

# ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СТАТУСА НАСЕЛЕНИЯ МЕГАПОЛИСА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

**Швец Юрий Юрьевич**

Старший научный сотрудник, кандидат экономических наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. г. Москва  
jurijswets@yahoo.com

## ECOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL ASSESSMENT OF THE MICROELEMENT STATUS OF THE MEGAPOLIS POPULATION UNDER CONDITIONS OF TECHNOGENIC LOAD

**Yu. Shvets**

*Summary.* The study is devoted to a systematic analysis of the formation of the microelement status of the adult population of a large industrial metropolis under conditions of technogenic and socio-economic load. Based on a retrospective analysis of data from more than 20,000 residents of the Moscow region (2019–2022), a comprehensive assessment was conducted using blood serum and hair as substrates, employing AAS and ICP-MS methods.

A persistent deficiency of zinc and selenium was identified in 30–40 % of the population, indicating «hidden hunger.» A direct correlation was found between the growth of investment activity and the accumulation of copper, while an inverse correlation was observed with lead. Economic factors, especially inflation, negatively affect the sufficiency of zinc and iron.

It is concluded that the microelement profile is formed under the influence of «risk scissors»: the technogenic environment increases the level of urbanization markers, while economic constraints deplete the diet. The results justify the need for implementing a regional biomonitoring system for health risk management.

*Keywords:* human ecology, obesity, ecology, microelement status, heavy metals, zinc, selenium, technogenic load, biomonitoring.

*Аннотация.* Исследование посвящено системному анализу формирования микроэлементного статуса взрослого населения крупного промышленного мегаполиса в условиях техногенной и социально-экономической нагрузки. На основе ретроспективного анализа данных более 20000 жителей Московского региона (2019–2022 гг.) проведена комплексная оценка по сыворотке крови и волосам методами ААС и ИСП-МС.

У 30–40 % популяции выявлен устойчивый дефицит цинка и селена, указывающий на «скрытый голод». Обнаружена прямая корреляция между ростом инвестиционной активности и накоплением меди, а обратная — со свинцом. Экономические факторы, особенно инфляция, негативно влияют на обеспеченность цинком и железом.

Сделан вывод, что микроэлементный профиль формируется под воздействием «ножниц рисков»: техногенная среда повышает уровень урбанизационных маркеров, а экономические ограничения истощают рацион. Результаты обосновывают необходимость внедрения регионального биомониторинга для управления рисками здоровья.

*Ключевые слова:* экология человека, ожирение, экология, микроэлементный статус, тяжелые металлы, цинк, селен, техногенная нагрузка, биомониторинг.

### Введение

Современная экологическая повестка все чаще рассматривает здоровье человека не изолированно, а как результат сложного взаимодействия с геохимической средой. В условиях урбанизированных территорий почвенный покров и водные ресурсы испытывают колоссальное давление, становясь аккумуляторами техногенных загрязнений. Как справедливо отмечают исследователи, формируется своего рода «экологическая воронка»: промышленные выбросы трансформируют элементный состав почв, что неизбежно сказывается на качестве трофических цепей и, в конечном итоге, на нутриентном статусе населения.

Представляется очевидным, что в крупных мегаполисах проблема приобретает двойственный характер. С одной стороны, мы наблюдаем феномен «скрытого голода» — парадоксального состояния, при котором на фоне достаточной калорийности рациона сохраняется хронический дефицит эссенциальных микроэлементов, таких как, например, цинк, селен или железо [12, 19].

С другой стороны, интенсивная антропогенная нагрузка повышает риски накопления токсичных металлов (кадмия, свинца, ртути), которые действуют как эндокринные дизрапторы и вмешиваются в фундаментальные метаболические процессы [7, 16].

Особую тревогу вызывает тот факт, что загрязнение окружающей среды нередко носит латентный характер.

В зонах интенсивной промышленной нагрузки и активных инвестиционных циклов формируются устойчивые геохимические аномалии. При этом существующие нормативы не всегда успевают реагировать на динамику загрязнения, а население продолжает испытывать воздействие так называемой «молчаливой метаболической нагрузки».

Следует отметить, что традиционные биомедицинские подходы часто игнорируют экологический контекст, фокусируясь лишь на клинических проявлениях. Однако анализ литературы показывает необходимость интеграции данных мониторинга среды и биомедицинской статистики [2, 18]. География проживания, качество воды и уровень техногенного прессинга становятся равнозначными участниками формирования здоровья, наравне с генетикой и образом жизни.

