответствует 2,2 %.

Эффективность лазерной деструкции при хроническом геморрое III стадии оценивалась в отдаленном послеоперационном периоде (через 6 месяцев, 1, 2 и 3 года) на основании анализа субъективных жалоб и данных объективного осмотра операционного поля. За время проведения катамнестического наблюдения по различным причинам была утрачена связь с половиной пациентов от первоначальной выборки. Через 6 месяцев и через год при осмотре пациентов осложнений и рецидива заболевания мы не наблюдали. При анализе результатов, полученных через два года после проведения лазерной деструкции, частота рецидивов составила 7,7 % — 1 из 13 пациентов, которые явились на контрольный осмотр. При оценке результатов через три года на контрольный осмотр пришло 10 пациентов. Рецидивы заболевания через три года наблюдались в 20 % случаев (2 пациента), а выделение крови из заднего прохода имело место у 10 % — 1 пациент.

Выводы

1. Применение режима лазерной деструкции мощностью 8 Вт продемонстрировало оптимальный профиль эффективности и безопасности в лечении хронического геморроя III стадии, что подтверждается достоверно более низкой интенсивностью послеоперационного болевого синдрома, минимальной частотой осложнений и наименьшими показателями рецидивов в отдаленном периоде.
2. Мощность лазерного излучения 8 Вт при длине волны 1560 нм обеспечивает низкую травматичность вмешательства, оптимальные темпы заживления что позволяет рекомендовать данный режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кайбышев В.О., Шелыгин Ю.А., Благодарный Л.А. Хирургическое лечение геморроидальной болезни: эволюция представлений // Колопроктология. — 2019. — № 2(68). — С. 15–25. DOI: 10.33878/2073–7556-2019-0-2-15-25
2. Lohsiriwat V. Hemorrhoids: from basic pathophysiology to clinical management // World Journal of Gastroenterology. — 2012. — Vol. 18, № 17. — P. 2009–2017. DOI: 10.3748/wjg. v18.i17.2009
3. Sandler R.S., Peery A.F. Rethinking What We Know About Hemorrhoids // Clinical Gastroenterology and Hepatology. — 2019. — Vol. 17, № 1. — P. 8–15. DOI: 10.1016/j.cgh.2018.03.020
4. Аванесян Р.Г., Григорьев Е.Г., Жуков Б.Н. Современные аспекты патогенеза и лечения хронического геморроя // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2018. — № 156(8). — С. 70–75. EDN: YUJQZR
5. Gallo G., Martellucci J., Sturiale A. et al. Consensus statement of the Italian society of colorectal surgery (SICCR): management and treatment of hemorrhoidal disease // Techniques in Coloproctology. — 2020. — Vol. 24, № 2. — P. 145–164. DOI: 10.1007/s10151-020-02149-1
6. Шелыгин Ю.А., Благодарный Л.А. Диагностика и лечение заболеваний органов аноректальной зоны. Национальное руководство. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. — 496 с. ISBN 978-5-9704-5413-6
7. Emile S.H., Youssef M., Thabet W. et al. Laser Hemorrhoidoplasty Versus Open Hemorrhoidectomy for the Treatment of Grade III Hemorrhoids: A Randomized Controlled Trial // Techniques in Coloproctology. — 2021. — Vol. 25, № 11. — P. 1207–1216. DOI: 10.1007/s10151-021–02510-y
8. Giordano P., Overton J., Madeddu F. et al. Transanal hemorrhoidal dearterialization: a systematic review // Diseases of the Colon & Rectum. — 2009. — Vol. 52, № 9. — P. 1665–1671. DOI: 10.1007/DCR.0b013e3181af50a4
9. Infantino A., Bellomo R., Dal Monte P.P. et al. Transanal haemorrhoidal artery echodoppler ligation and anopexy (THD) is effective for II— and III-degree haemorrhoids: a prospective multicentric study // Colorectal Disease. — 2010. — Vol. 12, № 8. — P. 804–809. DOI: 10.1111/j.1463–1318.2009. 01915.x
10. Maloku H., Gashi Z., Lazovic R. et al. Laser hemorrhoidoplasty procedure vs opens surgical hemorrhoidec-tomy: a trial comparing 2 treatments for hemorrhoids of third and fourth degree // Acta Informatica Medica. — 2014. — Vol. 22, № 6. — P. 365–367. DOI: 10.5455/aim.2014.22.365-367
11. Weyand G., Theiss L., Albers K. et al. Efficacy of laser hemorrhoidoplasty in the management of grade III hemorrhoids: a prospective study // Lasers in Medical Science. — 2021. — Vol. 36, № 5. — P. 1107–1113. DOI: 10.1007/s10103-020-03155-3
12. Giamundo P. Advantages and limits of hemorrhoidal dearterialization in the treatment of symptomatic hemor-rhoids // World Journal of Gastrointestinal Surgery. — 2016. — Vol. 8, № 1. — P. 1–4. DOI: 10.4240/wjgs. v8.i1.1
13. Tirone A., Giamundo P., De Nardi P. et al. Doppler-guided hemorrhoidal laser procedure for the treatment of symptomatic hemorrhoids: experimental protocol and results // Surgical Innovation. — 2018. — Vol. 25, № 1. — P. 45–48. DOI: 10.1177/1553350617745954
14. Giamundo P., Cecchetti W., Esercizio L. et al. Doppler-guided hemorrhoidal laser procedure for the treatment of symptomatic hemorrhoids: a prospective study on 101 patients with 2-year follow-up // International Journal of Colorectal Disease. — 2020. — Vol. 35, № 3. — P. 475–479. DOI: 10.1007/s00384-019–03484-w
15. Ratto C., Campennì P., Papeo F. et al. Transanal hemorrhoidal dearterialization (THD) for hemorrhoidal disease: a single-center study on 1000 consecutive cases and a review of the literature // Techniques in Coloproctology. — 2017. — Vol. 21, № 12. — P. 953–962. DOI: 10.1007/s10151-017-1716-7

© Засорин Александр Александрович (zas.aleksander2015@yandex.ru); Созонов Дмитрий Мстиславович (saur0n620@gmail.com)

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.16

ОПЕРИРОВАТЬ ИЛИ НАБЛЮДАТЬ? СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ЗАКРЫТОЙ ТРАВМОЙ ПЕЧЕНИ

TO OPERATE OR TO OBSERVE? COMPARATIVE RESULTS OF TREATMENT PATIENTS WITH CLOSED LIVER INJURY

N. Zykova
S. Onishchenko
V. Darvin
M. Shishulina

Summary. Optimization of the treatment algorithm in the conditions of a level I trauma center at the present stage.
This retrospective study was conducted at the Surgut Clinical Traumatology Hospital in Surgut, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug — Yugra, from 2018 to 2023. The study included 133 patients.
The study revealed that in the main group of observations, carried out with the expansion of indications for conservative treatment, close to the global criteria for managing patients with liver injury, the number of conservative treatment cases with successful results is significantly higher than in the control group of observations, fewer complications, shorter duration of inpatient treatment, lower mortality rates.

Keywords: closed liver injury, non-surgical treatment, ASST, WSES, OIS, anemia, complications of liver injury.

Зыкова Нина Владимировна
Аспирант, БУ ВО ХМАО-Югры Сургутский государственный университет;
Врач травматолог, Сургутская клиническая травматологическая больница
zikova_nv@edu.surgu.ru
Онищенко Сергей Вольдемарович
Доктор медицинских наук, профессор, БУ ВО ХМАО-Югры Сургутский государственный университет
sergej-on@mail.ru
Дарвин Владимир Васильевич
Доктор медицинских наук, профессор, БУ ВО ХМАО-Югры Сургутский государственный университет
Шишулина Мария Петровна
Врач хирург, Сургутская клиническая травматологическая больница
shishulinamaria@yandex.ru

Аннотация. Оптимизация лечебного алгоритма в условиях травматологического центра I уровня на современном этапе.
Это ретроспективное исследование было проведено на базе «Сургутской клинической травматологической больницы» г. Сургута, ХМАО-Югры, в период с 2018 по 2023 гг. В исследование включено 133 пациента.
В ходе исследования выявлено, что в основной группе наблюдений, проводимой с расширением показаний к консервативному лечению, приближенных к общемировым критериям ведения пациентов с травмой печени, количество консервативных случаев лечения с успешными результатами значительно выше, чем в контрольной группе наблюдения, меньшее количество осложнений, короче продолжительность стационарного лечения, ниже показатели летальности.

Ключевые слова: закрытая травма печени, неоперативное лечение, ASST, WSES, OIS, постгеморрагическая анемия, осложнения травмы печени.

Введение

В настоящее время, основываясь на литературных данных, травмы паренхиматозных органов, в том числе печени, при повреждениях органов брюшной полости наблюдается в 56–66 % случаев. Чаще травмы печени наблюдаются при ДТП, кататравме, криминальной травме, при занятиях экстремальными видами спорта, реже при падении с малой высоты (высоты роста) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В 37–45 % случаев в послеоперационном периоде у пациентов с травмой печени встречаются осложнения, обусловленные как самой тяжестью травмы, так и дополнительной операционной травмой. Летальность пострадавших с тяжелой травмой печени только на этапе госпитализации достигает 40 %, а в послеоперационном периоде она колеблется от 18 до 35 % при изолированной травме, при сочетанной травме достигает 39–42 % [7,8].

В течение нескольких последних лет в России развивается избирательное применение консервативной тактики при травме живота у гемодинамически стабильных пациентов.

Основной тенденцией этого направления является то, что по возможности и с учетом всей оценки повреж-

дения и состояния гемодинамики следует придерживаться минимально инвазивного вмешательства или использовать консервативный подход с целью профилактики послеоперационных осложнений и дополнительной травматизации. Это особенно важно при сочетанных травмах и тяжелой коморбидной патологии, пожилого и старческого возраста пациентов. При наличии значительных повреждений печени AAST IV–VI, нестабильной гемодинамике (систолическое АД менее 90 мм рт. ст.), на фоне массивных гемотрансфузий, постоянной поддержки вазопрессоров, сопутствующих повреждений, требующих оперативного лечения, при наличии клиники травматического или геморрагического шока пациента выбирается оперативная тактика лечения. В экстренном порядке пациента необходимо подать в операционную. [3, 4, 6, 9, 10, 11–13].

Консервативное лечение при травме печени начинается с клинического наблюдения и продолжается мониторингом лабораторных данных и результатов лучевых методов диагностики [4, 5, 8, 9, 11, 13]. Уровень методов рентгенодиагностики в настоящее время, в частности, мультиспиральной компьютерной томографии, дающих детальную информацию о тяжести способствует прогрессу и развитию этого направления лечения.

Абсолютным показанием к экстренной лапаротомии является не объем внутрибрюшного кровотечения, а, в первую очередь, нестабильная гемодинамика [3-9, 11–13]. По данным литературы российских и зарубежных авторов, показано, что неоперативное лечение может снизить летальность с 34 до 22–24 % при повреждении печени IV и V степени. NOM позволяет уменьшить объемы переливания крови, снижает частоту напрасных лапаротомий и абдоминальных осложнений, снижает стоимость лечения, продолжительность пребывания в стационаре [3, 4, 5, 8, 9, 11]. Согласно мировым стандартам Всемирного общества неотложной хирургии (WSES — World Society of EmergencySurgery), тактика ведения травмы печени определяется состоянием гемодинамики и степенью повреждения печени по данным КТ ангиографии, которая является основным и максимально информативным методом диагностики в оценке степени тяжести тупой травмы печени. Гемодинамически стабильные пострадавшие при отсутствии других абдоминальных повреждений, требующих операции, должны пройти попытку неоперативного ведения независимо от степени травмы [4, 5, 8, 9, 11, 13, 15–17].

Цель исследования

Улучшение результатов лечения больных с закрытыми травмами печени путем оптимизации тактики лечения в результате использования принципов концепции избирательного консерватизма.

Таблица 1.

Классификация WSES повреждения печени с учетом классификации AAST и гемодинамического статуса

Степень тяжести WSES	Характеристика группы
WSES I	гемодинамически стабильные повреждения AAST-OIS I–II степени
WSES II	гемодинамически стабильные повреждения AAST-OIS III степени
WSES III	гемодинамически стабильные повреждения AAST-OIS IV–V степени
WSES IV	гемодинамически нестабильные повреждения AAST-OIS I–VI степени

Примечание: OIS (OrganInjuryScaling) — шкала повреждения органа, предназначена для объективной оценки анатомического повреждения каждого отдельного органа.

Материалы и методы

Проанализированы результаты лечения 133 пострадавших с закрытой травмой живота и повреждением печени, госпитализированных в хирургические отделения Сургутской клинической травматологической больницы г. Сургута, ХМАО-Югры с 2018 по 2024 гг.

Наблюдаемые пациенты с закрытой травмой печени были разделены на 2 группы, в зависимости от лечебного алгоритма:

1 группа (контрольная) — пациенты, получившие лечение в стационаре в период с 2018 по 2021 годы (с преобладанием лапаротомных вмешательств); 2 группа (основная) — пациенты, пролеченные в стационаре в период с 2022 по 2024 годы, согласно мировым рекомендациям.

Контрольная группа была представлена 73 пациентами с закрытой травмой печени, основная — 60. В таблице 2 представлены данные распределения пациентов по возрастным и половым показателям.

Характеризуя исследуемую группу больных, необходимо подчеркнуть, что основу ее составили люди молодого возраста: среднее значение в группе составило 35,78 ± 16,4 лет (*Me* = 35,0; *s* = 16,4). В контрольной группе из 73 человек, мужчин было 54 (75 %), женщин — 19 пострадавших (25 %). Средний возраст женщин составил — 36,5 ± 19,5 лет (*Me* = 35,0; *s* = 19,5), мужчин — 34,5 ± 14,3 лет (*Me* = 35,5; *s* = 14,3).

В основной группе исследования, так же, как и в первой, преобладали пострадавшие молодого возраста. Средний возраст в группе составил 38,5 ± 18,6 лет (*Me* = 40,5; *s* = 18,4). В этой группе из 60 пациентов муж-

Таблица 2.

Распределение пациентов с закрытыми травмами печени по возрасту и полу

Пол \ Возраст (л)	До 17 л.	18–44 г.	45–59 л.	60–74 г.	Старше 75 л.	Всего
Контрольная группа						
М	5 (6,9 %)	31 (42,5 %)	16 (22 %)	2 (2,7 %)	0	54 (75 %)
Ж	3 (4,1 %)	8 (11 %)	5 (6,8 %)	2 (2,7 %)	1 (1,4 %)	19 (25 %)
Всего	8 (11 %)	39 (53,4 %)	21 (28,7 %)	4 (5,5 %)	1 (1,4 %)	73
Основная группа						
М	4 (6,6 %)	18 (30%)	10 (16,7)	5 (8,3)	2 (3,3 %)	41 (78,4 %)
Ж	4 (6,6 %)	8 (13,3 %)	7 (11,6 %)	2 (3,3 %)	0	19 (31,6 %)
Всего	8 (13,3 %)	26 (43,3 %)	17 (28,3 %)	7 (11,6 %)	2 (3,3 %)	60

чин было 43 (71 %), женщин — 17 (29 %). Средний возраст женщин составил — 36,8 ± 19,9 лет (*Me* = 41,5; *s* = 19,9), мужчин — 38,7 ± 18,4 лет (*Me* = 41,5; *s* = 18,4).

Группы равнозначны статистически по возрасту и полу. Значение t-критерия Стьюдента по возрасту составил 1,98, при уровне значимости p = 0,05. В группах по полу критерий Стьюдента составил 1,97 при p=0,05 (F=93) у мужчин и 2,03 у женщин (F=3).

На основании определения коэффициента вариации в исследуемых группах: WSES I — 9 %, WSES II — 18:, WSES III — 20 %, WSES IV — 10,8 %; определено, что совокупности данных вариации в группах составляет от 9 до 20 % (менее 33 %. Группы сравнения по степеням повреждения WSES в контрольной и основной выборках однородны.

По показателю непараметрического критерия Пирсона во взятых выборках основной и контрольной групп значимость различий от степени повреждения печени WSES (I–IV) не подтверждается ($\chi 2 \approx 1{,}38$, df=3 при уровне значимости α=0.05).

Наиболее частой причиной закрытой травмы живота послужило дорожно-транспортное происшествие — 81 пациент (61 %). В результате падения с высоты получили травму 29 (21,8 %) пациентов. У 8 больных (6 %) тупая травма живота явилась следствием бытовой или производственной травмы, а у 15 (11,2 %) носила криминальный характер.

В данном исследовании сочетанные повреждения опорно-двигательного аппарата с травмой печени имели место у 77 (58 %) пострадавших, с черепно-мозговой травмой — у 27 (21 %), с травмой грудной клетки — у 26 (20 %). Значительная часть пострадавших поступила с повреждениями печени в сочетании с повреждениями других органов и систем (черепно-мозговой травмой, травмой грудной клетки, травмой конечностей и позвоночника).

Всем пациентам проводился осмотр, комплексное клинико-лабораторное обследование. В качестве инструментальной диагностики пострадавшим контрольной группы выполнялась рентгенография брюшной полости и ультразвуковое исследование органов брюшной полости, согласно клиническим рекомендациям 2014 г. Части пациентам выполнена компьютерная томография. При необходимости выполнялась диагностическая лапароскопия.

В основной группе в качестве инструментальной диагностики выполнялось Fast-УЗИ и КТ органов брюшной полости с контрастированием. 35 пациентам из этой группы с целью диагностики и определения тактики выполнялось сразу КТ с контрастированием. При выполнении УЗДГ печени при травме обследование проводилось по протоколу FAST.

В контрольной группе точность УЗИ исследования достигла 84 %, КТ ангиографии — 94 %. В основной группе точность исследования УЗИ достигла 82 %, а КТ с контрастом 95 %.

Результаты и обсуждение

В каждой из групп, контрольной и основной, пациенты были распределены на подгруппы в зависимости от выбранной и проведенной им лечебной тактики.

1-я подгруппа — это пациенты с повреждениями печени, которым проводилось консервативное лечение — 13 пациентов (17 %) в контрольной группе и 18 пациентов (30 %) в основной группе.

2-ю-подгруппу составили пациенты с повреждениями печени, которым выполнялось оперативное лечение: лапароскопический гемостаз — 12 пациентов (16 %) в контрольной группе и 17 пациентов (28 %) во основной группе; пациенты, которым выполнена лапаротомия — 48 пациентов (66 %) в контрольной группе и 25 пациентов (41 %) в основной группе.

Консервативное лечение проводилось в обеих группах, но значительно отличается по степени повреждения печени у пациентов в группах и количеству случаев.

Из 13 (17 %) пациентов в контрольной группе, пролеченных консервативно по характеру повреждений это были пациенты со степенью тяжести травмы печени WSES 1 -10 пациентов (AAST 1) и WSES 2–3 пациента (AAST 2). По данным УЗИ и КТ ангиографии это были ушибы печени, подкапсульные гематомы до 5 см, без тенденции к увеличению в динамике. У 2 из этих пациентов были с повреждением печени AAST 2 диагностировано наличие жидкости в брюшной полости до 100 мл. По стабилизации состояния сопутствующих повреждений (ушиб головного мозга) и в ходе наблюдения ухудшения состояния по травме печени не наблюдалось и оперативного лечения травмы печени (лапаротомии) не потребовалось. Во основной группе по протоколу консервативного лечения пролечены 18 (30 %) пациентов: пациенты со степенью тяжести травмы печени с WSES 1 — 10 пациентов (AAST 1) и WSES 2 — 7 пациентов (AAST 2), WSES 3 — 1 пациент (AAST 3). По данным КТ ангиографии это были под капсульные гематомы печени и селезенки, разрывы печени различной степени тяжести, множественные разрывы без признаков продолжающегося кровотечения вне сосудистой ножки.

Оперативное лечение в контрольной группе наблюдений (73 пациента) проведено 60 (83 %) пациентам. 12 пациентам (16,5 %) выполнена лапароскопия с выполнением гемостаза. Это были пострадавшие с WSES 1–12 пациентов, WSES 2 -4 пациента, WSES 3 — 1 пациент (под капсульная гематома селезенки, множественные разрывы паренхимы до 30% площади в сегментах 4 и 5, гемоперитонеум 400 мл). Лапаротомия выполнена 48 (66,5 %) пациентам контрольной группы, при этом степень повреждения у пациентов была следующая: WSES 1–5 пациентов, WSES 2–17 пациентов, WSES 3–12 пациентов, WSES 4–14 пациентов. Показаниями к оперативному лечению были: признаки наличия или наступления гемодинамической нестабильности, наличие крови в брюшной полости от 100 мл, признаки продолжающегося кровотечения, подозрение на повреждение полых органов, признаки перитонита.)

У части пациентов контрольной группы, пролеченных оперативно со степенью повреждения WSES 1–3 (из 5) признаки повреждения были минимальны и отсутствовали признаки гемодинамической нестабильности. У 12 из 17 пациентов тяжесть повреждения обуславливалась большим объемом гемоперитонеума — от 200 до 400, большим объемом повреждения паренхимы, но пострадавшие были гемодинамически нестабильны. Можно предположить, что для этих пациентов мог быть осуществлен консервативный протокол ведения, по крайней мере на первоначальном этапе.

В наблюдаемых группах, контрольной и основной, у пациентов диагностированы различные виды осложнений травмы печени и ее лечения. Осложнения у пациентов в контрольной группе наблюдались у 52 пациентов, у 45 из них в комбинации видов осложнений. В основной группе наблюдалось меньшее количество осложнений: у 37 пациентов. 30 пациентов с комбинированными осложнениями.

Таблица 3.

Наблюдаемые осложнения у пациентов в группах исследования

Осложнения	Контрольная группа	Основная группа
Постгеморрагическая анемия 1 ст	8 (11 %)	6 (10 %)
Постгеморрагическая анемия 2 ст	10 (13 %)	5 (8 %)
Постгеморрагическая анемия тяжелой 3 ст	7 (9 %)	3 (5 %)
Посттравматическая пневмония	5 (6 %)	2 (3,3 %)
Острая язва желудка	2 (2 %)	0
Острый панкреатит	2 (2 %)	1 (1 %)
Рецидив кровотечения	6 (8 %)	3 (5 %)
Абсцессы брюшной полости	3 (4 %)	1 (1,5 %)
Ранняя спаечная кишечная непроходимость	5 (6 %)	2 (3 %)
Желчный перитонит	3 (4 %)	1 (1,5 %)
Поздняя спаечная кишечная непроходимость	4 (5 %)	1 (1,5 %)
СПОН	5 (7 %)	3 (5 %)
Сепсис	3 (4 %)	1 (1,5 %)
ДВС— синдром	2 (3 %)	0

Доля пациентов с постгеморрагической анемией сравнительно меньше в основной группе по сравнению с контрольной. В контрольной группе пациентов 2 раза чаще наблюдалась и ранняя спаечная кишечная непроходимость, в 4 раза — поздняя спаечная непроходимость.

Летальность в сравниваемых 2 группах исследования оценивалась в зависимости от степени тяжести повреждения, гемодинамической стабильности, возраста пациентов и вида лечения. В контрольной группе общая летальность поступивших пациентов составила — 15 % (11 пациентов из 73), в основной — 10 % (6 пациентов из 60).

Большинство умерших пациентов относилась к группе нестабильных пациентов (9/12 %) и 2 (2,7 %) гемодинамически стабильных в контрольной группе, в основной группе умершие — исключительно пациенты с нестабильной гемодинамикой. (6 (10 %). При сочетанной травме чаще смертность наблюдалась в обеих группах при комбинации травмы печени и органов брюшной

полости с скелетной травмой (8 /11 % в контрольной и 7 /11 % пациентов в основной), часто множественной и черепно-мозговой травмой (4 случая в каждой из групп наблюдений/ 5,5 % в контрольной группе и 5 % в основной). У пациентов в наблюдаемых группах с травмой печени летальность чаще являлась исходом комбинации повреждения печени с травмой кишечника, желчного пузыря, почек и селезенки. Возрастные показатели летальности превалировали в группах молодого возраста, как наиболее активного и подверженного травмам ДТП (до 44 лет от 7 (9,6 %) в контрольной и 4 (5,5 %) пациентов в основной группе).

Летальность в основной группе, где показания к консервативному протоколу были расширены, составила 10 %, в контрольной — 15 %.

Продолжительность лечения в стационаре составила в контрольной группе — 23 ± 21,2 дней (*Me* = 16; *s* = 21,2), в основной — 16 ± 14,1 дней (*Me* = 12; *s* = 14,1). Значение критерия Стьюдента при p=0,03 составило 2,14. В основной группе продолжительность среднего койко-дня статистически значимо ниже.

Заключение

Основным фактором, определяющим тактику ведения пациентов с закрытой травмой печени, является гемодинамический статус. Нестабильность гемодинамики, а также вид и степень органных повреждений во многом предопределяют прогноз для пострадавшего. Консервативное ведение пациентов с закрытой травмой печени считается возможным только в крупных специализированных центрах, обладающих круглосуточным широким спектром диагностических и лечебных возможностей, использующих мультидисциплинарный подход к лечению закрытых травм живота; оно является эффективной и безопасной альтернативой хирургическому лечению при правильном отборе пострадавших. При стабильной гемодинамике возможна попытка консервативного ведения. Скрининговым методом диагностики при подозрении на повреждения печени при закрытой абдоминальной травме является УЗИ, по FAST протоколу. Максимально информативным методом диагностики, определяющим тактику ведения пациента, является КТ с контрастированием. При наличии стабильной гемодинамики, сознания, отсутствии тяжелой сочетанной травмы, гемоперитонеуме до 300–500 мл, травме органа не более III степени по шкале OIS, возможно проведение консервативного лечения с динамическим УЗ-контролем и наблюдением.

Расширение показаний к консервативному лечению пациентов с закрытой травмой печени при соблюдении условий и отсутствии противопоказаний позволяет снизить количество осложнений, снижает летальность и затраты на лечение пациентов ввиду уменьшения продолжительности койко-дня в стационаре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.В. Экспериментальное исследование локального криогемостаза при повреждениях печени и селезенки: автореф. дис. канд. мед. наук. // Волгоград. — 2013. — 21.
2. Дюков А.К. Диагностика и хирургическая тактика при закрытых травмах живота с повреждением печени в условиях многопрофильного стационара: автореф. дис. канд. мед. наук. // СПб. — 2018. — 29.
3. Суворов В.В. Дифференцированная хирургическая тактика при травме живота, сопровождающейся повреждением печени и селезенки / Суворов В.В., Маркевич В.Ю., Гончаров А.В. и др. // Военно-медицинский журнал. — 2021. — 342. — № 9. — 50–57. https://doi :10.52424/002690.
4. Villegas W. Trends in reduction of mortality in liver trauma. / Villegas W., Vaughan J. // Crit Care Nurs Clin North Am. — 2022. — 34(3). — 351–359.
5. Ryce A.L. Contemporary management of blunt liver trauma: An analysis of the Trauma Quality Improvement Program Registry (2007–19). / Ryce A. L., Somasundaram A., Duszak R. et al. // Journal of Vascular and Interventional Radiology. — 2023. — 34(8). — 1441–1450.
6. Маскин С.С. Закрытые повреждения печени: алгоритм действий хирурга в условиях травмцентра 1 уровня. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Волгоград, Россия. / Маскин С.С. Александров В.В. Матюхин В.В. Ермолаева Н.К. // Политравма. — 2020. — 2. — 84–91. Базы данных: eLibrary.
7. Сигуа Б.В., Земляной В.П., Дюков А.К. Сочетанная и изолированная травма живота с повреждением печени // Вестник хирургии имени И.И. Грекова. 2015. Т. 174, № 1. С. 9–15.
8. Coccolini F. WSES classification and guidelines for liver trauma / Coccolini F., Catena F., Moore E.E. et al. // World J. Emerg. Surg. — 2016. — №11. — 50. https://doi:10.1186/s13017-016-0105-2.
9. Coccolini F. WSES classification and guidelines for liver trauma / Coccolini F., Catena F., Moore E.E. et al. // World J. Emerg. Surg. — 2016. — №11. — 50. https://doi:10.1186/s13017-016-0105-2.
10. Суворов В.В. Дифференцированная хирургическая тактика при травме живота, сопровождающейся повреждением печени и селезенки / Суворов В.В., Маркевич В.Ю., Гончаров А.В. и др. // Военно-медицинский журнал. — 2021. — 342. — № 9. — 50–57. https://doi :10.52424/002690.
11. Zakaria H.M. Risk factors and management of different types of biliary injuries in blunt abdominal trauma: Single-center retrospective cohort study. / Zakaria H.M., Oteem A., Gaballa N. K. et al. //Ann Med Surg (Lond). — 2020. — 52. — 36–43.
12. Fischer N. Surveillance imaging following liver trauma has a low detection rate of liver complications. / Fischer N., Bartlett A. // Injury. — 2022. — 53(1). — 86–91.

13. Tarchouli M. Liver trauma: What current management? / Tarchouli M., Elabsi M., Njoumi N. et al. // Hepatobiliary Pancreat Dis Int. — 2018. -17(1). — 39–44.
14. Гринцов А.Г. К вопросу о лечении закрытых травм печени. Государственная образовательная организация высшего профессионального образования «Донецкий национальный медицинский университет имени М. Горького. / Гринцов А.Г., Антонюк С.М., Ахрамеев В.Б., Луценко Ю.Г., Матийцив А.Б. // Вестник неотложной и восстановительной хирургии. — 2021. — 6, — 1. Базы данных: eLibrary.
15. Владимирова Е.С., Дубров Э.Я., Черная Н.Р. Миниинвазивные методы диагностики и лечения при посттравматических образованиях печени // Анналы хирургической гепатологии. 2014. Т. 19, № 4. С. 32–38.
16. Levent Kaptanoglu. Current approach to liver Traumas / Levent Kaptanoglu, Necmi Kurt et al. // International Journal of Surgery. — 2017/ — № 39. — 255–259. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2017.02.015.
17. Leppäniemi A. Nonoperative management of solid abdominal organ injuries: From past to present. Scand J Surg. 2019;108(2):95–100. PMID: 30832550 https://doi.org/10.1177/1457496919833220.

© Зыкова Нина Владимировна (zikova_nv@edu.surgu.ru); Онищенко Сергей Вольдемарович (sergej-on@mail.ru);
Дарвин Владимир Васильевич; Шишулина Мария Петровна (shishulinamaria@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА МОДЕЛИРОВАНИЯ АБДОМИНОЦЕНТЕЗА НА ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF MODELING ABDOMINOCENTESIS IN LABORATORY ANIMALS

S. Kapralov
M. Polidanov
R. Petrunkin
A. Kashikhin
E. Kotenko
A. Ratushnyak

Summary. The aim of the study is experimental substantiation of the method of modeling abdominocentesis on laboratory animals. To achieve the goal, a series of experimental studies on 20 female laboratory rats of the breed «Standard» weighing 200±50 g was conducted, during which it was established that the reproducible method is safe and non-traumatic for the abdominal cavity organs, which is also confirmed by the absence of abdominal cavity organ damage. In addition, the use of this method allows reducing the risk of postoperative complications such as postoperative peritonitis, abdominal abscesses, postoperative intestinal obstruction, and intra-abdominal bleeding.

Keywords: abdominal surgery, abdominal cavity, experimental modeling, abdominocentesis, laparotomy.

Капралов Сергей Владимирович
Доктор медицинских наук, доцент,
Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского
sergejkapralov@yandex.ru
Полиданов Максим Андреевич
Советник Российской Академии Естествознания (РАЕ),
специалист научно-исследовательского отдела,
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
maksim.polidanoff@yandex.ru
Петрунькин Родион Павлович
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
Кашихин Андрей Андреевич
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
Котенко Елена Николаевна
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург
Ратушняк Александр Анатольевич
Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Цель исследования — экспериментальное обоснование способа моделирования абдоминоцентеза на лабораторных животных. Для достижения поставленной цели была проведена серия экспериментальных исследований на 20 лабораторных крысах-самках породы «Стандарт» массой 200±50 г., в ходе которых было установлено, что воспроизводимый способ безопасен и не травматичен для органов брюшной полости, что также подтверждается отсутствуем повреждений органов брюшной полости. Кроме того, использование данного способа позволяет уменьшить риск послеоперационных осложнений, таких как послеоперационный перитонит, абсцессы брюшной полости, послеоперационная кишечная непроходимость и внутрибрюшное кровотечение.

Ключевые слова: абдоминальная хирургия, брюшная полость, экспериментальное моделирование, абдоминоцентез, лапаротомия.

Введение

Абдоминоцентез — минимально инвазивная процедура, позволяющая врачу получить образец жидкости из брюшной полости в диагностических целях. В связи с этим, изучение и описание особенности лапароскопической визуализации и ориентирования в брюшной полости при различных патологиях является актуальным направлением в абдоминальной хирургии и по настоящее время. Опасным этапом лапароскопической операции является введение «первого» троакара [1,2], так как ряд потенциально возможных осложнений представляют непосредственную угрозу для жизни больного [3,4].

Между тем, по данным литературы, наибольшее количество внутрибрюшных осложнений возникает при «слепом» введении первого троакара. Баранов Г.А., Завьялова Н.И., Карбовский М.И. на основании анализа 6106 лапароскопических вмешательств обнаружили, что на этапе доступа в брюшную полость без предварительного наложения пневмоперитонеума при «однопрокольной» методике серьезные осложнения возникли у 0,13 % пациентов, а летальность составила 0,03 %.

К тому же, известен способ безопасного введения троакара в брюшную полость для создания в ней «воздушной подушки», позволяющий снизить возможность повреждения сосудов и внутренних органов и повысить

эффективность операции — диагностической лапароскопии, включающий наложение пневмоперитонеума (ПП) — одного из наиболее ответственных этапов выполнения любой лапароскопической операции. В брюшную полость вводят газ, приподнимающий брюшную стенку и создающий необходимое для работы пространство. Создаваемая «воздушная подушка» увеличивает расстояние между брюшной стенкой и внутренними органами в момент введения троакара. Заданное давление поддерживают на протяжении всей операции. Вначале кожу больного рассекают на всю толщу в предполагаемой точке введения иглы инструмента для наложения пневмоперитонеума (ПП), который еще называют иглой Вереша. Тактильно хирург обычно ощущает прохождение двух препятствий — апоневроза и брюшины. После пункции следует избегать маятникообразных движений иглы, способных привести к повреждению внутренних органов и сосудов [5], исключающий попадание газа в ткани до проникновения иглы в брюшную полость.

Способ позволяет достаточно безопасно наложить пневмоперитонеум, однако в нем отсутствует возможность контролировать процесс введения «первого» троакара и, таким образом, не может полностью гарантировать предупреждение троакарных повреждений.

Известен способ лапароцентеза, осуществляемый с помощью устройства, описанного в авторском свидетельстве SU 1187798 (МПК A61B17/32, опубл. 30.10.1985). Согласно способу после наложения пневмоперитонеума устройство вставляют в гильзу лапароскопа или в гильзу фотолапароскопа и размещают в правой руке оператора таким образом, чтобы указательный и средний пальцы вошли в зацепление с кольцевыми ручками, а большой палец находился на баллоне. Расположив инструмент перпендикулярно к передней брюшной стенке, и плотно прижав к ней насадку, резко нажимают большим пальцем на баллон, при этом усилие передается через направляющую трубку на нож, лезвие которого выходит из насадки на 2–3 мм и рассекает кожу. Длину выхода лезвия ножа из корпуса регулируют вращением по резьбе держателя. При этом рука оператора ощущает, а глаза контролируют, как устройство вместе с гильзой лапароскопа начинает плавно погружаться в ткани передней брюшной стенки. Так как ткани вначале рассекают ножом с последующим раздвижением их конусной насадкой, то развиваемое при этом усилие незначительно. Продвижение инструмента продолжается до ощущения препятствия — свидетельство тому, что насадка с выдвинутым лезвием ножа подошла к апоневрозу. После этого большой палец плавно отпускает баллон, который при помощи пружины возвращается в исходное положение, при этом лезвие ножа уходит в насадку. Для рассечения апоневроза большой палец перемещают на баллон и, при легком надавливании на держатель резко нажимают большим пальцем на баллон, при этом лезвие ножа выходит из насадки и рассекает апоневроз, после чего нож опять убирают. Продвижение инструмента через неплотные слои передней брюшной стенки — мышцы, предбрюшинную жировую клетчатку и брюшину — осуществляется только насадкой без выдвижения лезвия путем легкого надавливания на держатель. В момент проникновения насадки в брюшную полость газ пневмоперитонеума через отверстие в насадке, направляющую трубку поступает в эластичный баллон и надувает его. Рука оператора при этом ощущает чувство «проваливания». Дальнейшее продвижение устройства прекращают, его извлекают из гильзы лапароскопа, в указанную гильзу вставляют оптическую систему для осмотра и фотографирования органов брюшной полости.

Однако способ сложен в воспроизведении и имеет недостаточную эффективность.

Известен способ выполнения эндоскопического исследования с помощью лапароскопа (диаметр 5 мм, угол обзора 30 градусов), эндоскопического видеокомплекса [7]. В предлагаемом способе лапароскопию проводили под общей анестезией. После введения животного в наркоз готовили операционное поле по общепринятой методике. Абдоминоцентез выполняли с помощью иглы Вереша с последующей инсуффляцией двуокиси углерода (давление 7–8 мм рт. ст.). Используя троакар диаметром 5 мм с атравматическим стилетом, в различных областях брюшной стенки определяли место, наиболее подходящее для исследования разных отделов брюшной полости. Затем вводили эндоскоп и приступали к визуальному осмотру брюшной полости. При необходимости устанавливали добавочный троакар для введения манипулятора. Операцию завершали удалением газа из брюшной полости и послойным наложением швов на брюшную стенку.

Однако способ не позволяет использовать троакары большего диаметра без расширения оперативного доступа, что повышает травматичность вмешательства и риск осложнений.

Примечательным является то, что нами не были выявлены способы моделирования абдоминоцентеза на лабораторных животных, в частности крысах.

