

ПОДХОДЫ К ПОЧВЕННОЙ БИОИНДИКАЦИИ¹

APPROACHES TO SOIL BIOINDICATION

A. Konovalov
P. Fursova
D. Risnik

Summary. The soil is a polydisperse multiphase multicomponent system, populated as a result of organisms of different taxonomic affiliation, size groups and physiological requirements to the environment, but the most well developed Botanical methods of phytoindication and soil diagnosis. Based on the analysis of the structure of plant communities and physiological reactions of individual plants can identify the classification of soil, the dominant soil-forming processes, to determine the main indicators of soil condition.

This article presents the main approaches to soil bioindication. This overview of the method of bioindication and existing areas of bioindication of soils. The types of invertebrates and microorganisms used as indicators are presented in the most detail.

Keywords: soil bioindication, habitat, invertebrates, microorganisms.

Коновалов Алексей Глебович

МГУ имени М. В. Ломоносова

Фурсова Полина Викторовна

К.б.н., с.н.с, МГУ имени М. В. Ломоносова

Рисник Дмитрий Владимирович

К.б.н., в.н.с, МГУ имени М. В. Ломоносова

biant3@mail.ru

Аннотация. Почва представляет собой полидисперсную многофазную многокомпонентную систему, населённую вследствие этого организмами самой различной таксономической принадлежности, размерных групп и физиологических требований к среде обитания, но наиболее хорошо на настоящий момент разработаны ботанические методы фитоиндикации и диагностики почв. На основе анализа структуры растительных сообществ и физиологических реакций отдельных растений можно выявить классификационную принадлежность почв, доминирующие почвообразующие процессы, определить основные показатели состояния почвы.

В данной статье представлены основные подходы к биоиндикации почв. Даны общие сведения о самом методе биоиндикации и существующих направлениях биоиндикации почв. Наиболее подробно представлены используемые в качестве индикаторов виды беспозвоночных и микроорганизмов.

Ключевые слова: почвенная биоиндикация, среда обитания, беспозвоночные, микроорганизмы.

Общие сведения о почвенной биоиндикации

Почвенно-альгологическая диагностика построена на предположении о соответствии зональности группировок водорослей и зональности почв и растительности.

Основными инструментами зоологической биоиндикации являются крупные беспозвоночные и мелкие позвоночные.

Биологическая активность почвы определяется большим количеством показателей, среди которых общая микробная численность, численность основных групп почвенных микроорганизмов (почвенных, сапрофитных бактерий, актиномицетов, почвенных микромицетов), показатели интенсивности трансформации соединений углерода и азота в почве («дыхание» почвы, «санитарное число», динамика азота аммиака и нитратов в почве, азотфиксация, аммонификация, нитрификация

и денитрификация), динамика кислотности и окислительно-восстановительного потенциала в почве, активность ферментативных систем и другие показатели [Гигиеническая оценка..., 1999].

Под биологической индикацией понимают обнаружение и определение значимых природных и антропогенных нагрузок на среду на основе реакций на них обитающих в этой среде живых организмов [Мелехова, Егорова, 2007]. Биоиндикаторами служат организмы, присутствие, количество и особенности развития которых являются показателями естественных или антропогенно-обусловленных процессов, протекающих в среде, и показателями её состояния. Ценность конкретно взятого организма в качестве биоиндикатора определяется степенью интенсивности и характером проявления реакции, возникающей при воздействии стрессовых факторов. Индикаторы по типу проявления ответной реакции подразделяют на кумулятивные и чувствительные. Первые накапливают в своём организме вещества, поступающие в процессе антропогенного воздействия,

¹ Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-04-01024)

к примеру, тяжёлые металлы, в количествах, значительно превышающих их содержание в среде. Вторые демонстрируют специфическую морфофизиологическую реакцию на воздействие и отклонение состояния организма от жизненных норм.

Среди методов оценки состояния почв можно выделить фито индикацию, почвенно-альгологическую и зоологическую биоиндикацию, а также фиксирование показателей биологической активности почв.

Использование почвенных беспозвоночных для целей биоиндикации

Наиболее подходящими для целей биоиндикации являются крупные беспозвоночные — дождевые черви, многоножки, личинки насекомых. Стафилиниды рода *Bledius* и чернотелки рода *Belopus* показательны для солончаково-солонцовых почв, многоножки-кивсяки, мокрецы и лёгочные моллюски хорошо подходят для индикации содержания извести в почвах. В качестве индикаторов содержания кальция в грунтовых водах подходят некоторые проволоочники и дождевые черви *Octolaseum lacteum* [Мелехова, Егорова, 2007].

