



DOI 10.23859/estr-230217

EDN NNMVRY5

УДК 57.042+57.044+57.045

Научная статья

## Информативность показателей экологического состояния почвы, находящейся в условиях низкоуровневого стресса: загрязнение, засуха, кислотность

А.С. Олькова\* , Е.В. Товстик 

Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

\*usr08617@vyatsu.ru

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме выбора информативных показателей экологического состояния почвы с низкоуровневым стресс-фактором. Цель данной работы – сравнение токсикологических (*ex situ*) и биоиндикационных показателей (*in situ*) почвы, находящейся в условиях загрязнения, засухи, повышенной кислотности. В образцах почвы определяли численность зимогенной и олиготрофной микрофлоры, активность экзоферментов каталазы и уреазы, острую токсичность почвенных вытяжек в тестах на *Paramecium caudatum* и *Escherichia coli*. Большинство реакций, проявившихся *ex situ* и *in situ*, были горметическими или равными контролю. Увеличение численности по сравнению с контролем наблюдали у олигокарбофилов в среднекислой почве (в 13 раз), у олиготрофов в почве, испытывавшей засуху (в 22 раза), у амилолитиков в загрязненной и кислой почве (в 6 раз), а также в засушливой (в 1.6 раза). Достоверно уменьшались в условиях приложенных факторов значения следующих показателей: численность аммонификаторов при кадмиевом стрессе низкого уровня (в 3 раза) и средней кислотности почвы (в 5 раз), целлюлозолитиков в ответ на кислотность почвы (в 2.5 раза) и при засухе (в 1.7 раза), активность уреазы в среднекислой почве (в 1.7 раза). Кроме того, в 1.4 раза возрастал индекс токсичности для среднекислой почвы в тесте на *P. caudatum*.

**Ключевые слова:** почвенные модели, кадмий, недостаток увлажнения, биотестирование, экологотрофические группы микроорганизмов, почвенные ферменты

### ORCID:

А.С. Олькова, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>

Е.В. Товстик, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>

**Для цитирования:** Олькова, А.С., Товстик, Е.В., 2024. Информативность показателей экологического состояния почвы, находящейся в условиях низкоуровневого стресса: загрязнение, засуха, кислотность. *Трансформация экосистем* 7 (3), 138–152. <https://doi.org/10.23859/estr-230217>

Поступила в редакцию: 17.02.2023

Принята к печати: 14.03.2023

Опубликована онлайн: 16.08.2024

DOI 10.23859/estr-230217

EDN NNMVRY5

UDC 57.042+57.044+57.045

## Article

# Informative indicators of the ecological state of soil exposed to low stress factors: pollution, drought, acidity

A.S. Olkova\*, E.V. Tovstik

Vyatka State University, Moskovskaya 36, Kirov, 610000 Russia

\*usr08617@vyatsu.ru

**Abstract.** The article is devoted to the problem of choosing informative indicators of the ecological state of soil with a low stress factor. The purpose of this work is to compare toxicological (*ex situ*) and bioindicative indicators (*in situ*) of soil under conditions of pollution, drought, and increased acidity. The number of zymogenic and oligotrophic microflora, the activity of catalase and urease exoenzymes, including the acute toxicity of soil extracts in tests for *Paramecium caudatum* and *Escherichia coli* were determined in soil samples. Most of the reactions observed *ex situ* and *in situ* were hormetic or equal to the control. As compared to the control, an increase in the number was noted in oligocarbophiles in moderately acidic soil (by 13 times), in oligotrophs in drought-exposed soil (by 22 times), in amylolytics in contaminated and acidic soil (by 6 times), as well as in arid soil (by 1.6 times). The values of the following parameters significantly decreased in the conditions of the applied factors: the number of ammonifiers under low-level cadmium stress (by 3 times) and moderate soil acidity (by 5 times), cellulolytics in response to soil acidity (by 2.5 times) and under drought (by 1.7 times), urease activity in moderately acidic soil (by 1.7 times). In addition, the toxicity index for moderately acidic soil in the test for *P. caudatum* increased by 1.4 times.