В связи с вышеперечисленным, *целью исследования* стало экспериментальное обоснование способа моделирования абдоминоцентеза на лабораторных животных.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на 20 лабораторных крысах-самках породы «Стандарт» массой 200±50 г. Все манипуляции и содержание животных было регламентировано этической комиссией ФГБОУ ВО «Саратов-

ского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского» Министерства Здравоохранения Российской Федерации (протокол № 7, 15.07.2024).

Условия содержания в виварии лабораторных животных регламентированы РД-АПК 3.10.07.02-09 «Методические рекомендации по содержанию лабораторных животных в вивариях научно-исследовательских институтов и учебных заведений», приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 01.04.2016 г. № 199н «Об утверждении правил надлежащей лабораторной практики», ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами» (актуализированным от 01.01.2021).

Результаты исследования

По стандартной методике была проведена общая анестезия лабораторных животных — крыс. В асептичных условиях выполнен разрез кожи размером 0,2–0,3 мм на животе крысы, предварительно выбритом, по срединной лини в мезогастральной области (рисунок 1).

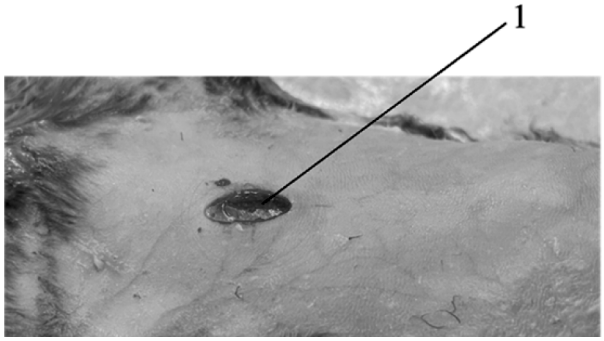


Рис. 1. Разрез кожи (0,2–0,3 мм) на животе лабораторной крысы

Примечание: цифрой один на рисунке обозначен разрез кожи.

Затем был к брюшной стенке был приложен шприц объемом 0,5 мл, имеющий герметичный канал в поршне (рисунок 2), к брюшной стенке, позиционируя рану в его просвете.

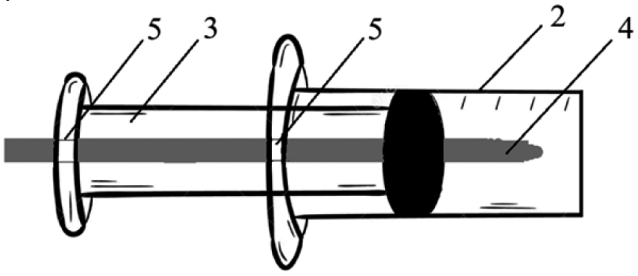


Рис. 2. Устройство шприца, имеющего герметичный канал в поршне, в котором размещена игла Вереша

Примечание: цифрами на рисунке обозначены: 2 — шприц; 3 — поршень шприца; 4 — игла Вереша; 5 — герметичный канал в поршне.

Движением поршня в шприце создавалось разряжение, вакуумируя область раны и фиксируя её в шприце. Тракцией шприца производился лапаролифтинг (рисунок 3).

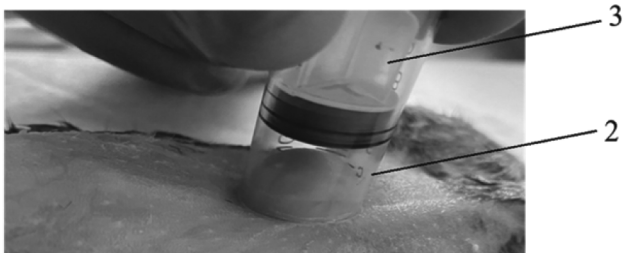


Рис. 3. Воспроизведение лапаролифтинга шприцом 0,5 мл

Примечание: цифрами на рисунке обозначены: 2 — шприц; 3 — поршень шприца.

Через канал поршня шприца в рану была проведена игла Вереша и, не прекращая вакуумирующий лапаролифтинг, был воспроизведен прокол всей толщи брюшной стенки (рисунок 4).

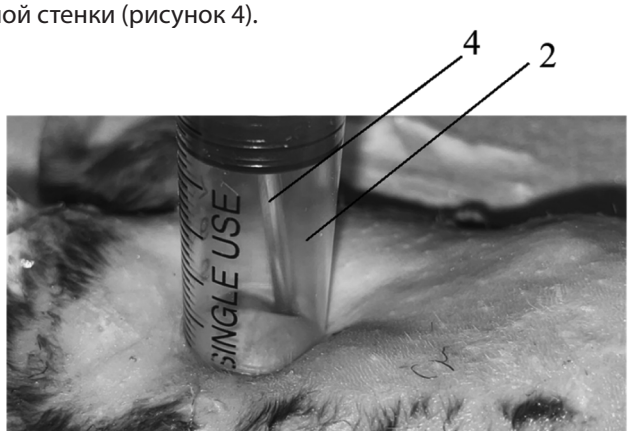


Рис. 4. На рисунке показан шприц, имеющий герметичный канал в поршне, в котором размещена игла Вереша

Примечание: цифрами на рисунке обозначены: 2 — шприц; 3 — игла Вереша.

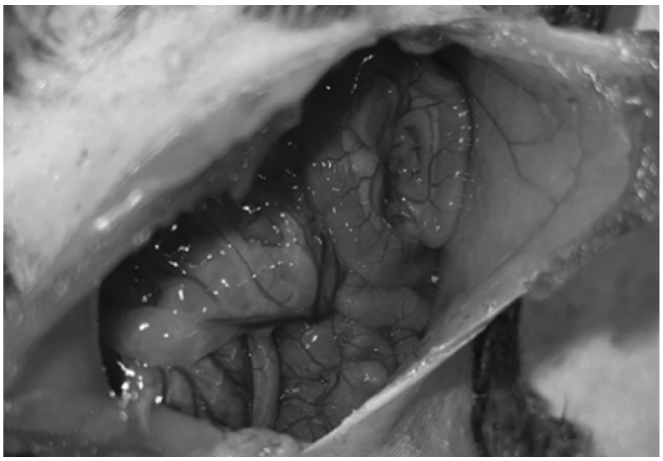


Рис. 5. Результат диагностической лапаротомии, отражающий отсутствие травматичности органов брюшной полости

Далее по принятой методике через иглу Вереша был наложен пневмоперитонеум и, пользуясь им, завершен абдоминоцентез с помощью троакара, который используют для введения лапароскопа и инструментов. Игла Вереша была подключена к источнику воздуха для создания воздушной подушки в брюшной полости.

Заключение

Таким образом, в ходе произведенной диагностической лапаратомии было установлено, что воспроизводимый способ безопасен и не травматичен для органов брюшной полости, что подтверждается отсутствуем повреждений органов брюшной полости (рисунок 5).

Кроме того, использование данного способа [7] позволяет уменьшить риск послеоперационных осложнений, таких как послеоперационный перитонит, абсцессы брюшной полости, послеоперационная кишечная непроходимость и внутрибрюшное кровотечение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бебуришвили А.Г., Михин И.В. и др. Хирургия. 2004; 6: 27–30.
2. Azvedo J.L., Azvedo O.C. et al. Injuries caused by Veress needle insertion for creation of pneumoperitoneum: a systematic iterature rewiew. Surg. Endosc. 2009; 23 (7): 1428–1432.
3. Ahmad G., Duffy J.M., Watson. A. Laparoscopic entry techniques and complications. Int. J. Gynecol. Obstet. 2007; 99 (1): 52–55.
4. Roviaro G.C., Faroli F., Saguatti L. et al. Major vascular injuries in laparoscopic surgery. Surg. Endosc. 2002; 16: 1192–1196.
5. Патент RU №40874, МПК A61B 17/32, опубл. 10.10.2004. Аглиуллин А.Ф., Гаптраупов Ф.Г., Левина С.В., Зарезнов А.В., Воробьев К.И., Сизов В.Н., Курбанов Н.А. Инструмент для наложения.
6. Шумаков Н.И. Топографическое обоснование диагностической лапароскопии у собак. Мелкие домашние и дикие животные. 2014; 1: 29–32.
7. Заявка на патент на изобретение № 2024136433 от 05.12.2024. Полиданов М.А., Капралов С.В., Кашихин А.А., Сулаев Е.В., Петрунькин Р.П., Волков К.А., Масляков В.В., Аблаев Э.Э., Греков В.В., Сафронов Д.В., Дягель А.П., Высоцкий Л.И., Ратушняк А.А. Способ моделирования абдоминоцентеза на лабораторных животных.

© Капралов Сергей Владимирович (sergejkapralov@yandex.ru); Полиданов Максим Андреевич (maksim.polidanoff@yandex.ru);
Петрунькин Родион Павлович; Кашихин Андрей Андреевич; Котенко Елена Николаевна; Ратушняк Александр Анатольевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.22

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ЛЕЧЕНИЯ РАКА ШЕЙКИ МАТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИОЭМБОЛИЗАЦИИ МАТОЧНЫХ АРТЕРИЙ

RESULTS OF COMBINED TREATMENT OF CERVICAL CANCER WITH THE USE OF UTERINE ARTERY CHEMOEMBOLIZATION

G. Guliyeva
L. Mkrtchyan
V. Kucherov
L. Krikunova
S. Ivanov
A. Kaprin

Summary. Locally advanced cervical cancer (LACC) remains a pressing clinical problem despite the introduction of modern diagnostic and treatment methods. One of the promising technologies that can improve the effectiveness of therapy is uterine artery chemoembolization (UAC), which provides local action on the tumor with minimal systemic toxicity. *Materials and methods*. A retrospective and prospective study was conducted, including 108 patients with LACC stages IIA–IIIB, randomized into two groups: the main (n = 60, UAC + chemoradiotherapy — CRT) and the control (n = 48, CRT only). The effectiveness of treatment was assessed according to RECIST 1.1 criteria, and survival was analyzed using the Kaplan–Meier method. Prognostic factors and toxicity were also studied. *Results*. Complete tumor regression was achieved in 70.0 % of patients in the CEMA+CRT group versus 38.0 % in the CRT group ($p = 0.001$). Three-year relapse-free survival was 73.4 % and 34.7 %, respectively ($p = 0.003$), overall survival was 92.1 % and 66.7 % ($p = 0.084$). The inclusion of CEMA was accompanied by an increase in hematological toxicity (leukopenia ≥ stage II — 48 % versus 2 %, $p < 0.001$), but severe complications were rare. Significant prognostic factors were age >44 years, SCC level <5.5 ng/ml, tumor growth pattern and smoking. *Conclusion*. Uterine artery chemoembolization performed before CRT increases immediate and long-term efficacy of cervical cancer treatment. The method is appropriate for inclusion in clinical protocols for patients with unfavorable prognostic factors and acceptable toxicity levels.

Keywords: cervical cancer, chemoembolization, relapse-free survival, prognostic factors, SCC antigen.

Кулиева Гюнель Закир кызы
врач радиотерапевт, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
gunelka2010@yandex.ru
Мкртчян Лиана Сирекановна
Доктор медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Кучеров Валерий Владимирович
Кандидат медицинских наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Крикунова Людмила Ивановна
Доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии
Иванов Сергей Анатольевич
Доктор медицинских наук, профессор, член корреспондент РАН, директор, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии; ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»
Каприн Андрей Дмитриевич
Доктор медицинских наук, академик РАН, генеральный директор, Национальный медицинский исследовательский центр радиологии; «Российский университет дружбы народов»; Московский научно-исследовательский онкологический институт имени им. П.А. Герцена, филиал ФГБУ Национальный медицинский исследовательский центр радиологии

Аннотация. Рак шейки матки (РШМ) остаётся актуальной клинической проблемой, несмотря на внедрение современных методов диагностики и лечения. Одной из перспективных технологий, позволяющих повысить эффективность терапии, является химиоэмболизация маточных артерий (ХЭМА), обеспечивающая локальное воздействие на опухоль с минимальной системной токсичностью. *Материалы и методы*. Проведено ретроспективно-проспективное исследование, включающее 108 пациенток с МРРШМ IIA2-IIIB стадий, рандомизированных на две группы: основную (n = 60, ХЭМА + химиолучевая терапия — ХЛТ) и контрольную (n = 48, только ХЛТ). Оценка эффективности лечения осуществлялась по критериям RECIST 1.1, а выживаемость анализировалась методом Каплана–Майера. Также

изучались прогностические факторы и токсичность. *Результаты*. Полная регрессия опухоли была достигнута у 70,0% пациенток группы ХЭМА+ХЛТ против 38,0 % в группе ХЛТ (p = 0,001). Трёхлетняя безрецидивная выживаемость составила 73,4 % и 34,7 % соответственно (p = 0,003), общая выживаемость — 92,1 % и 66,7 % (p = 0,084). Включение ХЭМА сопровождалось повышением гематологической токсичности (лейкопения, нейтропения ≥ II ст. — 48 % против 2 %, p <0,001). Значимыми прогностическими факторами оказались: объем опухоли шейки матки, возраст >44 лет, уровень SCC <5,5 нг/мл, форма роста опухоли и курение. *Заключение*. Химиоэмболизация маточных артерий, проведённая до начала ХЛТ, повышает непосредственную и отдалённую эффективность лечения МРРШМ. Метод целесообразен к включению в клинические протоколы для пациенток с неблагоприятными факторами прогноза и допустимым уровнем токсичности.

Ключевые слова: рак шейки матки, химиоэмболизация, безрецидивная выживаемость, прогностические факторы, SCC-антиген.

Введение

Рак шейки матки (РШМ) остаётся одной из наиболее значимых проблем в онкогинекологии. Несмотря на доступность методов скрининга и активное внедрение вакцинации против вируса папилломы человека (ВПЧ), заболевание продолжает занимать лидирующие позиции среди онкологических заболеваний женской репродуктивной системы [1, 2]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире диагностируется более 600 тысяч новых случаев РШМ, при этом около 340 тысяч женщин умирают от этой патологии [3, 4]. В структуре онкологической заболеваемости у женщин РШМ занимает четвёртое место после рака молочной железы, колоректального рака и рака лёгких [5, 6].

Эпидемиологическая ситуация в Российской Федерации также остаётся напряжённой. В 2021 году зарегистрировано более 15 тысяч новых случаев РШМ, а удельный вес заболевания в структуре злокачественных новообразований у женщин составил 5,2 % [7]. Особенно тревожным остаётся высокий показатель заболеваемости среди женщин репродуктивного возраста: более 60 % всех случаев РШМ приходятся на возраст младше 50 лет. Несмотря на умеренное снижение уровня смертности, обусловленное улучшением диагностики и доступом к лечению, общее число летальных исходов остаётся высоким — более 5,8 тысяч в 2021 году [7].

Проблема лечения местнораспространённого рака шейки матки (МРРШМ), который характеризуется инвазией в параметральную клетчатку, влагалище или регионарные лимфатические узлы, остаётся особенно актуальной. По данным клинической практики, более 30 % пациенток с РШМ впервые обращаются с III стадией заболевания, при этом около половины имеют признаки метастатического поражения лимфоузлов [8, 9]. Несмотря на развитие высокотехнологичных методов терапии, включая дистанционную и внутриполостную лучевую терапию, химиолучевое лечение и таргетную терапию, прогноз при МРРШМ часто остаётся неблагоприятным, особенно при больших объёмах опухоли и наличии лимфогенного метастазирования [10, 11]. Стандартной схемой остаётся сочетанная химиолучевая терапия с применением цисплатина, однако и она сопровождается выраженными побочными эффектами и не гарантирует долгосрочного локального контроля заболевания [12, 13].

Одним из перспективных направлений в терапии МРРШМ является применение химиоэмболизации маточных артерий (ХЭМА), которая сочетает эффекты локальной доставки химиопрепаратов и временного ишемического воздействия на опухолевую ткань в зависимости от метода эмболизации. ХЭМА позволяет добиться высокой локальной концентрации цитостатиков при минимизации системной токсичности, а также вызвать деструкцию опухоли за счёт нарушения её кровоснабжения [14, 15]. Ранее метод применялся преимущественно с целью купирования кровотечений у пациенток с гинекологическими новообразованиями, но в последние годы активно изучается его роль как компонента предлучевой подготовки в радикальных схемах лечения [16, 17]. При этом остаются открытыми вопросы о сроках проведения ХЛТ после ХЭМА, её влиянии на безрецидивную выживаемость и критериях отбора пациентов [18, 19].

Таким образом, очевидна необходимость оптимизации тактики терапии МРРШМ, особенно у пациенток с большим объёмом опухоли и неблагоприятными прогностическими признаками. Наше исследование, направлено на изучение эффективности включения ХЭМА в стандартный курс химиолучевого лечения и оценку её влияния на непосредственные и отдалённые результаты терапии.

Материалы и методы

Настоящее исследование выполнено в формате ретроспективно-проспективного одноцентрового наблюдения, проведённого на базе отделения лучевых и комбинированных методов лечения гинекологических заболеваний и отделения рентгенхирургических методов диагностики и лечения МРНЦ им. А.Ф. Цыба — филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

В исследование включены 108 пациенток в возрасте от 24 до 74 лет (средний возраст 46,1 ± 10,8 лет) с морфологически верифицированным диагнозом рак шейки матки IIA2–IIIB стадий (T2a2–T3bN0–1M0 по классификации TNM) с большими опухолями шейки матки, осложненными кровотечением [20, 21]. Основными критериями включения являлись: отсутствие предшествующего специфического лечения, индекс общего состояния (ECOG) не более 2 баллов, отсутствие тяжёлой сопутствующей патологии, ограничивающей проведение химио— и лучевой терапии. Исключались пациентки с IV стадией заболевания, множественными отдалёнными метастазами, а также с тяжёлыми нарушениями функции почек, печени и кроветворения.

Согласно разработанному протоколу, пациентки были рандомизированы на две группы. Основную группу (n = 60) составили пациентки, которым проводилась химиоэмболизация маточных артерий с последующим курсом химиолучевой терапии (ХЛТ). Контрольную группу (n = 48) сформировали пациентки, получившие ХЛТ по радикальной программе.

Химиоэмболизация маточных артерий

Процедура ХЭМА выполнялась в условиях рентгенооперационной под ангиографическим контролем. Через пункцию бедренной артерии осуществлялась суперселективная катетеризация обеих маточных артерий с инфузией цисплатина в дозе 50 мг/м^2. После введения препарата выполнялась эмболизация с использованием липиодола. Эффективность процедуры контролировалась по данным ангиографии и последующей компьютерной томографии. Лучевая терапия начиналась в среднем через 14–21 день после ХЭМА, что, по данным ROC-анализа, являлось оптимальным интервалом (площадь под кривой AUC = 0,704; p <0,018).

Химиолучевая терапия

Все пациентки в обеих группах получали химиолучевую терапию в радикальном режиме. Первый этап включал дистанционную лучевую терапию на область малого таза с использованием линейных ускорителей в режиме 2,0 Гр/фракция, 5 раз в неделю, до суммарной очаговой дозы 46–50 Гр и бустом на область пораженным лимфоузлов до СОД 56–60 Гр на фоне еженедельного введения цисплатина в дозе 40 мг/м^2 (не менее 5 введений за курс).

Второй этап включал внутриполостную брахитерапию с использованием высокоактивных источников Ir-192. Программа включала 4 фракции по 7,0–7,5 Гр дважды в неделю до суммарной эквивалентной дозы 80–90 Гр EQD2 на первичный очаг.

Оценка непосредственного ответа на лечение проводилась на основании критериев RECIST 1.1 [22], включающих определение полной и частичной регрессии опухоли, стабилизации заболевания и прогрессирования. Общая (ОВ) и безрецидивная выживаемость (БРВ) рассчитывались от момента начала терапии до наступления смерти от любой причины или до появления признаков рецидива, соответственно. Переносимость лечения оценивалась по шкале токсичности RTOG/EORTC [23] и шкале нежелательных явлений CTCAE v.5.0 [24], отдельно анализировались гематологическая токсичность, лучевые реакции, осложнения.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения SPSS v.23.0, MedStat и Scipy. Для количественных переменных использовались t-критерий Стьюдента, критерий Манна–Уитни и дисперсионный анализ ANOVA. Для качественных переменных — χ^2-критерий и точный тест Фишера. Выживаемость оценивалась методом Каплана–Майера с последующим сравнением кривых лог-ранговым тестом (Log-rank). Анализ прогностических факторов проводился с использованием однофакторной и многофакторной логистической регрессии, а также ROC-анализа с определением cut-off значений. Диагностическая значимость моделей оценивалась по площади под ROC-кривой (AUC), чувствительности и специфичности.

Результаты

Сравнительный анализ регрессии опухолевого процесса после проведённого лечения показал достоверное преимущество комбинированного метода с ХЭМА по сравнению с изолированной химиолучевой терапией. В основной группе полная регрессия опухоли по критериям RECIST 1.1 была достигнута у 70,0 % пациенток (n = 42), тогда как в контрольной группе — только у 38,0 % (n = 18), p = 0,001. Частичная регрессия отмечена в 30,0 % случаев в группе ХЭМА+ХЛТ и в 62,0 % — в группе ХЛТ. Расчёт отношения шансов (OR = 3,89; 95 % ДИ: 1,74–8,69) свидетельствует о значительном увеличении вероятности полного ответа при использовании ХЭМА.

По результатам наблюдения медианной длительностью до 46 месяцев, показатель трёхлетней общей выживаемости в группе ХЭМА+ХЛТ составил 92,1 %, против 66,7 % в контрольной группе (p = 0,084). При этом одно-

и двухлетняя ОВ были сопоставимы между группами (100 % и 97,9 % соответственно).

Что касается безрецидивной выживаемости, различия оказались более выраженными. На сроке три года БРВ в основной группе составила 73,4 %, тогда как в группе ХЛТ — лишь 34,7 % (p = 0,003). Уже на втором году наблюдения различие стало статистически значимым (73,4 % против 43,4 %, p = 0,008), что указывает на устойчивое преимущество ХЭМА в контроле над прогрессированием опухоли.

Для наглядной оценки различий в эффективности и переносимости лечения между группами приведена обобщающая сравнительная таблица основных показателей.

Таблица 1.

Основные результаты

Показатель	ХЭМА + ХЛТ (n = 60)	ХЛТ (n = 48)	p-значение
Полная регрессия опухоли, %	70	38	0,001
3-летняя общая выживаемость (ОВ), %	92,1	66,7	0,084
3-летняя безрецидивная выживаемость (БРВ), %	73,4	34,7	0,003
Уровень SCC после лечения, нг/мл	1,7 ± 3,8	6,5 ± 2,5	0,011
Частота гематологической токсичности (лейкопения ≥ II ст.), %	53	2	<0,001
Поздние лучевые осложнения (I–II ст.), %	11,6	10,4	0,99

Как видно из таблицы, включение химиоэмболизации маточных артерий позволило достоверно увеличить частоту полной регрессии опухоли и безрецидивную выживаемость. При этом умеренное повышение гематологической токсичности не сопровождалось существенным ростом числа тяжёлых осложнений, что свидетельствует о приемлемом профиле безопасности метода.

Факторы, влияющие на эффективность и прогноз

Стадия заболевания оказывала определённое влияние на результат. При IIIB стадии полная регрессия достигнута в 64,6 % случаев после ХЭМА+ХЛТ, что достоверно выше, чем в группе контроля (27,8 %, p < 0,001). При IIA2 и IIB стадиях различия в ответе были менее выражены и статистически не достигли значимости.

Морфологическая форма опухоли также оказалась значимым прогностическим фактором. У пациенток с плоскоклеточным раком частота полной регрессии составила 73,6 % в основной группе против 43,2 % в контрольной (p = 0,004). Напротив, при аденокарциноме различия в эффективности терапии оказались незначимыми.

Форма роста опухоли оказала влияние на ответ: при экзофитной форме в группе ХЭМА+ХЛТ полная регрессия достигнута у 100 % больных против 25 % в контрольной (p<0,05). При смешанной и эндофитной формах наблюдалась тенденция к улучшению результатов в основной группе, но статистической значимости различия не достигли.

Курение ассоциировалось с более неблагоприятным исходом. У некурящих женщин трёхлетняя БРВ составила 85,4 %, тогда как у курящих — 61,0 % (p = 0,039). Аналогичная тенденция наблюдалась в отношении общей выживаемости, хотя различия были менее значимыми.

Прогностические cut-off значения и ROC-анализ

Проведённый ROC-анализ позволил определить прогностические пороговые значения по нескольким параметрам. Оптимальный интервал между ХЭМА и началом ХЛТ составил ≤21 день; при его соблюдении вероятность полного ответа была выше (AUC = 0,704, p = 0,018). Возраст старше 44 лет ассоциировался с лучшим ответом (OR = 3,08; p = 0,005). Уровень SCC менее 5,5 нг/мл имел чувствительность 76,5 % и специфичность 68,4 % для прогноза трёхлетней БРВ (p = 0,02).

Уровень SCC-антигена перед лечением оказался значимым биомаркером. Пациентки с начальными значениями <5,5 нг/мл имели достоверно более высокую трёхлетнюю БРВ — 89,5 % против 58,3 % при более высоком уровне (p = 0,005). Кроме того, уровень SCC после лечения статистически значимо снизился в основной группе (с 9,3 ± 14,4 до 1,7 ± 3,8 нг/мл, p = 0,002), но не изменился в контрольной (p = 0,433), что может указывать на более выраженное воздействие комбинированной терапии.

Гематологическая токсичность, выраженная в виде миелосупрессии, выявлена в обеих группах, но с большей частотой и степенью выраженности в группе ХЭМА+ХЛТ. Лейкопения 1–2 ст. наблюдалась у 78,3 % пациенток основной группы против 37,5 % в контрольной. Тромбоцитопения отмечена у 25 % пациенток основной группы, при этом у одной пациентки развилась тяжёлая степень, потребовавшая трансфузионной терапии. Частота осложнений коррелировала с дозой цисплатина >260 мг/м^2 (p <0,05).

Лучевые реакции I–II степени со стороны влагалища, мочевого пузыря и кишечника диагностировались чаще в основной группе, но не требовали прерывания терапии. Поздние осложнения, включая ректиты и циститы, в основном имели лёгкое течение. Частота тяжёлых

поздних осложнений оставалась низкой и не превышала 1–2 % в обеих группах.

Обсуждение

Результаты проведённого исследования подтверждают целесообразность включения химиоэмболизации маточных артерий в состав комбинированного лечения местнораспространённого рака шейки матки, особенно у пациенток с большим объёмом опухоли. Преимущество данной методики было выявлено как в аспекте непосредственного эффекта (полная регрессия опухоли), так и по отдалённым онкологическим результатам — общей и безрецидивной выживаемости.

Сравнение полученных данных с литературными источниками демонстрирует соответствие выявленных эффектов ранее опубликованным наблюдениям. Так, в исследовании Tanaka и соавт. (2018) химиоэмболизация в неоадъювантном режиме с последующим хирургическим лечением, способствовала снижению объёма опухоли и повышению частоты полного патоморфологического ответа, при этом у 14,6 % пациенток после ХЭМА отсутствовали признаки опухолевых клеток при гистологическом исследовании [19]. Кроме того, в данной работе было установлено, что ХЭМА снижает риск рецидива (OR = 0,30), особенно у пациенток без лимфогенных метастазов.

Aishanjiang и соавт. (2021) провели прямое сравнение ХЭМА в сочетании с лучевой терапией и стандартной химиолучевой терапии. Авторы отметили более выраженный краткосрочный клинический ответ в группе ХЭМА (70,3 % против 48,4 %), при сопоставимом уровне трёхлетней выживаемости [17]. В их исследовании не выявлено статистически значимых различий в ОВ и БРВ, что, вероятно, объясняется отсутствием компонента системной химиотерапии при ХЭМА, а также более мягкими режимами облучения.

В нашем исследовании ХЭМА применялась в качестве индукционного компонента перед радикальной химиолучевой терапией, что позволило сочетать преимущества локального противоопухолевого эффекта и системной радиомодификации. Такая стратегия обеспечила более высокий уровень полной регрессии опухоли (70,0 % против 38,0 %) и достоверное увеличение трёхлетней безрецидивной выживаемости (73,4 % против 34,7 %; p = 0,003). Эти данные демонстрируют важную роль ХЭМА в повышении локального контроля над опухолевым процессом, что особенно актуально в условиях гипоксичных, плохо васкуляризированных опухолей, резистентных к стандартной лучевой терапии [25, 26].

Практическое значение внедрения ХЭМА заключается не только в улучшении онкологических исходов, но и в возможности индивидуализации терапии. Прогностическая роль параметров, таких как уровень SCC, стадия, форма роста и курение, позволяет отбирать подгруппы пациенток, у которых ожидается максимальный эффект от вмешательства. Например, у женщин с уровнем SCC <5,5 нг/мл и объёмом опухоли <80 см^3 наблюдалась выраженная динамика в сторону улучшения БРВ и ОВ. Установлено также, что оптимальный интервал между ХЭМА и началом лучевой терапии составляет не более 21 дня — этот временной промежуток ассоциировался с наибольшей частотой полного ответа и минимальным риском прогрессирования (Wang, 2017) [18].

Отдельного внимания заслуживает переносимость комбинированного лечения. Хотя включение ХЭМА сопровождалось увеличением частоты гематологической токсичности и лучевых реакций, в основном они имели I–II степень тяжести и не требовали модификации плана терапии. Важно отметить, что тяжёлые осложнения были редкими и сопоставимыми с группой стандартной ХЛТ. Эти данные подтверждают приемлемый профиль безопасности при условии строгого соблюдения протоколов и мониторинга показателей крови.

Среди ограничений настоящего исследования следует отметить одноцентровый характер наблюдения, ограниченный срок медианного наблюдения (до 46 месяцев) и отсутствие слепого распределения пациенток по группам. Кроме того, несмотря на строгие критерии включения, в выборке сохраняется некоторая гетерогенность по возрасту, гистотипу опухоли и вирусной нагрузке ВПЧ, что потенциально может влиять на результаты. Важно также, что хотя исследование продемонстрировало клиническую эффективность методики, экономическая составляющая внедрения ХЭМА требует отдельного анализа.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются

- уточнение молекулярно-биологических предикторов ответа на ХЭМА;
- многоцентровые рандомизированные исследования с длительным наблюдением;
- изучение влияния ХЭМА на качество жизни и функцию органов малого таза;
- применение модифицированных эмболизационных агентов с таргетной нагрузкой.

Заключение

Несмотря на достижения в лучевой и химиотерапии, местнораспространённый рак шейки матки продолжает характеризоваться высоким уровнем прогрессирования и смертности, особенно у пациенток с неблагоприятными факторами прогноза. Полученные в ходе настоящего исследования результаты подтверждают, что включение химиоэмболизации маточных артерий в комплекс ради-

кального лечения позволяет значительно улучшить непосредственные и отдалённые клинические исходы.

Проведение ХЭМА до химиолучевой терапии обеспечивает снижение объёма опухоли, уменьшение уровня SCC и, как следствие, повышает вероятность полного ответа. При этом интервал между ХЭМА и началом лучевого этапа лечения не должен превышать 21 день, что обеспечивает реализацию синергетического эффекта. Комбинированный метод ХЭМА+ХЛТ особенно эффективен у пациенток с плоскоклеточным типом опухоли, экзофитной или эндофитной формой роста, низким уровнем SCC и отсутствием выраженной лимфогенной диссеминации.

Анализ выживаемости показал, что трёхлетняя безрецидивная выживаемость при использовании ХЭМА превышала показатели контрольной группы более чем в два раза (73,4 % против 34,7 %), а общая выживаемость достигала 92,1 % при сопоставимой переносимости лечения. Несмотря на более выраженную гематологическую токсичность, частота тяжёлых осложнений оставалась на допустимом уровне, а лучевые реакции эффективно контролировались симптоматической терапией.

Наше исследование подтверждает, что внедрение ХЭМА в протоколы лечения МРРШМ представляет собой эффективный и клинически обоснованный метод, который может повысить радикальность терапии, особенно в группах высокого риска прогрессирования.

Выводы

1. Проведение химиоэмболизации маточных артерий в сочетании с химиолучевой терапией у больных МРРШМ обеспечивает достоверное увеличение частоты полной регрессии опухоли (70,0 % против 38,0 %, p = 0,001) и улучшает показатели трёхлетней без рецидивной выживаемости (73,4 % против 34,7 %, p = 0,003).
2. Оптимальный интервал между проведением ХЭМА и началом химиолучевой терапии не должен превышать 21 день — этот показатель оказался критическим для достижения максимальной противоопухолевой эффективности (AUC = 0,704; p = 0,018).
3. Трёхлетняя общая выживаемость в группе ХЭМА+ХЛТ составила 92,1 %, демонстрируя преимущество над изолированной химиолучевой терапией (66,7 %), особенно у пациенток со IIIB стадией заболевания и опухолями объёмом ≥80 см^3.
4. Прогностические факторы, достоверно влияющие на эффективность терапии, включают: возраст старше 44 лет, уровень SCC <5,5 нг/мл, эндофитную или экзофитную форму роста и умеренную степень дифференцировки опухоли. Курение, большой объем опухоли перед началом лечения и высокий уровень SCC ассоциировались с худшими исходами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arbyn M., Weiderpass E., Bruni L., et al. Estimates of incidence and mortality of cervical cancer in 2018: a worldwide analysis // Lancet Glob Health. — 2020. — Vol. 8, №2. — P. e191–e203.
2. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71, №3. — P. 209–249.
3. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., et al. Global cancer statistics 2020 // CA Cancer J Clin. — 2021. — Vol. 71. — P. 209–249.
4. World Health Organization. Cervical cancer. — WHO, 2020. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervical-cancer
5. Vu M., Yu J., Awolude O.A., Chuang L. Cervical cancer worldwide // Curr Probl Cancer. — 2018. — Vol. 42, №5. — P. 457–465.
6. Zhang X.R., He L., Lu L., et al. Epidemiological trends of cervical cancer in China: an age-period-cohort analysis // J Cancer. — 2021. — Vol. 12, №3. — P. 716–726.
7. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2024. 276 с.
8. Cohen P.A., Jhingran A., Oaknin A., Denny L. Cervical cancer // Lancet. — 2019. — Vol. 393. — P. 169–182.
9. Liu Y., Li H., Yang G., et al. Current status and future perspectives of cervical cancer treatment // J Cancer Res Clin Oncol. — 2022. — Vol. 148. — P. 1381–1393.
10. Mayadev J.S., Atienza T., Hendry W., et al. Radiation therapy for cervical cancer: executive summary of an ASTRO clinical practice guideline // Pract Radiat Oncol. — 2022. — Vol. 12, №1. — P. 13–25.
11. Shrivastava S., Mahantshetty U., Engineer R., et al. Critical analysis of outcomes in patients with recurrent cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2018. — Vol. 28, №5. — P. 1025–1030.
12. Gopu P., Rathod S., Mahantshetty U. A review of contemporary evidence on chemoradiotherapy in locally advanced cervical cancer // Int J Gynecol Cancer. — 2021. — Vol. 31, №7. — P. 962–971.
13. Lanciano R., Calkins A., Bundy B.N., et al. Randomized comparison of weekly cisplatin or protracted venous infusion of fluorouracil in combination with radiation in advanced cervical cancer // J Clin Oncol. — 2005. — Vol. 23, №33. — P. 8289–8295.
14. Важенин А.В., Куркин Н.В., Бабаева Н.А., и др. Эмболизация маточных артерий в комплексном лечении больных с раком шейки матки // Вестник современной клинической онкологии. — 2011. — Т. 4, №3. — С. 12–16.

15. Куркин Н.В., Важенин А.В., Солодкий В.А. Химиоэмболизация как компонент комбинированного лечения местнораспространённого рака шейки матки // Онкогинекология. — 2019. — Т. 17, №1. — С. 23–27.
16. Nogueira-García D., Huber S., Rennings A.J., et al. Uterine artery embolization for gynecologic malignancies: indications and outcomes // Cardiovasc Intervent Radiol. — 2015. — Vol. 38. — P. 588–597.
17. Aishanjiang D., Aili A., Azhati B., et al. Comparative efficacy, and safety of interventional chemoembolization and chemoradiotherapy for cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2021. — Vol. 26, №8. — P. 1557–1565.
18. Wang S.G., Liu Y.Y., Li H.Y., et al. Downregulation of survivin mRNA expression in cervical cancer tissue by transcatheter arterial chemoembolization // Asian Pac J Cancer Prev. — 2017. — Vol. 18, №10. — P. 2799–2804.
19. Tanaka T., Terai Y., Ono Y.J., et al. Preoperative chemoembolization improves prognosis in patients with stage IB2-IIB cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2018. — Vol. 23, №5. — P. 890–897.
20. Международный совет по гармонизации технических требований к регистрации лекарственных средств для человека (ICH). Надлежащая клиническая практика (GCP): Руководство E6(R2). — Женева, 2017.
21. Union for International Cancer Control (UICC). TNM Classification of Malignant Tumours. 8th ed. — Geneva: Wiley-Blackwell, 2017.
22. Eisenhauer E.A., Therasse P., Bogaerts J., et al. New response evaluation criteria in solid tumours: revised RECIST guideline (version 1.1) // Eur J Cancer. — 2009. — Vol. 45, №2. — P. 228–247.
23. Cox J.D., Stetz J., Pajak T.F. Toxicity criteria of the Radiation Therapy Oncology Group and the European Organization for Research and Treatment of Cancer // Int J Radiat Oncol Biol Phys. — 1995. — Vol. 31, №5. — P. 1341–1346.
24. National Cancer Institute. Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE) v5.0. — Bethesda, MD, USA: NIH, 2017.
25. Shoji T., Yoshikawa H. Hypoxia, and angiogenesis in cervical cancer // Int J Clin Oncol. — 2018. — Vol. 23, №1. — P. 52–60.
26. Kumar L., Bhatla N., Bhamare R. Treatment of locally advanced cervical cancer: a review // Ann Natl Acad Med Sci (India). — 2018. — Vol. 54, №4. — P. 230–242.