Хорошими организмами-биоиндикаторами являются почвенные нематоды. Так, в одном из исследований, проведённых в китайской пустыне, было выяснено, что состав сообществ почвенных нематод существенно зависит от времени, прошедшего с момента начала закрепления песков. В местах, где песок был закреплён 29 лет назад, была достигнута наибольшая численность бактериотрофных, микотрофных и всеядных нематод, равно как и общее их количество. На участках, где процесс закрепления песка начался за 13 и 18 лет до начала исследования, численность нематод была ниже, но выше, чем в активно перемещающихся дюнах [Karlen, Stott, 1994]. Анализ сообществ нематод в районе расположения комбината по переработке магниевого руды показал, что с удалением от комбината в сообществах возрастала сложность и полнота, происходило увеличение доли чувствительных к загрязнению всеядных и хищных нематод [Salamun, Kusanova, Brazova, 2014]. Также нематоды восприимчивы и к органическим загрязнителям. Численность и структура сообществ нематод зависит от обработки почвы — так, в исследовании было показано, что при внесении в почву навоза возрастает численность растительноядных нематод рода *Paratylenchus*, при этом численность и разнообразие остальных нематод резко снижается. Отсутствие удобрений или удобрение осадками сточных вод приводят к снижению общей численности, но увеличению разнообразия и более развитой структуре сообществ нематод. Таким образом, нематоды рода *Paratylenchus* могут служить своего рода

маркерами экологической деградации [Cenci, Jones, 2009].

Биомасса и видовой состав земляных червей также могут служить показателями качества почвы. На эти характеристики могут влиять влажность, различные почвенные характеристики, такие как гранулометрического состава почвы, присутствие специфических загрязняющих веществ, системы обработки почв [Pérès et al., 2006]. К примеру, для дождевых червей нежелательны как высокая доля песчаных частиц в почве [Pérès et al., 1998], так и сильная вспашка [Curry, Byrne, Schmitt, 2002]. Дождевые черви чувствительны к содержанию меди [Malecki, Neuhauser, Loehr, 1982], чьё поступление в почву в виде нитрата в количестве 100 мг/г заметно снижает репродукция червей *Eisenia foetida*.

Несмотря на особенности местообитания почвенные полости, поры и трещины, наличие которых характерно для практически любых почв микроартроподы тоже являются актуальным и эффективным почвенным биоиндикатором и могут быть использованы при почвенном экологическом мониторинге [Van Straalen, 2004]. Так, панцирные клещи, зависящие наряду с почвенными свойствами от состава растительности, вполне могут быть использованы для целей биоиндикации [Мелехова, Егорова, 2007]. Коллембол *Folsomia candida* наиболее часто используют в тестах по определению полулетальной дозы (LD-50) [Crommentuijn, Brils, Van Straalen, 1993]. У некоторых видов коллембол под влиянием меди и цинка, содержащихся в почве, падает продукция яиц [Tranvik, Bengtsson, Rundgren, 1993].

Использование почвенных позвоночных для целей биоиндикации

Мелкие позвоночные животные также могут быть использованы в целях биоиндикации состояния почвы, в частности, индикации загрязнения почв тяжёлыми металлами. Так, в исследовании, проведённом в 2012 году в Словении [Petkovšek, Kopušar, Krystufek, 2014], было показано, что содержание свинца и кадмия в печени у зверьков, пойманных у свинцового металлургического завода, превышало таковое, измеренное у зверей, отловленных около термальной станции и на контрольной площадке.

Показатели биологической активности почв как биоиндикаторы состояния почв

На основании измерения ферментативной активности почв, продуктов метаболизма микроорганизмов, микробной продуктивности и биомассы можно судить

о состоянии почвы. Биомасса почвенных микроорганизмов может быть определена на основе измерения количества специфических соединений, входящих в состав тел организмов или принимающих участие в их метаболизме. Биомасса водорослей может быть оценена путём измерения количества хлорофилла, бактерий — по количеству мурамовой кислоты, грибов — путём измерения количества хитина, эргостерола и т.д. Количество нуклеиновых кислот, ферментов, аминокислот также говорит о микробиологической активности почв [Мелехова, Егорова, 2007]. Микробная биомасса в почве зависит от множества условий. По данным австралийских исследователей, она обычно не превышает 600 мг/кг почвы, а чаще и 300 [Gonzalez-Quíñones et al., 2011]. Отечественные учёные [Гавриленко, Ананьева, Макаров, 2010] на основе анализа почти 300 почвенных образцов Московской области указывают, что достоверно высокое значение микробной биомассы — 548 мг/кг почвы, а достоверно низкое — 152 мг/кг почвы.