**Keywords:** soil models, cadmium, lack of moisture, bioassay, eco-trophic groups of microorganisms, soil enzymes

## ORCID:

A.S. Olkova, <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>E.V. Tovstik, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>

**To cite this article:** Olkova, A.S., Tovstik, E.V., 2024. Informative indicators of the ecological state of soil exposed to low stress factors: pollution, drought, acidity. *Ecosystem Transformation* 7 (3), 138–152. <https://doi.org/10.23859/estr-230217>

Received: 17.02.2023

Accepted: 14.03.2023

Published online: 16.08.2024

## Введение

Обоснованная экологическая оценка состояния почвы является важным междисциплинарным естественно-научным направлением, поскольку ее результаты влияют на планирование использования земельных ресурсов, возможность сельскохозяйственной эксплуатации почв, вносят вклад в общую картину экологического благополучия территории<sup>1</sup>.

Методология оценки экологического состояния почвы не останавливает своего развития. Научным сообществом признано, а затем принято на государственном и международном уровне, что состояние почвы необходимо определять, используя комплекс показателей. Такой подход известен как «триадный» (TRIAD) и означает оценку, основанную на сочетании химических, токсикологических (*ex situ*) и биоиндикационных (*in situ*) данных<sup>2</sup> (Terekhova, 2022).

При оценке влияния токсикантов на окружающую среду, в том числе почву, большинство подходов направлены на определение безопасных концентраций загрязняющих веществ, при которых не нарушаются функции биоты. В нашей стране это реализовано через утвержденную в законодательном порядке систему предельно допустимых концентраций, а также других гигиенических и природоохранных нормативов, в том числе учитывающих характер землепользования<sup>3, 4, 5</sup>. В то же время при использовании данной системы крайне редко принимаются во внимание многочисленные свойства почвы: ее механический состав, кислотность, температурный режим, разнообразие педосообщества и т.д. Варианты преодоления проблемы уже предлагаются. Так, описан метод локальных экологических норм, заключающийся в разделении допустимых и недопустимых значений интенсивности экологических факторов (Коновалов и Рисник, 2017).

Известны случаи, когда нормирование загрязняющих веществ в почве производится в зависимости от ее назначения, свойств или совокупности этих признаков<sup>5</sup> (Antoniadis et al., 2019). Например, в Китае для нормирования содержания тяжелых металлов и металлоидов в сельскохозяйственных почвах используется три типа пороговых значений, позволяющих обеспечить безопасность продуктов, поддержание урожайности, защиту микробной системы почвы (Li et al., 2019).

Таким образом, оценка экологического состояния почв с помощью таких интегральных параметров, как интенсивность дыхания почвы, активность почвенных ферментов, жизненное состояние организмов-биоиндикаторов и благополучие их популяций, структура почвенных сообществ, приобретает все большую актуальность (Акименко и др., 2019; Bünemann et al., 2018).

Часть применяемых в научных исследованиях интегральных экологических показателей состояния почвы используется также в государственном экологическом контроле и мониторинге компонентов окружающей среды. Так, определение токсичности почвы предусмотрено в программах экологического мониторинга опасных промышленных объектов (Чупис и др., 2013), микробиологических показателей – при санитарной оценке почв населенных мест и сельскохозяйственных угодий<sup>6</sup>.

Согласно важнейшим экологическим законам (Odum, 1983), от факторов окружающей среды зависят показатели жизнедеятельности почвенной биоты и, следовательно, интегральные показатели состояния почвы. Например, ферментативная активность почвы определяется не только обилием и видовым разнообразием почвенных микроорганизмов, но и видовым составом растений (Faroq et al., 2021) и сезонностью (Garcia-Ruiz et al., 2009).

Формирование сообщества микроорганизмов почвы зависит от ее типа, температурного и водного режимов, уровня pH, обогащенности макро- и микроэлементами (Islam et al., 2020; Zuccarini et al., 2020). Эколого-токсикологические показатели почвы, определяемые в биотестах на различных лабораторных организмах, несмотря на изолированность от окружающей среды в момент анализа, также зависят от набора экологических факторов (Olkova and Tovstik, 2022).

<sup>1</sup> ГОСТ Р 54003-2010. Экологический менеджмент. Оценка прошлого накопленного в местах дислокации организаций экологического ущерба. Общие положения.

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО 17616-2022. Качество почвы. Руководство по выбору и оценке биопроб для определения экотоксикологических характеристик почв и почвенных материалов.