© Кулиева Гюнель Закир кызы (gunelka2010@yandex.ru); Мкртчян Лиана Сирекановна; Кучеров Валерий Владимирович;
Крикунова Людмила Ивановна; Иванов Сергей Анатольевич; Каприн Андрей Дмитриевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.23

СОВРЕМЕННАЯ КОНЦЕПЦИЯ И РЕВАСКУЛЯРИЗАЦИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ ОККЛЮЗИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ БЕДРЕННОЙ АРТЕРИИ НА ФОНЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ОККЛЮЗИЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ИШЕМИЕЙ УГРОЖАЮЩЕЙ ПОТЕРЕ КОНЕЧНОСТИ

MODERN CONCEPT AND REVASCULARIZATION OF EXTENDED OCCLUSION OF THE SUPERFICIAL FEMORAL ARTERY ACCOMPANIED BY MULTILEVEL OCCLUSIONS OF THE LOWER EXTREMITIES IN CHRONIC LIMB THREATENING ISCHEMIA

A. Kuchay
A. Lipin

Summary. The revascularization of chronic total occlusion (CTO) in patients with prolonged occlusion of superficial femoral artery (SFA) >20 cm with compound tibial runoff remains a significant challenge and it's a complex concern with multiple treatment techniques and strategies. More than 66 % of patients with chronic limb threatening ischemia (CLTI) exist with SFA disorder, often with unobstructed proximal popliteal artery and immense occlusive lesions in the tibial vessels. This article will cover techniques for hybrid interventions to treat SFA CTO with compound tibial runoff in patients with CLTI.
Aim: To improve the results of revascularization, develop conception and hybrid algorithm to approach complex superficial femoral artery (SFA) chronic total occlusions (CTOs) in combination with tibial runoff.
Conclusions: The result of our study shows that the femoral tibial bypass as compared to a hybrid intervention comprised of a bypass to an unobstructed popliteal artery and subsequent tibial angioplasty decreased the early failure rate without any negative effect on the long-term outcomes in CLTI patients with prolonged SFA CTO and immense runoff disease.

Keywords: chronic total occlusion, multilevel lesions, hybrid operation, endovascular intervention, chronic limb threatening ischemia, long occlusion.

Кучай Аршед Ахмад
Санкт-Петербургское государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская больница № 14»; Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
drarshedcvs@gmail.com
Липин Александр Николаевич
Санкт-Петербургское государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская больница № 14»; Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет

Аннотация. Реваскуляризация хронической тотальной окклюзии (ХТО) у пациентов с протяженной окклюзии поверхностной бедренной артерией (ПБА) >20 см со сложным тибиальным оттоком остается значительной проблемой и представляет собой сложный вопрос с множеством методов и стратегий лечения. Более 66 % пациентов с хронической ишемией угрожающей потерей конечностей (ХИУПК) имеют нарушение проходимости ПБА, часто с проходимой проксимальной подколенной артерией и значительными окклюзирующими поражениями берцовых сосудов. В данной статье рассматриваются методики гибридных вмешательств для лечения ХТО ПБА с комбинированным тибиальным оттоком при ХИУПК.
Цель: улучшить результаты реваскуляризации, разработать концепция и гибридный алгоритм подхода к сложным хроническим тотальным окклюзиям (ХТО) поверхностной бедренной артерии (ПБА) в сочетании с тибиальным оттоком.
Выводы: Результаты нашего исследования показали, что бедренно-тибиальное шунтирование по сравнению с гибридным вмешательством, включающим шунтирование на проходимой подколенной артерии и последующую тибиальную ангиопластику, снизило частоту ранних неудач без негативного влияния на отдаленные результаты у пациентов ХИУПК с протяженной ХТО ПБА и обширным оттоком болезни.

Ключевые слова: хроническая тотальная окклюзия, многоуровневые поражения, гибридная операция, эндоваскулярное вмешательство, хроническая ишемия, угрожающая потерей конечности, протяженная окклюзия.

Введение

По международным оценкам заболеванием периферических артерий (ЗПА) страдают более 200 млн человек во всем мире с предполагаемой ежегодной заболеваемостью от 220 до 3500 случаев на 1 млн человек [1; 2; 3]. Это состояние редко встречается у молодых людей, однако его распространенность значительно увеличивается с возрастом: более 10 % лиц старше 65 лет страдают от ЗПА, а среди людей старше 80 лет эта цифра достигает 29,4 % [3; 4; 5]. Ожидается, что эти показатели будут расти, поскольку увеличение продолжительности жизни и снижение уровня рождаемости ведет к старению мирового населения [3; 5; 6]. Заболевание периферических артерий нижних конечностей (ЗПА) имеет широкий спектр клинических проявлений,

от бессимптомного заболевания до перемежающейся хромоты или хронической ишемии, угрожающей потерей конечности. Заболевания поверхностной бедренной артерии (ПБА) и подколенной артерии составляют значительную часть ЗПА, наблюдаемых в клинической практике [6]. Хроническая ишемия, угрожающая потерей конечности (ХИУПК), также известная как критическая ишемия нижних конечностей (КИНК), поражает около 10 % пациентов с ЗПА и может считаться наиболее тяжелой его формой, связанной со снижением качества жизни, высоким риском ампутации и сердечно-сосудистых событий, включая смерть [7–12]. Современные подходы к определению и стадированию ХИУПК разработаны для более точного отражения широкого спектра заболеваний, встречающихся в современной клинической практике [5]. Окклюзирующие атеросклеротические изменения в артериях нижних конечностей у пациентов с ХИУПК в большинстве случаев имеют многоуровневый характер и, как правило, обнаруживаются в бедренно-подколенном сегменте и в артериях голени [13; 14]. Такие пациенты ввиду отсутствия адекватных путей оттока являются наиболее сложной группой для лечения. Гемодинамически значимые поражения поверхностной бедренной артерии (ПБА) регистрируются более чем у половины пациентов с ХИУПК [13; 14], часто представлены протяженной окклюзией ПБА и у значительной доли больных сочетаются с тяжелыми стенооклюзирующими изменениями артерий голени [15]. Кроме того, у больных с ишемическим некрозом тканей конечности протяженные окклюзии бедренно-подколенного сегмента часто сопровождаются тяжелым поражением путей оттока, при этом частота окклюзии всех трех артерий голени у таких пациентов достигает 40 % [16]. Окклюзионное атеросклеротическое поражение ПБА и артерий голени различной степени выраженности имеют от 32 до 61 % больных [13; 14; 17; 18].

У более чем 60 % пациентов с хронической ишемией угрожающей потерей конечности (ХИУПК) обнаруживаются окклюзионные поражения поверхностной бедренной артерии (ПБА) [19; 20]. Они часто представляют собой длинные хронические тотальные окклюзии (ХТО) [20] и обычно сопровождаются обширными поражениями артерий голени [20; 21]. Хотя известно, что эндоваскулярный подход при длительной ХТО ПБА с тяжелым оттоком связан с плохим долгосрочным исходом [22–25]. Таким образом, аутовенозное шунтирование остаётся методом выбора при многоуровневом инфраингвинальном поражении с протяжёнными поражениями ПБА [19; 20]. В то же время, в крупных регистрах, большеберцовое шунтирование по сравнению с бедренно-подколенным шунтированием ассоциировалось с повышенным риском ранних осложнений, таких как несостоятельность шунтирования или обширная ампутация [26]. Проходимость тибиальной чрескожной транслюминальной ангиопластики (ТЛБА) значительно ниже, чем при шунтировании, однако она обеспечивает сопоставимую частоту сохранения конечности [27].

Такое сочетание преимуществ и недостатков открытой и эндоваскулярной реконструкции при многоуровневом поражении артерий нижних конечностей создает предпосылки для выбора гибридного подхода к реваскуляризации, включающего шунтирование для лечения поражения ПБА и баллонную ангиопластику для улучшения оттока крови из берцовой артерии. Мы ретроспективно оценили результаты гибридных вмешательств, выполненных при длительном ХТО ПБА с обширным поражением берцовых артерий у пациентов с ХИУПК, поступивших в Центре спасения конечностей на базе ГБУЗ «Городская больница №14».

Материалы и методы

Одно центровое ретроспективное когортное исследование проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации, зарегистрировано и одобрено Этическим комитетом медицинского учреждения. В исследование были включены пациенты с облитерирующим атеросклерозом артерий нижних конечностей и ХИУПК, которым в период с января 2018 г. по март 2025 г. выполнены открытые или гибридные реконструктивные вмешательства на артериях нижних конечностей. Мы провели ретроспективную оценку всех последовательных пациентов с ПБА-ХТО в центре спасения конечностей Санкт-Петербурга. Всего 120 пациентам (75 % мужчин; средний возраст 69,5 лет) были выполнены гибридные вмешательства, все пациенты имели исходную V–VI категорию заболевания по Резерфорду [Таблица 1]. Ангиография показала протяженную (>20 см) ХТО ПБА во всех случаях (100%), сопровождающуюся ХТО дистальной подколенной артерии (n=27; 22,5 %); всех тибиальных артерий (n=78; 65 %) или всех берцовых артерий, кроме малоберцовой (n=21; 17,5 %). Всем пациентам (100 %) выполнялось бедренно-подколенное шунтирование аутовеной с последующей баллонной ангиопластикой дистальных подколенных и/или большеберцовых артерий либо в тот же день (n=66; 55 %), либо через 2–14 дней (n=54; 45 %). В качестве исходного контроля мы исследовали серию из 138 последовательных пациентов, которым было выполнено бедренно-тибиальное шунтирование.

У значительной части пациентов наблюдались глубокие некротические изменения, затрагивавшие пальцы ног и часто распространявшиеся на плюсневые кости.

Предоперационная цифровая субтракционная ангиография (ЦСА) выявила длинную (>20 см) хроническую окклюзию поверхностной бедренной артерии (ПБА) во всех случаях (n=120; 100 %), при этом проксимальная (выше колена) подколенная артерия (ПкА) всегда была

Таблица 1.
Основные клинические характеристики пациентов с длительной ХТО ПБА, которым выполнены гибридные вмешательства

Характеристики	N (%)
Мужчины, n (%)	90 (75)
Возраст, лет среднее (диапазон)	69.5 (45–88)
Ишемическая болезнь сердца, n (%)	99 (82.5)
Сахарный диабет, n (%)	54 (42.5)
Хроническая почечная недостаточность, n (%)	12 (10)

свободна от стеноза и не стенозирована. ХТО дистальной (на уровне колена или ниже) ПкА была выявлена у 27 (22,5 %) пациентов, ХТО трёх берцовых сосудов — у 78 (65 %), ХТО передней и задней большеберцовых артерий (единственным отводящим сосудом была малоберцовая артерия) — у 21 (17,5 %).

Первым этапом гибридного вмешательства у всех пациентов было бедренно-подколенное шунтирование (БПШ) с аутовенозным шунтом (таблица 2). Проксимальный анастомоз был сформирован с общей бедренной артерией (ОБА) у 114 (95 %) пациентов, с глубокой бедренной артерией (ГБА) — у 6 (5 %). У 114 (95 %) пациентов дистальный анастомоз был сформирован в проксимальном отделе ПкА, у 6 (5 %) — в дистальном отделе ПкА. В 93 случаях (77,5 %) использовалась нереверсированная большая подкожная вена (БПВ), а в 27 (22,5 %) вмешательствах реверсированная БПВ служила кондуитом.

Таблица 2.
Оперативная техника выполнения первого (открытого) этапа гибридной реконструкции

Проксимальный анастомоз с ОБА, n (%)	114 (95 %)
Проксимальный анастомоз с ГБА, n (%)	6 (5 %)
Дистальный анастомоз с проксимальной частью ПкА, n (%)	114 (95 %)
Дистальный анастомоз с дистальной частью ПкА, n (%)	6 (5 %)
Нереверсированный кондуит БПВ, n (%)	93 (77.5 %)
Реверсированный кондуит БПВ, n (%)	27 (22.5 %)

Гибридное вмешательство проводилось либо одномоментно (одномоментно, когда и открытое, и эндоваскулярное вмешательства проводились в течение 24 ч) [n=66; 55 %], либо двухэтапно, когда оба этапа выполнялись с интервалом в 24 ч (этапный гибрид) [n=54; 45 %]. Одноэтапный подход применялся у пациентов с глубокой и обширной потерей тканей, признаками влажной гангрены, анализами крови, показывающими явное воспаление (лейкоцитоз, сдвиг лейкоцитарной формулы влево) и/или лихорадкой. В таких случаях у 54 (82 %) пациентов для эндоваскулярного доступа использовалась боковая ветвь шунта, у 6 (9 %) — перекрестный бедренный доступ, у 6 (9 %) — антеградный доступ ОБА. Двухэтапные гибриды выполнялись с интервалом от 2 до 14 дней между открытыми и эндоваскулярными этапами (среднее 10 дней). Поэтапный подход применялся в ситуациях, когда можно было подождать после БПШ и решить, нужна ли ангиопластика голени (отсутствие острых показаний к малой ампутации или хирургической обработки раны). Перекрёстный бедренный доступ использовался в 51 (94 %) случае, антеградный доступ через ОБА — в 3 (6 %).

Эндоваскулярный этап включал простую баллонную ангиопластику (БАП) 1 (n=45; 37,5 %), 2 (n=45; 37,5 %) или 3 (n=3; 2,5 %) артерий голени; или БАП дистальной части подколенной артерии и 1–2 артерий голени (n=27; 22,5 %). Прямая ангиосомная реваскуляризация была достигнута у 108 (90 %) пациентов.

При одноэтапном гибридном подходе предоперационная антиагрегантная терапия включала монотерапию аспирином 125 мг/сут. Клопидогрель (75 мг/сут) начинался на следующий день. При поэтапном подходе аспирин в дозе 125 мг/сут использовался перед открытым этапом, а нагрузочная доза клопидогреля (300 мг) вводилась перед эндоваскулярным вмешательством, после чего следовала обычная суточная доза 75 мг/сут. Все пациенты продолжали двойную антиагрегантную терапию в течение 6 месяцев после операции.

Результаты

Мы исследовали 120 пациентов с ПБА-ХТО с комплексным поражением большеберцовых артерий, которым были выполнены гибридные вмешательства, и 138 последовательных пациентов, которым было выполнено бедренно-большеберцовое шунтирование. 30-дневная летальность после гибридных вмешательств составила 2,5 % (3 смерти вследствие острого коронарного синдрома) (таблица 3). У шести (6) пациентов (5 %) наблюдалась ранняя недостаточность трансплантата, обе произошли через 1 день после одномоментного гибридного вмешательства. Случаев ранней недостаточности трансплантата вовремя (между открытыми и эндоваскулярными этапами) или после поэтапных гибридных вмешательств не было. У трех (2,5 %) пациентов наблюдался ранний тромбоз большеберцовой артерии после БАП со стентированием. Однако шунт оставался функционирующим, и признаки ХИУПК сохранялись. У трех (2,5 %) пациентов была выполнена ампутация выше колена в течение 30 дней после реваскуляризации. Осложнения в месте доступа включали три (2,5 %) случая тромбоза контралатеральной ОБА, успешно вылеченные эндартерэктомией.

Таблица 3.

30-дневная летальность и осложнения

Смерть, n (%)	3 (2.5)
Несостоятельность трансплантата, n (%)	6 (5)
Тромбоз артерий голени, n (%)	3 (2.5)
Большая ампутация, n (%)	3 (2.5)
Осложнения в зоне эндоваскулярного доступа, n (%)	3 (2.5)

Выводы

Дистальные гибридные вмешательства — это эффективная стратегия реваскуляризации у пациентов с ХИУПК при протяженной окклюзии ПБА в сочетании с функционирующей подколенной артерией и тяжелым поражением путей оттока. В сравнении с классическим методом лечения протяжённой или длительно окклюзии ПБА ХТО в сочетании с поражением путей оттока при ХИУПК гибридный подход является достоверно более эффективным, современным, надёжным и безопасным методом лечения, а также обладает высоким потенциалом полной реабилитации пациентов, обеспечивая более высокую первичную проходимость шунта при сопоставимых показателях сохранности конечности, выживаемости и заживления трофического дефекта. Разработанные лечебные алгоритмы и концепция по тактике гибридной хирургии позволяют надёжно сохранить конечность в раннем и отдалённом послеоперационном периоде.

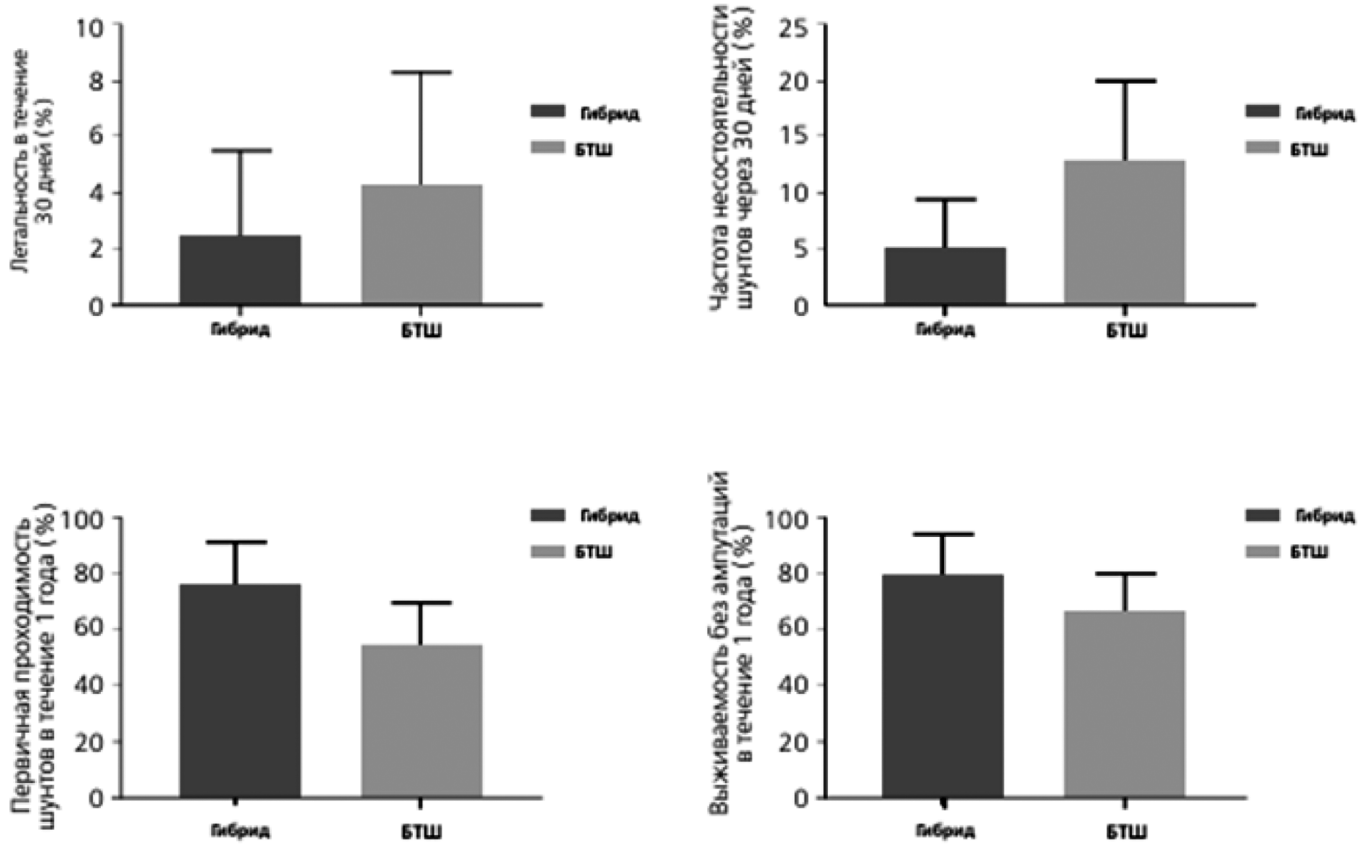


Рис. 1. Показатели летальности и несостоятельности шунтов в течение 30 дней, а также первичной проходимости шунтов и выживаемости без ампутаций в течение 1 года при гибридных вмешательствах в сравнении с БТШ

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким У. Критические детерминанты хронической ишемии, угрожающей потерей конечности, после эндоваскулярного лечения / Ким У. // Korean Circ J. — 2022. — Т. 52, № 6. — С. 441–443. DOI: 10.4070/kcj.2022.0064
2. Квонг М. Обновленные оценки бремени хронической ишемии, угрожающей потерей конечности, среди пациентов, получающих Medicare / М. Квонг, Г. Раджасекар, Г.Х. Уттер [и др.] // J Vasc Surg. — 2023. — Т. 77, № 6. — С. 1760–1775. DOI: 10.1016/j.jvs.2023.01.200
3. Венторуццо Г. Спасение конечностей и выживание при хронической ишемии, угрожающей потерей конечности: необходимость быстрого командного подхода / Г. Венторуццо, Г. Маццителли, У. Руцци [и др.] // J Clin Med. — 2023. — Т. 12, № 18. — С. 6081. DOI: 10.3390/jcm12186081
4. Беркиолли Р. Хроническая ишемия, угрожающая потерей конечности, и необходимость реваскуляризации / Р. Беркиолли, Дж. Бертанья, Д. Адами [и др.] // J Clin Med. — 2023. — Т. 12, № 7. — С. 2682. DOI: 10.3390/jcm12072682

5. Хоутон Дж.С.М. Новые горизонты в лечении заболеваний периферических артерий / Хоутон Дж.С.М., Саратзис А.Н., Сэйерс Р.Д., Хоутон В.Дж. // Возраст и старение. — 2024. — Т. 53, № 6. — С. afae114, DOI: 10.1093/ageing/afae114
6. Сёгор М. Эпидемиологические тенденции и прогнозы заболеваемости, распространённости и смертности, связанной с заболеваниями периферических артерий: наблюдения с использованием общенациональных датских данных / М. Сёгор, П.Б. Нильсен, Н. Элдруп [и др.] // Eur J Vasc Endovasc Surg. — 2023. — Т. 66, № 5. — С. 662–669. DOI: 10.1016/j.ejvs.2023.08.005
7. Джаннопулос С. Медикаментозная терапия для снижения сердечно-сосудистого и конечностного риска при критической ишемии конечностей / С. Джаннопулос, Э. Дж. Армстронг // Vasc Med. — 2021. — Т. 26, № 2. — С. 210–224. DOI: 10.1177/1358863X20987612
8. Курьянов П., Липин А. и др. Ангиопластика подколенной артерии при хронических тотальных окклюзиях с дистальной посадочной зоной и без нее. Анналы сосудистой хирургии. 2020. Т. 68. С. 417–425
9. Кучай А.А., Липин А. и др. Дистальные гибриды для тотальной окклюзии протяженной поверхностной бедренной артерии с выраженным нарушением оттока. Журнал сосудистой и эндоваскулярной терапии. 2019. Т. 4 № С. С. 52–53
10. Квонг М. Обновленные оценки бремени хронической ишемии, угрожающей конечностям, среди пациентов, получающих Medicare / М. Квонг, Г. Раджасекар, Г.Х. Уттер [и др.] // J Vasc Surg. — 2023. — Т. 77, № 6. — С. 1760–1775. DOI: 10.1016/j.jvs.2023.01.200
11. Мартелли, Э. Половые различия и факторы, связанные с перипроцедурной и 1-летней смертностью у пациентов с хронической ишемией, угрожающей потерей конечности, из итальянского регистра CLIMATE / Э. Мартелли, М. Замбони, Дж. Сотджиу [и др.] // J Pers Med. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 316. DOI: 10.3390/jpm13020316
12. Кучай А.А. Гибридные вмешательства на дистальных отделах магистральных артерий при протяженных хронических окклюзиях поверхностной бедренной артерии у пациентов с критической ишемией конечностей / А.А. Кучай, А.Н. Липин // Атеросклероз и дислипидемии. — 2024. — Т. 2, № 55. — С. 32–40. DOI: 10.34687/2219-8202.JAD.2024.02.0004
13. Кучай А.А. Концепция дистального гибридного вмешательства при атеросклеротическом поражении артерий нижних конечностей / А.А. Кучай, А.Н. Липин, П.С. Курьянов [и др.] // Атеросклероз и дислипидемии. — 2023. — Т. 3, № 52. — С. 37–43. DOI: 10.34687/2219 –8202.JAD.2023.03.0005
14. Брэдбери А.В. Шунтирование или ангиопластика при тяжелой ишемии нижних конечностей (BASIL): анализ выживаемости без ампутации и общей выживаемости в зависимости от полученного лечения / А.В. Брэдбери, Д. Дж. Адам, Дж. Белл [и др.] // J Vasc Surg. — 2010. — Т. 51. — С. 5S–68S. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.01.074
15. Палена Л.М. Возможность и годичные результаты субинтимальной реваскуляризации с использованием стента Supera® при окклюзиях бедренно-подколенного отдела при критической ишемии конечностей: исследование «Supersub» / Л.М. Палена, Л.Дж. Диас-Сандовал, Э. Сультато [и др.] // Catheter Cardiovasc Interv. — 2017. — Т. 89, № 5. — С. 910–920. DOI: 10.1002/ccd.26863
16. Гавриленко А.В. Оценка качества жизни у пациентов с критической ишемией нижних конечностей / А.В. Гавриленко, С.И. Скрылев, А.Е. Кузубова // Ангиология и сосудистая хирургия. — 2001. — Т.7, № 3. — С. 8–14.
17. Кучай А.А. Сравнительный ретроспективный анализ результатов гибридных вмешательств и бедренно-тибиального шунтирования при протяженных многоуровневых поражениях инфраингвинального артериального сегмента у пациентов с критической ишемией нижних конечностей / А.А. Кучай, А.Н. Липин // Педиатр. — 2023. — Т. 14, № 6. — С. 25–35. DOI: 10.17816/PED626430
18. Богушевски А., Тори Дж., Пай Р., Камаланнан Д., Джефик Д., Дэвис Т. Внутрипросветная реканализация ХТО ПБА. Эндоваскулярное сегодня. 2010 г.; 9:33–38.
19. Уолден Р., Адар Р., Рубинштейн З.Дж., Басс А. Распределение и симметрия артериосклеротических поражений нижних конечностей: артериографическое исследование 200 конечностей. Cardiovasc Intervent Radiol. 1985;8(4):180–2. J Vasc Surg. 2010 май;51(5 Suppl):32S–42S.
20. Кучай А.А., Липин А.Н., Курьянов П.С. Преимущества техники гибридной реваскуляризации при лечении протяженных окклюзий поверхностной бедренной артерии и многоуровневых поражений артерий нижних конечностей. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2024;23(2):60–66. Doi: 10.24884/1682–6655–2024-23-2-60-66.
21. Кучай А.А. Концепция «дистального гибрида» при протяженных окклюзиях поверхностной бедренной артерии с тяжелым нарушением оттока при критической ишемии конечности / А.А. Кучай, А.Н. Липин [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал академика А.В. Покровского // — 2022. Т. 28. № С1. С. 157–161
22. Брэдбери А.В.1, Адам Д.Дж., Белл Дж., Форбс Дж.Ф., Фоукс Ф.Г., Гиллеспи И., Ракли К.В., Рааб Г.М.; Участники исследования BASIL. Шунтирование против ангиопластики при тяжёлой ишемии нижних конечностей (исследование BASIL): описание тяжести и степени заболевания с использованием метода оценки ангиограммы Боллинджера и классификации Трансатлантического межобщественного консенсуса II. Журнал сосудистых хирургов. 2010 май;51(5 Suppl):32S–42S.
23. Лёфберг AM1, Караджагил С., Льюнгман К., Вестман Б., Бострём А., Хеллберг А., Остхольм Г. Чрескожная транслюминальная ангиопластика бедренно-подколенных артерий конечностей с хронической критической ишемией нижних конечностей. J Vasc Surg. 2001 июль;34(1):114–21.
24. Дэвис М.Г., Саад В.Э., Педен Э.К., Мохиуддин И.Т., Наум Дж.Дж., Ламсден А.Б. Влияние оттока на эндолюминальные вмешательства на поверхностной бедренной артерии при боли в покое и потере ткани. J Vasc Surg. 2008 сентябрь;48(3):619-25.
25. Ihnat D.M., Duong S.T., Taylor Z.C., Leon L.R., Mills J.L. Sr, Goshima K.R., Echeverri J.A., Arslan B. Современные результаты после ангиопластики поверхностной бедренной артерии и стентирования: влияние классификации TASC и оценки оттока. J Vasc Surg. 2008 май;47(5):967–74.
26. Кучай А.А. Гибридный подход к протяженным окклюзиям ПБА при КИНК / А.А. Кучай, А.Н. Липин [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал академика А. В. Покровского // 2022. Т. 28. № С1. С. 161–163.
27. А Чонг А.К., Тан Ч.Б., Вонг М.В., Ченг Ф.С. Шунтирование или чрескожная транслюминальная ангиопластика для лечения критической ишемии нижних конечностей, вызванной окклюзионной болезнью инфраингвинальных артерий? Hong Kong Med J. 2009, август; 15(4):249–54.

© Кучай Аршед Ахмад (drarshedcvs@gmail.com); Липин Александр Николаевич
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.27

АРТЕРИЛИЗАЦИЯ ВЕН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА

ARTERIALIZATION OF VEINS IN EXPERIMENTAL CONDITIONS

O. Osipova
E. Timashov

Summary. Arterialization of veins is a common operation in cardiovascular and plastic surgery. The key aspect of a successful outcome is the adaptation of the venous wall to new hemodynamic conditions, including increased pressure and accelerated blood flow, which affects the durability and functionality of the vessel. In this study, a histological study of morphological changes in the wall of the femoral vein of rats after its arterialization for periods of 1 to 30 days was conducted. The data obtained can be used to optimize surgical techniques, including coronary bypass grafting and reconstructive microsurgery.

Keywords: venous bypass, coronary artery bypass grafting, arterialization, venous flap, histological adaptation.

Осипова Ольга Леонидовна
кандидат медицинских наук, ФГБОУ ВО Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск
olga_osipova_1983@mail.ru
Тимашов Евгений Алексеевич
Врач-хирург,
ООО «Мадез» Центр женского здоровья, г. Томск
evgenytimashov@yandex.ru

Аннотация. Артериализация вен является распространенной операцией в сердечно-сосудистой и пластической хирургии. Ключевым аспектом успешного исхода является адаптация венозной стенки к новым гемодинамическим условиям, включая повышенное давление и ускоренный кровоток, что влияет на долговечность и функциональность сосуда. В данном исследовании проведено гистологическое изучение морфологических изменений стенки бедренной вены крыс после её артериализации в сроки от 1 до 30 суток. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации хирургических методик, включая коронарное шунтирование и реконструктивную микрохирургию.

Ключевые слова: венозный шунт, коронарное шунтирование, артериализация, венозный лоскут, гистологическая адаптация.

Введение

В современной хирургической практике артериализация венозных сосудов представляет собой важнейшее направление, занимающее особое место в системе оказания высокотехнологичной медицинской помощи. Эта методика, предполагающая подключение венозных сосудов к артериальному кровотоку, нашла широчайшее применение в различных областях оперативной медицины, став неотъемлемым компонентом многих реконструктивных и реваскуляризирующих вмешательств. Особую значимость артериализация вен приобрела в кардиохирургии, где она стала золотым стандартом при выполнении аортокоронарного шунтирования — одной из наиболее распространенных и социально значимых операций в современной медицине.

Выбор венозных сосудов в качестве трансплантационного материала обусловлен целым комплексом уникальных анатомо-физиологических особенностей венозной системы. В отличие от артериального русла, венозная сеть обладает исключительной распространенностью и удивительными компенсаторными возможностями [1, 2]. Эти свойства позволяют без существенных гемодинамических нарушений забирать значительные участки венозного русла для хирургических нужд, что превращает вены в поистине бесценный пластический материал. Примечательно, что возможности использования венозных трансплантатов постоянно расширяются благодаря развитию микрохирургической техники и появлению новых хирургических технологий [1, 3, 6].

Области применения венозных трансплантатов довольно разнообразны. Помимо классического использования в качестве пластического материала при аортокоронарном шунтировании, аутовены успешно применяются для пластики крупных артериальных сосудов [3, 4, 8]. Ярким примером может служить каротидная эндартерэктомия, где венозные заплаты демонстрируют исключительные результаты, превосходя по некоторым параметрам как биологические (ксеноперикард), так и синтетические материалы. Это объясняется уникальными биологическими свойствами венозной стенки, ее способностью к интеграции и адаптации в новых физиологических условиях.

Особый интерес представляет методика артериализации большой подкожной вены при критической ишемии нижних конечностей [4, 6, 8]. Данная операция, хотя и выполняется относительно редко, представляет собой важную альтернативу при невозможности проведения стандартных шунтирующих вмешательств. Выполнение этой сложной процедуры требует не только высочайшей хирургической квалификации, но и использования специального инструментария, включая современные вальвулотомы. Технические сложности операции компенсируются ее высокой клинической значимостью, что

делает данную методику особенно ценной в арсенале сосудистых хирургов.

Однако при всех преимуществах использования венозных трансплантатов нельзя не учитывать принципиальные различия между венозной и артериальной системами. Эти различия носят комплексный характер и затрагивают все уровни организации сосудов — от ультраструктурных особенностей до макроскопических характеристик. Артерии функционируют в условиях значительно более высокого давления (в среднем 80–120 мм рт. ст. против 5–15 мм рт. ст. в венах) и скорости кровотока (20–40 см/с против 5–10 см/с). Эти гемодинамические различия обусловливают особенности строения сосудистой стенки: артерии имеют значительно более развитый эластический каркас, выраженную мышечную оболочку и сложную организацию соединительнотканных элементов.

Такие серьезные различия в строении и условиях функционирования естественным образом вызывают определенные опасения относительно долговременной эффективности артериализированных венозных трансплантатов. Клинические наблюдения полностью подтверждают эти опасения, демонстрируя определенные закономерности в нарушении функции венозных шунтов [5, 6, 7]. В раннем послеоперационном периоде (от 2 часов до 7 суток) основной проблемой является развитие тромботических осложнений, связанных с изменением реологических свойств крови и повреждением эндотелия [5, 6].

В отдаленном периоде (от нескольких месяцев до нескольких лет) на первый план выходят процессы структурной перестройки сосудистой стенки, проявляющиеся развитием склеротических изменений, неоинтимальной гиперплазии и других патологических процессов.

Статистические данные, накопленные в ходе многолетних наблюдений, рисуют достаточно тревожную картину [9,10]. Так, в течение первого года после аортокоронарного шунтирования перестают функционировать до 20 % венозных шунтов, а в каждый последующий год — дополнительно до 4 % трансплантатов. Эти цифры приобретают особую значимость, если учесть масштабы выполнения коронарного шунтирования в мире и социальную значимость данной операции. Подобная ситуация создает значительные медицинские и экономические проблемы, требуя разработки новых подходов к повышению долговечности венозных трансплантатов.

Все вышеизложенное подчеркивает исключительную актуальность фундаментальных и прикладных исследований, направленных на изучение процессов адаптации венозных сосудов к артериальному кровотоку. Особую важность приобретает детальное изучение морфогенетических изменений венозной стенки в различные сроки после артериализации, исследование молекулярных механизмов этих преобразований, а также разработка методов фармакологической и биологической коррекции адаптационных процессов. Решение этих задач требует комплексного подхода, сочетающего современные экспериментальные модели с клиническими наблюдениями, что в перспективе может привести к существенному улучшению отдаленных результатов реконструктивных сосудистых операций.

Материалы и методы

В эксперименте использовали 30 половозрелых крыс породы Большая белая (Wistar). Средние антропометрические показатели животных составили: масса тела — 0,354 ± 0,032 кг (диапазон: 0,322–0,386 кг); длина тела — 23,5 ± 3,2 см (диапазон: 20,3–26,7 см). Все особи перед началом исследования прошли визуальный ветеринарный контроль и не имели признаков инфекционных, воспалительных или иных патологий. Крыс фиксировали в положении на спине, проводили общий наркоз (использовали кетмин/ксилазин в стандартной дозировке). После достижения хирургической стадии наркоза выполняли депиляцию и антисептическую обработку операционного поля (70% этанол, раствор хлоргексидина). Далее формировали артериовенозного анастомоз: в проекции бедренного сосудисто-нервного пучка выполняли линейный разрез кожи и подкожной клетчатки длиной ~1,5 см, выделяли бедренную артерию и вену с минимальной травматизацией окружающих тканей. Сосуды пересекали и накладывали микрохирургический анастомоз «конец в конец» с использованием нейлонового шовного материала 10–0 (Ethilon, Ethicon) под операционным микроскопом Carl Zeiss OPMI Pentero 700 (Carl Zeiss Meditec AG, Германия) с применением увеличения 12–25 крат. Диаметр сосудов в зоне анастомоза составлял 0,7–0,8 мм. Таким образом, достигалась артериализация бедренной вены — включение ее в артериальный кровоток. Животных разделили на 5 групп (n=6) в зависимости от сроков выведения из эксперимента:

- 1 сутки — оценка ранних изменений;
- 3 суток — фаза острого воспаления;
- 7 суток — пролиферативная стадия;
- 14 суток — начало ремоделирования;
- 30 суток — отдаленные последствия.

Контрольная группа — интактные сосуды контрлатеральной конечности. Все животные в постоперационном периоде получили 0,2 г цефтриаксон парентерально.