Цель исследования — провести эколого-физиологический анализ микроэлементного статуса взрослого населения Московской области за период 2019–2022 гг., выявив характерные дисбалансы эссенциальных и токсичных элементов в контексте социально-экологических факторов среды.

#### Материалы и методы исследования

В основу работы положен ретроспективный наблюдательный дизайн с элементами панельного анализа. Такой подход позволил использовать обширный массив накопленных данных без прямого вмешательства в клинические процессы, что соответствует современным стандартам эпидемиологических исследований [17].

Исследование базируется на деперсонализированных данных лабораторных обследований жителей Московской области. Общий массив содержит данные более чем 20000 пациентов, период наблюдения охватывает 2019–2022 годы.

Для оценки элементного статуса использовались два биологических субстрата, отражающих разные временные горизонты экспозиции:

1. Сыворотка крови — маркер текущего функционального состояния и краткосрочного баланса элементов.
2. Волосы — биосубстрат, аккумулирующий информацию о долговременном накоплении веществ и позволяющий оценить хроническую нагрузку токсикантами [6, 18].

Определение концентраций проводилось методами атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Данные технологии признаны «золотым стандартом» для многокомпонентного анализа в клинической и экологической практике [19].

В работе анализировались данные по 27 химическим элементам, включая эссенциальные (Zn, Fe, Se, Cu, Mn и др.) и токсичные (Pb, Cd, As, Ni). Для унификации результатов, полученных разными методами, применялась процедура нормирования относительно референсных лабораторных диапазонов. Это позволило перевести абсолютные концентрации в безразмерные индексы отклонения, где значения  $|S| > 0,5$  интерпретировались как значимый выход за пределы нормы.

Для выявления взаимосвязей между уровнем микроэлементов и факторами внешней среды (индикаторами экономической активности, техногенной нагрузки) использовался корреляционный анализ по Спирмену. Данный метод выбран ввиду ненормального распределения большинства экологических переменных. В качестве маркеров состояния среды использовались официальные данные Росстата по региону: валовой региональный продукт (ВРП), объем инвестиций в основной капитал (как индикатор промышленной активности) и индекс потребительских цен [8].

#### Результаты

Первичный анализ полученных данных позволил выявить неоднородную картину. Если обеспеченность макроэлементами (натрием, калием, кальцием) в целом оставалась стабильной и соответствовала физиологическим нормам, то ситуация с микроэлементами оказалась тревожной. Мы обнаружили, что значительная часть взрослого населения мегаполиса находится в состоянии хронического микронутриентного дисбаланса.

Особенно показательно распределение отклонений по эссенциальным элементам. Данные свидетельствуют, что такие ключевые для иммунитета и антиоксидантной защиты металлы, как цинк и селен, находятся в дефиците у трети обследованных (Таблица 1).

Полученные нами цифры демонстрируют высокую сходимость с результатами других крупных популяционных исследований. В частности, В.М. Коденцова и соавт., анализируя витаминно-минеральный статус населения Центрального федерального округа, также фиксировали недостаточность эссенциальных элементов у 22–38 % взрослого трудоспособного населения [3]. Это позволяет утверждать, что выявленный нами дефицит является не локальной аномалией, а маркером системного неблагополучия.

Клиническая значимость этих отклонений крайне высока. Хронический дефицит цинка, зафиксированный у трети выборки, выступает доказанным фактором риска метаболических расстройств: он нарушает синтез и секрецию инсулина, способствуя развитию инсулинорезистентности [4, 21]. Ситуация усугубляется на фоне не-

Таблица 1.  
Характеристика обеспеченности населения  
ключевыми микроэлементами  
(по материалам выборки 2019–2022 гг.)

Группа элементов	Элемент	Преобладающий статус	Характеристика отклонения в выборке
Критические эссенциальные	Цинк (Zn)	Дефицит	Отклонение к нижней границе нормы или явный дефицит фиксируется у 35–40 % пациентов.
	Селен (Se)	Дефицит	Недостаточность выявлена более чем у 30 % обследованных.
Пограничные состояния	Железо (Fe)	Нижняя граница	Около 15–20 % выборки имеют показатели на пределе нормы.
	Медь (Cu)	Нижняя граница	Тенденция к снижению, особенно выраженная в 2021–2022 гг.
Токсичные (маркеры среды)	Свинец (Pb)	Накопление	Выявляются субклинические уровни накопления, коррелирующие с техногенной нагрузкой.
	Кадмий (Cd)	Накопление	Периодические всплески концентраций.