<sup>3</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 1 от 23 января 2006 года «О введении в действие Гигиенических Нормативов ГН 2.1.7.2041-06».

<sup>4</sup> Положение о государственном санитарно-эпидемиологическом нормировании, утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 июля 2000 года № 554.

<sup>5</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

<sup>6</sup> СанПин 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы и грунтов.

Проблема определения взаимосвязи характеристик почв и воздействующих на нее факторов находится в стадии разработки и актуальна для объективной интерпретации получаемых данных. Специалисты в области агрономии, экологии, почвоведения и других смежных наук в реальных условиях чаще всего сталкиваются с оценкой влияния на почву и ее функции таких воздействий, которые относятся к низкому уровню стресса. Это понятие условно и характеризуется, прежде всего, отклонением фактора от оптимальных условий до значений, позволяющей живой системе (от организменного до экосистемного уровня) длительно существовать. Так, при выходе значений рН солевой вытяжки из почв за пределы 6.1–7.8 кислотность почвенной среды становится стресс-фактором, что объясняется как прямым действием ионов водорода, так и изменением доступности питательных веществ почвы для биоты (Msimbira and Smith, 2020).

Целью данной работы было сравнение информативности интегральных показателей почвы, находящейся в разных условиях низкоуровневого стресса (загрязнение, засуха, кислотность), для ее экологической оценки.

## Материалы и методы

### Схема модельного эксперимента

Эксперимент проводился в условиях, приближенных к полевым (г. Киров, Кировская область, Россия). Дерново-подзолистая почва, отобранная вблизи г. Кирова, с разным уровнем кислотности (рН 4.8 и 6.5) помещалась в вегетационные емкости с последующим посевом в них семян ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Почва характеризовалась как среднегумусная (содержание гумуса – 1.9–2.5%), с низким содержанием подвижного фосфора (20–50 мг/кг) и нитратного азота (1.1–1.7 мг/кг). Моделировались стандартные полевые условия без воздействия (контроль, рН = 6.5), а также три вида неблагоприятных факторов:

1) Загрязнение почвы кадмием. Внесение токсиканта в почву (рН = 6.5) осуществлялось в виде раствора ацетата кадмия. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии, уровень легкоподвижных соединений кадмия в почве составил  $6.4 \pm 0.5$  мг/кг. Для кадмия не регламентированы ПДК в почве; величина ОДК установлена только для его подвижных форм<sup>7</sup>. Для почв, характеризующихся рН среды, близкой к нейтральным значениям, ОДК составляет 2.0 мг/кг.

2) Кислотность почвы. Для данного варианта использовали почву, характеризующуюся среднекислым уровнем рН солевой вытяжки (1Н раствор КСl) из почвы –  $4.8 \pm 0.1$  единиц рН, что на 1.7 единиц ниже контроля. По другим характеристикам почва данного варианта не имела достоверных отличий от контрольного образца.

3) Кратковременная засуха. Моделирование осуществлялось путем изолирования почвы (рН = 6.5) с посевами от атмосферных осадков на 25 суток с помощью слабопрветриваемого полиэтиленового прозрачного навеса. Начало моделирования засухи приходилось на 42-е сутки эксперимента. После завершения модельной засухи данные опытные варианты находились в одинаковых условиях с контрольной почвой.

Общая продолжительность опыта, независимо от варианта, составила 90 дней. По истечению времени отбирали пробы почвы для лабораторного анализа.