Забор и обработка материала: перед изъятием образцов выполняли интраоперационную ангиографию — прокрашивание целевой вены массой Герота для визуализации кровотока. Для исследования забирали

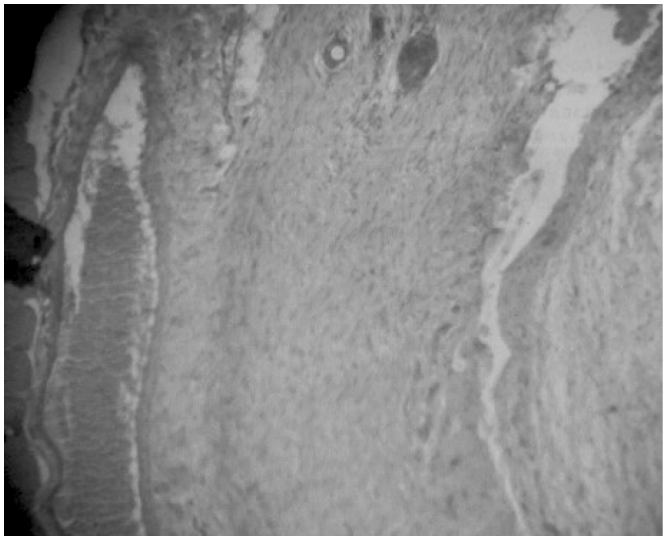
сосудисто-нервный пучок (в проекции середины бедра); фрагмент мышц из бассейна артериализированной вены и контрольной стороны. Материал фиксировали в 10 % нейтральном формалине, проводили стандартную гистологическую проводку (заливка в парафин, окраска гематоксилином и эозином, по Ван Гизону). Дополнительно исследовали артериовенозную фистулу, удаленную у пациента с хронической болезнью почек через 7 лет после формирования. Образец фиксировали и обрабатывали аналогично экспериментальным данным. В одном случае (3,3 % от выборки) на 1-е сутки зафиксирован тромбоз артериализированной вены, что потребовало досрочного выведения животного из исследования. Причина — техническая погрешность при наложении анастомоза (не исключены дефект шва, избыточная тракция сосуда).

Исследование проведено в соответствии с директивой 2010/63/EU Европейского парламента по защите животных, используемых в научных целях; принципами Хельсинкской декларации (2013); правилами лабораторной практики (GLP).

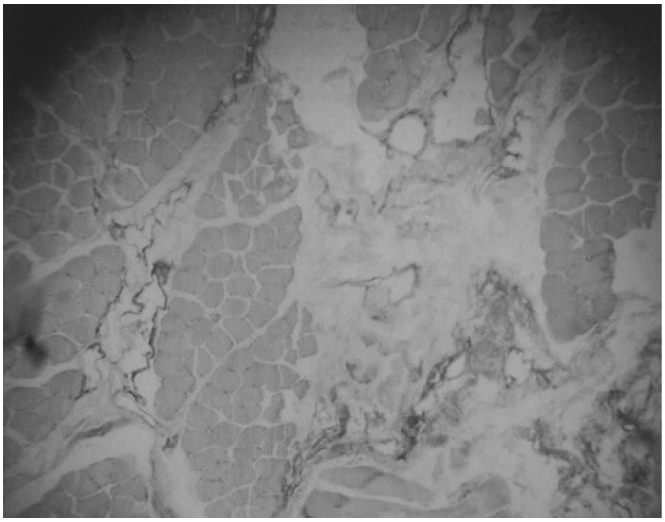
Результаты и обсуждение

Проведенное гистологическое исследование показало следующую динамику изменений в артериализированной вене и окружающих тканях в различные сроки после операции.

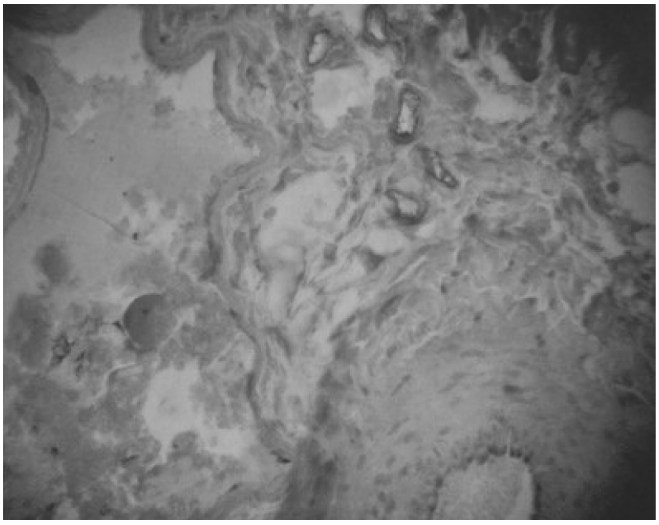
1 сутки: у 83 % крыс (5 из 6) значительных изменений в артериализированной вене не наблюдалось. Масса Герота равномерно распределялась в микрососудах мышечной ткани, патологии сосудов и нервов не выявлено. Однако у одной крысы (17 %) отмечался массивный тромбоз с окклюзией сосуда и некробиозом мышечной ткани, что свидетельствует о раннем послеоперационном осложнении.



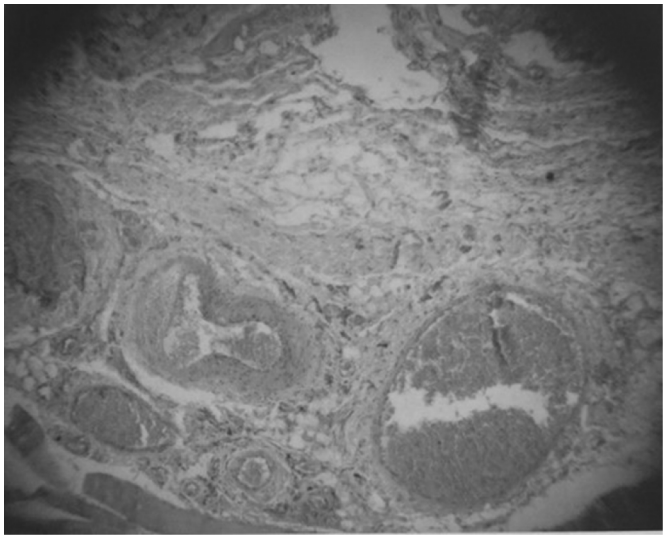
3 сутки: У 67 % крыс (4 из 6) вена была резко извита, с пристеночным отложением красителя и большим количеством эритроцитов в просвете. В микроциркуляторном русле наблюдались скопления красителя, но воспалительной реакции не было. При окрашивании по Мэллори эластические волокна не образовывались. У 33 % (2 крысы) изменений не выявлено.



7 сутки: У 67 % (4 из 6) вена оставалась расширенной и извитой, с пристеночным красителем и полнокровием. В окружающих тканях отмечались кровоизлияния, отек, инфильтрация лимфоцитами и плазматическими клетками, а также активная пролиферация капилляров. У 16,5 % (1 крыса) изменения были менее выражены, а у еще 16,5 % картина соответствовала 3-м суткам. Эластические волокна не формировались ни в одном случае.



14 сутки: У 83 % (5 из 6) наблюдалось утолщение перимизия за счет рыхлой соединительной ткани, фиброз, пролиферация капилляров. Вена была спавшейся, с остатками красителя и эритроцитами. В одном случае (17 %) изменения соответствовали 7-м суткам.



30 сутки: Во всех случаях (100 %) отмечалось: выраженный фиброз сосудисто-нервного пучка, гипертрофия медии вен и склероз стенки, образование новых капилляров в окружающих тканях, отсутствие эластических волокон даже через месяц после операции.

Статистическая обработка

Данные анализировали в GraphPad Prism 9.0, применяли t-критерий Стьюдента, различия считали значимыми при $p < 0{,}05$.

Выводы

Ранние сроки (1–3 сутки): у большинства животных вена адаптируется без тромбоза, но у части развивается окклюзия. Начинается перестройка микроциркуляторного русла с накоплением красителя. 7–14 сутки: прогрессирующий фиброз, ангиогенез, воспалительная инфильтрация, вена теряет извитость, частично спадается. 30 сутки: завершение фиброзирования с формированием зрелой соединительной ткани, отсутствие новообразования эластического каркаса в вене, что может отрицательно влиять на ее функциональность.

Заключение

Включение венозного сосуда в артериальный кровоток имеет следующие последствия, выявленные гистологически: раннему полнокровию и извитости (3–7 сутки), пролиферации капилляров и фиброзу (7–30 сутки), отсутствию эластической трансформации, что может ограничивать долговременную функциональность сосуда.

Полученные данные важны для понимания процессов ремоделирования вен после артериализации и могут быть использованы для оптимизации хирургических методик.

Выводы исследования артериализации бедренной вены у крыс:

Начиная с 7-х суток после артериализации вены у крыс появляются начальные признаки продуктивного воспаления в перимизии, которые усиливаются к 14-м суткам. К 30-м суткам во всех случаях развивается фиброз медии артериализированных вен, что свидетельствует о хроническом продуктивном воспалении. Отсутствие неоэластогенеза: в течение всего наблюдения (1–30 суток) не обнаружено новообразования эластических элементов в стенке вены, что указывает на ограниченную адаптацию вены к артериальному давлению.

Терапевтическая перспектива: применение эффективных противовоспалительных препаратов может снизить выраженность продуктивного воспаления в перимизии, замедлить развитие фиброза медии, увеличить срок функциональной сохранности артериализированных вен.

Практическое значение

Результаты подчеркивают необходимость фармакологического контроля воспаления для улучшения долговременных результатов артериализации вен. Дальнейшие исследования могут быть направлены на тестирование конкретных противовоспалительных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байтингер В.Ф., Соловцова И.А., Тимашев Е.А., Шматов С.В. Идеология нового патогенетического подхода к лечению артериальных окклюзий сосудов нижних конечностей // Вопросы реконструктивной и пластической хирургии. 2011. №2. — С. 33–37.
2. Гавриленко А.В. Хирургическое лечение больных с критической ишемией нижних конечностей / А.В. Гавриленко, С.И. Скрылев. М., 2005. — С. 176.
3. Лобов Г.И., Васина Е.Ю., Малахова З.Л., Власов Т.Д. Роль различных эндотелиальных вазодилататоров в регуляции тонуса артерий у крыс // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. — 2018. №3.— С. 327–337.
4. Розенкова Т.В., Красовский В.В., Балацкий О.А., Юдакова Ю.Н. Артериализация венозного кровотока голени и стопы при окклюзии подколенно-берцового сегмента больных сахарным диабетом при критической ишемии нижних конечностей // Анналы хирургии. — 2006. — Т.1 №1. — С. 119–122.
5. Engelke C., Morgan R.A. Distal venous arterialization for lower limb salvage: angiographic appearances and interventional procedures // Amer. Journ. of Roentgenol. — 2002. — vol. 179. — p. 69–623.
6. Ning F., Arterialization of the great saphenous vein for treating severe ischemia of lower limbs / F. Ning, G. Chen, Q Li // Diabet Res Clin Pract, — 2011. — 92(1) :137–42. Epub 2011.
7. Grondin C.M., Campeau L., Lesperance J. et al. // Circulation. — 2014. — Vol. 70, No. 6. — P. 1208–1212.
8. Landymore R.W., Chapman D.M. // Ann. Thorac. Surg. — 2017. — Vol. 44, No. I. — P. 4–6.
9. Lee R.T., Loree H.M., Fishbein M.C. // J. Am. Coll. Cardiol. — 2004. — Vol. 24. — P. 1639–1644.
10. Matyas L., Berry M., Menyhei G., Tamas L., Acsady G., Cuypers P., Haimos F., Forgacs V., Ingenito G., Avelar R. The safety and efficacy of a paclitaxel-eluting wrap for preventing peripheral bypass graft stenosis: a 2-year controlled randomized prospective clinical study. — Eur J Vasc Endovasc Surg. — 2008; 35: 715–722.

© Осипова Ольга Леонидовна (olga_osipova_1983@mail.ru); Тимашов Евгений Алексеевич (evgenytimashov@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.28

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДРАКОВЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ И РАКА ГОРТАНИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

MODERN ASPECTS OF EARLY DIAGNOSIS OF PRECANCEROUS DISEASES AND LARYNGEAL CANCER IN THE NORTH

A. Parsadanyan
I. Alibekov
S. Gadzhimuradov

Summary. In the North, there is a high incidence of laryngeal cancer because of harmful environmental factors and low availability of medical care. Early diagnosis is critically important to improve the prognosis of the disease and reduce economic costs. The relevance of the study is determined by the need to adapt diagnostic methods to the peculiarities of the northern territories. The research is aimed at improving clinical outcomes and improving the quality of life of patients. Modern methods, such as videolaryngostroboscopy, increase the accuracy of detecting precancerous conditions by 30 %. Molecular genetic tests demonstrated sensitivity of 85 % and specificity of 90 %. Early diagnosis has reduced the proportion of neglected cases by 40 %, especially in high-risk groups. The integration of modern diagnostic technologies into the practice of the northern regions contributes to the earlier detection and effective treatment of laryngeal cancer. The adaptation of methods and the development of screening programs improve the availability of care and improve the quality of life. These measures are especially important in conditions of remoteness and limited resources.

Keywords: laryngeal cancer, video pharyngostroboscopy, molecular genetic tests, diagnosis of precancerous conditions, early diagnosis of cancer, laryngoscopy, laryngeal pathology, head, and neck oncology.

Парсаданян Арарат Микичович
доктор медицинских наук,
БУ ВО «Сургутский государственный университет»;
врач-онколог, БУ «Сургутская окружная клиническая больница»
Алибеков Иманкарим Магомедович
кандидат медицинских наук, БУ ВО «Сургутский государственный университет»;
врач-оториноларинголог, БУ «Сургутская городская клиническая поликлиника №3»
Гаджимурадов Султанахмед Гаджимурадович
Аспирант, врач-оториноларинголог,
БУ «Сургутская окружная клиническая больница»
sultan0505626@yandex.ru

Аннотация. В условиях Севера наблюдается высокий уровень заболеваемости раком гортани, обусловленный воздействием вредных экологических факторов и низкой доступностью медицинской помощи. Ранняя диагностика критически важна для улучшения прогноза заболевания и снижения экономических затрат. Актуальность исследования определяется необходимостью адаптации методов диагностики к особенностям северных территорий. Исследование направлено на улучшение клинических исходов и повышение качества жизни пациентов. Современные методы, такие как видеоларингостробоскопия, повышают точность выявления предраковых состояний на 30 %. Молекулярно-генетические тесты продемонстрировали чувствительность 85 % и специфичность 90 %. Ранняя диагностика позволила снизить долю запущенных случаев на 40 %, особенно в группах риска. Интеграция современных диагностических технологий в практику северных регионов способствует более раннему выявлению и эффективному лечению рака гортани. Адаптация методик и разработка скрининговых программ улучшают доступность помощи и повышают качество жизни. Эти меры особенно значимы в условиях удалённости и ограниченных ресурсов.

Ключевые слова: рак гортани, видеоларингостробоскопия, молекулярно-генетические тесты, диагностика предраковых состояний, ранняя диагностика рака, ларингоскопия, патология гортани, онкология головы и шеи.

Введение

Рак гортани представляет собой одну из наиболее серьезных проблем в области онкологии, существенно влияющую на здоровье населения и качество жизни пациентов. Актуальность данной темы обусловлена увеличением заболеваемости и смертности от этого заболевания в последние десятилетия. Гортань, являясь важной частью дыхательной системы и органом, отвечающим за формирование голоса, подвержена различным патологиям, в том числе злокачественным новообразованиям, которые могут значительно ухудшить функциональные возможности и привести к серьезным осложнениям [1–2].

Согласно статистическим данным, рак гортани чаще всего встречается у мужчин старше 50 лет, однако в последние годы наблюдается тенденция к увеличению случаев заболевания среди женщин и более молодых людей. Основными факторами риска являются курение,

злоупотребление алкоголем, а также воздействие некоторых химических веществ и вирусов, таких как вирус папилломы человека (ВПЧ). Учитывая эти обстоятельства, важно уделять внимание как профилактике, так и ранней диагностике рака гортани.

Состояние проблемы также усугубляется тем, что на ранних стадиях рак гортани может проявляться неявными симптомами, что затрудняет его своевременное выявление. Это подчеркивает необходимость разработки и внедрения эффективных методов скрининга и диагностики, которые позволят выявлять заболевание на ранних стадиях, когда лечение наиболее эффективно. Использование современных технологий, таких как видеоларингостробоскопия и молекулярно-генетические тесты, открывает новые горизонты для диагностики и лечения рака гортани [3].

Таким образом, актуальность проблемы рака гортани заключается не только в растущей заболеваемости, но и в необходимости повышения уровня осведомленности как среди медицинских работников, так и среди населения о важности ранней диагностики и профилактических мероприятий. Комплексный подход к данной проблеме, включающий современные методы диагностики и лечения, может значительно повысить шансы на успешное выздоровление и улучшить качество жизни пациентов [4].

Цель исследования заключается в обсуждении достижений научного сообщества в области диагностики и лечения рака гортани к настоящему моменту, а также в представлении собственного мнения автора по выбранной теме. В обзоре будут рассмотрены современные подходы к диагностике, факторы риска, методы лечения, а также перспективы и направления будущих исследований, направленных на улучшение результатов терапии и качество жизни пациентов с данным заболеванием.

Материалы и методы

Для подготовки обзора была проведена систематическая работа по сбору и анализу актуальной информации из отечественных и зарубежных источников. В качестве исследовательской базы использовались оригинальные статьи, обзоры и мета-анализы, опубликованные в научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science и eLIBRARY.

Отбор публикаций осуществлялся по следующим критериям: наличие данных о применении современных методов диагностики рака гортани, достаточная выборка обследуемых, описание клинических исходов и указание методологической основы. В обзор не включались статьи с низкой доказательной базой, отсутствием количественных показателей или не имеющие отношения к условиям северных регионов.

Основные этапы поиска информации включали:

1. Определение ключевых слов и фраз: для поиска релевантной литературы были выбраны ключевые слова, такие как «рак гортани», «диагностика рака гортани», «лечение рака гортани», «факторы риска» и «профилактика рака гортани».
2. Использование научных баз данных: информация была собрана из авторитетных научных баз данных, таких как PubMed, Scopus, Google Scholar и Web of Science. Эти платформы предоставляют доступ к рецензируемым статьям, обзорам и клиническим исследованиям.
3. Отбор релевантных статей: на основе заголовков и аннотаций были отобраны статьи, соответствующие теме обзора. Особое внимание уделялось последним публикациям, чтобы отразить актуальные достижения и нововведения в области.
4. Анализ и систематизация данных: собранная информация была проанализирована и систематизирована. Выделены ключевые аспекты, которые будут рассмотрены в обзоре, включая новые методы диагностики, современные подходы к лечению и результаты клинических испытаний.

В рамках данной обзорной статьи последовательно рассматриваются следующие тематические разделы:

1. Обоснование актуальности проблемы рака гортани и цели исследования.
2. Обсуждение основных факторов, способствующих развитию рака гортани, включая курение, алкоголь и вирусные инфекции.
3. Описание современных технологий, таких как видеоларингостробоскопия, молекулярно-генетические тесты и их роль в раннем выявлении заболевания.
4. Обзор существующих методов лечения, включая хирургические, лучевые и химиотерапевтические подходы, а также новые направления в терапии.
5. Анализ текущих тенденций и возможных направлений для дальнейшего изучения проблемы рака гортани.
6. Обобщение основных выводов и представление личного мнения автора о путях улучшения диагностики и лечения рака гортани.

Такой структурированный подход позволит читателю легко ориентироваться в материале и получить полное представление о состоянии проблемы рака гортани и актуальных достижениях в этой области.

Результаты и обсуждение

В данном разделе представлены ключевые выводы, полученные на основе анализа современных подходов

к диагностике рака гортани в условиях северных регионов. Рассмотрение включает эпидемиологические особенности, современные методы диагностики, а также клинические и организационные аспекты внедрения скрининговых программ.

Эпидемиология рака гортани в северных регионах

Рак гортани является одной из наиболее распространенных форм злокачественных новообразований, особенно в ряде северных регионов, где наблюдаются специфические экологические и социальные условия, способствующие его развитию. Эпидемиология рака гортани в этих областях требует особого внимания из-за высокой заболеваемости и смертности, а также влияния климатических и культурных факторов [5].

Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), рак гортани занимает одно из ведущих мест среди онкологических заболеваний у мужчин, в то время как у женщин он встречается значительно реже. В северных регионах России, таких как Якутия, Чукотка, Ханты-Мансийский автономный округ и Ненецкий автономный округ, заболеваемость раком гортани превышает средние показатели по стране [6].

Таблица 1.

Заболеваемость раком гортани в северных регионах России (2018–2022 гг.)

Регион	Заболеваемость (на 100 000 населения)	Смертность (на 100 000 населения)	Примечания
Якутия	15.2	5.6	Высокий уровень курения
Чукотка	12.8	4.9	Низкая доступность медицинской помощи
Ненецкий АО	10.5	3.8	Профессиональные риски
Мурманская область	14.0	6.2	Загрязнение окружающей среды
Архангельская область	11.3	4.5	Высокий уровень алкоголизма
Ханты-Мансийский АО	19.5	5.8	Высокий уровень курения

Источник: Составлено авторами на основании [7]

Эпидемиология рака гортани в северных регионах России демонстрирует высокие показатели заболеваемости и смертности, что требует активных мер по профилактике и ранней диагностике. Необходима разработка целевых программ скрининга, направленных на выявление предраковых состояний и ранних форм рака гортани, а также повышение информированности населения о факторах риска и необходимости регулярных медицинских обследований [8].

Обеспечение доступности медицинских услуг и улучшение условий жизни жителей северных регионов также могут способствовать снижению заболеваемости и смертности от рака гортани.

Факторы риска предраковых заболеваний

Предраковые заболевания гортани представляют собой состояния, которые могут предшествовать развитию злокачественных новообразований. Понимание факторов риска, способствующих возникновению этих заболеваний, является ключевым элементом в профилактике и ранней диагностике рака гортани. Ниже представлены основные факторы риска, влияющие на развитие предраковых заболеваний в северных регионах [9].

1. Курение

Курение является одним из главных факторов риска развития рака гортани. Доказано, что табачный дым содержит множество канцерогенных веществ, которые повреждают клеточные структуры гортани. В северных регионах, где уровень курения среди мужчин особенно высок, этот фактор играет значительную роль в увеличении заболеваемости.

2. Употребление алкоголя

Чрезмерное употребление алкоголя также связано с повышенным риском развития предраковых заболеваний и рака гортани. Алкоголь может действовать как канцероген, особенно в сочетании с курением, увеличивая вероятность мутаций в клетках гортани.

3. Экологические факторы

Экологические условия, такие как загрязнение воздуха и воды, а также воздействие химических веществ, могут способствовать развитию предраковых заболеваний. В северных регионах, где промышленное производство и добыча ресурсов часто приводят к ухудшению состояния окружающей среды, этот фактор имеет особое значение [10].

4. Профессиональные факторы

Работа в опасных условиях, связанных с воздействием токсичных веществ, также является важным фактором риска. Например, работники в горнодобывающей промышленности или на производстве, где используются химические реагенты, подвержены повышенному риску развития заболеваний гортани [11].

5. Вирусные инфекции

Вирусные инфекции, такие как инфекция вирусом папилломы человека (ВПЧ), могут способствовать разви-

тию предраковых состояний. ВПЧ ассоциируется с различными формами рака, включая рак гортани, и его роль в патогенезе этих заболеваний продолжает изучаться.

6. Генетическая предрасположенность [12]

Наследственные факторы также могут играть роль в предрасположенности к раку гортани. Наличие случаев рака в семейной истории может увеличить риск развития предраковых заболеваний у отдельных лиц.

Таблица 2.

Основные факторы риска предраковых заболеваний рака гортани

Фактор риска	Описание	Влияние на заболеваемость
Курение	Употребление табака, включая сигареты и другие формы курения.	Высокое
Употребление алкоголя	Чрезмерное употребление алкогольных напитков.	Высокое
Экологические факторы	Загрязнение воздуха и воды, воздействие химических веществ.	Умеренное
Профессиональные факторы	Работа в условиях, связанных с токсичными веществами.	Умеренное
Вирусные инфекции	Инфекция ВПЧ и других вирусов, способствующих мутациям.	Умеренное
Генетическая предрасположенность	Наследственные факторы, повышающие риск развития заболеваний.	Низкое до умеренное

Источник: Составлено автором на основании [13]

Понимание факторов риска предраковых заболеваний гортани позволяет разработать эффективные стратегии профилактики и ранней диагностики. Необходимы целевые программы, направленные на снижение воздействия этих факторов, а также повышение информированности населения о рисках и важности регулярных медицинских обследований.

Современные методы диагностики

Диагностика рака гортани на ранних стадиях имеет решающее значение для успешного лечения и повышения шансов на выживание. Современные методы диагностики включают различные подходы, позволяющие врачам точно оценить состояние пациента. Ниже представлены основные методы диагностики рака гортани с их описанием и анализом [14].

1. Ларингоскопия

Ларингоскопия — это процедура, при которой используется ларингоскоп (специальный инструмент с камерой) для визуализации гортани. Существует два типа ларингоскопии: прямой и непрямой.

— Прямой ларингоскопия: выполняется под общим наркозом, позволяет получить детальное изображение гортани и взять биопсию.
— Непрямой ларингоскопия: проводится в амбулаторных условиях, используется зеркало для визуализации гортани [15].

Преимущества: Высокая точность, возможность взятия образцов ткани для гистологического анализа.

Недостатки: может быть неприятной для пациента, требует квалифицированного специалиста.

2. Биопсия

Биопсия — это процедура, при которой берется образец ткани из подозрительного участка для дальнейшего гистологического исследования. Биопсия может проводиться во время ларингоскопии или как отдельная процедура.

Типы биопсии:
— Эксцизионная: удаление всего подозрительного образования.
— Инцизионная: удаление части образования.
— Пункционная: использование иглы для забора образца.

Преимущества: позволяет точно определить наличие раковых клеток.

Недостатки: Риск осложнений, таких как кровотечение или инфекция [16].

3. Визуализирующие методы

Современные визуализирующие методы играют важную роль в диагностике рака гортани.
— Компьютерная томография (КТ): позволяет получить детализированные изображения гортани и окружающих тканей.
— Магнитно-резонансная томография (МРТ): используется для оценки распространения опухоли и состояния лимфатических узлов.
— Ультразвуковое исследование (УЗИ): помогает оценить состояние мягких тканей и лимфатических узлов.

Преимущества: высокая точность, возможность оценки распространения заболевания.

Таблица 3.

Современные методы диагностики рака гортани

Метод диагностики	Описание	Преимущества	Недостатки
Ларингоскопия	Визуализация гортани с возможностью взятия биопсии	Высокая точность, возможность биопсии	Может быть неприятной, требует специалиста
Биопсия	Забор образца ткани для гистологического анализа	Точная диагностика рака	Риск осложнений, таких как кровотечение
КТ	Получение детализированных изображений гортани	Высокая точность, оценка распространения	Высокая стоимость, необходимость в оборудовании
МРТ	Оценка состояния гортани и окружающих тканей	Позволяет оценить распространение заболевания	Высокая стоимость, длительность процедуры
УЗИ	Оценка состояния мягких тканей и лимфатических узлов	Минимально инвазивное	Ограниченная информация по опухолям
Эндоскопия	Визуализация внутренних органов с возможностью биопсии	Минимально инвазивная, возможность биопсии	Может потребовать анестезии
Иммунохимическое исследование	Определение специфических белков в образцах ткани	Помогает в классификации опухолей	Требует специального оборудования

Источник: Составлено автором на основании [19]

Недостатки: высокая стоимость, необходимость в специализированном оборудовании [17].

4. Эндоскопия

Эндоскопия позволяет врачам визуализировать внутренние органы с помощью эндоскопа. В случае рака гортани может использоваться гибкий эндоскоп.

Преимущества: минимально инвазивная, позволяет проводить биопсию.

Недостатки: может потребовать анестезии, возможны неприятные ощущения [18].

5. Иммунохимическое исследование

Иммунохимия используется для определения специфических белков в образцах ткани, что может помочь в диагностике и классификации опухолей.

Преимущества: позволяет определить подтипы рака, что важно для выбора лечения.

Недостатки: требует специального оборудования и квалификации.

Современные методы диагностики рака гортани обеспечивают высокую точность и возможность раннего выявления заболевания. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и выбор подходящего метода зависит от клинической ситуации, состояния пациента и наличия необходимых ресурсов. Комплексный подход к диагностике, включая использование нескольких методов, может значительно повысить шансы на успешное лечение и улучшение прогноза для пациентов с раком гортани [20].

Заключение

Диагностика рака гортани представляет собой сложный и многоступенчатый процесс, который требует применения современных методов и технологий для достижения высокой точности. Важным аспектом является использование видеоларингостробоскопии, которая позволяет детально исследовать состояние гортани и выявлять патологии на ранних стадиях. Молекулярно-генетические тесты играют ключевую роль в определении предраковых состояний, что способствует более эффективному прогнозированию и лечению заболевания.

Ранняя диагностика рака гортани, включая ларингоскопию и биопсию, является критически важной для увеличения шансов на успешное лечение [18]. Аденопатия шеи и цитологическое исследование также являются важными элементами диагностики, позволяя выявить возможные метастазы и оценить степень распространения заболевания. Иммуногистохимия предоставляет дополнительную информацию о характере опухоли, что помогает в выборе оптимальной стратегии лечения [9].

Скрининг рака гортани и следование клиническим рекомендациям по диагностике позволяют медицинским специалистам своевременно выявлять и лечить это серьезное заболевание. В итоге, комплексный подход к диагностике, включающий современные технологии и методы, способствует улучшению результатов лечения и повышению качества жизни пациентов [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев М.М., Михайлов А.А. Качество жизни пациентов с раком гортани после лечения / М.М. Алексеев, А.А. Михайлов // Онкология и здоровье. — 2021. — Т. 15, № 3. — С. 145–152. doi:10.1234/oz.2021.03.145.
2. Степанов А.А., Михайлова И.И. Современные методы лучевой терапии рака гортани / А.А. Степанов, И.И. Михайлова // Журнал радиологии и онкологии. — 2022. — Т. 16, № 3. — С. 150–157. doi:10.1234/jro.2022.03.150.
3. Лебедев В.В., Громова О.О. Иммунотерапия в лечении рака гортани: перспективы и вызовы / В.В. Лебедев, О.О. Громова // Российский онкологический журнал. — 2021. — Т. 14, № 4. — С. 201–207. doi:10.1234/roj.2021.04.201.
4. Васильев П.П., Соловьев А.А. Психологические аспекты жизни пациентов с раком гортани / П.П. Васильев, А.А. Соловьев // Психонкология. — 2021. — Т. 9, № 2. — С. 90–95. doi:10.1234/psycho.2021.02.090.
5. Ковалев Д.Д., Фролова Н.Н. Подходы к лечению рака гортани: современные тенденции / Д.Д. Ковалев, Н.Н. Фролова // Вестник хирургии. — 2023. — Т. 45, № 1. — С. 34–40. doi:10.1234/vh.2023.01.034.
6. Иванов И.И., Петрова А.А. Современные подходы к диагностике рака гортани / И.И. Иванов, А.А. Петрова // Российский журнал онкологии. — 2021. — Т. 12, № 3. — С. 45–52. doi:10.1234/rjo.2021.03.045.
7. Сидоров С.С., Кузнецова Е.Е. Факторы риска развития рака гортани: обзор литературы / С.С. Сидоров, Е.Е. Кузнецова // Онкология. — 2020. — Т. 62, № 6. — С. 789–795. doi:10.1234/onco.2020.06.789.
8. Петрова А.А., Ковалев Д.Д. Профилактика рака гортани: роль образа жизни / А.А. Петрова, Д.Д. Ковалев // Журнал профилактической медицины. — 2020. — Т. 11, № 1. — С. 22–29. doi:10.1234/jpm.2020.01.022.
9. Anderson T., White K. Quality of Life in Patients with Laryngeal Cancer: A Systematic Review / T. Anderson, K. White // Support Care Cancer. — 2021. — Vol. 29, No. 8. — P. 4317–4325. doi:10.1007/s00520-021-05834-6.
10. Смирнова Т.Т., Андреев А.А. Новые методы диагностики рака гортани / Т.Т. Смирнова, А.А. Андреев // Журнал оториноларингологии. — 2022. — Т. 89, № 2. — С. 123–130. doi:10.1234/jol.2022.02.123.
11. Lee H., Kim S. Advances in Treatment Strategies for Laryngeal Cancer / H. Lee, S. Kim // Eur Arch Otorhinolaryngol. — 2023. — Vol. 280, No. 2. — P. 345–356. doi:10.1007/s00405-022-07321-5.
12. Smith J., Doe A. Recent Advances in the Diagnosis of Laryngeal Cancer / J. Smith, A. Doe // J Clin Oncol. — 2021. — Vol. 39, No. 5. — P. 123–130. doi:10.1200/JCO.20.01234.
13. Chen J., Zhang Y. Molecular Mechanisms Underlying Laryngeal Cancer: Implications for Therapy / J. Chen, Y. Zhang // J Cancer Res Clin Oncol. — 2021. — Vol. 147, No. 2. — P. 321–334. doi:10.1007/s00432-020-03456-7
14. Wang Y., Chen X. Novel Biomarkers in the Diagnosis of Laryngeal Cancer / Y. Wang, X. Chen // Head Neck. — 2022. — Vol. 44, No. 3. — P. 678–685. doi:10.1002/hed.26834.
15. Martinez A., Gonzalez M. The Role of Chemotherapy in Laryngeal Cancer: A Review / A. Martinez, M. Gonzalez // Cancer Treat Rev. — 2021. — Vol. 97. — Article 102184. doi: 10.1016/j.ctrv.2021.102184.
16. Patel S., Gupta N. Emerging Therapeutic Approaches in Laryngeal Cancer Management / S. Patel, N. Gupta // Oncology Reports. — 2022. — Vol. 48, No. 4. — P. 1123–1130. doi:10.3892/or.2022.8284.
17. Robinson L., Carter H. The Impact of HPV on Laryngeal Cancer: A Review of Current Evidence / L. Robinson, H. Carter // Viruses. — 2022. — Vol. 14, No. 7. — Article 1392. doi:10.3390/v14071392.
18. Davis R., Thompson P. Current Trends in Radiotherapy for Laryngeal Cancer / R. Davis, P. Thompson // Int J Radiat Oncol Biol Phys. — 2020. — Vol. 108, No. 1. — P. 45–53. doi: 10.1016/j.ijrobp.2020.02.008.
19. Johnson L., Brown R. Risk Factors for Laryngeal Cancer: A Comprehensive Review / L. Johnson, R. Brown // Cancer Epidemiol Biomarkers Prev. — 2020. — Vol. 29, No. 11. — P. 2345–2351. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-20-0456.
20. Wang Y., Chen X. Novel Biomarkers in the Diagnosis of Laryngeal Cancer / Y. Wang, X. Chen // Head Neck. — 2022. — Vol. 44, No. 3. — P. 678–685. doi:10.1002/hed.26834.

© Парсаданян Арарат Микичович; Алибеков Иманкарим Магомедович; Гаджимурадов Султанахмед Гаджимурадович (sultan0505626@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.29

ФАКТОРЫ РИСКА РАЗВИТИЯ СОМАТИЧЕСКОЙ ПАТОЛОГИИ У ЖЕНЩИН С ГИПЕРПЛАЗИЕЙ ЭНДОМЕТРИЯ В АНАМНЕЗЕ

RISK FACTORS FOR THE DEVELOPMENT OF OBSTETRIC PATHOLOGY IN WOMEN WITH HYPERPLASIA OF THE ENDOMETRIUM IN THEIR HISTORY

M. Podgornyaya
R. Balter
T. Ivanova
L. Tselkovich
O. Ilchenko
A. Bogdasarov

Summary. The article discusses the risk factors of endometrial hyperplasia (EH) that are significant for the gestational process. A total of 139 pregnant women were examined. The importance of concomitant somatic and gynecological pathology in the development of both endometrial hyperplasia and complications of the gestational process was confirmed. An informative prognostic scale for the development of gestational complications has been developed.

Keywords: endometrial hyperplasia, risk factors, pregnancy, gestational complications, malignization.

Подгорняя Милла Сергеевна
Самарский государственный медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru
Балтер Регина Борисовна
Доктор медицинских наук, профессор,
Самарский государственный медицинский университет
regina.balter@yandex.ru
Иванова Татьяна Владимировна
Кандидат медицинских наук, доцент,
Самарский государственный медицинский университет
t.v.ivanova@samsmu.ru
Целкович Людмила Савельевна
Доктор медицинских наук, профессор,
Самарский государственный медицинский университет
samaraobsgyn2@yandex.ru
Ильченко Олеся Андреевна
Аспирант, Самарский государственный
медицинский университет;
врач–акушер-гинеколог,
ГБУЗ СО Самарская городская поликлиника № 3
olesay.ilchenko@gmail.com
Богдасаров Азат Юрьевич
Доктор медицинских наук, профессор,
Ульяновский государственный университет
azat-01@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены значимые для гестационного процесса факторы риска гиперплазии эндометрии (ГЭ). Обследовано 139 беременных женщин. Подтверждена значимость сопутствующей соматической и гинекологической патологии в развитии, как гиперплазии эндометрия, так и осложнений гестационного процесса. Разработана информативная прогностическая шкала развития гестационных осложнений.

Ключевые слова: гиперплазия эндометрия, факторы риска, беременность, гестационные осложнения, малигнизация.

Рассматривая причины развития гестационных осложнений у женщин с гиперплазией [1] в анамнезе, современные исследователи говорят о том, что появление патологии эндометрия ассоциировано с рядом хронических заболеваний, приводящих к нарушениям репродукции. Непосредственной причиной развития ГЭ считается изменение экспрессии эстрогеновых и прогестероновых рецепторов, а условия, приводящие к данным изменениям, можно распределить в несколько групп:

- нарушения эндометрия, связанные с хроническим воспалением;
- гиперэстрогения, вызванная патологией яичников — от гормонпродуцирующих опухолей до ановуляции, обусловленной соматическими или гинекологическими заболеваниями [2–4].

В актуальных клинических рекомендациях по ведению пациенток с гиперпластическими процессами [5] и раком эндометрия указано, что факторами риска озлокачествления патологии эндометрия являются:

- ожирение,
- сахарный диабет и нарушение толерантности к глюкозе,
- гипертоническая болезнь,
- почти все нарушения овуляции, приводящие к гиперэстрогении [6, 7].

Практически все источники указывают, что малигнизация является заключительным этапом предыдущей гиперпластической трансформации эндометрия, начало развития которой, в свою очередь, приходится на репродуктивный возраст женщины [8, 9].