*Примечание:* Составлено авторами по результатам лабораторного скрининга.

достатка селена, который критически ослабляет систему антиоксидантной защиты (снижение активности глутатионпероксидазы) и повышает уязвимость организма к вирусным инфекциям и окислительному стрессу [1, 17].

Особую обеспокоенность вызывает статус селена в контексте среды. Наши данные коррелируют с выводами межгосударственных программ по биогеохимии, в которых В.В. Ермаков указывает на прогрессирующее обеднение почв селеном в агробиоценозах [11]. Что касается пограничных состояний по железу и меди, то они формируют скрытую угрозу адаптационному потенциалу. Даже без клинической картины анемии, снижение тканевых запасов железа приводит к митохондриальной дисфункции и хронической утомляемости, а дефицит меди нарушает процессы кроветворения и синтеза соединительной ткани [10].

Возникает закономерный вопрос о драйверах этих изменений. Чтобы оценить вклад среды, мы сопоставили данные биомониторинга с макроэкономическими показателями развития региона — в частности, с динамикой инвестиций в основной капитал. Инвестиции в мегаполисе выступают маркером интенсивности строительства

и промышленной активности, то есть косвенным индикатором техногенного давления.

Результаты корреляционного анализа (Рисунок 1) выявили четкую закономерность. Данные тепловой карты позволяют сделать вывод, что экономический рост сопровождается качественным изменением профиля техногенной нагрузки.

Мы наблюдаем максимально сильную положительную корреляцию ( $r=1,0$ ) между объемом инвестиций и уровнем накопления меди (Cu), молибдена (Mo) и вольфрама (W). Этот комплекс элементов является характерным маркером современной урбанизированной среды: медь ассоциирована с интенсивным трафиком, а молибден и вольфрам — с промышленными и строительными технологиями. Рост инвестиций, отражающий активизацию строительства и транспортных потоков, закономерно приводит к увеличению экспозиции населения именно к этим металлам.

В то же время для целой группы элементов, включая свинец (Pb), марганец (Mn) и железо (Fe), зафиксирована сильная обратная корреляция ( $r=-1,0$ ). Снижение уровня свинца на фоне роста инвестиций может свидетельствовать о положительном эффекте модернизации инфраструктуры: новые проекты способствуют замене устаревших технологий и снижению активности «устаревших» источников загрязнения.

При этом зарубежные исследователи (С. Huang et al.) отмечают, что подобная смена элементного профиля несет свои риски. Воздействие накапливающихся токсичных металлов (в нашем случае — W, Mo) может усиливаться на фоне дефицита эссенциальных протекторов [15].

### Обсуждение

Полученные данные о широкой распространенности дисбаланса цинка и селена находят подтверждение в работах, посвященных биомониторингу населения Центральной России. В частности, исследования В.М. Коденцовой и соавт. свидетельствуют, что полигиповитаминозы и недостаточность эссенциальных элементов — это системная проблема для всего Центрального федерального округа, где частота дефицитных состояний достигает 38 % [3]. Природу этого явления целесообразно рассматривать через призму биогеохимии. Как отмечается в работах В.В. Ермакова, в агробиоценозах наблюдается прогрессирующее обеднение почв подвижными формами селена [11]. Это создает первичный экологический дефицит в трофической цепи «почва — растение — продукт питания», который невозможно компенсировать без специализированных агротехнических или диетологических интервенций.