### Погодные условия проведения эксперимента

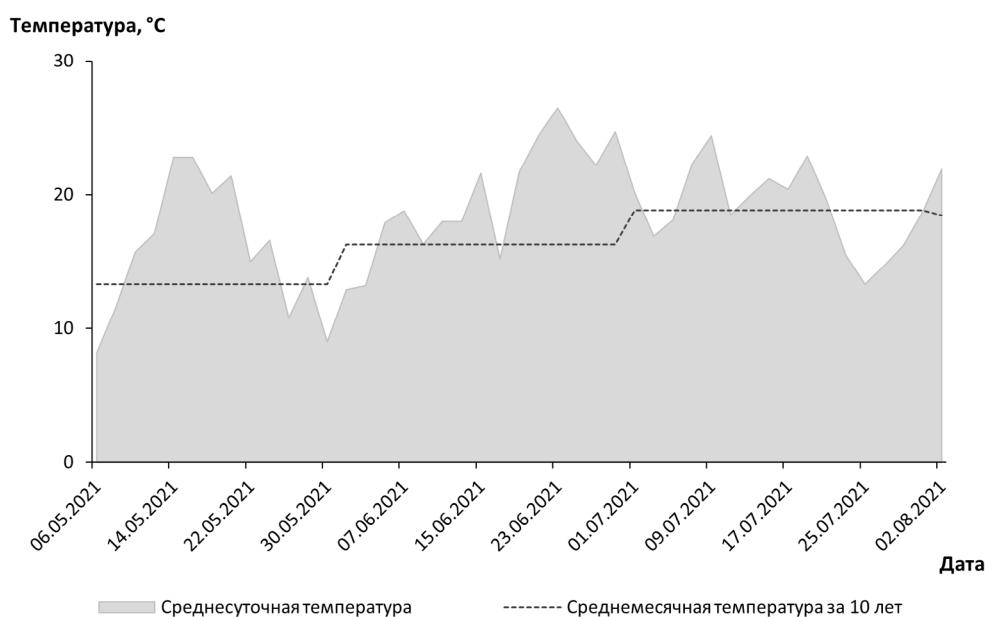
По метеорологическим показателям год проведения эксперимента характеризовался относительно повышенными среднесуточными температурами по сравнению с десятилетними среднегодовыми значениями показателя для вегетационного сезона (Рис. 1).

### Оцениваемые интегральные экологические показатели

Все выбранные показатели благополучия почвы были связаны с микроорганизмами:

1) Реакция микробного комплекса почвы по численности отдельных представителей эколого-трофических групп. Определение проводили методом посева почвенных суспензий на агаризованные питательные среды различного состава с последующим учетом количества выросших колоний. Среди представителей зимогенной экологической ниши учитывались аммонификаторы

<sup>7</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.



**Рис. 1.** Температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью Земли в г. Кирове, Кировская область, Россия (по данным сайта <https://rp5.ru/>).

ры на мясопептонном агаре, амилотические микроорганизмы на крахмало-аммиачном агаре и целлюлозолитические микроорганизмы на среде Гетчинсона–Клейтона; среди представителей олиготрофной экологической ниши – олиготрофные микроорганизмы на почвенном агаре и олигокарбофильные микроорганизмы на голодном агаре (Практикум..., 2005).

2) Острая токсичность почвы по ответным реакциям лабораторных организмов: инфузорий *Paramecium caudatum* (Ehrenberg, 1833) и бактерий *Escherichia coli* (Migula, 1895). Оцениваемая тест-функция *P. caudatum* – хемотаксис<sup>8</sup>, *E. coli* – биолюминесценция<sup>9</sup>. Проводили тестирование водных вытяжек из почвы (дистиллированная вода) при соотношении фаз 1:4; время контакта воды и почвы составляло 2.5 ч, включая 2 ч на ротаторе (100 об/мин) и 30 мин отстаивания. Надосадочную жидкость отфильтровывали через бумажный фильтр «белая лента», не допуская взмучивания осадка. Далее проводили анализ вытяжки, при этом время тест-реакции составляло 30 мин. Для расчетов индекса токсичности (Т) использовали формулу:

$$T = \frac{T_k - T_{оп}}{T_k},$$

где Т – индекс токсичности,  $T_{оп}$  – значение для пробы,  $T_k$  – значение для чистой среды (контроль).

Для *E. coli* полученные индексы токсичности (Т) переводили в относительные величины путем умножения опытных значений на 100% согласно методике.

3) Активность почвенных ферментов. Определение активности каталазы проводили на специальном приборе (каталазнике) газометрическим методом, основанном на учете объема молекулярного кислорода, выделяющегося при контакте почвы с 3% раствором пероксида водорода (Хазиев, 2005). Учет показаний производился трехкратно через 1, 3, 5 мин с последующим усреднением данных. Активность уреазы определяли на спектрофотометре (ПЭ5300ВИ, ООО «Экротек», Россия) спектрофотометрическим методом, основанном на определении количества аммиака, высвобождаемого под действием уреазы (Хазиев, 2005). Почва инкубировалась с 0.1 М трис-буфером и 10% раствором мочевины при 30 °C в течение 3 ч. Определение аммиака производилось после инкубации почвы путем связывания его в окрашенные комплексы с реактивом Несслера.