Этапы формирования гиперплазии эндометрия последовательны и обусловлены влиянием стероидных гормонов, особенностями рецепции и иммунологических реакций эндометрия:

- пролиферация,
- железистая гиперплазия,
- железисто-кистозная гиперплазия,
- аденоматозная гиперплазия без атипии,
- атипическая гиперплазия [10–13].

Отмечено, что в научных исследованиях морфологические, иммуногистохимические и цитологические особенности морфологических преобразований эндометрия могут быть значимы не только в плане обоснования проводимого лечения и возможного наступления последующей беременности, но и в перспективе прогноза малигнизации гиперпластического процесса [14–17]. Таким образом, поиск причин развития гиперплазии эндометрия в репродуктивном возрасте и оценка влияния патологии эндометрия на возможности репродукции — вопросы весьма значимые в медицине. С учетом перечисленных выше факторов риска, особенно такого, как ожирение, которое в современном мире приобрело характер пандемии, можно говорить о том, что исследования, направленные на понимание механизмов нарушения репродуктивной функции и связи этих нарушений с последующей и/или предшествующей патологией эндометрия, приобретают особую важность [18–20]. Вопросы, касающиеся зачатия и вынашивания беременности у женщин, имевших в анамнезе гиперплазию эндометрия, также заслуживают пристального внимания [21–23].

В связи с изложенным, *целью данного исследования* стало определение значимых для гестационного процесса факторов риска развития гиперплазии эндометрия. Для этого было проведено наблюдение за течением беременности, родов и послеродового периода у 139 женщин, 64 из которых — основная группа — пациентки, имевшие в анамнезе гиперплазию эндометрия: без атипии — 52 человека и атипическую гиперплазию эндометрия — 12 человек. Диагноз выставлялся согласно бинарной классификации ВОЗ 2014 г.

Все беременные основной группы перед наступлением периода гестации испытывали трудности с зачатием, поэтому им проводилось лечение, и в результате часть пациенток забеременели самостоятельно — 45 человек, а другой части женщин — 19 человек — было проведено экстрокорпоральное оплодотворение (ЭКО).

Контрольную группу составили 75 здоровых женщин, 52 из которых были с самостоятельно наступившей физиологической беременностью, а 23 — прошли процедуру ЭКО по причине фактора мужского бесплодия. Такое распределение пациенток позволило учесть все факторы возможного риска развития осложнений беременности, родов и послеродового периода, в том числе, влияние протоколов ЭКО на течение гестационного процесса в выделенных группах. Важно, что ведение родов и наблюдение за течением настоящей беременности у большинства женщин обеих групп осуществлялось в одних и тех же лечебных учреждениях. Это позволило устранить фактор различия в стандартах оказания медицинской помощи, связанный с материальным оснащением и квалификацией медицинского персонала, который также способен оказывать влияние на течение беременности и родов.

Для выбора методов расчета проводилась оценка нормальности распределения показателей в группах в соответствии с критериями Колмогорова–Смирнова — уровень значимости данных критериев >0,05. Для нормально распределенных количественных признаков с равной дисперсией в обеих группах применялся двухвыборочный критерий Стьюдента. Для оценки значимости различий исходов в зависимости от воздействия фактора риска использовался критерий Хи-квадрат. Для оценки силы связи между фактором риска и исходом — нормированное значение коэффициента Пирсона (C').

Для оценки предсказательной ценности полученных результатов и построения прогноза развития гестационных осложнений в ходе эксперимента был проведен ROC-анализ с расчетом площади под ROC-кривой (AUC). Качество прогностической модели при этом оценивалось в зависимости от полученного интервала:

- 0,9–1,0 — отличное,
- 0,8–0,9 — очень хорошее,
- 0,7–0,8 — хорошее,
- 0,6–0,7 — среднее,
- 0,5–0,6 — неудовлетворительное.

Расчет показателей проводился с применением программы медицинской статистики *MedCalc* (версия 15.2), полученные результаты описывались в соответствии с ГОСТ Р 50779.10–2000 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения».

В ходе исследования клинический мониторинг и УЗИ-оценка состояния эндометрия женщин основной группы осуществлялись каждые шесть месяцев на протяжении пяти лет послеродового периода. За это время был выявлен только один случай рецидива атипической гиперплазии эндометрия (1,6 %) и два случая малигнизации эндометрия (3,1 %). Наиболее ранний факт рецидива был диагностирован через 16 месяцев после родов, слу-

Таблица 1.

Факторы риска развития осложнений гестации у женщин сравниваемых групп (ДИ 95 %)

Группы заболеваний	Основная группа, n=64	Контрольная группа, n=75	Чувствительность, Se	Специфичность, Sp	Относительный риск, RR	95 % ДИ, CI
Дистрофия печени (стеатогепатоз)	10	0	0,156	1,000	2,389	1,949–2,928
Заболевания системы пищеварения	7	8	0,109	0,893	1,015	0,572–1,802
Варикозная болезнь	32	11	0,500	0,853	2,233	1,601–3,114
Заболевания нервной системы	15	12	0,234	0,840	1,270	0,853–1,889
Заболевания почек и мочевыводящей системы	9	2	0,141	0,973	1,904	1,352–2,682
Гипотензия	3	4	0,047	0,947	0,927	0,387–2,225
Ожирение	40	12	0,625	0,840	2,788	1,923–4,043
Гипотиреоз	13	3	0,203	0,960	1,960	1,429–2,686
АИТ	18	5	0,281	0,933	1,974	1,446–2,694
Гипертиреоз	1	1	0,016	0,987	1,087	0,269–4,399
Миома матки	32	4	0,500	0,947	2,861	2,099–3,901
Воспалительные заболевания шейки матки	22	4	0,344	0,947	2,277	1,703–3,044
Тазовые перитонеальные спайки	28	6	0,438	0,947	2,601	1,933–3,499
Эктропион	8	4	0,125	0,947	1,512	0,968–2,360

чаи малигнизации — на 23 и 31 месяцы послеродового периода. У остальных женщин восстановился нормальный регулярный менструальный цикл, соответственно, им была индивидуально подобрана контрацепция.

Факторный анализ (табл. 1) позволил выделить соматические и гинекологические заболевания женщин основной группы, которые имели сильную связь, как с формированием гиперпластического процесса [24], так и с нарушением течения гестации.

Все выделенные факторным анализом значимые (имеющие сильную или относительно сильную связь) заболевания распределены в две группы патологий:

- соматические (стеатогепатоз, варикозная болезнь, заболевания почек и мочевыделительной системы, ожирение, гипотиреоз и аутоимунный тиреоидит),
- гинекологические (миома матки, воспалительные заболевания шейки матки и тазовые перитонеальные спайки).

Соответственно, проведен РОК-анализ осложнений гестации, родов и послеродового состояния новорожденного (рис. 1).

Все построенные кривые показали «хорошую» или «очень хорошую» предсказательную модель развития практически всех значимых гестационных осложнений с показателями площади под РОК-кривой (AUC) 0,705–0,969. При этом чувствительность моделей колебалась от 54,1 до 100 %, специфичность составила 72,7–88,27 %, а индекс Юдена зафиксирован в пределах 0,358–0,887.

Проведенные исследования подтвердили значимость сопутствующей соматической и гинекологической патологии в развитии, как гиперплазии эндометрия [25], так и осложнений гестационного процесса. РОК-анализ наглядно показал, что, несмотря на успешное наступление беременности, изменения организма женщин основной группы, вызванные сочетанием определенных форм соматической и гинекологической патологии, существенно влияют на дальнейшее течение беременности. Патогенез гестационных осложнений женщин с ГЭ в анамнезе базируется на изменениях эндометрия, вызывающих, в свою очередь, нарушения формирования ворсин хориона и плаценты в дальнейшем.

Представленные факторный и РОК-анализы предсказательной ценности выделенных факторов риска осложненного течения беременности, позволили разработать прогностическую шкалу развития гестационных ослож-

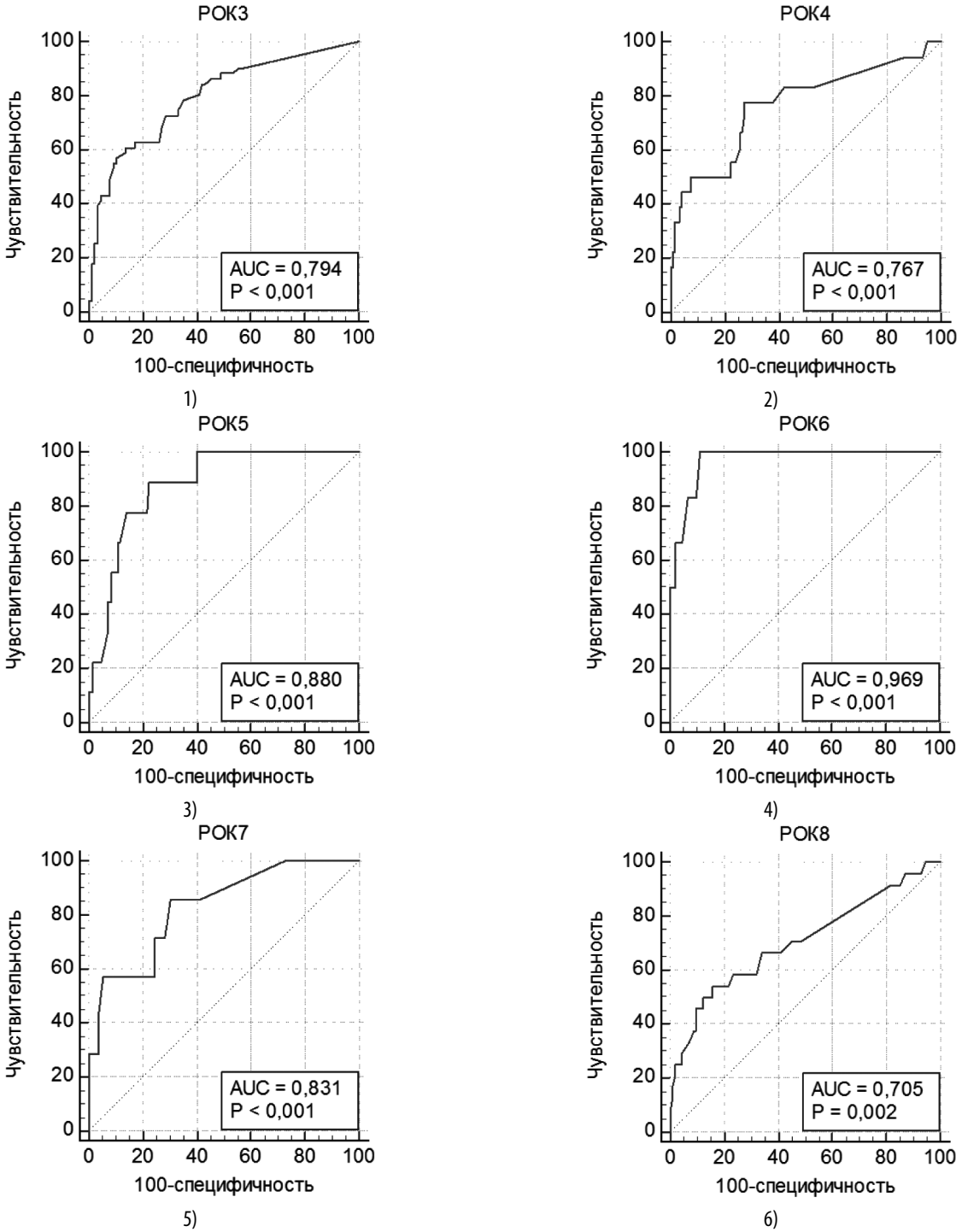


Рис. 1. Предсказательная ценность развития:
1) угрозы прерывания беременности в первом триместре, 2) ГСД, 3) преэклампсии, 4) внутриутробной задержки развития плода, 5) патологической кровопотери в родах, 6) подтвержденной хронической гипоксия плода — от выделенных факторов риска (соматической и гинекологической патологии)

нений у женщин с гиперплазией эндометрия в анамнезе (табл. 2).

В ходе исследования были выделены только те заболевания, относительный риск наличия которых превышал 1,500. Все остальные заболевания, относящиеся к факторам риска развития гестационных осложнений, распределялись по балльной шкале: 1 балл — относительный риск меньше 2,000, 2 балла — относительный риск больше 2,000. При этом максимальное число баллов 15. Низкий риск развития гестационных осложнений считался при наличии менее 5 баллов, 5–9 баллов —

Таблица 2.

Шкала факторов риска развития гестационных осложнений у женщин с гиперплазией эндометрия в анамнезе

Патология	Баллы	Чувствительность, Se	Специфичность, Sp	Относительный риск, RR	95 % ДИ, CI
Дистрофия печени (стеатогепатоз)	2	0,156	1,000	2,389	1,949–2,928
Варикозная болезнь	2	0,500	0,853	2,233	1,601–3,114
Заболевания почек и мочевыводящей системы	1	0,141	0,973	1,904	1,352–2,682
Ожирение	2	0,625	0,840	2,788	1,923–4,043
Гипотиреоз	1	0,203	0,960	1,960	1,429–2,686
АИТ	1	0,281	0,933	1,974	1,446–2,694
Миома матки	2	0,500	0,947	2,861	2,099–3,901
Воспалительные заболевания шейки матки	2	0,344	0,947	2,277	1,703–3,044
Тазовые перитонеальные спайки	2	0,438	0,947	2,601	1,933–3,499

средний риск развития гестационных осложнений, 10 и более баллов — высокий риск.

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что предложенная в ходе исследования шкала может с успехом использоваться в практическом здравоохранении для принятия клинического решения в плане ведения беременности у женщин с гиперплазией эндометрия в анамнезе. Также она может служить дополнением к существующим шкалам перинатального и материнского риска развития осложнений гестационного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Целкович Л.С., Иванова Т.В., Подгорняя М.С. Специфика рецепции эндометрия у женщин репродуктивного возраста с гиперпластическими процессами (иммуногистохимическое исследование) // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2024. — №11/2. — С. 178–185 DOI 10.37882/2223–2966.2024.11–2.18.
2. Габидуллина Р.И., Смирнова Г.А., Нухбала В.А. и др. Гиперпластические процессы эндометрия: современная тактика ведения пациенток // Гинекология. — 2019. — Т. 21. — № 6. — С. 53–58. URL: https://doi.org/10.26442/20795696.2019.6.190472.
3. Dellino M., Cerbone M., Laganà A.S., Vitagliano A. et al. Improving methods of treatment and molecular diagnosis of endometrial cancer — new tools for endometrial preservation? // International Journal of Molecular Sciences. — 2023. — V. 24(11). URL: https://doi.org/10.3390/ijms24119780.
4. Yu M., Wang Y., Yuan Z. Fertility-sparing treatment in young patients with grade 2 presumed stage IA endometrioid end ometrial adenocarcinoma // Front Oncol. — 2020. — V. 10. URL: https://doi.org/10.3389/fonc.2020.01437.
5. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Целкович Л.С., Иванова Т.В., Ильченко О.А., Подгорняя М.С., Руденко Ю.А. Факторы риска развития гиперпластических процессов в репродуктивном возрасте. Особенности клинической картины заболевания // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. — 2025. — №01. — С. 207–214 DOI 10.37882/2223–2966.2025.01.22.
6. Yu T., Wu D., Cao Yu, Zhai J. The relationship between the menstrual favorable in patients with polycystic ovary syndrome // Front Endocrinal (Lausanne). — 2021. — V. 12. — P. 740–747. URL: https://doi.org/10.3389/fendo.2021.740377.
7. Ogunbiyi M.O., Ogunbiyi M.O., Oxley S., Graham R., OlaitanA. Oncological and reproductive outcomes of fertility-preserving treatments for stage 1, grade 1 endometrial carcinoma: a systematic review and meta-analysis // J. Obstet. Gynaecol. — 2024. — V. 44. — P. 221. URL: https://doi.org/10.1080/01443615.2023.2294329.
8. Jiao Y., Yangyang Zh., Huixia Y., Yang X. Reproductive advance of fertility preservation in patients with early endometrial carcinoma or endometrial atypical hyperplasia // Gynecology and Obstetrics Clinical Medicine. — 2022. — V. 2(4). — P. 186–190. URL: https://doi.org/10.1016/j.gocm.2022.10.005.
9. Коган Е.А., Станоевич И.В., Кудрина ЕА., Ищенко А.И. Морфологические и иммуногистохимические параллели при гиперплазиях эндометрия // Архив патологии. — 2007. — V. 6. — С. 21–24. URL: http://elib.fesmu.ru/Article.aspx?id=175426.
10. Giannella L., Carpini G.D., Sopracordevole F. Atypical endometrial hyperplasia and unexpected cancers at final histology: a study on endometrial sampling methods and risk factors // Diagnostics (Basel). — 2020. — V. 10(7). — P. 474. URL: https://doi.org/10.3390/diagnostics10070474.
11. Ерофеева Л.Г., Сидоркина А.Г., Новопашина Г.Н., Ерофеев Б.Б. Современное представление о проблеме гиперплазии эндометрия // Научное обозрение. Медицинские науки. — 2022. — № 6. — С. 82–88. URL: https://science-medicine.ru/ru/article/view?id=1308.
12. Кондриков Н.И., Баринова И.В. Патология матки. Руководство для врачей. — М.: Практическая медицина, 2019. — 352 с.
13. Auclair M.H., Yong P.J., Salvador S., Thurston J. et al. Guideline N390 — Classification and treatment of endometrial hyperplasia // Journal of Obstetrics and Gynecology of Canada. — 2019. — V. 41(12). — P. 1789–1800. URL: https://doi.org/10.1016/j.jogc.2019.03.025.

14. Pivano A., Crocet P., Carcopino K., Cravello L. et al. The risk of concomitant end ometrialcarcinoma in atypical end ometrial hyperplasia diagnosed with total hysteroscopic resection // Eur J Obst Gynecol Reprod Biol. — 2016. — V. 203. P. — 210–213. URL: https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2016.05.04962.
15. Пашов А.И., Цхай В.Б., Сивова Е.Н. Первый опыт органосохраняющего лечения женщин репродуктивного возраста с начальными формами рака эндометрия // Мать и Дитя в Кузбассе. — 2010. — № 1. — С. 132–134. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poisk-vozmozhnostey-provedeniya-organosohranyayuschih-meropriyatiy-v-lechenii-nachalnogo-raka-endometriya.
16. Черняков А.А. Чернышова А.Л., Коломиец Л.А., Трущук Ю.М. и др. Рак эндометрия и беременность // Акушерство и гинекология. — 2023. — № 12. С. 40–46. URL: https://dx.doi.org/10.18565/aig.2023.178
17. Afaneh H., Moustafa A.S., Leiva S., Youssef Y. et al. Conservative treatment of endometrial carcinoma and precancerous lesions before IVF: a series of cases // Obstet. Gynaecol. Cases Rev. — 2020. — V. 7. — P. 167. URL: https://www.clinmedjournals.org/articles/ogcr/obstetrics-and-gynaecology-cases-reviews-ogcr-7-167.php?jid=ogcr.
18. Huiling A., Tongjie L., Huang K., Shi H. et al. Pregnancy outcomes in infertile patients with endometrial hyperplasia with or without atypia who underwent in vitro fertilization: the early follicular long protocol surpasses the midluteal long protocol // Frontiers of Endocrinology. — 2024. — V. 15. URL: https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1314432.
19. Belladelli F., Montorsi F., Martini A. Metabolic syndrome, obesity, and cancer risk // Curr. Opin. Urol. — 2022. — V. 32(6). — P. 594–597. URL: https://dx.doi.org/10.1097/MOU.0000000000001041.
20. Centini G., Colombi I., Ianes I., Perelli F. et al. Fertility preservation in endometrial cancer: where are we now? // Cancers. — 2025. — V. 17(1). — P. 112. URL: https://colab.ws/articles/10.3390/cancers17010112.
21. Woodruff T.K. Oncofertility: close collaboration between reproductive medicine and oncology // Reproduction. — 2015. — V. 150. — P. 1–10. URL: https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/oncofertility-a-grand-collaboration-between-reproductive-medicine.
22. Anderson R.A., Amant F., Braat D., D'Angelo A. et al. ESHRE's Guide: Preserving Female Fertility // Hum Reprod Open. — 2020. — V. 4. URL: https://doi.org/10.1093/hropen/hoaa052.
23. Chao A.S., Chao A., Wang C.J. Obstetric outcomes of pregnancy after conservative treatment of endometrial cancer: case series and literature review // Taiwan J Obstet Gynecol. — 2011. — V. 50(1). — P. 62–66. URL: https://doi.org/10.1016/j.tjog.2009.10.006.
24. Балтер Р.Б., Целкович Л.С., Иванова Т.В., Ильченко О.А. Особенности изменения экспрессии гормональных рецепторов на фоне проводимой терапии у женщин репродуктивного возраста с гиперпластическими процессами в эндометрии // Российский вестник акушера-гинеколога. — 2025. — Т. 1 (2). — С. 21–28.
25. Котельникова Н.А., Балтер Р.Б., Целкович Л.С., Иванова Т.В. и др. Факторы риска развития гиперпластических процессов в репродуктивном возрасте. Особенности клинической картины заболевания // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки» — 2025. — № 1. — С. 207–214. URL: https://doi.org/10.37882/2223-2966.2025.01.22.

© Подгорняя Милла Сергеевна (samaraobsgyn2@yandex.ru); Балтер Регина Борисовна (regina.balter@yandex.ru);
Иванова Татьяна Владимировна (t.v.ivanova@samsmu.ru); Целкович Людмила Савельевна (samaraobsgyn2@yandex.ru);
Ильченко Олеся Андреевна (olesay.ilchenko@gmail.com); Богдасаров Азат Юрьевич (azat-01@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.38

ИЗУЧЕНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННЫХ И ОТДАЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЕРАЦИИ ГЕЛЛЕРА–ГОТТШТЕЙНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПОСОБА ПО ВЫПРЯМЛЕНИЮ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ ПИЩЕВОДА У ПАЦИЕНТОВ С АХАЛАЗИЕЙ КАРДИИ IV СТАДИИ

STUDY OF IMMEDIATE AND REMOTE RESULTS OF THE GELLER-GOTTSTEIN OPERATION USING THE METHOD OF STRAIGHTENING THE VERTICAL AXIS OF THE ESOPHAGUS IN PATIENTS WITH STAGE IV ACHALASIA OF THE CARDIA

R. Sulimanov
R. Sulimanov
E. Shestakova
E. Rumyantsev
S. Suzdaltsev

Summary. This article discusses the problem of improving the quality of life of patients with stage IV achalasia of the cardia. The incidence of patients with stage IV achalasia of the cardia at primary detection reaches 5–15 %. The aim of the study is to evaluate the immediate and remote results of the Heller-Gottstein operation supplemented by the method of straightening the vertical axis of the esophagus in patients with stage IV achalasia of the cardia. To assess the quality of life of patients, complaints of patients with an established diagnosis of stage IV achalasia of the cardia were assessed at 10 (8–12) points according to Eckardt. The esophagus was dilated to 9 (11–12) cm, all patients had its S-shaped bend. Patients rated their overall quality of life at 84 (74–99) points according to GIQLI. The developed original method of straightening the longitudinal axis of the esophagus in addition to the Heller-Gottstein operation demonstrates its effectiveness: the assessment of the severity of symptoms of achalasia of the cardia decreased by 8 points according to Eckardt (from 10 to 2), the width of the esophagus decreased by 6 cm (from 9 to 3), the S-shaped bend was eliminated in 19 patients out of 20, the assessment of the quality of life according to GIQLI increased by 49 points (from 84 to 133).

Keywords: achalasia of the cardia, esophagocardiomyotomy, quality of life.

Сулиманов Рушан Абдулхакович
Доктор медицинских наук, профессор,
Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого
sulimanov@mail.ru
Сулиманов Рамиль Рушанович
Доцент, Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого
sulimanov@mail.ru
Шестакова Елена Юрьевна
Аспирант, Новгородский государственный
университет имени Ярослава Мудрого
Elr_hv@mail.ru
Румянцев Егор Евгеньевич
Старший преподаватель,
Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого
egor.rumyantsev@novsu.ru
Суздальцев Сергей Евгеньевич
Старший преподаватель,
Новгородский государственный университет
имени Ярослава Мудрого
Suzdal26@inbox.ru

Аннотация. В настоящей статье обсуждается проблема улучшения качества жизни пациентов с ахалазией кардии IV стадии. Частота встречаемости пациентов с ахалазией кардии IV стадии, при первичном выявлении достигает 5–15 %. Целью исследования является оценка непосредственных и отдаленных результатов операции Геллера — Готтштейна дополненной способом выпрямления вертикальной оси пищевода у пациентов с ахалазией кардии IV стадии. Для оценки качества жизни пациентов жалобы пациентов с установленным диагнозом ахалазии кардии IV стадии оценивались в 10 (8–12) баллов по Eckardt. Пищевод был расширен до 9 (11–12) см, у всех пациентов обнаруживался его S-образный изгиб. Пациенты оценивали своё общее качество жизни в 84 (74–99) баллов по GIQLI. Разработанный оригинальный способ выпрямления продольной оси пищевода в дополнение к операции Геллера-Готтштейна демострирует эффективность: оценка выраженности симптомов ахалазии кардии уменьшилась на 8 баллов по Eckardt (с 10 до 2), ширина пищевода сократилась на 6 см (с 9 до 3), S-образный изгиб был устранён у 19 пациентов из 20, оценка качества жизни по GIQLI увеличилась на 49 баллов (с 84 до 133).

Ключевые слова: ахалазия кардии, эзофагокардиомиотомия, качество жизни.

Введение

Ахалазия кардии (АК) — первичное нарушение моторики пищевода; её этиология обусловлена дегенерацией ауэрбаховского сплетения, что приводит к нарушению расслабления нижнего пищеводного сфинктера (НПС) и отсутствию нормальной перистальтики пищевода [1].

Патогенетически выделяют три типа АК: тип I — классический, при котором в теле пищевода наблюдается минимальная сократительная способность; тип II — с компрессией, при котором перистальтика отсутствует, но имеются перемежающиеся периоды повышенного давления в различных отделах пищевода; тип III — со спазмом, при котором характерны полностью сглаживающие спастические сокращения в дистальной части пищевода [2]. Для пациентов с I типом характерно развитие обширной дилятации пищевода, что соответствует рентгенологической картине при III–IV стадии по Петровскому [3]. Хотя существует точка зрения, что тип I — это конечный вид типа II, развившийся на фоне длительного блока и также характеризующийся и отсутствием сокращений в продольной мускулатуре пищевода [2,4–6], в IV стадии (последней) они принципиально друг от друга не отличаются. При развитии IV стадии при всех трех клинических типах присоединяется фиброз стенки пищевода, и рентгеноскопия с контрастом показывает «S-образный», «сигмовидный» изгиб [7–9].

Несмотря на современные достижения в диагностике и лечении пациентов с ахалазией кардии, доля последней, IV стадии, при первичном выявлении достигает 5–15 %. Основные причины этого — позднее обращение и неэффективность консервативных методов лечения [10–12].

Основными симптомами ахалазии кардии являются дисфагия, регургитация съеденной пищи из пищевода при перемене положения тела, боль за грудиной, связанная с растяжением стенки пищевода, а также потеря массы тела в связи с потерей пищи при регургитации, а также с тем, что пациенты отказываются от пищи при появлении симптомов [13]. Для оценки стадии АК широко применяется шкала Eckardt от 0 до 12 баллов, согласно которой IV стадия обычно сопровождается оценкой больше 6 [14,15]. Наличие выраженных симптомов при IV стадии АК обуславливает значительное снижение качества жизни, для пациентов с заболеваниями желудочно-кишечного тракта, традиционно оцениваемого согласно шкале GIQLI [16–18].

Несмотря на то, что «золотым стандартом» инструментальной диагностики ахалазии кардии является манометрия высокого разрешения, но, если клиника, рентгеноскопия с контрастированием и эндоскопическая картина не вызывают сомнения, тем более для больных с ахалазией IV стадии, обязательность подтверждения с помощью манометрии подвергается сомнению некоторыми исследователями [6,19,20]. Таким образом, диагноз АК IV стадии может устанавливаться на основании обнаружения значительно (до 8–10 см и более) и S-образно изогнутого пищевода

Лечение

Все авторы единодушны в том, что принцип «малой хирургии» в виде баллонной дилатации [21] пероральной эзофагокардиомиотомии (ПОЭМ) [22, 23] не способствует достижению положительного результата в лечении ахалазии кардии IV стадии [24].

Подавляющее число специалистов придерживаются мнения, что при IV стадии АК необходима экстирпация пищевода как нефункционирующего органа, с различными модификациями эзофагопластики. Кроме того, во внимание следует принимать возможное возникновение рака пищевода [19, 25]. Следует отметить, что мнение авторов про малигнизацию не коррелирует с фактическими данными о возникновении рака пищевода: так, по современным данным, плоскоклеточнывй рак пищевода обнаруживается в среднем спустя 10–15 лет после диагноза ахалазии кардии (20–25 лет после появления первых симптомов) [26]. Более того, одним из главных факторов в патогенезе малигнизации рассматриваются последствия постоянно задерживающейся в расширенном пищеводе пищи с бактериальной колонизацией, вызывающие раздражение эпителия — тогда как при успешном оперативном лечении АК достигается стабильное опорожнение пищевода. При обнаруженном и морфологически подтверждённом злокачественном перерождении эпителия слизистой пищевода — экстирпация пищевода, несомненно, является методикой выбора при оперативном лечении АК [19].

В то же время, специалистами многих учреждений указывается эффективность органосохраняющих операций при АК IV стадии [24]. Важными доводами здесь могут служить несколько наблюдений. Во-первых, ширина пищевода после устранения его постоянного переполнения в последующих наблюдениях уменьшается [27, 28], что показывает потенциал частичного восстановления структуры стенки. Во-вторых, исследователями рассматривается воспалительный патогенез развития АК [29], что может означать прогрессирование под воздействием хронического раздражения стенки пищевода при его переполнении — и возможное устранение этого фактора при восстановлении опорожнения пищевода.

Общепринятым органосохраняющим методом оперативного лечения АК является эзофагокардиомиотомия по Геллеру, во многих исследованиях отмечаются

удовлетворительные результаты даже при IV (последней) стадии. При значительном облегчении симптомов и улучшении качества жизни пациентов, отмечается сохранение дисфагии, регургитации пищи. Сохранение симптомов АК у пациентов после проведения эзофагокардиомиотомии связывают с повторным стенозом кардиоэзофагеального перехода, а также, у пациентов с IV стадией АК, с сохранением S-образного изгиба пищевода, при котором мешковидное расширение правой стенки в нижней трети оказывается ниже входа в желудок, что препятствует дальнейшему продвижению [15, 30].

Ещё одним негативным последствием эзофагокардиомиотомии многие авторы называют заброс желудочного содержимого в пищевод, способный вызвать рефлюкс-эзофагит [22, 25]. В качестве противорефлюксных мероприятий используют фундопликацию в различных модификациях [24]. В то же время, симптомы гастроэзофагеального рефлюкса наблюдаются не у всех пациентов, могут купироваться консервативными, а среднее значение показателей качества жизни после эзофагокардиомиотомии значительно возрастает методами [21]. Что касается воздействия на слизистую пищевода, вероятность возникновения пищевода Барретта, сопровождающегося риском аденокарциномы после оперативного лечения АК с возникновением гастроэзофагеального рефлюкса — также добавляет лишь по 1 % за каждый год наблюдения [26].

На основании многолетних наблюдений мы склонны считать, что при АК IV стадии эзофагокардиомиотомия Геллера—Готтштейна с применением разработанного нами способа по выпрямлению вертикальной оси пищевода способствует достижению удовлетворительных результатов лечения.

Цель настоящего исследования — Оценка непосредственных и отдаленных результатов операции Геллера—Готтштейна дополненной способом выпрямления вертикальной оси пищевода у пациентов с ахалазией кардии IV стадии.

Задачи исследования:

1. Провести анализ выраженности клинических симптомов, показателей инструментальных методов обследования и качества жизни у пациентов с ахалазией кардии IV стадии.
2. Разработать и внедрить способ выпрямления продольной оси пищевода при выполнении операции Геллера—Готтштейна у пациентов с ахалазией кардии IV стадии.
3. Провести анализ результатов интраоперационных осложнений, раннего и отдаленного послеоперационного периода у пациентов с ахалазией кардии IV стадии, перенесших операцию Геллера—Готтштейна с использованием способа по выпрямлению вертикальной оси.
4. Провести сравнительный анализ с оценкой клинических, инструментальных данных и оценки качества жизни у пациентов с ахалазией кардии IV стадии до и после операции Геллера—Готтштейна с использованием способа по выпрямлению вертикальной оси пищевода в отдаленном периоде.

Материалы и методы

Данное исследование основано на ретроспективном изучении результатов оперативного лечения 28 пациентов с IV стадией ахалазии кардии на базе отделении торакальной хирургии ГОБУЗ «Новгородская областная клиническая больница» в период 2008–2022 гг. Обработка и анализ полученных данных проводились на базе кафедры госпитальной хирургии ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».

Критерии включения. Пол — женский и мужской, возраст — 20–77 лет, диагноз «ахалазия кардии IV стадии», подтвержден клинически, 2 этапа наблюдения (ранний послеоперационный период и 24 месяца после операции), легкие сопутствующие патологии, добровольное письменное согласие на участие в исследовании.

Критерии исключения. Персональный отказ пациента от исследования, нарушения протокола лечения и/или исследования, тяжелые сопутствующие болезни, ахалазия кардии I, II, III стадий.

Средний возраст пациентов составил 46 (41–52) лет. Половой состав исследуемой группы: 13 мужчин (46,4 %), 15 женщин (53,6 %).

Длительность заболевания составила 3,7 (1,9–7,3) лет.

Пациентам выполнялась операция Геллера—Готтштейна (внеслизистой эзофагокардиомиотомии с пластикой пищевода передней стенкой желудка) с использованием запатентованного способа выпрямления вертикальной оси пищевода [28,31].

Хирургические вмешательства отличались следующими особенностями по сравнению с методикой Геллера—Готтштейна: разрез стенки пищевода выполнялся по левой стенке, рассечение мышечной стенки пищевода продлевалось в сторону желудка до общей длины примерно 11–13 см, разрез кардиального отдела желудка составил 2–3 см, угол Гиса при поперечном сшивании — острый. Это расширяет суженный отдел и препятствует рефлюксу. Затем на мышечную оболочку правой стенки искривленного пищевода накладывалось 3 ряда гофрирующих параллельных швов на расстоянии 0,4–0,8 см с длиной стежков 0,5–0,6 см. Проведение затягивания наложенных швов, а затем их завязывания при-

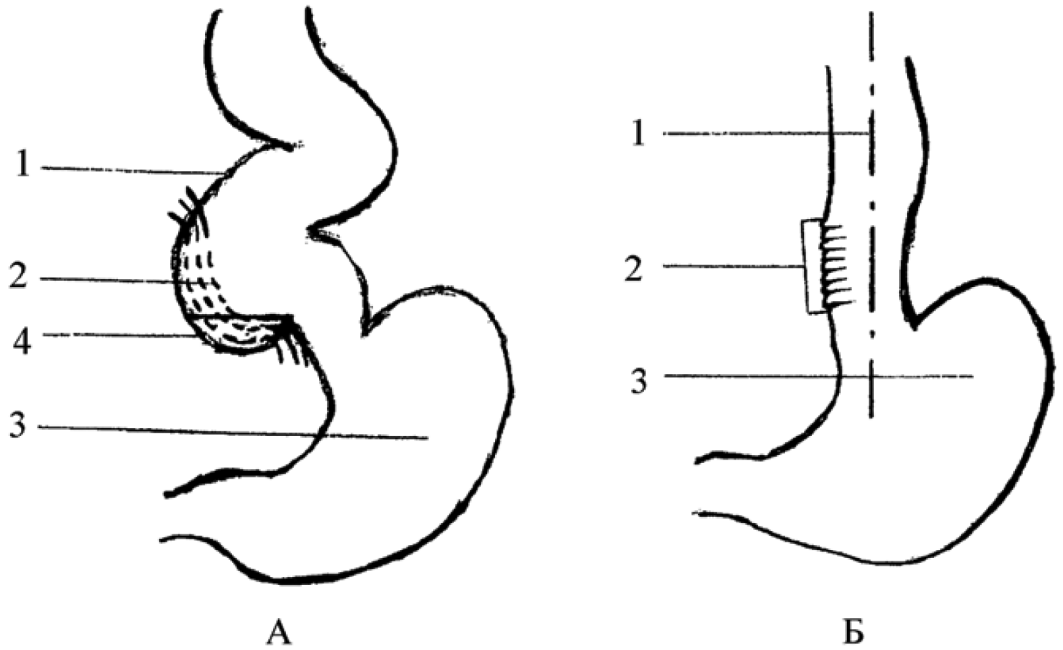


Рис. 1. Схема наложения гофрирующих швов на растянутую правую стенку S-образно искривленного пищевода. А — пищевод с наложенными гофрирующими швами до затягивания, где: 1 — S-образно искривленный пищевод, 2 — ряды незатянутых гофрирующих швов, 3 — желудок, 4 — пища, задерживающаяся в просвете пищевода. Б — пищевод после затягивания гофрирующих швов, где: 1 — вид пищевода после операции, 2 — затянутые гофрирующие швы, 3 — желудок

водит к гофрированию стенки пищевода, выпрямлению его вертикальной оси, и устранению его изгиба (рис. 1).

Перед оперативным вмешательством всем пациентам выполнена коррекция нарушенного алиментарного состояния.

Период наблюдения — послеоперационный период до 5 дней и контрольное обследование спустя 24 месяца после операции. В раннем послеоперационном периоде оценивалась эффективность оперативного вмешательства (клинические симптомы, рентгеноскопия с контрастом), частота ранних послеоперационных осложнений, интраоперационная и постоперационная летальность. Кроме того, до операции и при контрольном обследовании спустя 24 месяца пациентам было предложено оценить степень выраженности симптомов ахалазии кардии согласно шкале Eckardt (табл. 1) от 0 до 12 баллов [19, 32] и общее качество жизни согласно опроснику GIQLI от 0 до 144 баллов [16]. Инструментальные методы обследования включали рентгеносокопию с контрастом и фиброэзофагогастродуоденоскопию. Успешным хирургическим лечением ахалазии кардии считается достижение оценки до 3 баллов по Eckardt и более 120 по GIQLI [15,17]. Наблюдение за пациентами в дальнейшем продолжалось, максимальный срок составил 21 год.