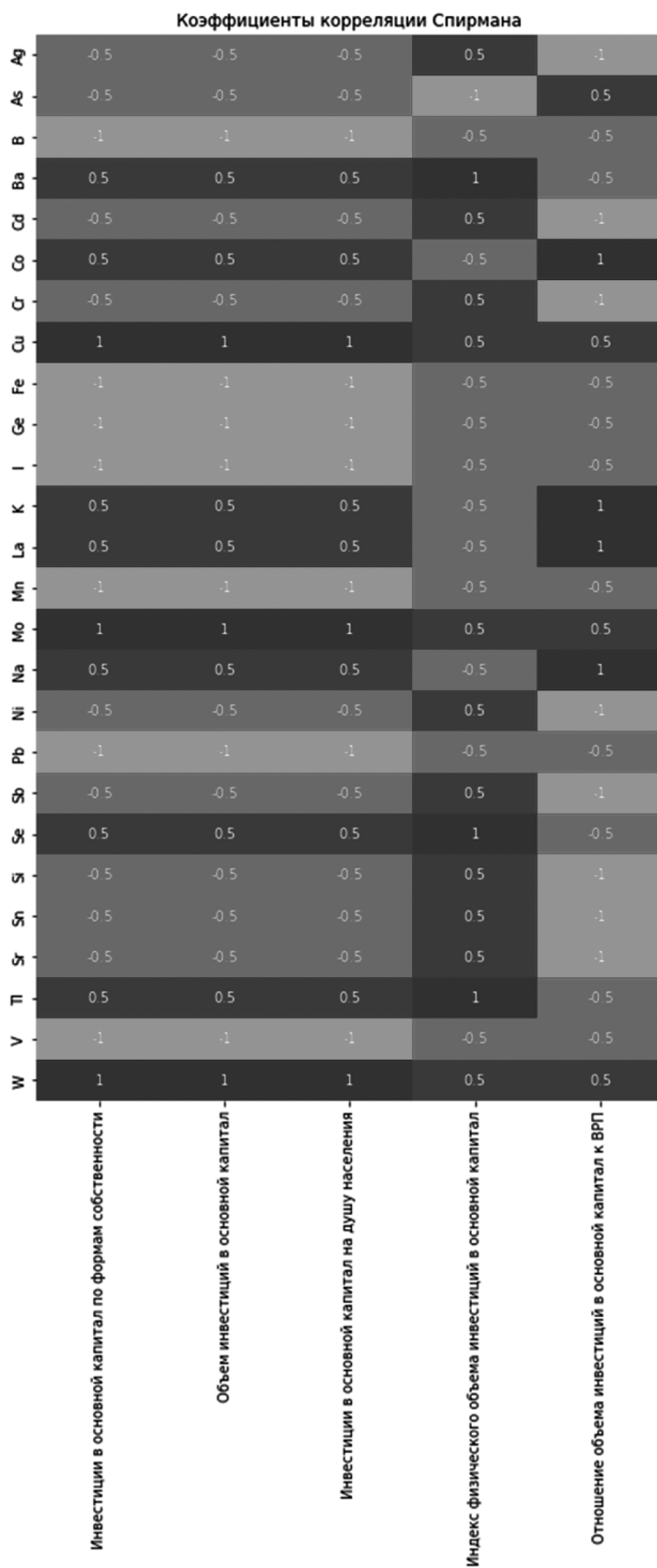


Рис. 1. Корреляционная взаимосвязь между показателями инвестиционной активности и накоплением химических элементов

Особое внимание следует уделить интерпретации техногенного влияния. Зафиксированная нами связь инвестиционной активности с накоплением специфических металлов согласуется с данными А.В. Скального и соавт., доказавших высокую информативность волос как индикатора географической вариативности загрязнения в промышленных регионах [18]. Однако главная угроза кроется не столько в самом наличии токсикантов, сколько в их сочетании с микронутриентной недостаточностью. Зарубежные исследования (С. Huang et al.) указывают на синергический эффект: токсичность свинца и других техногенных металлов многократно возрастает на фоне дефицита протекторов — цинка и железа. Таким образом, наблюдаемая нами картина (рост Cu/W/Mo при низком Zn/Se) формирует профиль повышенного метаболического риска.

Экономическая детерминанта этого процесса (отрицательная связь инфляции и обеспеченности нутриентами) укладывается в концепцию «городского недоедания», описанную экспертами FAO [12]. Несмотря

на сравнительно высокие доходы населения мегаполиса, структура потребления смещается в сторону рафинированных продуктов с низкой биологической ценностью, что и провоцирует феномен «скрытого голода» даже при избыточной калорийности рациона [20].

### Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать, что микроэлементный профиль жителя современного мегаполиса формируется под перекрестным воздействием экологической нагрузки и экономических ограничений. Доказано, что интенсификация урбанистических процессов сопряжена не только с трансформацией внешней среды, но и с качественным изменением элементного статуса населения: происходит накопление специфических техногенных маркеров на фоне критического снижения обеспеченности эссенциальными протекторами. Таким образом, биосубстраты человека выступают чувствительным индикатором как индустриальных циклов, так и социально-экономической конъюнктуры региона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Батырова Г., Тлегунова Ж., Умарова Г. и др. Микроэлементный статус взрослого населения Западного Казахстана // Экология человека. 2021. Т. 28. № 11. С. 42–49.
2. Горбунов А.В., Ушакова Е.Н. Микроэлементы в водах и волосах жителей различных регионов России // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99. № 12. С. 1356–1362.
3. Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В., Никитюк Д.Б. Микронутриентный статус населения Российской Федерации и возможность его коррекции. Состояние проблемы // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 4. С. 113–124.
4. Лавренова Е.А., Драпкина О.М. Роль цинка в развитии инсулинорезистентности и сахарного диабета 2 типа // Эндокринология: новости, мнения, обучение. 2020. Т. 9. № 2. С. 64–71.
5. Омарова С.О., Абдуллаева Н.М., Магомедова М.А. Влияние дисбаланса микроэлементов в питьевой воде на заболеваемость населения (на примере Республики Дагестан) // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. № 1. С. 145–153.
6. Скальный А.В. Микроэлементы: бодрость, здоровье, долголетие. М.: Эксмо, 2018. 304 с.
7. Ульзетуева И.Д., Намжилова А.Ю. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова и здоровья населения в зоне влияния Гусиноозерского промышленного узла // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022. № 4. С. 45–54.
8. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Валовой региональный продукт. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 21.11.2025).
9. Balk E.M., Tatsioni A., Lichtenstein A.H. et al. Effect of chromium supplementation on glucose metabolism and lipids: a systematic review of randomized controlled trials // Diabetes Care. 2007. Vol. 30. № 8. P. 2154–2163.
10. Cepeda-Lopez A.C., Melse-Boonstra A., Zimmermann M.B. et al. In overweight and obese women, dietary iron absorption is reduced and the enhancement of iron absorption by ascorbic acid is one-half that in normal-weight women // American Journal of Clinical Nutrition. 2015. Vol. 102. № 6. P. 1389–1397.
11. Ermakov V.V., Jovanovic L. Selenium deficiency as a consequence of human activity and its correction // Journal of Geochemical Exploration. 2010. Vol. 107. № 2. P. 193–199.
12. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome: FAO, 2020.
13. Geisler C.E., Ghimire S., Hepler C. et al. Copper accumulation in the liver correlates with steatosis and fibrosis // Nutrients. 2021. Vol. 13. № 5. P. 1517.
14. Guerrero-Romero F., Rodríguez-Morán M. Magnesium improves the beta-cell function to compensate variation of insulin sensitivity: double-blind, randomized clinical trial // European Journal of Clinical Investigation. 2011. Vol. 41. № 4. P. 405–410.
15. Huang C., Gao E., Xiao F. et al. The relative and interactive effects of urinary multiple metals exposure on hyperuricemia among urban elderly in China // Frontiers in Public Health. 2023. Vol. 11. Article 1015202.
16. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 p.
17. Rocourt C.R., Cheng W.H. Selenium supranutrition: are the potential benefits of chemoprevention outweighed by the acute risk of type 2 diabetes? // Nutrients. 2013. Vol. 5. № 4. P. 1349–1365.
18. Skalny A., Burtseva T.I., Salnikova E.V., Ajsuvakova O.P. Geographic variation of environmental, food, and human hair selenium content in an industrial region of Russia // Environmental Research. 2019. Vol. 171. P. 293–301.
19. Stevens G.A., Beal T., Mbuya M.N. et al. Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide // The Lancet Global Health. 2022. Vol. 10. № 11. e1590–e1599.
20. Tunakova Y.A., Galimova A.R., Valiev V.S. Assessment of the impact of the elemental composition of drinking water on the health of the population // Journal of Water Chemistry and Technology. 2021. Vol. 43. № 3. P. 298–307.
21. Yarıbeygi H., Sathyapalan T., Atkin S.L., Sahebkar A. Molecular mechanisms linking Zn deficiency to insulin resistance // Journal of Diabetes Research. 2019. Vol. 2019. Article 8681763.