<sup>8</sup> ФР 1.39.2015.19241. Методика определения токсичности проб почв и донных отложений экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер».

<sup>9</sup> ПНДФ Т 14.1:2:3:4.11-04. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм».

## **Достоверность и математическая обработка результатов**

Все анализы выполнены в трех повторностях. Результаты представлены в виде средних значений и их стандартных отклонений. Достоверность отличий одного вида показателя между массивами данных, полученных для разных почвенных образцов, определяли однофакторным анализом по методу ANOVA. Для оценки вклада каждого из факторов (кадмий, кислотность, засуха) в наблюдаемый эффект проводили многофакторный дисперсионный анализ данных с последующей оценкой F-критерия (F-Ratio) и уровня его значимости (P-Value). Критический уровень значимости всех сравнений ( $p$ ) – 0.05. Корреляционный анализ между массивами данных выполняли с использованием критерия Фишера.

## **Результаты**

### **Численность аборигенных микроорганизмов почвы в ответ на воздействие неблагоприятных факторов**

Способность микроорганизмов реагировать на воздействие факторов внешней среды может быть использована в контроле качества почвы. При этом важно различать изменения, произошедшие в почвенном микробном комплексе под воздействием антропогенных нагрузок, и изменения, вызванные природными факторами.

Согласно результатам микробиологического анализа проб почвы, реакция зимогенной экологической ниши микроорганизмов была асинхронной (Рис. 2). При отсутствии воздействия (контроль) среди представителей зимогенной экологической ниши доминировали аммонификаторы ( $7.5 \cdot 10^6$  КОЕ/г), против  $5 \cdot 10^6$  КОЕ/г амилолитических микроорганизмов и  $5 \cdot 10^5$  КОЕ/г целлюлозолитических.

Численность аммонификаторов в почве снижалась в ответ на все виды неблагоприятных воздействий. При этом максимальное уменьшение их численности наблюдалось в пробах почвы с повышенной кислотностью, на втором месте по силе воздействия оказался кадмий: в 5.4 и 3 раза по сравнению с контролем соответственно. Кратковременная засуха снижала развитие аммонификаторов в 2.3 раза.

Численность амилолитиков при воздействии неблагоприятных факторов возрастала, указывая на интенсификацию минерализационных процессов в почве. Высокую степень развития амилолитической части почвенного микробного комплекса по сравнению с контролем отмечали в почве, загрязненной кадмием – в 6.4 раза, а также под влиянием повышенной кислотности – в 6.2 раза. Наименьший рост численности амилолитических микроорганизмов наблюдался в почве, испытавшей засуху (в 1.6 раза).