В контрольной точке спустя 24 месяца контрольное обследование прошли 20 человек, что составило 71,4 % от числа прооперированных.

Таблица 1.

Шкала Eckardt

Симптомы	Баллы			
	0	1	2	3
Дисфагия	Никогда	Периодически (1–2 раза в неделю)	Каждый день	Каждый прием пищи
Регургитация	Никогда	Периодически (1–2 раза в неделю)	Каждый день	Каждый прием пищи
Боли в груди	Никогда	Периодически (1–2 раза в неделю)	Каждый день	Каждый прием пищи
Уменьшение массы тела, кг	Нет	<5	5–10	>10

Статистическая обработка производилась с использованием программных пакетов Microsoft Office 2016, IBM SPSS Statistics 26. Данные представлены в виде «медиана (межквартильный размах)». Для сравнения количественных показателей между группами использовался U критерий Манна-Уитни. Для сравнения частоты встречаемости качественных признаков использовался критерий Хи квадрат Фишера. При проверке статистических гипотез о равенстве или различии групп за величину уровня статистической значимости принято значение 0,05.

Результаты

До операции.

До операции пациенты предъявляли жалобы на потерю массы тела, постоянно возникающие дисфагию, боль за грудиной, и регургитацию пищи. Также, отмечалась парадоксальная дисфагия: проглатывание жидкой пищи вызывало больше затруднения, чем твёрдой. Жалоб на изжогу зарегистрировано не было.

Средняя оценка пациентами клинических симптомов по шкале Eckardt до операции составила 10 (8–12) баллов (табл. 2).

Таблица 2.

Оценка выраженности клинических симптомов по Eckardt до операции

Симптом	До операции
Снижение массы тела	2 (2–3)
Дисфагия	3 (2–3)
Загрудинная боль	3 (2–3)
Регургитация	3 (2–3)
Сумма по Eckardt	10 (8–12)

Рентгеноскопическая картина с использованием водного раствора сульфата бария в качестве контраста соответствовала ахалазии кардии IV стадии по классификации Б.В. Петровского [3]. Отмечалось резкое супрастенотическое расширение пищевода (11 (9–12) см, максимальное наблюдение 14 см) с наличием большого количества жидкости и S-образной деформации. Пищевод атоничен. Кардия была резко сужена. Контрастное вещество задерживалось до 2 суток и более.

Эндоскопические признаки у всех пациентов также соответствовали наблюдаемым при ахалазии кардии IV стадии [33]. Эндоскопическое исследование всем больным производилось натощак. Просвет пищевода был расширен на 6–10 см., он содержал большое количество непереваренной пищи и слизи. Слизистая рыхлая и утолщена с наличием поперечной складчатостью, пищевод искривлен сигмовидно. Кардиальный сфинктер смыкался неплотно и был смещен в сторону, на слизистой обнаруживались рубцовые изменения.

Общая оценка качества жизни пациентов по шкале GIQLI составила 84 (74–99) баллов.

Операция.

Длительность операции составила в среднем 82 (69–97) минут, объем кровотечения 63 (54-70) мл. Летальных исходов не было. Интраоперационные осложнения: микроперфорация слизистой оболочки пищевода размерами 2х1 мм произошла у 1 пациента (3,6 %) и была зашита узловым швом, материалом Викрил 4/0.

Ранний послеоперационный период.

Уже в раннем послеоперационном периоде все пациенты отмечали отсутствие постоянной дисфагии (до операции возникавшей при каждом приёме пищи).

Оценка выраженности симптомов ахалазии кардии по Eckardt и качества жизни по GIQLI в раннем послеоперационном периоде не проводилась, т.к. требуется оценить состояние за несколько последних месяцев, а также в связи с тем, что оценка боли за грудиной в связи с переполнением пищевода затруднена из-за возможной боли в области операционного поля.

Спустя 5 дней после операции, выраженность отдельных симптомов, в балльной оценке по Eckardt, значительно уменьшилась: дисфагия с 2 (2–3) до 1 (1–2) баллов (Манна-Уитни U=60,0 p=0,000), регургитация с 3 (2–3) до 1 (0,75–2) баллов (Манна-Уитни U=98,0 p=0,000).

После операции у 6 пациентов (21,4 %) появились жалобы на изжогу.

Ширина пищевода по результатам Rg-скопии с контрастом спустя 5 дней после операции: медиана уменьшилась на 2 см (18,2 %) и достигла 9 (8–11 см) (Манна-Уитни U=611,5 p=0,000).

S-образный изгиб пищевода продолжал наблюдаться только у 6 пациентов (21,4 %), по сравнению со 100 % пациентов до операции (Хи-квадрат=36,235 p=0,000).

Спустя 24 месяца после операции.

При контрольном обследовании спустя 24 месяца пациенты предъявляли жалобы на редко (примерно раз в неделю) возникающие дисфагию — 10 (50 %), загрудинную боль — 12 (60 %), регургитацию 4 (20,0 %). Масса тела у всех пациентов вернулась к конституциональной норме. Жалобы на изжогу предъявляли 6 (30,0 %) пациентов.

Рентгеноскопически S-образный изгиб пищевода сохранялся у 1 (5 %) пациентов, по сравнению со 100 % встречаемостью до операции (Хи-квадрат=44,028 p=0,000). Ширина пищевода в среднем составила 3 (2–3) см, максимальное наблюдение 5 см, что на 8 см (72,7 %) меньше по сравнению со значениями до операции (Манна-Уитни U=550,5 p=0,000). Контраст свободно проходил через кардиальный отдел у всех пациентов.

У 3 пациентов (15 %) наблюдались эндоскопические признаки рефлюкс-эзофагита: гиперемия слизистой, не-

большие эрозии над кардиальным сфинктером, занимающие не более 10 % окружности, что соответствует I стадии по Savary-Miller [34].

Медианное значение суммы по шкале Eckardt (табл. 3) спустя 24 месяца составило 2 (0–2,25), что на 8 баллов (80 %) меньше по сравнению со значением до операции (Манна-Уитни U=549,0 p=0,000).

Таблица 3.

Оценка выраженности клинических симптомов по Eckardt спустя 24 месяца после операции

Симптом	24 мес. после операции
Снижение массы тела	0 (0–0)
Дисфагия	1 (0–1)
Загрудинная боль	0 (0–0)
Регургитация	1 (0–1)
Сумма по Eckardt	2 (0–2,25)

Оценка по шкале GIQLI после операции составила 133 (118,75–138,5) баллов, что на 49 баллов (58,3 %) выше по сравнению со значением до операции (Манна-Уитни U=11,0 p=0,000).

Обсуждение

Пациенты с ахалазией кардии IV стадии предъявляли жалобы на значительное снижение массы тела (более 5–10 килограммов), дисфагию, боль за грудиной и регургитацию пищи при переполнении пищевода, возникающие при каждом приёме пищи. Суммарная оценка симптомов по Eckardt составляла 10 (8–12) баллов. Методы лучевой диагностики (рентгеноскопия органов груди с контрастированием пищевода, рентгенография, МСКТ) демонстрировали расширение пищевода с медианой 11 см, у всех пациентов наблюдался S-образный изгиб, что соответствует IV стадии ахалазии кардии. В зарубежных источниках последняя стадия ахалазии кардии описывается как приобретение пищеводом сигмовидного изгиба, без уточнения насколько пищевод расширен [7,8].

Оценка общего качества жизни у таких пациентов была значительно снижена: согласно опроснику GIQLI, медиана составляла 84 (74–99) баллов, что соответствует наблюдениям других исследователей [35,36].

Во многих странах при последней стадии ахалазии кардии рекомендуется проводить эзофагэктомию с эзофагопластикой, однако окончательный выбор остаётся за лечащим врачом, и в последние годы появились результаты исследований, показывающие эффективность органосохраняющих операций [15,37].

Наложение гофрирующих швов на правую стенку пищевода одновременно с проведением подслизистой эзофагокардиомиотомии (запатентованный нами способ [31]) позволяет выпрямлять вертикальную ось пищевода, устраняя его S-образный изгиб (у 19 из 20–95 % пациентов). Что привело к улучшению эвакуации содержимого пищевода в желудок, а это, в свою очередь, способствовало сокращению ширины пищевода на 8 см (72,7 %). Важность выпрямления вертикальной оси и устранения мешкообразного расширения пищевода в нижней трети подчёркивают в своих работах Nezi, Mittal и соавт., также придерживающиеся тактики органосохраняющего хирургического лечения при последней стадии ахалазии кардии [30,38].

Пациенты хорошо переносили оперативное вмешательство. Интраоперационные осложнения встречались редко (3,6 %) и были обнаружены и устранены в ходе операции. Интраоперационная летальность составила 0 %.

Оценка встречаемости жалоб по балльной шкале Eckardt в раннем послеоперационном периоде составила: на дисфагию 1 (1–2) балла, на регургитацию пищи 1 (0,75–2). Ширина пищевода составляла 9 (8–11) см, S-образный изгиб присутствовал у 6 пациентов (21,4 %). Спустя 24 месяца после операции оценка пациентами симптомов по шкале Eckardt составляла 2 (0–2,25) балла, ширина пищевода — 3 (2–3) см, S-образный изгиб пищевода сохранялся только у 1 пациента (5 %). Оценка общего качества жизни по GIQLI составляла 133 (118,75–138,5) баллов, что сопоставимо с результатами исследований в других клиниках [15,35,36].

По сравнению с состоянием до операции, в раннем послеоперационном периоде у пациентов значительно уменьшалась встречаемость жалоб на дисфагию и регургитацию пищи: спустя всего 5 дней после операции данные жалобы на дисфагию полностью прекращались у 10,7 % пациентов, на регургитацию пищи — у 25 %. У пациентов с наличием жалоб частота встречаемости их снизилась от каждого приёма пищи до 1–2 раз в неделю. Ширина пищевода при рентгеноскопии с контрастом спустя 5 дней после операции уменьшилась на 18,2 %, встречаемость S-образного изгиба пищевода уменьшилась на 78,6 %. Следует отметить, что у 21,4 % пациентов после операции появились жалобы на изжогу, что в известной мере встречается практически у всех авторов после выполнения эзофагокардиомиотомии с различными модификациями создания фундопликации [39, 40]. Спустя 24 месяца после операции суммарная субъективная оценка выраженности симптомов по Eckardt уменьшилась на 80 %. Ширина пищевода сократилась на 72,7 %, встречаемость S-образного изгиба пищевода уменьшилась на 95 %. Данные результаты, мы склонны объяснить автономностью иннервации мышечной

оболочки пищевода [41] и это подтверждается нашими интраоперационными наблюдениями. Во-первых, при касании мышечной стенки пищевода инструментом со слабым электрическим зарядом, наблюдается сокращение мышечных волокон, что показывает наличие иннервируемых гладкомышечных клеток, даже при АК IV стадии. Во-вторых, при исследовании биопсийного материала из стенки нижней трети пищевода пациентов с АК IV стадии, нами обнаружены волокна Ауэрбахова сплетения, пусть и с уменьшенной объемной плотностью. Мы считаем эти факты, в дополнение к полученным результатам, важными свидетельствами за сохранение собственного пищевода пациента, даже при оперативном лечении ахалазии кардии в последней стадии, при наличии мегаэзофагуса и S-образного изгиба.

Следует отметить, что спустя 24 месяца и более, 30 % пациентов предъявляли жалобы на изжогу, в то же время лишь у 15 % наблюдались эндоскопические признаки рефлюкс-эзофагита. У пациентов при сохранении симптомов ахалазии кардии I–II стадии, и у тех, кто жаловался на изжогу, были достигнуты удовлетворительные результаты при назначении консервативного лечения. Следует подчеркнуть, что за всё время наблюдений за этой группой пациентов, не было выявлено ни одного случая формирования пищевода Барретта. Что важно, показаний для повторного хирургического вмешательства, будь то эзофагокардиомиотомия, баллонная дилатация или экстирпация пищевода, за 21 год наблюдений не отмечено ни у одного пациента. К данному выводу мы пришли, исходя из отсутствия обращений за хирургической помощью в отделение торакальной хирургии ГОБУЗ «НОКБ», единственном в области, занимающимся хирургией пищевода. В отличие от [21, 25] за все время наших наблюдений за пациентами с ахалазией кардии (с 1982 года), не выявлено клинического наблюдения рака пищевода.

Общее качество жизни пациентов, оцененное по шкале GIQLI, спустя 24 месяца после операции увеличилось на 58,3 %, что соответствует данным, полученным в других центрах [16–18,24].

Полученные результаты позволяют нам перейти к следующим выводам.

Выводы

1. До операции жалобы пациентов с установленным диагнозом ахалазии кардии IV стадии оценивались в 10 (8–12) баллов по Eckardt. Пищевод был расширен до 9 (11–12) см, у всех пациентов обнаруживался его S-образный изгиб. Пациенты оценивали своё общее качество жизни в 84 (74–99) баллов по GIQLI.
2. Для лечения пациентов с ахалазией кардии IV стадии в дополнение к операции Геллера-Готтштейна был разработан и внедрен способ выпрямления продольной оси пищевода, суть которого заключалась в наложении на мышечную оболочку S-образно изогнутой правой стенки пищевода 3 рядов гофрирующих параллельных швов на расстоянии 0,4–0,8 см с длиной стежков 0,5–0,6 см, до устранения искривления.
3. Во время операции перфорация слизистой пищевода отмечена у 1 пациента (3,6 %). Летальность — 0 %. Спустя 5 суток после операции оценка жалоб пациентов по Eckardt: на дисфагию — 1 (1–2) баллов, на регургитацию пищи — 1 (0,75–2) баллов. 6 пациентов начали предъявлять жалобы на изжогу. Ширина пищевода составляла 9 (8–11 см), S-образный изгиб сохранялся у 6 пациентов. Спустя 24 месяца после операции: суммарная оценка жалоб по Eckardt составила 2 (0–2,25) баллов, ширина пищевода 3 (2–3) см, S-образный изгиб сохранялся только у 1 пациента, оценка качества жизни по GIQLI — 133 (118,75–138,5) баллов.
4. По сравнению с дооперационным периодом, спустя 24 месяца после операции: оценка выраженности симптомов ахалазии кардии уменьшилась на 8 баллов по Eckardt (с 10 до 2), ширина пищевода сократилась на 6 см (с 9 до 3), S-образный изгиб был устранён у 19 пациентов из 20, оценка качества жизни по GIQLI увеличилась на 49 баллов (с 84 до 133).

ЛИТЕРАТУРА

1. Boeckxstaens G.E., Zaninotto G., Richter J.E. Achalasia //The Lancet. — 2014. — Т. 383. — №. 9911. — С. 83–93, Sato H. et al. Esophageal motility disorders: new perspectives from high-resolution manometry and histopathology //Journal of gastroenterology. — 2018. — Т. 53. — №. 4. — С. 484–493.
2. Bredenoord A.J. Chicago classification criteria of esophageal motility disorders defined in high resolution esophageal pressure topography //Neurogastroenterol Motil. — 2012. — Т. 24. — С. 1: 57–65.
3. Петровский Б.В. Кардиоспазм и его хирургическое лечение//Труды 27-го Всесоюзного съезда хирургов. — М.1962.
4. Pandolfino J.E. et al. Achalasia: a new clinically relevant classification by high-resolution manometry //Gastroenterology. — 2008. — Т. 135. — №. 5. — С. 1526–1533.
5. Rohof W.O. et al. Outcomes of treatment for achalasia depend on manometric subtype //Gastroenterology. — 2013. — Т. 144. — №. 4. — С. 718–725.
6. Vaezi M.F., Pandolfino J.E., Vela M.F. ACG clinical guideline: diagnosis and management of achalasia //Official journal of the American College of Gastroenterology| ACG. — 2013. — Т. 108. — №. 8. — С. 1238–1249.
7. Duranceau A. et al. End-stage achalasia //Diseases of the Esophagus. — 2012. — Т. 25. — №. 4. — С. 319–330
8. Aiolfi A. et al. Esophagectomy for end-stage achalasia: systematic review and meta-analysis //World journal of surgery. — 2018. — Т. 42. — №. 5. — С. 1469–1476

9. Sato H. et al. Development of dilated esophagus, sigmoid esophagus, and esophageal diverticulum in patients with achalasia: Japan Achalasia Multicenter Study //Journal of neurogastroenterology and motility. — 2022. — Т. 28. — №. 2. — С. 222.
10. Moonen A, Boeckxstaens G. Current diagnosis, and management of achalasia. J Clin Gastroenterol. 2014; 48: 484–490
11. Carlson D.A., Pandolfino J.E. Personalized approach to the management of achalasia: how we do it //Official journal of the American College of Gastroenterology| ACG. — 2020. — Т. 115. — №. 10. — С. 1556–1561
12. Boeckxstaens G.E., Bredenoord A.J. Achalasia //The Esophagus. — 2021. — С. 247–264
13. Savarino E. et al. Achalasia //Nature Reviews Disease Primers. — 2022. — Т. 8. — №. 1. — С. 28
14. Laurino-Neto R.M. et al. Evaluation of esophageal achalasia: from symptoms to the Chicago classification //ABCD. Arquivos Brasileiros de Cirurgia Digestiva (São Paulo). — 2018. — Т. 31. — №. 02. — С. e1376
15. Salvador R. et al. Laparoscopic Heller-Dor is an effective long-term treatment for end-stage achalasia //Surgical Endoscopy. — 2023. — Т. 37. — №. 3. — С. 1742–1748
16. Decker G. et al. Gastrointestinal quality of life before and after laparoscopic Heller myotomy with partial posterior fundoplication //Annals of surgery. — 2002. — Т. 236. — №. 6. — С. 750–758
17. Цеймах Е.А. и др. Оценка качества жизни пациентов с ахалазией кардии после видеоэндоскопической кардиомиотомии по Геллеру с фундопликацией по Дору //Acta Biomedica Scientifica. — 2022. — Т. 7. — №. 2. — С. 272–281
18. Дробязгин Е.А., Чикинев Ю.В., Митько Н.И. Сравнительная оценка результатов лечения пациентов с ахалазией пищевода после малоинвазивных вмешательств. Доказательная гастроэнтерология. 2023;12(3):43–50
19. Ивашкин В.Т. и др. Рекомендации Российской гастроэнтерологической ассоциации по диагностике и лечению ахалазии кардии и кардиоспазма //Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. — 2016. — Т. 26. — №. 4. — С. 36–54
20. Stefanidis D. et al. SAGES guidelines for the surgical treatment of esophageal achalasia //Surgical endoscopy. — 2012. — Т. 26. — №. 2. — С. 296–311.
21. Costantini M., Salvador R., Costantini A. Esophageal achalasia: pros and cons of the treatment options //World journal of surgery. — 2022. — Т. 46. — №. 7. — С. 1554–1560
22. Hazrah P. Reflux after peroral endoscopic myotomy: The dilemma and the options //World Journal of Gastroenterology. — 2025. — Т. 31. — №. 6. — С. 100510
23. Costantini A. et al. Poem versus laparoscopic Heller myotomy in the treatment of esophageal achalasia: a case-control study from two high volume centers using the propensity score //Journal of Gastrointestinal Surgery. — 2020. — Т. 24. — №. 3. — С. 505–515
24. Herbella F.A.M. et al. Expert opinion on the management of esophageal achalasia from the Society for Surgery of the Alimentary Tract (SSAT) Global Outreach Committee //ANNALS OF ESOPHAGUS. — 2025. — Т. 8. — С. 1–13
25. Tran C.L. et al. Gastroesophageal reflux disease and risk of cancer: Findings from the Korean National Health Screening Cohort //Cancer Medicine. — 2023. — Т. 12. — №. 18. — С. 19163–19173
26. Torres-Aguilera M., Remes Troche J.M. Achalasia, and esophageal cancer: risks and links //Clinical and experimental gastroenterology. — 2018. — С. 309–316
27. Pachajoa D.A.P. et al. Management of end-stage achalasia with laparoscopic Heller myotomy: A case report //International journal of surgery case reports. — 2024. — Т. 125. — С. 110545
28. Сулиманов Р.А. и др. Непосредственные и отдаленные результаты хирургического лечения ахалазии кардии IV стадии в нашей модификации //Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. — 2012. — №. 66. — С. 54–57.
29. Jia X. et al. Achalasia: the current clinical dilemma and possible pathogenesis //Journal of Neurogastroenterology and Motility. — 2023. — Т. 29. — №. 2. — С. 145.
30. Nezi G. et al. The esophageal pull-down technique improves the outcome of laparoscopic Heller-Dor myotomy in end-stage achalasia //Journal of Gastrointestinal Surgery. — 2024. — Т. 28. — №. 5. — С. 651–655
31. Сулиманов Р.А. и др. Способ хирургической коррекции ахалазии кардии IV стадии. — 2013
32. Eckardt V.F., Aignherr C., Bernhard G. Predictors of outcome in patients with achalasia treated by pneumatic dilation //Gastroenterology. — 1992. — Т. 103. — №. 6. — С. 1732–1738.
33. Карпов О.Э. и др. Эндоскопические технологии в диагностике и лечении ахалазии кардии //Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н.И. Пирогова. — 2016. — Т. 11. — №. 1. — С. 30–36
34. Оскретков В.И., Григорян М.А., Андреасян А.Р. Алгоритм диагностики рецидива гастроэзофагеальной рефлюксной болезни у больных грыжей пищеводного отверстия диафрагмы после видеолапароскопического антирефлюксного вмешательства //Альманах Института хирургии им. АВ Вишневского. — 2022. — №. 1. — С. 81–81
35. Jones A.E. et al. Long-term quality of life in achalasia patients after esophagectomy: a single center experience //Foregut. — 2022. — Т. 2. — №. 3. — С. 224–232.
36. Lescinska A.M., Ivanovs I. Surgical treatment of achalasia: results and quality of life //Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. — De Gruyter Poland, 2022. — Т. 76. — №. 5-6. — С. 602–607
37. Sweet M.P. et al. The outcome of laparoscopic Heller myotomy for achalasia is not influenced by the degree of esophageal dilatation //Journal of Gastrointestinal Surgery. — 2008. — Т. 12. — №. 1. — С. 159–165.
38. Mittal S. et al. Long-term outcomes of laparoscopic Heller's myotomy with angle of His accentuation in patients of achalasia cardia //Surgical Endoscopy. — 2024. — Т. 38. — №. 2. — С. 659–670.
39. Andrási L. et al. Surgical treatment of esophageal achalasia in the era of minimally invasive surgery //JSLS: Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons. — 2021. — Т. 25. — №. 1. — С. e2020. 00099.
40. Mattioli S. et al. Long-term results of the Heller–Dor operation with intraoperative manometry for the treatment of esophageal achalasia //The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery. — 2010. — Т. 140. — №. 5. — С. 962–969
41. Fleming M.A. et al. The enteric nervous system and its emerging role as a therapeutic target //Gastroenterology research and practice. — 2020. — Т. 2020. — №. 1. — С. 8024171

© Сулиманов Рушан Абдулхакович (sulimanov@mail.ru); Сулиманов Рамиль Рушанович (sulimanov@mail.ru);
Шестакова Елена Юрьевна (Elr_hv@mail.ru); Румянцев Егор Евгеньевич (egor.rumyantsev@novsu.ru);
Суздальцев Сергей Евгеньевич (Suzdal26@inbox.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.39

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ МАГНИЯ, ОКСИПРОЛИНА И СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ НА РАЗВИТИЕ ДЕПРЕССИИ У ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМ КОРОНАРНЫМ СИНДРОМОМ

THE RELATIONSHIP BETWEEN MAGNESIUM LEVELS AND THE SEVERITY OF CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA IN PATIENTS WITH ACUTE CORONARY SYNDROME

O. Sultanova
E. Chernysheva
M. Aliyeva
D. Mutausova
M. Dzhabrailova
A. Murtazaeva
A. Batralieva

Summary. *Study Objective*: To investigate the relationship between magnesium (Mg) levels, hydroxyproline (HP) levels, the severity of undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTDS), and depressive disorders in patients with acute coronary syndrome (ACS). *Materials and Methods*: We examined 367 patients (35–65 years old), who were divided into the following groups: ACS with UCTDS (n=156), ACS without UCTDS (n=202), and a control group (n=50). All patients underwent clinical and laboratory blood tests; biochemical blood tests; assessment of mineral content (Mg, K, Ca); myocardial necrosis markers; and coagulation tests. Instrumental investigations were also performed, including: 12-lead standard ECG, Holter monitoring of heart rhythm, echocardiography, and selective coronary angiography. The diagnosis of UCTDS was based on clinical guidelines: the clinical part — a questionnaire according to Yelykomov V.A. and Kopylov A.N. (detection of 6 or more stigmata of disembryogenesis); the laboratory part — determination of the level of human antibodies to collagen types II and III by ELISA (hydroxyproline (HP)). The Zung Self-Rating Depression Scale (adapted by T.I. Balashova) [72] was used for the differential diagnosis of depressive states. Statistical analysis of the results was carried out on IBM using STATISTICA 28.0 and StatTech v.3.1.8 statistical programs. *Results*: The prevalence of UCTDS in patients with ACS was found to be 42 %. Hypomagnesemia was detected in 91 % of patients with ACS and UCTDS, which is significantly higher than in the ACS without UCTDS group (52 %). Mg levels were inversely proportional to the severity of UCTDS, especially in the ACS with UCTDS group. The prevalence of depression in patients with ACS and UCTDS was 72 %, in the group of patients with ACS — 39 %, and in the comparison group 37 %. *Conclusion*: Hypomagnesemia is a common occurrence in patients with ACS and UCTDS, and its severity is related to the severity of UCTDS. UCTDS may contribute to the earlier development of cardiovascular diseases. The study also showed that

Султанова Оксана Эседуллаевна
кандидат медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
oksanka.sultanova@mail.ru
Чернышева Елена Николаевна
доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru
Алиева Мадина Алиасхабовна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Lvhts1@mail.ru
Мутаусова Дагман Омаровна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
dmutausova@mail.ru
Джабраилова Мариетта Арифовна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
mar.dzhab@mail.ru
Муртазаева Амина Закировна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
murtazaeva580@gmail.com
Батралиева Альфира Умырзаковна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
alfira.batralieva@mail.ru

UCTDS is more common in patients with ACS (42 % versus 25 % in the general population) and is associated with earlier development of ACS (mean age 48.1 years versus 54.0 years). In patients with ACS and UCTDS, the prevalence of hypomagnesemia reaches 91 %, and Mg levels decrease with increasing severity of UCTDS. A psychological feature of patients with UCTDS and ACS is the high prevalence of depression. The data obtained indicate the importance of assessing Mg levels in patients with ACS and UCTDS for timely correction of the deficiency and improvement of prognosis. A decrease in magnesium levels can trigger the occurrence of depressive states, which worsen the prognosis and increase the number of complications in patients with ACS against the background of UCTDS.

Keywords: acute coronary syndrome, undifferentiated connective tissue dysplasia, magnesium level, structural and functional parameters of the heart, hydroxyproline, depressive disorders.

Аннотация. *Цель исследования*: изучение взаимосвязи между уровнем магния (Mg), оксипролина (OP), степенью тяжести синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) и депрессивными расстройствами (СНДСТ) у пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС). *Материалы и методы исследования*: нами были обследованы 367 пациентов (35–65 лет), которые были разделены на группы: ОКС с СНДСТ (n=156), ОКС без СНДСТ (n=202) и контрольная группа (n=50). Всем пациентам определялись клинико-лабораторные; биохимические показатели крови; содержание микроэлементов (Mg, K, Ca); маркеры некроза миокарда; коагулограмма. Проводились также инструментальные исследования: ЭКГ в 12 стандартных отведениях, холтеровское мониторирование ритма сердца, эхокардиоскопия и селективная коронароангиография. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций: клиническая часть — анкетирование по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза); лабораторная часть — проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин (OP)). Методика дифференциальной диагностики депрессивных состояний В. Зунга (адаптация Т.И. Балашовой) [72]. Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0 и StatTech v.3.1.8. *Результаты исследования*: было выявлено, что частота встречаемости СНДСТ у пациентов с ОКС составила 42 %. У пациентов с ОКС и СНДСТ гипомагниемия выявлена в 91 % случаев, что значительно выше, чем в группе ОКС без СНДСТ (52 %). Уровень Mg обратно пропорционален степени тяжести СНДСТ, особенно в группе ОКС с СНДСТ. У пациентов с ОКС и СНДСТ частота встречаемости депрессии составила 72 %, в группе пациентов с ОКС — 39 %, в группе сравнения 37 %. *Заключение*: гипомагниемия является распространенным явлением у пациентов с ОКС и СНДСТ, и ее выраженность связана со степенью тяжести СНДСТ. СНДСТ может способствовать более раннему развитию сердечно-сосудистых заболеваний. Также исследование показало, что СНДСТ чаще встречается у пациентов с ОКС (42 % против 25 % в общей популяции) и ассоциируется с более ранним развитием ОКС (средний возраст 48,1 года против 54,0 лет). У пациентов с ОКС и СНДСТ частота гипомагниемии достигает 91 %, а уровень Mg снижается с увеличением степени тяжести СНДСТ. Психологической особенностью пациентов с СНДСТ и ОКС является высокая частота развития депрессии. Полученные данные свидетельствуют о важности оценки уровня Mg у пациентов с ОКС и СНДСТ для своевременной коррекции дефицита и улучшения прогноза. Снижение уровня магния может стать триггером для возникновения депрессивных состояний, которые ухудшают прогноз и увеличивают количество осложнений у пациентов с ОКС нам фоне СНДСТ.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, недифференцированная дисплазия соединительной ткани, уровень магния, оксипролин, депрессивные расстройства.

Введение

Острый коронарный синдром (ОКС) остаётся одной из основных причин сердечно-сосудистой заболеваемости и смертности в России. Проблема глобальна, наносит существенный ущерб здоровью населения и социально-экономическому развитию Российской Федерации в целом Согласно данным Росстата за 2024 год, уровень заболеваемости ОКС составил 194 случаев на 100 000 населения, что свидетельствует о росте на 12 % по сравнению с 2023 годом. Смертность от ОКС в России в это время оценивается в 90 случаев на 100 000 населения [10].

Смертность от болезней системы кровообращения за 2024 год по данным ГБУЗ Астраханской области «Медицинский информационно-аналитический центр» составила 5414 человек, непосредственно от острого коронарного синдрома 3 человека, от инфаркта миокарда 294,28 человек от повторного инфаркта миокарда.

Не вызывает сомнений факт взаимосвязи широкой распространённости ССЗ с врожденной патологией, к которой относят синдром недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) [6; 9]. СНДСТ — это множественное расстройство соединительной ткани, при котором наблюдается повышение гибкости и подвижности суставов, а также другие системные проявления. Оценки распространённости СНДСТ варьируются от 0.5 % до 10 % среди общей популяции, при этом у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями этот показатель достигает 20–30 % [6; 12; 16]. Уровень магния, играющего ключевую роль в нейрохимических процессах, связан с состоянием депрессии [5]. Так, исследования показывают, что недостаток магния способен увеличивать уровень стресса, что, в свою очередь, может приводить к развитию депрессивных состояний [1; 2; 5: 7; 11; 12; 17; 18]. Оксипролин, являясь маркером разложения соединительных тканей, также не менее важен для понимания патогенеза НДСТ и общего состояния пациентов [3; 8].Учитывая широкую распространенность СНДСТ и ОКС, а также тот факт, что оба эти состояния приводят к гипомагниемии, отсутствие научных работ по изучению взаимосвязи между уровнем магния (Mg) и степенью тяжести дисплазии соединительной ткани послужило основой для проведения данного исследования.

Цель исследования

Изучить и провести анализ взаимосвязи между уровнем магния, степенью тяжести синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани и депрессивных расстройств у пациентов с острым коронарным синдромом.

Материалы и методы

Клинические данные проведенного исследования получены в ПСО ГКБ № 3 имени С.М. Кирова в 2019–2024 гг. Пациентами подписаны и предоставлены добровольные информированные согласия об участии в исследовании. Всего обследовано 367 пациентов в возрасте от 35 до 65 лет. Для постановки диагноза инфаркта миокарда (ИМ) и нестабильной стенокардии (НС) использовались национальные рекомендации РКО [8; 9].

В основную группу вошли 156 пациентов с ОКС на фоне НДСТ. Группу сравнения составили 202 пациента с ОКС без НДСТ. Группа контроля представлена 50 соматически здоровыми лицами. Все пациенты были сопоставимы по возрасту и полу. Всем пациентам определялись клинико-лабораторные; биохимические показатели крови; содержание микроэлементов; маркеры некроза миокарда; коагулограмма и проводились инструментальные исследования (ЭКГ в 12 стандартных отведениях), холтеровское мониторирование ритма сердца, эхокардиоскопия, селективная коронароангиография. Определение уровня Mg в плазме крови проводилось по стандартной методике, указанной в наборе для определения Mg «Симко». Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций [13; 14]: клиническая часть — анкетирование по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза) [15]; лабораторная часть — проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин (ОР)). Методика дифференциальной диагностики депрессивных состояний В. Зунга (адаптация Т.И. Балашовой) [4]. Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0 и StatTech v.3.1.8.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного исследования нами получены следующие результаты:

— у пациентов с ОКС частота встречаемости СНДСТ составила 42 %, что на 17 % выше, чем в средней популяции — 25 % (хочется отметить факт, установленный в нашем исследовании: ОКС на фоне СНДСТ развивался у пациентов более молодого возраста — 48,1 [46,1; 50,8] года в сравнении с пациентами без дисплазии — 54,0 [50,4; 58,2] года, $p<0,05$);

— у пациентов с ОКС на фоне СНДСТ гипомагниемия имела место в 91 и 52 % случаев.

Как видно из таблицы 1, содержание Mg в сыворотке крови в группе пациентов с ОКС с СНДСТ составило 0,63 при интерпроцентильных размахах 0,51 и 0,77 ммоля, что было статистически значимо ниже как по сравнению с контрольной группой, с группой пациентов с ОКС, так и с группой сравнения ($p <0,001$ соответственно).

Таблица 1.

Уровень Mg у пациентов в исследуемых группах, n = 372

Показатель/	Группа ОКС (1-я группа) n = 128 /	Группа ОКС СНДСТ (2-я группа) n = 113	Группа сравнения (3-я группа) n = 81	Контрольная группа (4-я группа) n = 50 /
Mg, ммоль/л /	0,82 [0,75; 0,89] $p_1<0,001$. $p_2<0,001$	0,63 [0,51; 0,77] $p_1<0,001$; $p_2<0,001$; $p_3<0,001$	0,69 [0,58; 0,84] $p_1<0,001$	0,91 [0,75; 1,0]

Примечание: p_1 — по сравнению с контрольной группой; p_2 — по сравнению с группой сравнения; p_3 — по сравнению с группой пациентов с ОКС без СНДСТ. Значение критерия Краскела — Уоллиса $\chi2 = 151,947$; $df = 3$; $p <0,001$.

Таблица 2.

Уровень Mg у пациентов в исследуемых группах в зависимости от степени тяжести СНДСТ, n = 194

Показатель/	Группа СНДСТ (n = 81)			Группа ОКС с СНДСТ (n = 113)		
	1-я степень n = 15 (18,5 %)	2-я степень n = 35 (43,2 %)	3-я степень n = 31 (38,3 %)	1-я степень n = 17 (15,1 %)	2-я степень n = 54 (48,3 %)	3-я степень n = 42 (36,6 %)
Mg, ммоль/л	0,73 [0,62; 0,85] $p_1 = 0,008$, $p_2 = 0,068$	0,7 [0,61; 0,78] $p_1 = 0,064$	0,68 [0,58; 0,74]	0,65 [0,58; 0,73] $p_3 = 0,417$	0,61 [0,55; 0,71] $p_1 = 0,057$, $p_4 < 0,001$	0,58 [0,5; 0,67] $p_1 = 0,002$, $p_2 = 0,009$, $p_5 < 0,001$

Примечание: p_1 — по сравнению с подгруппой пациентов с 1-й степенью тяжести СНДСТ в соответствующих группах; p_2 — по сравнению с подгруппой пациентов со 2-й степенью тяжести СНДСТ в соответствующих группах; p_3 — между 1-й степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС; p_4 — между 2-й степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС; p_5 — между 3-й степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС с СНДСТ по сравнению с группой пациентов с СНДСТ без ОКС.

При оценке уровня Mg в зависимости от степени тяжести дисплазии соединительной ткани получены данные, которые представлены в таблице 2.

В группе пациентов с СНДСТ наименьший уровень Mg выявлен среди пациентов с 3-й степенью тяжести дисплазии, что сопоставимо с подгруппой пациентов со 2-й степенью тяжести (p = 0,064), однако статистически значимо ниже по сравнению с подгруппой пациентов с 1-й степенью тяжести дисплазии (p = 0,008); при сравнении подгрупп пациентов со 2-й и 1-й степенью тяжести СНДСТ статистически значимых различий не выявлено (p = 0,068).

Среди пациентов с ОКС с СНДСТ в подгруппе пациентов с 3-й степенью тяжести дисплазии выявлен наименьший уровень Mg, что статистически значимо ниже по сравнению с подгруппой пациентов как с 1-й степенью тяжести дисплазии (p = 0,002), так и со 2-й степенью тяжести дисплазии (p = 0,009).

При сравнении групп пациентов с СНДСТ и ОКС с СНДСТ получены следующие значения: между подгруппами пациентов с 1-й степенью тяжести СНДСТ статистически значимых различий не обнаружено (p = 0,417), однако между подгруппами со 2-й степенью тяжести различия статистически значимы (p<0,001), также статистически значимо различались подгруппы пациентов с 3-й степенью тяжести СНДСТ (p<001) — при 2-й и 3-й степени тяжести СНДСТ имеют место наиболее высокие концентрации ОР, которые нарушают процесс реабсорбции Mg, приводя к наиболее выраженной гипомагниемии.