Почвенные слизевики *Dictyostelium discoideum* показали себя как перспективный биоиндикатор уровня загрязнения почв. У данных организмов есть ряд характерных особенностей. Во-первых, они лишены клеточной стенки, во-вторых, у них существует два пути в жизненном цикле. Первый путь, реализуемый в нормальных условиях, представляет собой простое деление, а другой активируется в условиях недостатка элементов питания и заключается в образовании включающих порядка сотни клеток агрегатов, которые развиваются в спорносящие плодовые тела. В одном из исследований, проведённых в провинции Павия, было выявлено, что количество плодовых тел снижается на почвах, подверженных обработке навозом или осадком сточных вод, в котором содержатся загрязняющие вещества. Чувствительность слизевика к загрязнению почвы сопоставима с таковой дождевого червя или коллемболы. Загрязнение почв может быть диагностировано при помощи применения слизевиков как *in vivo*, так и в лабораторных экспериментах типа «доза-эффект» [Cenci, Jones, 2009]. Хорошим биологическим индикатором может служить также генетически модифицированный вариант инфузории *Tetrahymena thermophilla*, в геном которой вживлён фрагмент, ответственный за синтез флуоресцирующего протеина. Синтез этого протеина происходит в ответ на стрессовое воздействие [Cenci, Jones, 2009].

Наконец, в качестве суммарных показателей биологической активности почв могут выступать интенсивность дыхания почвы, оцениваемая по выделению углекислого газа или поглощению кислорода, активность азотфиксации и нитрификации, оцениваемая по восстановлению ацетилена [Мелехова, Егорова, 2007]. Почвен-

ное дыхание зависит от множества факторов: температуры, влажности, микробного пула, времени суток и года. Тем не менее, для практического использования необходимо ввести границы, показывающие оптимальный диапазон значений данного показателя. В исследовании американских ученых [A Basic Guide for Interpreting Soil Test Values, 1997] указывается, что средние величины почвенного дыхания составляют 300–1200 мгСО₂/кг почвы в неделю. Низкие значения — до 300, высокие — свыше 1200 мгСО₂/кг почвы в неделю. Таким образом, оптимальный диапазон в пересчёте на дни — от 43 до 171 мгСО₂/кг почвы в день.

Заключение

Оценка состояния почвы методами биоиндикации позволяет определять её тип и плодородность, помогает в поисках природных ископаемых, может свидетельствовать о степени загрязнения окружающей природной среды и служит контролем ее качества и изменений.

Существует несколько направлений биоиндикации, среди которых наиболее развитым является фитоиндикация. Среди животных подходящими для целей биоиндикации организмами являются крупные беспозвоночные и микроартроподы. Особая роль принадлежит микроорганизмам, которые в значительной мере определяют ферментативную активность почв и интенсивность почвенного дыхания. Согласно исследованиям Объединенного исследовательского центра института окружающей среды и устойчивости (Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability) приоритетными биоиндикаторами состояния почв являются: обилие и разнообразие видов земляных червей, обилие и разнообразие коллембол, микробное дыхание [Environmental Assessment..., 2008; Bispo et al., 2009].

Подбирая виды для проведения биоиндикации, необходимо учитывать несколько факторов:

1. Роль в экосистеме. Почвенные организмы могут быть разделены на следующие группы [Kibblewhite, Ritz, Swift, 2008]: разлагатели (бактерии, грибы, микробы, детритофаги); важнейшие двигатели круговорота биогенных элементов (азотфиксаторы, микоризообразователи, водоросли); экосистемные «инженеры» (мега-, макрофауна, грибы, бактерии, водоросли); контролёры (хищники, сверхпаразиты, микробоядные).
2. Виды-стенобионты для целей биоиндикации предпочтительнее видов-эврибионтов.
3. Каждый вид имеет различную чувствительность к разным факторам среды, поэтому целесообразно использовать комплекс видов для индикации воздействий разной природы и более полной оценки экологического состояния среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриленко Е.Г., Ананьева Н. Д., Макаров О. А. Микробиологические показатели для экологической оценки почв территории (Московская область) // В кн.: Экологическое нормирование, сертификация и паспортизация почв как научная основа рационального землепользования: Междунар. Научно-практ. Конф. (с элементами научной школы для молодежи); 30 сентября — 01 октября 2010 г., М.: МАКС Пресс. 2010. С. 52–55.
2. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания. МУ 2.1.7.730–99
3. Мелехова О.П., Егорова Е. И. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. М.: Изд. центр «Академия», 2007. — 288 с.
4. A Basic Guide for Interpreting Soil Test Values. Woods End Research Laboratory, Mt Vernon, USA. URL: <https://woodsend.org/pdf-files/brinton2.pdf>, 1997.
5. Bispo A., Cluzeau D., Creamer R., Dombos M., Graefe U., Krogh P. H., Sousa J. P., Peres G., Rutgers M., Winding A. et al.: Indicators for monitoring soil biodiversity. // Integr. Environ Assess Manage, 2009. 5:717–719.
6. Cenci R.M., Jones R. J.A. Holistic approach to biodiversity and bioindication in soil. EUR23940 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, 2009. 43 pp.
7. Crommentuijn T., Brils J., Van Straalen N. M. Influence of cadmium on life-story characteristics of *Folsomia candida* (Willem) in an artificial soil substrate. Ecotox. Environ. Safe, 1993. 26, 216–227.
8. Curry, J.P., Byrne D., Schmitt O. Intensive cultivation can drastically reduce earthworm populations in arable land. Eur. J. Soil Biol, 2002. 38, 127–130.
9. Environmental Assessment of Soil for Monitoring Volume I: Indicators & Criteria. S. Huber, G. Prokop, D. Arrouays, G. Banko, A. Bispo, R.J.A. Jones, M. G. Kibblewhite, W. Lexer, A. Möller, R. J. Rickson, T. Shishkov, M. Stephens, G. Toth, J.J.H. Van den Akker, G. Varallyay, F.G.A. Verheijen, A. R. Jones (eds) / JRC Scientific and technical reports. 2008. 358 p.
10. Gonzalez-Quiñones V, Stockdale EA, Banning NC, Hoyle FC, Sawada Y, Wherrett AD, Jones DL, and Murphy DV. Soil microbial biomass — Interpretation and consideration for soil monitoring. Australian Journal of Soil Research, 2011. 49: 287–304.
11. Karlen, D.L., Stott, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W., et al. (Eds.), Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA and ASA, Madison, WI, 1994. pp. 53–72.
12. Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M. J. Soil health in agricultural systems. Phil. Trans. R. Soc. B, 2008. 363:685–701.
13. Malecki, M.R., Neuhauser E. F., Loehr R. C. The effects of metals on the growth and reproduction of *Eisenia foetida* (Oligochaeta, Lumbricidae). Pedobiologia, 1982. 24, 129–137.
14. Pérès, G., Cluzeau D., Curmi P. and Hallaire V. Earthworms activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems. Biology and Fertility of soil. 1998. 27, 247–424.
15. Pérès, G., Cluzeau D., Ferrand C., Peron D. Earthworms used as indicators of agricultural management. In: BIO-BIO Project. Biodiversity-Bioindication to evaluate soil health. R. M. Cenci and F. Sena (Eds). Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2006, EUR22245 EN, 107–115.
16. Petkovšek, S., Kopušar, N., Krystufek, B. Small mammals as biomonitors of metal pollution: a case study in Slovenia. Environ. Monit. Assess, 2014. 186(7):4261–74.
17. Salamun P., Kucanova E., Brazova T. Diversity and food web structure of nematode communities under high soil salinity and alkaline pH. Ecotoxicology, 2014. 23(8):1367–76.
18. Tranvik, L., Bengtsson G., Rundgren S. Relative abundance and resistance traits of two *Collembola* species under metal stress. J. Appl. Ecol., 1993. 30, 43–52.
19. Van Straalen, N. M. The use of soil invertebrates in ecological survey of contaminated soils. P. Doelman, H.J.P. Eijsackers (Eds.). Vital Soil Function, Value and Properties. Elsevier, 2004. p. 159–194.

© Коновалов Алексей Глебович, Фурсова Полина Викторовна, Рисник Дмитрий Владимирович (biant3@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»