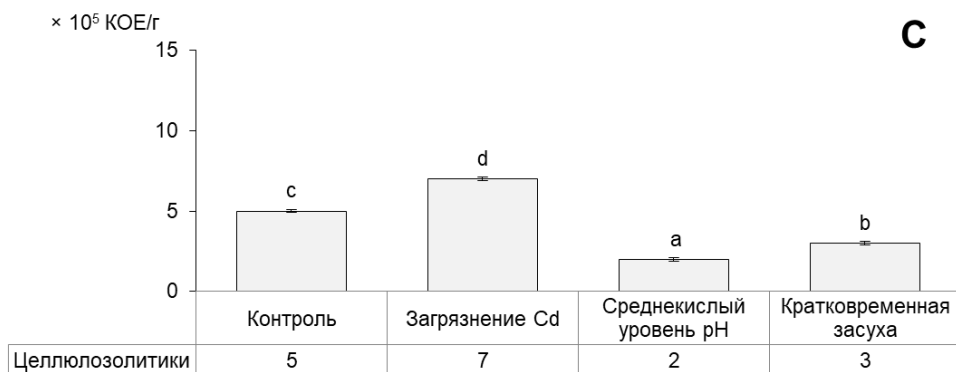
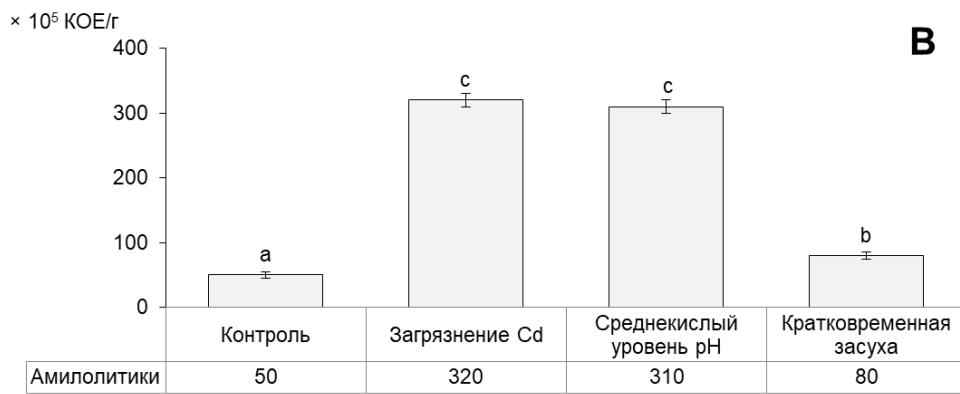
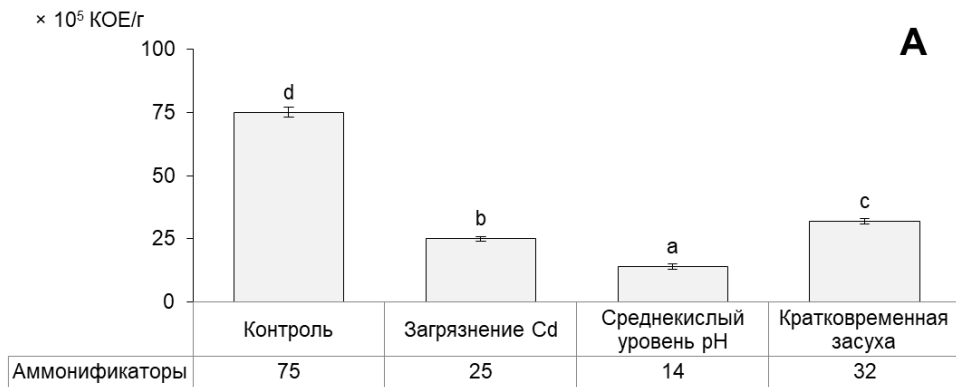
Целлюлозолитические микроорганизмы снижали численность по сравнению с контролем только в ответ на повышенную кислотность среды (в 2.5 раза) и засуху (в 1.7 раза). При воздействии кадмия их численность возрастала в 1.7 раза по сравнению с данными для почвы без воздействия.

Микроорганизмы олиготрофной экологической ниши, обладающие низкими потребностями в питательных веществах, а также завершающие процесс минерализации органических веществ в почве, реагировали на действие неблагоприятных факторов по типу гормезиса (Рис. 3).

Нибольшая численность олиготрофов (в 22 раза выше, чем в контроле) зафиксирована в почве, испытавшей воздействие кратковременной засухи. Меньшее воздействие на олиготрофы оказывали кадмий и кислотность. В данных вариантах опыта их численность в почве возросла соответственно в 4.0 и 2.7 раза.

Особый интерес среди олиготрофных микроорганизмов вызывали олигокарбофилы. Данная группа микроорганизмов играет важную роль в преобразовании органического вещества почвы благодаря своей высокой окислительно-восстановительной ферментативной активности. В условиях угнетения большинства представителей зимогенной микрофлоры олигокарбофилы увеличивали свою численность, причем максимальный положительный эффект наблюдался в почве, загрязненной кадмием (в 13 раз). Кислотность и кратковременная засуха также стимулировали развитие олигокарбофилов в почве, но в меньшей степени, чем кадмий (в 2.8 и 1.7 раза соответственно).

Таким образом, ответные реакции представителей аборигенной микрофлоры на засуху, среднюю кислотность почвы и загрязнение кадмием варьировали от стимуляции до значительного угнетения, что говорит о перестройке почвенного сообщества. В то же время фиксировались и сходные реакции на действие экологических факторов. Так, изменения численности амилолитических микроорганизмов и олигокарбофилов тесно коррелировали между собой ( $r = 0.69$ ), еще выше был уровень связи между целлюлозолитическими микроорганизмами и олигокарбофилами ( $r = 0.75$ ).