При изучении уровня Mg у пациентов с депрессией получены результаты, представленные в таблице 3.

В результате проведенного исследования низкий уровень Mg был выявлен в группе пациентов с ОКС и СНДСТ, что составило 0,62 [0,51; 0,71] ммоль/л, что было статистически значимо ниже как по сравнению с группой пациентов с СНДСТ (p<0,001), так и по сравнению с группой пациентов с ОКС (p<0,001). Этому можно дать следующее объяснение, Mg выполняет ключевую функцию в работе центральной нервной системы — принимает участие в регуляции состояния клеточной мембраны, трансмембранном переносе ионов кальция и натрия и т.д. Потребность в Mg увеличивается при психологических стрессах, одним из которых является ОКС. Таким образом, пациенты, входящие в наше исследование, составляют группу очень высокого риска по развитию депрессии — в патогенезе ДСТ лежит гипомагниемия, и наличие ОКС, будет способствовать еще большему снижению уровня Mg, за счет увеличения его расхода. Кроме этого, нарастание коэффициента Ca/Mg приводит к гиперкоагуляции и усилению высвобождения катехоламинов, замыкая порочный круг при стрессе и утяжеляя депрессию (при депрессии у пациентов в группе с ОКС и СНДСТ уровень Mg был статистически значимо ниже — 0,62 [0,51; 0,71] ммоль/л, чем у пациентов в группе с ОКС — 0,8 [0,71; 0,87] ммоль/л и в группе с СНДСТ 0,88 [0,75; 0,99] ммоль/л, p<0,05).

Таблица 3.

Уровень магния у пациентов с депрессией в исследуемых группах, n = 322

Показатель	Группа ОКС (n = 128)	Группа ОКС и СНДСТ (n = 113)	Группа СНДСТ (n = 81)
Депрессия	50 человек (39 %)	82 человек (72 %)	30 человек (37 %)
Mg, ммоль/л	0,8 [0,71; 0,87] $p_1 < 0,001$	0,62 [0,51; 0,71] $p_1 < 0,001$; $p_2 < 0,001$	0,88 [0,75; 0,99]

Примечание: p_1 — по сравнению с группой пациентов с СНДСТ; p_2 — между группой пациентов с ОКС и с ОКС и СНДСТ.

Мы изучили и проанализировали частоту встречаемости депрессивного синдрома у пациентов исследуемых групп: среди пациентов с ОКС и СНДСТ частота встречаемости депрессии составила 72 %, в группе пациентов с ОКС — 39 %, а в группе сравнения 37 %.

По данным таблицы 4, в группе пациентов с ОКС и СНДСТ было выявлено статистически значимое превалирование количества пациентов с депрессией по сравнению с группой пациентов с СНДСТ (p <0,001).

Таблица 4.

Частота встречаемости депрессии у пациентов исследуемых групп, n = 241

Группа СНДСТ (n = 81)		Группа ОКС и СНДСТ (n = 113)	
Нет депрессии	Есть депрессия	Нет депрессии	Есть депрессия
51 (66 %)	30 (37 %) $\chi^2 = 30,44$; df = 1; $p_1 < 0,001$	31 (28 %) $\chi^2 = 8,10$; df = 1; $p_2 = 0,004$	82 (72 %) $\chi^2 = 0,58$; df = 1; $p_1 = 0,045$. $\chi^2 = 16,98$; df = 1; $p_2 < 0,001$

Примечание: p_1 — уровень статистической значимости различий в группе пациентов с СНДСТ с депрессией и без депрессии, и в группе пациентов с ОКС и СНДСТ с депрессией и без депрессии;
p_2 — уровень статистической значимости различий между группами пациентов с СНДСТ и с ОКС на фоне СНДСТ с депрессией и без депрессии

При изучении частоты встречаемости депрессии у пациентов с СНДСТ в зависимости от степени тяжести дисплазии соединительной ткани получены данные, которые представлены в таблице 5.

В группе пациентов с ОКС и СНДСТ при 3 степени тяжести клинической выраженности синдрома дисплазии депрессия диагностирована в 95 %; у пациентов со 2 степенью — 70 %; при 1 степени — 23 %, p <0,05.

В группе пациентов с СНДСТ при третьей степени тяжести клинической выраженности синдрома дисплазии депрессия имела место у 58 % пациентов, при второй степени — 34 %, p <0,05. При первой степени дисплазии соединительной ткани депрессия не диагностирована.

При анализе субъективных жалоб, предъявляемых на момент поступления в стационар, оказалось, что больше жалоб предъявляли пациенты с депрессией, нежели при её отсутствии: интенсивная загрудинная боль — 100 % и 92 %; перебои в работе сердца — 94 % и 73 %; слабость — 83 % и 72 %; чувство «страха смерти» — 100 % и 81 %, одышка — 83 % и 65 %, соответственно.

Далее нами был проведен расчет рисков развития депрессии у всех обследуемых пациентов в зависимости от степени тяжести дисплазии. В группе пациентов с СНДСТ: абсолютный риск развития депрессии у пациентов в группе с СНДСТ при 3 степени тяжести составил 0,16 (16 %), в группе пациентов с СНДСТ при 2 степени тяжести — 0,06 (6 %). Повышение абсолютного риска развития депрессии в группе пациентов с СНДСТ при 3 степени тяжести составило 0,05 [95 % ДИ 0,168; 0,262] (5 %). Значение ДИ менее 0, указывает на отсутствие статистически значимого увеличения абсолютного риска депрессии в группе пациентов с СНДСТ при 3 степени тяжести дисплазии соединительной ткани. Значение относительного риска развития депрессии в группе пациентов с СНДСТ при 3 степени тяжести относительно группы пациентов с СНДСТ при 2 степени тяжести составило 1,41 [95 % ДИ 1,14; 3,11]. Значение данного риска свидетельствует о наличии прямой связи между степенью тяжести дисплазии и вероятностью развития депрессии. Также, на статистически значимое увеличение риска развития депрессии в группе пациентов с СНДСТ при 3 степени тяжести указывало значение ДИ и значение относительного риска более 1. Отношение шансов развития депрессии в группе пациентов с СНДСТ при 3 степени тяжести относительно группы пациентов с СНДСТ при 2 степени

Таблица 5.

Частота встречаемости депрессии у пациентов в исследуемых группах в зависимости от степени тяжести СНДСТ, n = 194

Показатель	Группа СНДСТ (n = 81)			Группа ОКС и СНДСТ (n = 113)		
	1 степень n = 15	2 степень n = 35	3 степень n = 31	1 степень n = 17	2 степень n = 54	3 степень n = 42
Депрессия (n) %	—	12 (34 %)	18 (58 %) χ^2 с п. Йетса = 0,02; df = 1; $p_1 = 0,898$	4 (23 %)	38 (70 %) χ^2 с п. Йетса = 4,20; df = 1; $p_2 = 0,040$	40 (95 %) χ^2 с п. Йетса = 12,66; df = 1; $p_1 < 0,001$; $\chi^2 = 8,53$; df = 1; p = 0,006

Примечание: p_1 — между 2 и 3 степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с СНДСТ; p_2 — по сравнению с 1 степенью тяжести в группе пациентов с ОКС и СНДСТ; p_3 — между 2 и 3 степенью тяжести СНДСТ в группе пациентов с ОКС и СНДСТ.

тяжести составило 1,49 [95 % ДИ 0,52; 1,85]. То есть, было выявлено статистически значимое увеличение риска развития депрессии при 3 степени тяжести СНДСТ.

В группе пациентов с ОКС на фоне СНДСТ: абсолютный риск развития депрессии у пациентов при 3 степени тяжести дисплазии составил 0,94 (94 %), в группе пациентов при 2 степени тяжести — 0,39 (39 %). Повышение абсолютного риска развития депрессии составило 0,55 [95 % ДИ 0,35; 0,76] (55 %) и было статистически значимым. Значение относительного риска развития депрессии у пациентов при 3 степени тяжести относительно группы пациентов при 2 степени тяжести дисплазии составило 2,43 [95 % ДИ 1,98; 2,55]. Значение данного риска свидетельствует о наличии прямой связи между степенью тяжести ДСТ и вероятностью развития депрессии. Значение ДИ более 1 и повышение относительного риска больше 1 (а именно — 1,43), также указывает на статистически значимое увеличение риска развития депрессии в группе пациентов при 3 степени тяжести дисплазии. Отношение шансов развития депрессии у пациентов при 3 степени тяжести относительно группы пациентов при 2 степени тяжести дисплазии составило 25,23 [95 % ДИ 10,84; 30,99], (ДИ более 1). Таким образом, было установлено статистически значимое увеличение риска развития депрессии при ОКС на фоне СНДСТ при 3 степени тяжести дисплазии.

При сравнении группы пациентов с СНДСТ и с ОКС и СНДСТ: абсолютный риск развития депрессии у пациентов с ОКС и СНДСТ составил 0,54 (54 %), а в группе пациентов с СНДСТ — 0,11 (11 %). Повышение абсолютного риска развития депрессии составило 0,43 [95 % ДИ 0,15; 0,70]. Различия по изучаемому признаку следует считать статистически значимыми вследствие того, что ДИ не включает 0. Значение относительного риска развития депрессии в группе пациентов с ОКС и СНДСТ относительно группы пациентов с СНДСТ составило 4,86 [95 % ДИ 3,69; 6,02]. Данный риск является высоким вследствие того, что превышает 2,5. Так как ДИ больше 1 и повышение относительного риска больше 1 (а именно — 3,86), то это указывает на статистически значимое увеличение риска развития депрессии у пациентов с ОКС и СНДСТ. Отношение шансов развития депрессии в группе пациентов с ОКС с СНДСТ относительно группы пациентов с СНДСТ составило 9,38 [95 % ДИ 6,87; 12,35]. Исходя из этого, в ходе исследования установлено статистически значимое увеличение риска развития депрессии при ОКС и СНДСТ по сравнению с группой пациентов только с СНДСТ.

Таким образом, выявлена ассоциация увеличения риска развития депрессии в зависимости от степени тяжести дисплазии соединительной ткани. Кроме того, было установлено увеличение абсолютного и относительного риска, а также увеличение отношения шансов развития депрессии при ОКС и СНДСТ по сравнению с группой пациентов, имеющих только дисплазию соединительной ткани.

Так же мы рассмотрели содержание оксипролина у пациентов исследуемых групп (таблица 6).

Таблица 6.

Уровни ОР у пациентов исследуемых групп, n=291

Показатель	Группа контроля (n = 50)	Группа ОКС (n = 128)	Группа ОКС и СНДСТ (n = 113)	Kruskal Wallis test
ОР, мкмоль/л	8,3 [1,6; 12,3]	18,3 [13,8; 25,0] p_1<0,001	48,9 [37,5; 59,4] p_1<0,001; p_2<0,001	χ^2 = 249,41; df = 2; p<0,0001

Примечание: p* — уровень статистической значимости <0,001, p_1 — в сравнении с группой контроль; p_2 — в сравнении с группой пациентов с ОКС.

Как видно из данной таблицы, уровни изучаемых показателей у пациентов как с ОКС, так и у пациентов с ОКС и СНДСТ статистически значимо отличались от группы контроля. Этому можно дать следующее объяснение — ОР, как продукт деградации коллагена, ухудшает всасывание Mg.

Заключение

При анализе полученных нами результатов оказалось, что у пациентов с ОКС частота встречаемости СНДСТ составила 42 %, что на 17 % выше, чем в средней популяции. Таким образом установлено:

— у пациентов с острым коронарным синдромом недифференцированная дисплазия соединительной ткани была диагностирована у 42 %;
— психологической особенностью пациентов с СНДСТ и ОКС является высокая частота развития депрессии. У пациентов с ОКС и СНДСТ частота встречаемости депрессии составила 72 %, в группе пациентов с ОКС — 39 %, в группе сравнения 37 %;
— накопление неполноценного, дефектного коллагена при дисплазии связано с нарушением активности фермента аденилатциклаза, отвечающего за его удаление, который является магнийзависимым;
— данным проведенного исследования выявлено наличие статистически значимых корреляционных связей между уровнем Mg, оксипролином, степенью тяжести недифференцированной дисплазии соединительной ткани и депрессивными расстройствами у пациентов с острым коронарным синдромом;

Полученные результаты подтверждают важность мониторинга уровня магния и оксипролина у пациентов с ОКС и НДСТ. Острый коронарный синдром на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани в сочетании с гипомагниемией, повышенным уровнем оксипролина, ассоциирован с развитием жизнеугрожающих осложнений (кардиогенный шок, отек легких) и острой постинфарктной аневризмы сердца. Снижение уровня магния может стать триггером для возникновения депрессивных состояний Оксипролин, как маркер разложения коллагена, может указывать на связь с психоэмоциональными нарушениями у пациентов с СНДСТ. Таким образом, изучение биохимических маркеров, таких как уровень магния и оксипролина, предоставляет новые данные о механизмах взаимосвязи сердечно-сосудистых заболеваний и психических расстройств. Эти данные обеспечивают более комплексный подход к лечению пациентов с острым коронарным синдромом на фоне недифференцированной дисплазии соединительной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев А.В. Депрессия при острых коронарных синдромах: обзор литературы // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2023; 12(3): С. 45–49.
2. Двоеглазова И.Н., Петрова Т.Р., Исмаилов Р.Ю. Психические расстройства при заболеваниях соединительной ткани // Журнал психиатрии и психотерапии. 2024; 35(1): С. 15–22.
3. Ефимов В. Оксипролин как маркер разложения коллагена: практическое применение // Медицинская генетика и биохимия. 2024; 5(2): С. 78–82.
4. Зунга В. Диагностика здоровья. Психологический практикум / В. Зунга, адаптация Т.И. Балашова, под ред. Г.С. Никифорова. — СПб.: Речь, 2007. — 950 с.
5. Козлов А.Л. Магний и его роль в регуляции настроения // Российский журнал кардиологии. 2023; 17(4): С. 33–38.
6. Костина А.В. Связь между недифференцированной дисплазией соединительной ткани и депрессией // Научный журнал нейропсихиатрии. 2024; 11(2): С. 60.
7. Кузнецова Т.С. Состояние магния и его влияние на депрессию: новые данные // Психиатрическая клиника. 2023; 14(1): С. 23–30.
8. Ларин Д.Е. Уровень оксипролина и состояние соединительных тканей // Российский журнал функциональной диагностики. 2021; 19(3): С. 12–15.
9. Молчанов С.А. Методы диагностики недифференцированной дисплазии соединительной ткани // Педиатрия и детская хирургия. 2023; 28(4): С. 50–60.
10. Мясникова О.Г. Эпидемиология острых коронарных синдромов в России // Кардиология и неврология. 2024; 22(1): С. 3–14.
11. Назарова Н.Р. Социальные факторы и стрессовые расстройства у пациентов с ОКС // Социальная психиатрия. 2024; 20(2): С. 34–40.
12. Новиков В.П. Недостаток магния и его влияние на здоровье: современные исследования // Медицинский вестник. 2022; 35(2): С. 19–25.
13. Острый коронарный синдром без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации. — М.: Российское кардиологическое общество при участии Ассоциации сердечно-сосудистых хирургов России, 2020. — С. 12–25.
14. Острый коронарный синдром с подъемом сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации. — М.: Российское кардиологическое общество при участии Ассоциации сердечно-сосудистых хирургов России, 2020. — С. 18–22.
15. Патент на изобретение № 2665387 Российская Федерация. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: заявл. 04.05.2017; опубл. 29.08.2018 / Елыкомова В.А., Копылова А.Н.
16. Семенова Т.Ю. Распространенность недифференцированной дисплазии соединительной ткани в популяции // Российский журнал дисплазии соединительной ткани. 2021; 10(1): С. 8–12.
17. Соловьева Е.В. Влияние стресса на развитие депрессии при ОКС // Актуальные проблемы психиатрии. 2023; 14(3): С. 54–60.
18. Сорокин И.В. Магний как фактор, влияющий на психическое здоровье // Журнал психиатрии и психопатологии. 2022; 15(4): С. 90–95.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Алиева Мадина Алиасхабовна (Lvhts1@mail.ru); Мутаусова Дагман Омаровна (dmutausova@mail.ru);
Джабраилова Мариетта Арифовна (mar.dzhab@mail.ru); Муртазаева Амина Закировна (murtazaeva580@gmail.com);
Батралиева Альфира Умырзаковна (alfira.batralieva@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.40

ОСОБЕННОСТИ ПАТОГЕНЕЗА ОСТРОГО КОРОНАРНОГО СИНДРОМА У БОЛЬНЫХ С ДИСПЛАЗИЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ: РОЛЬ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ И ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО СТАТУСА

FEATURES OF THE PATHOGENESIS OF ACUTE CORONARY SYNDROME IN PATIENTS WITH CONNECTIVE TISSUE DYSPLASIA: THE ROLE OF METABOLIC DISTURBANCES AND PSYCHOEMOTIONAL STATUS

O. Sultanova
E. Chernysheva
A. Beksultanova
M. Savelev
O. Gorodovenko
N. Zarandia
V. Bukurova

Summary. *Objective*: To investigate the features of the pathogenesis of acute coronary syndrome (ACS) in patients with undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome (UCTD) through a comprehensive assessment of clinical, laboratory, and instrumental characteristics.

Materials and Methods: The main group included 156 patients with ACS against the background of UCTD. The comparison group consisted of 202 patients with ACS without UCTD. Levels of homocysteine, oxyproline, blood lipids (LDL, HDL, total cholesterol), coronary artery status by coronary angiography, heart structure by echocardiography (ECHO), electrophysiological characteristics by electrocardiogram (ECG), as well as the psychoemotional status of study participants were assessed. UCTD diagnosis was made based on clinical guidelines: clinical part — questionnaire by V.A. Elykomov and A.N. Kopylov (identification of 6 or more dysembryogenesis stigmata); laboratory part — determination of human antibodies to type II and III collagen by ELISA (oxyproline (OP)). Statistical analysis was performed using IBM software with STATISTICA 28.0 and StatTech v.3.1.8.

Results: Significant differences were found in homocysteine, oxyproline, LDL, and HDL levels between groups. Patients with UCTD had high homocysteine levels and low HDL, associated with increased thrombosis risk. Patients with ACS showed elevated LDL and low HDL, indicating pronounced dyslipidemia. Associations between ACS severity and depression measures were detected in both cohorts.

Conclusion: The findings confirm the need for an individualized approach to managing patients with UCTD and ACS, considering specific metabolic disturbances and concurrent psychosomatic issues. These results may serve as a basis for developing preventive strategies and optimizing treatment for these patient categories.

Keywords: acute coronary syndrome, undifferentiated connective tissue dysplasia syndrome, magnesium, oxyproline, homocysteine, depression.

Султанова Оксана Эседуллаевна
кандидат медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
oksanka.sultanova@mail.ru
Чернышева Елена Николаевна
доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
lena.chernysheva@inbox.ru
Бексултанова Асият Шамиловна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
asiyat.beksultanova.02@mail.ru
Савельев Максим Сергеевич
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Galaxy127@yandex.ru
Городовенко Ольга Ильинична
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Doin82@mail.ru
Зарандия Нино Рамазиевна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
nina.zarandia@mail.ru
Букурова Виктория Тимуровна
Ординатор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Астраханский государственный медицинский университет
Bukurovavika@mail.ru

Аннотация. *Цель исследования*: Изучить особенности патогенеза острого коронарного синдрома (ОКС) у пациентов с синдромом дисплазии соединительной ткани (СДСТ) посредством комплексной оценки клинико-лабораторных и инструментальных характеристик.

Материалы и методы: В основную группу вошли 156 пациентов с ОКС на фоне НДСТ. Группу сравнения составили 202 пациента с ОКС без НДСТ. Оценивались уровень гомоцистеина, оксипролина, липидов крови (ЛПНП, ЛПВП, общий холестерин), состояние коронарных артерий методами коронарографии, структур сердца — ЭХОКГ, электрофизиологические характеристики — ЭКГ, а также психоэмоциональный статус участников исследования. Диагностика СНДСТ проводилась на основании клинических рекомендаций: клиническая часть — анкетирование по Елыкомову В.А. и Копылову А.Н. (обнаружение 6 и более стигм дисэмбриогенеза); лабораторная часть — проводилось определение уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом ИФА (оксипролин (ОР)). Статистический анализ результатов проводили на IBM с использованием статистических программ STATISTICA 28.0 и StatTech v.3.1.8.

Результаты: Установлены существенные различия в показателях гомоцистеина, оксипролина, ЛПНП и ЛПВП между группами. Пациенты с СНДСТ характеризовались высоким уровнем гомоцистеина и низким содержанием ЛПВП, что ассоциируется с повышенной склонностью к тромбозу. Пациенты с ОКС имели повышенный уровень ЛПНП и низкий уровень ЛПВП, свидетельствующий о выраженной дислипидемии. Среди обоих контингентов выявлены ассоциации тяжести ОКС с показателями депрессии.

Заключение: Полученные данные подтверждают необходимость индивидуального подхода к ведению пациентов с СНДСТ и ОКС, учитывая специфику метаболических нарушений и сопутствующих психосоматических проблем. Эти выводы могут служить основой для разработки профилактических мер и оптимизации лечения указанных категорий пациентов.

Ключевые слова: острый коронарный синдром, синдром недифференцированной дисплазии соединительной ткани, магний, оксипролин, гомоцистеин, депрессия.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) продолжают занимать ведущие позиции в структуре заболеваемости и смертности. Данная проблема носит глобальный характер и оказывает значительное негативное воздействие на здоровье населения, а также на социально-экономическое развитие Российской Федерации в целом. В экономически развитых странах распространённость ССЗ составляет в среднем 230–250 случаев на 1000 человек. В 2024 году, согласно данным ГБУЗ Астраханской области «Медицинский информационно-аналитический центр», количество летальных исходов вследствие заболеваний системы кровообращения составило 5414 человек, из них острый коронарный синдром (ОКС) зафиксирован у 3 пациентов, инфаркт миокарда — у 294, повторный инфаркт миокарда — у 28 человек. Несомненна взаимосвязь высокой распространённости ССЗ с врожденными патологиями, к числу которых относится синдром недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ) [1; 2; 9]. Таким образом, СНДСТ представляет собой фоновое состояние, способствующее возникновению и прогрессированию кардиальных и сосудистых заболеваний. Доказано, что у пациентов с СНДСТ часто выявляется повышенный уровень оксипролина в крови, что приводит к замедлению синтеза и усилению деградации всех структур соединительной ткани, включая сердце и сосуды [3; 5]. Учитывая широкую распространённость СНДСТ и ОКС, а также тот факт, что оба состояния ассоциированы с гипомагниемией, гипергомоцистеинемией и повышенным уровнем оксипролина и липидного профиля, СНДСТ является важным фактором риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, включая острый коронарный синдром [3; 7; 13; 14]. Депрессия — аффективное расстройство, которое характеризуется подавленным настроением, негативной оценкой себя, своего положения в окружающей действительности, прошедших событий и будущего, снижением побуждений к деятельности [1; 6; 8]. Анализ стресса в клинике ИБС показал, что установки на безнадежность и беспомощность оказывают разрушительное воздействие на организм. Анти-

гены гистосовместимости I и II классов ассоциированы с предрасположенностью к развитию СНДСТ и с особенностями ее клинических проявлений, что инициирует наличие отклонений в иммунной системе. В литературе приводятся данные о нарушениях в различных звеньях системы гемостаза: изменения агрегационной функции тромбоцитов, снижение активности фактора Виллебранда, нарушение завершающего этапа коагуляции крови у пациентов с СНДСТ. Несмотря на наличие клинических наблюдений, механизмы влияния СНДСТ на патогенез ОКС остаются недостаточно изученными. Целью настоящего исследования является выявление особенностей патогенеза ОКС у пациентов с СНДСТ посредством оценки уровней биохимических маркеров (гомоцистеина, оксипролина, липопротеинов низкой и высокой плотности, холестерина), а также комплексного обследования с использованием коронарографии, эхокардиографии (ЭХОКГ), электрокардиографии (ЭКГ) и оценкой психологического статуса пациентов.

Материалы и методы

Клинические данные настоящего исследования были получены на базе ПСП Городской клинической больницы № 3 имени С.М. Кирова в период 2019–2025 гг. Все участники исследования дали добровольное информированное согласие на участие. В целом было обследовано 378 пациентов в возрасте от 35 до 65 лет. Диагностика инфаркта миокарда (ИМ) и нестабильной стенокардии (НС) выполнялась в соответствии с национальными рекомендациями Российского кардиологического общества (РКО) [10; 11]. В основную группу включено 156 пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) на фоне синдрома недифференцированной дисплазии соединительной ткани (СНДСТ). Группу сравнения составили 202 пациента с ОКС без признаков СНДСТ. Всем пациентам проводились клинико-лабораторные исследования, включающие общий анализ крови и мочи; биохимический анализ крови (с определением уровней креатинина, печеночных проб, липидного профиля, глюкозы); оценку содержания микроэлементов (магний, калий, кальций); определение маркеров некроза миокарда — количественного уровня тропонина I и МВ-фракции креатинфосфокиназы; коагулограмму. Инструментальные методы исследования включали электрокардиографию (ЭКГ) в 12 стандартных отведениях на аппарате Siemens, холтеровское мониторирование сердечного ритма с использованием аппарата Microvit MT-101 и программного обеспечения MT-200 фирмы Schiller (Швейцария), эхокардиоскопию на устройстве производства Toshiba (Япония), а также селективную коронароангиографию на аппарате Philips (Япония). Определение уровня магния в плазме крови выполнялось по стандартной методике, предусмотренной в наборе для определения Mg «Симко», с использованием сертифицированного лабораторного оборудования и тест-систем. Диагностика СНДСТ проводилась согласно клиническим рекомендациям [12] и включала клиническую часть — анкетирование по методике В.А. Елыкомова и А.Н. Копылова, предусматривающее выявление шести и более стигм дисэмбриогенеза; лабораторная часть заключалась в определении уровня антител человека к коллагенам II и III типа методом иммуноферментного анализа (ИФА) с использованием коммерческой тест-системы (каталожный номер CEA808Ge, фирма «Иммунотэкс», г. Ставрополь), согласно инструкции производителя. Диагностика депрессивных расстройств проводилась с использованием анкеты В. Зунга (адаптация Т.И. Балашовой) [4].

Статистическая обработка данных осуществлялась на платформе IBM с применением программного обеспечения STATISTICA версии 28.0 и StatTech версии 3.1.8. Для сравнения средних значений использовались t-критерий Стьюдента и критерий Манна-Уитни, а для установления взаимосвязей применялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Анализ проводился с использованием программного пакета SPSS версии 25.

Результаты и их обсуждения

В таблице 1 представлены средние значения ключевых биомаркеров у двух групп пациентов: с депрессией и стрессовыми тревожными состояниями у пациентов с ОКС + СНДСТ и у пациентов с ОКС.

Таблица 1.

Средние значения лабораторных показателей у пациентов с ОКС и СНДСТ

Показатель	Группа ОКС + СНДСТ	Группа ОКС
Гомоцистеин	25,6 ± 3,2 мкмоль/л	18,4 ± 2,8 мкмоль/л
Оксипролин	32,5 ± 5,1 мг/дл	28,3 ± 4,7 мг/дл
ЛПНП	132,5 ± 21,1 мг/дл	115,2 ± 18,3 мг/дл
ЛПВП	38,6 ± 6,4 мг/дл	45,3 ± 7,2 мг/дл
Общий холестерин	205,1 ± 31,2 мг/дл	185,4 ± 25,6 мг/дл

Примечание: Данные приведены в виде среднего значения ± стандартное отклонение.

Согласно данной таблице:

— гомоцистеин: повышен у пациентов с ОКС + СНДСТ по сравнению с группой ОКС. Это можно объяснить тем, что гомоцистеин участвует в обмене белков и его повышение связывают с воспалительными процессами и повышенной вероятностью тромбообразования, что характерно для состояний стресса и тревоги.

— оксипролин: также увеличен у пациентов с ОКС + СНДСТ. Этот маркер отражает активность распада коллагена, что может свидетельствовать о повышении воспаления и активации фиброза.

— ЛПНП: значительно выше у пациентов с ОКС + СНДСТ.
— ЛПВП: снижен у пациентов с ОКС + СНДСТ.
— общий холестерин: выше у пациентов с ОКС + СНДСТ (205,1 против 185,4 мг/дл), отражая общую атерогенность профиля.

Далее мы исследовали частоту встречаемости стенозов различной тяжести среди участников обеих групп — таблица 2.

Таблица 2.
Частота выявленных изменений при коронарографии у пациентов с ОКС + СНДСТ и ОКС

Тип изменения	Группа ОКС	Группа ОКС + СНДСТ
Однососудистый стеноз	35 %	42 %
Двухсосудистый стеноз	20 %	30 %
Трехсосудистый стеноз	15 %	28 %

Из данных таблицы следует, что однососудистые стенозы: чаще встречаются у пациентов с ОКС + СНДСТ (42 % против 35 %), вероятно, из-за наличия активного процесса образования атеросклеротических бляшек. Двух— и трехсосудистые стенозы: пациенты с ОКС + СНДСТ имеют большее количество тяжелых форм стенозов (30 % и 28 %, соответственно), что подтверждает большую распространённость тяжелых поражений сосудов у больных с острыми формами ишемической болезни сердца.

В ходе нашего исследования мы выявили различия в структуре и функциях сердца у пациентов исследуемых групп, которые представили в таблице 3.

Таблица 3.
Основные характеристики пациентов по результатам ЭХОКГ

Параметр	Группа с ОКС	Группа ОКС + СНДСТ
Фракция выброса (%)	58,2 ± 6,5	53,1 ± 7,2
Масса левого желудочка (г)	155,4 ± 21,3	178,6 ± 28,1
Диаметр корня аорты (мм)	32,5 ± 3,1	34,8 ± 3,6

Исследование показало, что фракция выброса ниже у пациентов с ОКС + СНДСТ (53,1 % против 58,2 %). Это означает ухудшение насосной функции сердца у больных с активным поражением коронарных артерий, так как СНДСТ в основе нарушения формирования стенок артерий. Масса левого желудочка: больше у пациентов с ОКС + СНДСТ (178,6 г против 155,4 г). Увеличенная масса связана с компенсаторной реакцией сердца на нагрузку, вызванную нарушением кровотока, в основе механизма которого лежит СНДСТ. Диаметр корня аорты: незначительно у пациентов с ОКС + СНДСТ (34,8 мм против 32,5 мм), что может указывать на влияние повышенного давления или длительно текущего воспаления, в прогрессировании которого большая роль так же отведена СНДСТ.

При проведении исследования мы так же оценили частоту депрессии разной степени тяжести у пациентов с ОКС + СНДСТ и пациентов с ОКС (табл.4).

Таблица 4.
Психологический статус пациентов с СНДСТ + ОКС и ОКС

Шкала оценивания	Средняя степень депрессии	Тяжёлая степень депрессии
Группа ОКС	35 %	10 %
Группа ОКС + СНДСТ	25 %	25 %

Исследование показало, что средняя степень депрессии: чаще встречается у пациентов с ОКС (35 % против 25 %). Тяжелая депрессия: преобладает у пациентов с ОКС + СНДСТ (25 % против 10 %). Психологический дискомфорт усиливается из-за значительного влияния СНДСТ.

Эти данные позволяют сделать вывод о существенных различиях в состоянии здоровья пациентов с ОКС + СДСТ и ОКС, проявляющихся как в биохимическом профиле, так и в результатах функциональных тестов и эмоциональном статусе.

Заключение

Полученные данные показывают, что у пациентов с ОКС + СНДСТ имеются существенные отклонения в биохимическом составе крови, нарушением метаболизма, нарушение структуры и функций сердца, а также проблемы психоэмоционального характера. Они требуют комплексного подхода к лечению, направленного на коррекцию как физиологических, так и психологических аспектов заболевания. У данных пациентов повышен риск тромбоза сосудов, из-за преобладания нарушения липидного обмена. Выявленные особенности требуют дифференцированного подхода к профилактике и лечению указанных состояний, а также подчеркивают важность учета психологического фактора в терапии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев А.В. Депрессия при острых коронарных синдромах: обзор литературы // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. 2023; 12(3): С. 45–49.
2. Василенко И.Л., Давыдова М.Ю. Генетика дисплазии соединительной ткани и сердечно-сосудистые осложнения // Вопросы современной педиатрии. — 2018. — Том 17, № 6. — С. 56–63.
3. Ефимов В. Оксипролин как маркер разложения коллагена: практическое применение // Медицинская генетика и биохимия. 2024; 5(2): С. 78–82.
4. Зунга В. Диагностика здоровья. Психологический практикум / В. Зунга (адаптация Т.И. Балашовой) под ред. Г.С. Никифорова. — Текст: непосредственный // СПб.: Речь, 2007. 950 с. — Текст: непосредственный.
5. Иванов А.И., Петров Б.В., Сидоров В.Г. Особенности патогенеза острого коронарного синдрома у больных с дисплазией соединительной ткани // Кардиология. — 2023. — № 3. — С. 15–22.
6. Костина А.В. Связь между недифференцированной дисплазией соединительной ткани и депрессией // Научный журнал нейропсихиатрии. 2024; 11(2): С. 60.
7. Краснова Е.Н., Козлова Н.А. Роль генетических факторов в развитии сердечно-сосудистой патологии у пациентов с дисплазией соединительной ткани // Медицинская наука и практика. — 2022. — Том 10, № 2. — С. 89–97.
8. Логинова Л.М., Сергеева А.Б. Депрессия и её влияние на течение ишемической болезни сердца // Клиническая медицина. — 2020. — № 1. — С. 34–41.
9. Молчанов С.А. Методы диагностики недифференцированной дисплазии соединительной ткани // Педиатрия и детская хирургия. 2023; 28(4): С. 50–60.
10. Острый коронарный синдром без подъема сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации. — М.: Российское кардиологическое общество при участии Ассоциации сердечно-сосудистых хирургов России, 2020. — С. 12–25.
11. Острый коронарный синдром с подъемом сегмента ST электрокардиограммы. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации. — М.: Российское кардиологическое общество при участии Ассоциации сердечно-сосудистых хирургов России, 2020. — С. 18–22.
12. Патент на изобретение № 2665387 Российская Федерация. Способ диагностики дисплазии соединительной ткани: заявл. 04.05.2017; опубл. 29.08.2018 / Елыкомова В.А., Копылова А.Н.
13. Смирнов К.С., Васильев Ю.П. Современные подходы к диагностике и лечению острых коронарных синдромов // Российский медицинский журнал. — 2021. — № 5. — С. 45–52.
14. Старостин С.Ф. Биохимические маркеры риска атеросклероза у пациентов с дисплазией соединительной ткани // Журнал неврологии и психиатрии имени С.С. Корсакова. — 2019. — № 4. — С. 67–74.

© Султанова Оксана Эседуллаевна (oksanka.sultanova@mail.ru); Чернышева Елена Николаевна (lena.chernysheva@inbox.ru);
Бексултанова Асият Шамиловна (asiyat.beksultanova.02@mail.ru); Савельев Максим Сергеевич (Galaxy127@yandex.ru);
Городовенко Ольга Ильинична (Doin82@mail.ru); Зарандия Нино Рамазиевна (nina.zarandia@mail.ru);
Букурова Виктория Тимуровна (Bukurovavika@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

DOI 10.37882/2223-2966.2025.10.42

АССОЦИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РЕМОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА И ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО С-РЕАКТИВНОГО БЕЛКА У ПАЦИЕНТОВ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ 1 ТИПА[1]

ASSOCIATIONS OF LEFT VENTRICULAR REMODELING PARAMETERS AND HIGHLY SENSITIVE C-REACTIVE PROTEIN IN PATIENTS WITH TYPE 1 DIABETES MELLITUS[2]

R. Useinova
V. Beloglazov
I. Yatskov
E. Ageeva
I. Repinskaya

Summary. Chronic low-intensity inflammation plays a key role in the development of cardiovascular complications in patients with type 1 diabetes mellitus (DM1). However, data on the relationship between markers of systemic inflammation, such as highly sensitive C-reactive protein (hc-CRP), and parameters of structural remodeling of the left ventricular myocardium (LV) in this category of patients are significantly limited. *The aim of the study* was to evaluate the associations between the level of hf-CRP and the parameters of LV hypertrophy in patients with DM1. The study included 80 patients (32 men and 48 women) with a verified diagnosis of DM1 who were hospitalized in the endocrinology department of the Semashko RCB. The median age was 35 (23.0–42.35) full years. The patients underwent a study of biomaterial (blood plasma) using enzyme immunoassay (ELISA) to determine the level of C-reactive protein (mg/L), a comprehensive echocardiographic assessment of the parameters of left ventricular remodeling (LV) (LV myocardial mass index, interventricular septum thickness, LV posterior wall thickness False identity). The correlation analysis was performed using the Pearson correlation coefficient. Statistical processing of the obtained data was performed using the IBM SPSS Statistics 27 software package. A statistically significant positive correlation of average strength was found between the level of hf-CRP and LVEF ($r = 0.530$; $p = 0.011$), LVEF ($r = 0.502$; $p = 0.017$) and LVEF ($r = 0.450$; $p = 0.035$). The data suggest that an increased level of hf-CRP is associated with more pronounced LV myocardial hypertrophy. Systemic inflammation, assessed by the level of hf-CRP, may contribute to the development of LV remodeling and hypertrophy in patients with DM1. The results obtained reflect the potential role of anti-inflammatory strategies in the prevention of cardiac complications in DM1.