**Рис. 2.** Численность представителей зимогенной экологической ниши микроорганизмов. **А** – аммонификаторы; **В** – амилолитические микроорганизмы; **С** – целлюлозолитики. Здесь и далее разными буквенными индексами обозначены достоверные различия между значениями.

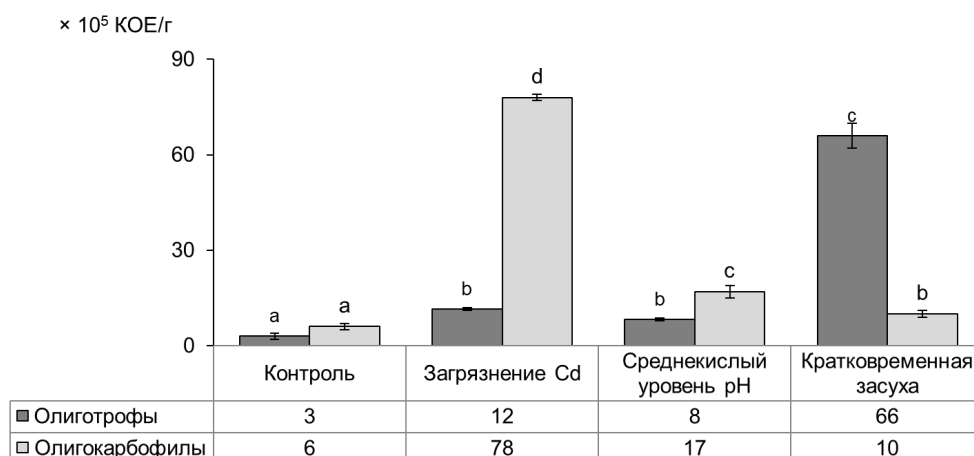


Рис. 3. Численность представителей олиготрофной экологической ниши микроорганизмов.

Среди исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов наибольшей чувствительностью к загрязнению кадмием обладали амилолитические микроорганизмы ( $F = 1453$ ;  $P = 0.0000$ ) и олигокарбофилы ( $F = 44443$ ;  $P = 0.0000$ ); к кислотности – аммонификаторы ( $F = 3189$ ;  $P = 0.0000$ ) и целлюлозолитики ( $F = 13.5$ ;  $P = 0.0063$ ); к кратковременной засухе – олиготрофы ( $F = 1361$ ;  $P = 0.0000$ ).

### **Реакции лабораторных тест-организмов на почву, испытавшую воздействие неблагоприятных факторов**

В отличие от синэкологических показателей, используемых для характеристики состояния аборигенных микроорганизмов в почве, результаты биотестирования позволяют сделать заключение о токсичности среды их обитания. С этой целью применяются тест-организмы различных систематических групп, в том числе низшие растения и микроорганизмы. Однако известно, что реакции лабораторных организмов определяются не только наличием в почве токсикантов (Олькова и Ашихмина, 2021).

Наиболее низкие значения токсичности по реакции *P. caudatum* были получены при тестировании проб почвы, не испытавшей воздействие неблагоприятных факторов (Рис. 4). При этом токсичность почв после кратковременной засухи и загрязнения кадмием значимо не отличалась от контрольного варианта. В то же время вытяжка из среднекислой почвы была токсичнее почвы контроля, варианта опыта с кадмием и засухой в 1.45, 1.20 и 1.21 раза соответственно.

В бактериальном тесте по реакции *E. coli* все значения индексов токсичности были отрицательными. Почвенные вытяжки всех исследуемых вариантов оказывали стимулирующее действие на биолюминесценцию бактерий по сравнению с дистиллированной водой, которая служила аналитическим контролем при измерении величины показателей (Рис. 5). Как и в предыдущем биотесте, при анализе почвенных вытяжек с помощью *E. coli* были получены близкие значения индексов токсичности для контрольного варианта и проб почвы, загрязненной кадмием и подвергшейся воздействию кратковременной засухи. Вытяжка из среднекислой почвы также вызывала стимуляцию тест-функции, но в достоверно меньшей степени, чем остальные исследуемые образцы. По сравнению с контрольной почвой, токсичность среднекислой почвы увеличилась в 1.8 раза.