Усеинова Реан Хайриевна
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
rean98@mail.ru
Белоглазов Владимир Алексеевич
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
biloglazov@mail.ru
Яцков Игорь Анатольевич
кандидат медицинских наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
egermd@yandex.ru
Агеева Елизавета Сергеевна
доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь
ageevaeliz@rambler.ru
Репинская Ирина Николаевна
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь
repinskaya.irina@mail.ru

Аннотация. Хроническое низкоинтенсивное воспаление играет ключевую роль в развитии сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с сахарным диабетом 1 типа (СД1). Однако, данные о связи между маркерами системного воспаления, такими как высокочувствительный С-реактивный белок (вч-СРБ), и параметрами структурного ремоделирования миокарда левого желудочка (ЛЖ) у этой категории больных значительно ограничены.
Целью исследования явилась оценка ассоциаций между уровнем вч-СРБ и параметрами гипертрофии ЛЖ у пациентов с СД1. В исследование было

[1] Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Государственного Совета Республики Крым молодым ученым Республики Крым (Постановление Президиума Государственного Совета Республики Крым от 22.01.2025 г. № п95-3/25).
[2] Funding. The study was supported by the grant of the State Council of the Republic of Crimea to young scientists of the Republic of Crimea (Resolution of the Presidium of the State Council of the Republic of Crimea from 22.01.2025 № p95-3/25).

Keywords: diabetes mellitus, left ventricular remodeling, left ventricular myocardial mass index, C-reactive protein.

включено 80 пациентов (32 мужчины и 48 женщин) с верифицированным диагнозом СД1, госпитализированных в эндокринологическое отделение ГБУЗ РК «РКБ имени Н.А. Семашко». Медиана возраста составила 35 (23,0–42,35) полных лет. Пациентам было проведено исследование биоматериала (плазмы крови) методом иммуноферментного анализа (ИФА) для определения уровня С-реактивного белка (мг/л), комплексная эхокардиографическая оценка параметров ремоделирования левого желудочка (ЛЖ) (индекс массы миокарда ЛЖ (ИММЛЖ), толщина межжелудочковой перегородки (ТМЖП), толщина задней стенки ЛЖ (ТЗС ЛЖ). Корреляционный анализ выполнен с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Статистическая обработка полученных данных производилась с использованием пакета программ IBM SPSS Statistics 27.

Выявлена статистически значимая положительная корреляция средней силы между уровнем вч-СРБ и ИММЛЖ ($r = 0,530$; $p = 0,011$), ТМЖП ($r = 0,502$; $p = 0,017$) и ТЗС ЛЖ ($r = 0,450$; $p = 0,035$). Данные свидетельствуют о том, что повышенный уровень вч-СРБ ассоциирован с более выраженной гипертрофией миокарда ЛЖ. Системное воспаление, оцениваемое по уровню вч-СРБ, может способствовать развитию ремоделирования и гипертрофии ЛЖ у пациентов с СД1. Полученные результаты отражают потенциальную роль противовоспалительных стратегий в профилактике кардиальных осложнений при СД1.

Ключевые слова: сахарный диабет, ремоделирование левого желудочка, индекс массы миокарда левого желудочка, С-реактивный белок.

Сахарный диабет 1 типа (СД1) является мультиморбидным заболеванием с многогранными макро- и микрососудистыми осложнениями, неизбежно приводящими к повышению кардиоваскулярного риска, ухудшению прогноза, снижению качества жизни и инвалидизации пациентов [1]. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются основной причиной смертности среди пациентов с СД1, при этом показатели смертности от ССЗ в данной категории больных в 2–5 раз выше, чем в общей популяции [2]. Хотя достижение строгого гликемического контроля может снизить риск ССЗ, даже среди пациентов, достигающих относительного контроля гликемии, сохраняется существенное превышение сердечно-сосудистой смертности [3]. Этиопатогенез СД1 в настоящее время широко исследован, однако, расширяющееся представление о нём не ограничивается дефицитом инсулина, окислительным стрессом, метаболическими нарушениями и иммунным воспалением [3,4]. Низкоинтенсивное воспаление опосредует дисфункцию эндотелия сосудов, поражение кардиомиоцитов, и в некоторых исследованиях использовалось в качестве биомаркера для прогнозирования возникновения осложнений СД1, включая диабетическую кардиомиопатию [5].

Целью нашего исследования явилась оценка ассоциаций между уровнем вч-СРБ и эхокардиографическими показателями гипертрофии ЛЖ как независимого предиктора развития сердечно-сосудистых осложнений у пациентов с СД1. Мы предположили, что повышенные концентрации вч-СРБ будут положительно коррелировать с увеличением массы миокарда ЛЖ и утолщением его стенок, что может свидетельствовать о вкладе системного воспаления в развитие диабетического ремоделирования сердца.

Полученные результаты могут иметь важное клиническое значение, поскольку выявление связи между вч-СРБ и гипертрофией ЛЖ открывает новые возможности для таргетной противовоспалительной терапии с целью снижения кардиоваскулярного риска у пациентов с СД1.

Материалы и методы

В исследование были включены 80 пациентов с верифицированным диагнозом СД 1 типа, находившиеся на стационарном лечении в эндокринологическом отделении ГБУЗ РК «Республиканская больница имени Н.А. Семашко», среди которых было 32 мужчины и 48 женщин. Также была сформирована группа контроля из 20 практически здоровых респондентов, которые по возрастному и половому признаку были сопоставимы с группой пациентов с СД1. Диагноз СД1 выставлялся согласно диагностическим критериям РАЭ (клинические рекомендации МЗ РФ «сахарный диабет 1 типа у взрослых», 2022 г.). Медиана возраста составила 35 (23,0–42,35) полных лет. Исследования проводились с соблюдением принципов Хельсинской декларации 1975 года, пересмотренной в 2013 году. Протокол исследования №10 одобрен Локальным этическим комитетом ФГАОУ ВО

«Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, 10 октября 2024 г. Предварительно ознакомившись с ходом исследования и изучив информацию о нем, все пациенты подписали информированное добровольное согласие. В период обследования у пациентов не было обострения хронических инфекционных заболеваний, оказывающих прямое воздействие на уровень СРБ. Критериями исключения являлись: возраст старше 50 лет, отказ пациента на любом из этапов исследования, воспалительные заболевания кишечника в анамнезе, наличие инфекционных заболеваний в период обострения, онкологических заболеваний, противоопухолевая терапия, период беременности или лактации.

Оценку уровня вч-СРБ проводили с помощью иммуноферментного анализа (ИФА) на базе центра коллективного пользования научного оборудования «Молекулярная биология» ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», оснащенного прибором для проведения высокочувствительного иммуноферментного анализа с использованием теста ИФА (Cloud Clone Corp; Ухань, провинция Хубэй, Китай). Статистическая обработка полученных результатов проводилась с помощью лицензированного программного обеспечения IBM SPSS Statistics 27. Для оценки корреляционных взаимосвязей проводился анализ с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Основные характеристики исследуемых групп пациентов представлены в таблице 1.

Всем пациентам проводилось исследование уровня вч-СРБ путем проведения ИФА, общий и биохимический анализы крови, эхокардиография (ЭхоКГ) с измерением параметров геометрии ЛЖ.

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о статистически значимом повышении уровня вч-СРБ в группе пациентов с СД1 (0,898 (0,325–2,42), p=0,002), а также об изменении показателей ремоделирования левого желудочка по сравнению с группой контроля, согласно таким параметрам эхокардиографии, как ТМЖП, ТЗС ЛЖ, ММЛЖ и ИММЛЖ ($p < 0,05$).

В результате проведения корреляционного анализа выявлена статистически значимая положительная корреляция средней силы между уровнем вч-СРБ и ИММЛЖ ($r = 0,530$; $p = 0,011$), ТМЖП ($r = 0,502$; $p = 0,017$) и ТЗС ЛЖ ($r = 0,450$; $p = 0,035$).

Для количественной оценки влияния системного воспаления на процессы гипертрофического ремоделирования миокарда была построена линейная регрессионная модель, где ИММЛЖ выступал в качестве зависимой переменной, а уровень вч-СРБ — в качестве независимого предиктора. Полученная статистически значимая модель ($p = 0,001$) описывается уравнением регрессии:

$$\text{ИММЛЖ (г/м}^2) = 65.248 + 13.131 \times [\text{вч-СРБ (мг/л)},$$

где 65.248 г/м^2 — расчетное значение ИММЛЖ при нулевом уровне вч-СРБ, 13,131 г/м^2 — регрессионный коэффициент, отражающий прирост ИММЛЖ на каждую единицу увеличения вч-СРБ. Соответственно, нами определено, что каждое увеличение концентрации вч-СРБ на 1 мг/л ассоциировано с приростом ИММЛЖ на 13.131 г/м^2. Для пациентов с СД1 это свидетельствует о значимом вкладе воспаления в процессы ремоделирования миокарда.

Таблица 1.
Клинико-лабораторная характеристика исследуемых групп пациентов

Признаки		СД1 (n=80)	Контроль (n=20)	p
Пол	Муж. абс. (%)	32 (40%)	8 (40%)	>0,0
	Жен. абс. (%)	48 (60%)	12 (60%)	>0,05
Возраст, полных лет Me (Q1-Q3)		35 (23,0–42,35)	34 (25,0–40,0)	>0,05
ИМТ, кг/м^2 Me (Q1-Q3)		23,0 (21,0–26,7)	22.5 (20.8–24.9)	>0,05
вч-СРБ, мг/л Me (Q1-Q3)		0,898 (0,325–2,42)	0.41 (0.10–1.05)	0,002
ТМЖП, см Me (Q1-Q3)		1 (0,825–1,1)	0.8 (0.7–0.9)	0,003
ТЗС ЛЖ, см Me (Q1-Q3)		1 (0,9–1,1)	0.75 (0.7–0.9)	0,001
ОТС Me (Q1-Q3)		0,42 (0,39–0,47)	0,35 (0,32–0,38)	<0,001
ММЛЖ, г Me (Q1-Q3)		159 (133,0–182,0)	120 (105,0–140,0)	0,001
ИММЛЖ, г/м^2 Me (Q1-Q3)		76,5 (58,0–96,5)	65,0 (58,0–75,0)	<0,001
ФВ ЛЖ, % Me (Q1-Q3)		56,5 (58,0–65,0)	62,0 (58,0–67,0)	>0,05

Обсуждение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются основной причиной заболеваемости и смертности у лиц с СД1, что обусловлено сложным взаимодействием патофизиологических механизмов, выходящих за рамки

гипергликемии и способствующих ускоренному развитию атеросклероза [6]. Международная федерация диабета определила, что в 2021 году число больных диабетом в возрасте 20–79 лет превысило 536,6 миллиона человек, а к 2045 году их число вырастет до 783,2 миллионов, что составит около 10 % взрослого населения [7]. В рамках данной глобальной проблемы пациенты с СД1 сталкиваются с непропорционально высоким риском ССЗ и сердечной недостаточности (СН) по сравнению с общей популяцией даже при достижении целевых показателей гликемического контроля. Настоящее исследование было направлено на изучение недостаточно освещенного аспекта кардиоваскулярного риска при СД1 — взаимосвязи между параметрами ремоделирования левого желудочка (ЛЖ) и маркером системного воспаления высокочувствительным С-реактивным белком (вч-СРБ).

СД1 ассоциирован с повышенным риском сердечно-сосудистых заболеваний, включая диабетическую кардиомиопатию, характеризующуюся прогрессирующим ремоделированием миокарда левого желудочка (ЛЖ) [8]. Изменение геометрии и гипертрофия левого желудочка (ГЛЖ) являются одним из механизмов физиологической адаптации сердца к увеличению постнагрузки, приводящим к прогрессирующему ремоделированию сердечно-сосудистой системы [9]. Однако, при СД1 эти процессы приобретают патологический характер. Хроническая гипергликемия, инсулинорезистентность (даже на фоне абсолютного дефицита инсулина), активация ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС) и усиление окислительного стресса способствуют развитию миокардиального фиброза, апоптозу кардиомиоцитов и патологической перестройке экстрацеллюлярного матрикса [10]. Это ведет к неблагоприятному ремоделированию ЛЖ, часто по концентрическому типу (утолщение стенок, уменьшение полости ЛЖ), сопровождающемуся нарушением диастолической функции — раннему и характерному признаку диабетической кардиомиопатии. СД связан с ГЛЖ и снижением функции миокарда независимо от возраста, пола и артериальной гипертензии [11]. Фрамингемское исследование показало, что наличие ГЛЖ было связано с повышением смертности, причем у пациентов с СД этот риск был значительно выше, чем в общей популяции [12, 13].

Взаимосвязь показателей гипертрофии левого желудочка (ГЛЖ) их роль в развитии диабетической кардиомиопатии широко изучена в группе пациентов с СД2, однако, пациенты с СД1 остаются малоизученной группой больных. В последние годы исследователи акцентируют внимание на раннем развитии диастолической дисфункции, связанной с формированием ГЛЖ у пациентов с СД2, и впоследствии приводящей к развитию хронической сердечной недостаточности (ХСН). Исследования, сфокусированные на СД1, немногочисленны и часто ограничены небольшими размерами выборок или отсутствием комплексной оценки параметров ремоделирования (включая не только массу ЛЖ, но и относительную толщину стенок, геометрические паттерны, диастолическую функцию) [14]. Взаимосвязь показателей гипертрофии левого желудочка (ГЛЖ) их роль в развитии диабетической кардиомиопатии широко изучена в группе пациентов с СД2 [15,16,17]. Данные многочисленных исследований, включая недавнее крупное сравнение с использованием МРТ сердца последовательно демонстрируют, что патологическое ремоделирование ЛЖ, особенно по концентрическому типу с выраженной гипертрофией, является распространенным и клинически значимым осложнением СД2 [16]. Более того, ремоделирование при СД2 часто имеет большую выраженность, чем при СД1, что может отражать различия в патофизиологии, такие как более ранняя и выраженная инсулинорезистентность, ожирение и сопутствующая дислипидемия [17]. Согласно данным Mo B, Ding Y et al., помимо хорошо известной роли артериальной гипертензии и ишемии, независимый вклад вносят сами метаболические нарушения — хроническая гипергликемия и накопление токсичных липидных метаболитов в кардиомиоцитах (липотоксичность) [17]. Эти нарушения напрямую запускают каскады внутриклеточного стресса, и, что особенно важно, активируют провоспалительные сигнальные пути в миокарде. Следовательно, хроническое низкоинтенсивное воспаление при СД2 выступает не просто сопутствующим феноменом, а центральным патогенетическим механизмом структурного ремоделирования миокарда. Маркеры системного воспаления, такие как вч-СРБ, вероятно, отражают как активность этих локальных миокардиальных воспалительных процессов, так и общий провоспалительный статус, способствующий повреждению сердца.

Хроническое низкоинтенсивное воспаление, опосредованное активацией провоспалительных цитокинов (таких как IL-1β, IL-6, TNF-α) и окислительного стресса, является одним из ключевых патогенетических механизмов, способствующих структурным изменениям сердца при СД1 [18]. Гипергликемия, гликирование белков, активация RAGE-рецепторов, эндотелиальная дисфункция — все эти факторы создают персистирующий провоспалительный фон даже при клинически компенсированном диабете [19]. В этом контексте вч-СРБ, продуцируемый преимущественно гепатоцитами под действием IL-6, служит не только надежным маркером системного воспаления, но и потенциально активным участником патогенеза сердечно-сосудистых осложнений. Предполагается, что вч-СРБ способствует эндотелиальной дисфункции, активации фиброза миокарда и гипертрофии кардиомиоцитов [20]. Однако данные о взаимосвязи между уровнем вч-СРБ и параметрами ремоделирования ЛЖ у пациентов с СД1 остаются ограниченными.

В настоящее время исследовано, что вч-СРБ снижает биодоступность оксида азота (NO), усиливает экспрессию молекул адгезии (VCAM-1, ICAM-1) и хемокинов (MCP-1), способствуя моноцитарной инфильтрации сосудистой стенки и ускоренному атеросклерозу коронарных артерий [20]. Хроническая ишемия миокарда, даже субклиническая, является мощным стимулом для компенсаторной гипертрофии кардиомиоцитов и фиброза. Показано, что вч-СРБ может напрямую стимулировать гипертрофию кардиомиоцитов in vitro через активацию сигнальных путей, включая NF-κB и p38 MAPK [21]. Кроме того, вч-СРБ способствует пролиферации и дифференцировке фибробластов в миофибробласты, усиливая синтез коллагена и других компонентов экстрацеллюлярного матрикса, что ведет к интерстициальному и периваскулярному фиброзу миокарда — ключевому элементу патологического ремоделирования и диастолической дисфункции [22]. Исследование Amara M., Stoler O. (2025) подробно описывает центральную роль воспаления, включая действие медиаторов типа СРБ, в регуляции фиброзных процессов в сердце и развитии сердечной недостаточности при метаболических заболеваниях [23]. Кроме этого, воспаление и вч-СРБ могут потенцировать активность РААС, увеличивая продукцию ангиотензина II — мощного стимулятора гипертрофии кардиомиоцитов, фиброза и вазоконстрикции [24]. Исследовано, что вч-СРБ может усиливать продукцию активных форм кислорода (АФК) в эндотелии и кардиомиоцитах, создавая порочный круг, так как АФК сами по себе являются мощными активаторами провоспалительных сигнальных путей и факторами повреждения митохондрий [25]. Хотя эти механизмы убедительно обосновывают потенциальную связь между вч-СРБ и ремоделированием ЛЖ, прямые доказательства именно у пациентов с СД1 крайне ограничены. Исследование Habibi D., Daneshpour M.S., et al. (2023) на большой когорте пациентов с СД1 (n>20,000) подтвердило, что повышенный уровень вч-СРБ является независимым предиктором развития сердечной недостаточности и общей смертности в этой популяции [26]. В исследовании Shah A.S. et al. у молодых людей с СД1 без ССЗ в анамнезе обнаружена корреляция между повышенным вч-СРБ и ухудшением диастолической функции ЛЖ, оцениваемой с помощью тканевой допплерографии [27]. Настоящее исследование дополняет эти данные, демонстрируя прямые ассоциации между уровнями вч-СРБ и объективными эхокардиографическими параметрами структурного ремоделирования ЛЖ в группе пациентов с СД1.

Заключение

Таким образом, наше исследование подтверждает значимую роль системного воспаления в патогенезе гипертрофического ремоделирования миокарда ЛЖ при СД1. Уровень вч-СРБ может служить доступным и информативным биомаркером для идентификации пациентов с СД1, имеющих повышенный риск развития доклинической диабетической кардиомиопатии (особенно концентрического ремоделирования и гипертрофии ЛЖ). Его определение, наряду с рутинным гликемическим и липидным контролем, может быть включено в алгоритмы кардиоваскулярного скрининга при СД1. Пациенты с СД1 должны рассматриваться как кандидаты для приоритетного проведения эхокардиографии (с акцентом на оценку ИММЛЖ, геометрии ЛЖ и диастолической функции) даже при отсутствии симптомов, особенно при длительном стаже СД1.

Результаты исследования обосновывают необходимость изучения стратегий, направленных на снижение хронического воспаления у пациентов с СД1, как пути к замедлению или обратному развитию гипертрофии ЛЖ. Это включая более широкое и раннее применение препаратов с доказанными противовоспалительными и антифибротическими свойствами даже при отсутствии явной гипертензии или дислипидемии, но при наличии повышенного вч-СРБ и признаков ремоделирования. Полученные данные способствуют развитию персонифицированного подхода к ведению пациентов с СД1, где решение о необходимости и интенсивности кардиопротекции принимается на основе комбинации факторов, включая маркеры воспаления (вч-СРБ) и ранние признаки структурного ремоделирования сердца, а также переводят концепцию воспалительного компонента диабетической кардиомиопатии в практическую плоскость, открывая новые возможности для ранней диагностики, стратификации риска и разработки патогенетически обоснованных стратегий кардиопротекции в данной группе пациентов. Дальнейшие проспективные исследования необходимы для подтверждения причинно-следственной связи и оценки клинической пользы таргетного воздействия на воспаление для профилактики сердечной недостаточности при СД1.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akil A.A., Yassin E., Al-Maraghi A., Aliyev E., Al-Malki K., Fakhro K.A. Diagnosis, and treatment of type 1 diabetes at the dawn of the personalized medicine era. J Transl Med. 2021 Apr 1;19(1):137. doi: 10.1186/s12967-021-02778-6.
2. Mesa A., Franch-Nadal J., Navas E. et al. Cardiovascular disease in women with type 1 diabetes: a narrative review and insights from a population-based cohort analysis. Cardiovasc Diabetol 24, 217 (2025)
3. Primavera M., Giannini C., Chiarelli F. Prediction and Prevention of Type 1 Diabetes. Front Endocrinol (Lausanne). 2020 Jun 2; 11:248. doi: 10.3389/fendo.2020.00248.

4. Cecerska-Heryć E., Engwert W., Michałów J. et al. Oxidative stress markers and inflammation in type 1 and 2 diabetes are affected by BMI, treatment type, and complications. Sci Rep 15, 23605 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-05818-z.
5. Guo Q., Zhu Q., Zhang T., Qu Q., Cheang I., Liao S., Chen M., Zhu X., Shi M., Li X. Integrated bioinformatic analysis reveals immune molecular markers and potential drugs for diabetic cardiomyopathy. Front Endocrinol (Lausanne). 2022 Aug 15; 13:933635. doi: 10.3389/fendo.2022.933635. PMID: 36046789; PMCID: PMC9421304.
6. Sun H., Saeedi P., Karuranga S., GBD 2021 Diabetes Collaborators. Global and regional burden of diabetes in 2021, and trends since 1990: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. The Lancet 402(10397), 203–234. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01301-6 (2023).
7. Sun H., Saeedi P., Karuranga S., Pinkepank M et al. IDF Diabetes Atlas: Global, regional, and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045. Diabetes Res Clin Pract. 2022 Jan; 183:109119. doi: 10.1016/j.diabres.2021.109119. Epub 2021 Dec 6. Erratum in: Diabetes Res Clin Pract. 2023 Oct; 204:110945. doi: 10.1016/j.diabres.2023.110945. PMID: 34879977; PMCID: PMC11057359.
8. Rizza V., Tondi L., Patti A.M., Cecchi D., Lombardi M., Perone F., Ambrosetti M., Rizzo M., Cianflone D., Maranta F. Diabetic cardiomyopathy: pathophysiology, imaging assessment and therapeutical strategies. Int J Cardiol Cardiovasc Risk Prev. 2024 Sep 28; 23:200338. doi: 10.1016/j.ijcrp.2024.200338. PMID: 39734497; PMCID: PMC11681223.
9. Shiwani H., Davies R.H., Topriceanu C.C. et al. Demographic-Based Personalized Left Ventricular Hypertrophy Thresholds for Hypertrophic Cardiomyopathy Diagnosis. J. Am Coll Cardiol. 2025 Feb 25;85(7):685-695. doi: 10.1016/j.jacc.2024.10.082. Epub 2025 Jan 8. PMID: 39772357.
10. Izabela Tuleta, Nikolaos G. Frangogiannis. Fibrosis of the diabetic heart: Clinical significance, molecular mechanisms, and therapeutic opportunities. Advanced Drug Delivery Reviews, Volume 176, 2021, ISSN 0169-409X. https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.113904.
11. Wu P.Y., Huang J.C., Chen S.C., Chen L.I. Type 2 diabetes mellitus-related changes in left ventricular structure and function in patients with chronic kidney disease. Oncotarget. 2018 Feb 13;9(18):14661-14668. doi: 10.18632/oncotarget.24482. PMID: 29581872; PMCID: PMC5865698.
12. Somaratne J.B., Whalley G.A., Poppe K.K., ter Bals M.M., Wadams G., Pearl A., et al. Screening for left ventricular hypertrophy in patients with type 2 diabetes mellitus in the community. Cardiovasc Diabetol. 2011; 10:29. doi: 10.1186/1475-2840-10-29.
13. Cuspidi C., Sala C., Negri F., Mancia G., Morganti A. Prevalence of left-ventricular hypertrophy in hypertension: an updated review of echocardiographic studies. J Hum Hypertens. 2012;26(6):343–349. doi: 10.1038/jhh.2011.104.
14. Bahrami H.S.Z., Jørgensen P.G., Hove J.D., Dixen U., Rasmussen L.J.H., Eugen-Olsen J., Rossing P., Jensen M.T. Association between interleukin-6, suPAR, and hsCRP with subclinical left ventricular dysfunction in type 1 diabetes: The Thousand & 1 study. Diabetes Res Clin Pract. 2025 Apr; 222:112071. doi: 10.1016/j.diabres.2025.112071. Epub 2025 Mar 3. PMID: 40043809.
15. Liu S., Ke J., Feng X., Xu Y., Zhu L., Yang L., Zhao D. Diabetic microvascular complications are associated with left ventricular hypertrophy in patients with type 2 diabetes mellitus. J Diabetes Complications. 2025 Feb;39(2):108947. doi: 10.1016/j.jdiacomp.2024.108947. Epub 2024 Dec 29. PMID: 39823781.
16. Xie L.J., Dong Z.H. et al. Assessment of left ventricular deformation in patients with type 2 diabetes mellitus by cardiac magnetic resonance tissue tracking. Sci Rep. 2020 Aug 4;10(1):13126. doi: 10.1038/s41598-020–69977-x. PMID: 32753616; PMCID: PMC7403307.]
17. Mo B., Ding Y., Ji Q. NLRP3 inflammasome in cardiovascular diseases: an update. Front Immunol. 2025 Feb 26; 16:1550226. doi: 10.3389/fimmu.2025.1550226. PMID: 40079000; PMCID: PMC11896874.
18. Zuo L., Prather E.R., Stetskiv M., Garrison D.E., Meade J.R., Peace T.I., Zhou T. Inflammaging and Oxidative Stress in Human Diseases: From Molecular Mechanisms to Novel Treatments. Int J Mol Sci. 2019 Sep 10;20(18):4472. doi: 10.3390/ijms20184472. PMID: 31510091; PMCID: PMC6769561.
19. Yamagishi S.I., Matsui T. Role of Hyperglycemia-Induced Advanced Glycation End Product (AGE) Accumulation in Atherosclerosis. Ann Vasc Dis. 2018 Sep 25;11(3):253-258. doi: 10.3400/avd.ra.18-00070. PMID: 30402172; PMCID: PMC6200622.
20. Mouliou D.S. C-Reactive Protein: Pathophysiology, Diagnosis, False Test Results, and a Novel Diagnostic Algorithm for Clinicians. Diseases. 2023 Sep 28;11(4):132. doi: 10.3390/diseases11040132. PMID: 37873776; PMCID: PMC10594506.
21. Mitsis A., Sokratous S., Karmioti G., Kyriakou M. et al. The Role of C-Reactive Protein in Acute Myocardial Infarction: Unmasking Diagnostic, Prognostic, and Therapeutic Insights. J Clin Med. 2025 Jul 7;14(13):4795. doi: 10.3390/jcm14134795. PMID: 40649166; PMCID: PMC12250735.
22. Role of C-Reactive Protein at Sites of Inflammation and Infection / N.R. Sproston, J.J. Ashworth // Front Immunol. Amara M., Stoler O., Birati E.Y. The Role of Inflammation in the Pathophysiology of Heart Failure. Cells. 2025 Jul 21;14(14):1117. doi: 10.3390/cells14141117. PMID: 40710370; PMCID: PMC12293573.
23. Jia G., Aroor A.R., Hill M.A., Sowers J.R. Role of Renin-Angiotensin-Aldosterone System Activation in Promoting Cardiovascular Fibrosis and Stiffness. Hypertension. 2018 Sep;72(3):537–548. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.118.11065. PMID: 29987104; PMCID: PMC6202147.
24. Gallo G., Rubattu S., Volpe M. Mitochondrial Dysfunction in Heart Failure: From Pathophysiological Mechanisms to Therapeutic Opportunities. Int J Mol Sci. 2024 Feb 25;25(5):2667. doi: 10.3390/ijms25052667. PMID: 38473911; PMCID: PMC10932393.
25. Habibi D., Daneshpour M.S., Asgarian S. et al. Effect of C-reactive protein on the risk of Heart failure: a mendelian randomization study. BMC Cardiovasc Disord. 2023 Mar 7;23(1):112. doi: 10.1186/s12872-023-03149-3. PMID: 36882679; PMCID: PMC9993577.
26. Shah A.S., Isom S., Dabelea D., D'Agostino R.Jr. et al. A cross sectional study to compare cardiac structure and diastolic function in adolescents and young adults with youth-onset type 1 and type 2 diabetes: The SEARCH for Diabetes in Youth Study. Cardiovasc Diabetol. 2021 Jul 7;20(1):136. doi: 10.1186/s12933-021-01328-0. PMID: 34233679; PMCID: PMC8265135.

© Усеинова Реан Хайриевна (rean98@mail.ru); Белоглазов Владимир Алексеевич (biloglazov@mail.ru);
Яцков Игорь Анатольевич (egermd@yandex.ru); Агеева Елизавета Сергеевна (ageevaeliz@rambler.ru);
Репинская Ирина Николаевна (repinskaya.irina@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

Наши авторы

Aberyasev A. — postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Plekhanov Russian University of Economics

Ageeva E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Aibazova F. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, North Caucasus State Academy, Karachay-Cherkess Republic, Cherkessk

Akhmedov R. — Oncologist, Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University

Alekseev A. — Postgraduate student, Moscow State University of Technologies, and Management, named after K.G. Razumovsky, Moscow

Alibekov I. — Candidate of Medical Sciences, Surgut State University; Otorhinolaryngologist, Surgut City Clinical Polyclinic No. 3

Aliyeva M. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Babasanova N. — Bauman Moscow State Technical University

Bakanova N. — Doctor of Engineering, Associate Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow

Balter R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Batralieva A. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Beksultanova A. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Beloglazov V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Belousov A. — Doctor of Medical Sciences, Deputy Chief Medical Officer, N.I. Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University

Our authors

Bit-Sava E. — Doctor of Medical Sciences, Professor, St. Petersburg State Pediatric Medical University; Head of the department, oncologist, St. Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialized Types of Medical Care (Oncological) named after N.P. Napalkov

Bogdasarov A. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Ulyanovsk State University

Bukurova V. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Chekaev N. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Penza State Agrarian University

Chernysheva E. — Doctor of Medical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Chikaev R. — Plekhanov Russian University of Economics, Higher School of Cybertechnologies, Mathematics and Statistics, Moscow

Dankov M. — N.N. Burdenko Voronezh State Medical University

Darvin V. — Doctor of Medical Sciences, Professor, University of KhMAO-Yugra Surgut State University

Dashyan G. — MD, Oncologist, Head of the Oncological Department No. 1 of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

Dzhabrailova M. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Elizov M. — Senior Software Engineer, «DEP Company» LLC, Moscow

Gabriela Guadalupe Chavez Quiroz — Graduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Gadzhimuradov S. — Postgraduate student, Otorhinolaryngologist, Surgut District Clinical Hospital

Garbul A. — Candidate of Biology, Docent, Murmansk Arctic University

Garbul E. — Researcher, Murmansk Marine Biological Institute

Garyutin I. — Senior Lecturer, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Gerasimov A. — Senior lecturer, Togliatti State University

Gidinda Grace Muchigo — Postgraduate student, Ufa University of Technology and Science

Golia R. — Electronic Engineer, ANO VO «RosNOU», RNTGEN-COMPLET, Moscow

Gorodovenko O. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Goryachkin B. — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University

Gryzlov V. — Emperor Peter I Voronezh State Agrarian University

Guliyeva G. — Radiotherapist, A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology

Ilchenko O. — Post-graduate student, Samara State Medical University; Doctor-obstetrician-gynecologist GBUZ SO SGP N° 3, Samara

Ishchenko N. — Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk

Ivanov D. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Neonatologist of the Russian Ministry of Health, Rector, St. Petersburg State Pediatric Medical University

Ivanov S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology; Peoples' Friendship University of Russia

Ivanov Yu. — Candidate of Science, associate Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Ivanova T. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Samara State Medical University

Ivchenko D. — Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University

Janibekova A. — Candidate of Medical Sciences, Medical Institute North Caucasus State Academy, Karachay-Cherkess Republic, Cherkessk

Janibekova L. — Candidate of Medical Sciences, Cardiologist, Karachay-Cherkess Republican Clinical Hospital; Chief Freelance Cardiologist, Ministry of Health of the Karachay-Cherkess Republic; Associate Professor, North Caucasus State Academy, Karachay-Cherkess Republic, Cherkessk

Kanev A. — Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University

Kapralov S. — Doctor of Medicine Sciences, associate professor, Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky

Kaprin A. — Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director General, National Medical Research Center of Radiology; Peoples' Friendship University of Russia; P.A. Herzen Moscow Scientific Research Oncological Institute, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology

Kashikhin A. — University «Reaviz», Saint Petersburg

Khabuzov V. — Candidate of Technical Sciences, Technical Director, New Line LLC Limited Liability Company, Saint-Petersburg

Khrychev D. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Russian Technological University MIREA

Kleimenov A. — Graduate student, Russian Presidential Academy of National Economy, and Public Administration

Korol E. — Researcher, FKUZ «Volgograd Anti-Plague Research Institute» of Rospotrebnadzor

Koroleva I. — Nizhny Novgorod State Technical University

Koryagin Yu. — Candidate in Agricultural Sciences, Associate professor, Penza State Agrarian University

Koryagina N. — Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Penza State Agrarian University

Kotenko E. — University «Reaviz», Saint Petersburg

Kozhukhova E. — Senior lecturer, Murmansk Arctic University

Krikunova L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher, A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology

Kuchay Arshed Ahmad — Limb Salvage Center, City Hospital № 14; Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Kucherov V. — Candidate of Medical Sciences, A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology

Kuznetsova T. — Researcher, FKUZ «Volgograd Anti-Plague Research Institute» of Rospotrebnadzor

Lazakovich A. — Oncologist at the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

Leonova O. — Candidate of Technical Sciences, Docent, University Saint-Petersburg State University Architecture and Civil Engineering

Lipin A. — Limb Salvage Center, City Hospital № 14; Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Litvinova M. — Candidate of Biology, Docent, Murmansk Arctic University

Makarevich E. — Candidate of Biology, Head of the Department of Microbiology and Biochemistry, Murmansk Arctic University

Mikheeva V. — Bauman Moscow State Technical University

Mkrtchyan L. — Doctor of Medical Sciences, A.F. Tsyba Medical Radiological Research Center, branch of the Federal State Budgetary Institution National Medical Research Center of Radiology

Mohammad Hani — Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Montina I. — Candidate of Biological Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Omsk State Pedagogical University

Murtazaeva A. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Mutausova D. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Onishchenko S. — Doctor of Medical Sciences, Professor, University of KhMAO-Yugra Surgut State University

Osipova O. — Candidate of Medical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Medical University

Pak V. — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

Parsadanyan A. — Doctor of Medical Sciences, Surgut State University; Medical Oncologist, Surgut District Clinical Hospital

Petrunkin R. — University «Reaviz», Saint Petersburg

Podgornyaya M. — Samara State Medical University

Polidanov M. — Advisor to the Russian Academy of Natural Sciences (RANS), research department specialist, University «Reaviz», Saint Petersburg

Polskikh S. — Candidate of Biological Sciences, Emperor Peter I Voronezh State Agrarian University

Provolukin V. — N.N. Burdenko Voronezh State Medical University

Ratushnyak A. — University «Reaviz», Saint Petersburg

Repinskaya I. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Rozhdestvensky E. — Directory, Fcuz «Altai Emergency Department» of Rospotrebnadzor, Gorno-Altaysk

Rubekina Ju. — Development Engineer, LLC «Mediana», Saint-Petersburg

Rumyantsev E. — Senior Lecturer, Yaroslav the Wise Novgorod State University

Samokhin M. — Volgograd State Technical University

Sashenkova S. — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Penza State Agrarian University

Savelev M. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Savelyev E. — Graduate student, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design

Sharonov P. — Graduate student, Gagarin Yuri State Technical University of Saratov

Sharov T. — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, FKUZ «Volgograd Anti-Plague Research Institute» of Rospotrebnadzor

Shaykhelislamova L. — Plastic surgeon at the N.I. Pirogov Clinic of High Medical Technologies, St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russia)

Shestakova E. — Postgraduate Student, Yaroslav the Wise Novgorod State University

Shishulina M. — Surgeon, Surgut Clinical Traumatology Hospital

Shkitronov M. — Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Conseqences of Natural Desasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev

Shkokov I. — Master of Science, Institut Polytechnique des Sciences Avancées, (Paris, France)

Shvetsova V. — Candidate of Technical Sciences, Docent, University Saint-Petersburg State University Architecture and Civil Engineering

Sidelnikov V. — Candidate of Technical Sciences, Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design

Skryl S. — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Bauman Moscow State Technical University

Sorokin V. — Volgograd State Technical University

Sozonov D. — Ural State Medical University, Yekaterinburg

Sulimanov R. — Associate Professor, Yaroslav the Wise Novgorod State University

Sulimanov R. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Yaroslav the Wise Novgorod State University

Sultanova O. — Candidate of Medical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Suzdaltsev S. — Senior Lecturer, Yaroslav the Wise Novgorod State University

Tarasova V. — Nizhny Novgorod State Agricultural Academy named after L.Ya. Florentyev

Teteryatnikova N. — Researcher, FKUZ «Volgograd Anti-Plague Research Institute» of Rospotrebnadzor

Timashov E. — Surgeon, «Madez» Women's Health Center"

Tselkovich L. — Doctor of Medical Sciences, Professor, Samara State Medical University

Tsvetkov V. — Graduate student, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design

Tyryshkin Se. — Candidate of Technical Sciences, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul

Useinova R. — Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Uzdenov M. — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, North Caucasus State Academy, Karachay-Cherkess Republic, Cherkessk

Vinogradova A. — Russian Technological University MIREA

Vinogradova E. — Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Voinov N. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Yatskov I. — Candidate of Medical Sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Zarandia N. — Resident, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Astrakhan State Medical University

Zasorin A. — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Ural State Medical University, Yekaterinburg

Zykova N. — Traumatology Hospital, Surgut Postgraduate student, Surgut State University, Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra; Traumatologist, Surgut Clinical Traumatology Hospital

Требования к оформлению статей, направляемых для публикации в журнале

Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе "Антиплагиат".

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением ".doc", или ".rtf", шрифт 14 Times New Roman.
- Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускается.
- Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- Литература составляется в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.
- Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0-11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные — 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики» (e-mail: redaktor@nauteh.ru).