Результаты показывают, что два выполненных биотеста оказались нечувствительными к загрязнению почвы кадмием на уровне, в 3.2 раза превышающем ориентировочно допустимую концентрацию для данного элемента. Кратковременная засуха не приводила к токсичности почвы. Максимальное угнетение тест-функций двух лабораторных микроорганизмов происходило в результате их контакта с вытяжкой из среднекислой почвы. Корреляционный анализ данных показал, что между значениями индексов токсичности, полученных в биотестах на *P. caudatum* и *E. coli*, существует сильная положительная взаимосвязь ( $r = 0,79$ ). Следовательно, результаты нельзя назвать случайными. В наибольшей степени исследуемые тест-организмы были чувствительны к кислотности, в случае *P. caudatum* – на статистически значимом уровне ( $F = 19.4$ ;  $P = 0.0023$ ). В целом результаты биотестирования и оценки численности аборигенной почвенной микрофлоры согласуются между собой в части достаточно сильного влияния кислотности почвы

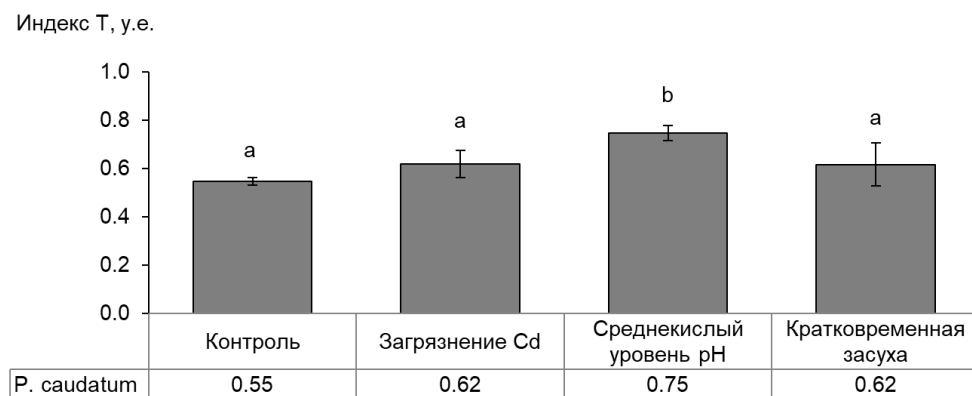
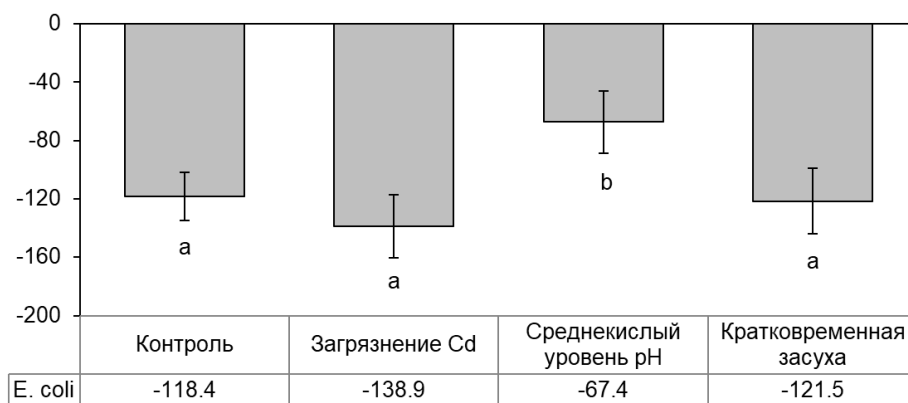


Рис. 4. Токсичность исследуемых образцов почвы для *P. caudatum*.



Индекс Т, у.е.

Рис. 5. Токсичность исследуемых образцов почвы для *E. coli*.

на жизненные функции организмов. С численностью некоторых микроорганизмов почвы и данными по *P. caudatum* отмечена тесная взаимосвязь: с амилолитиками положительная ( $r = 0,71$ ); с аммонификаторами и целлюлозолитиками – отрицательная ( $r = -0,85$  и  $r = -0,61$  соответственно). Реакции *E. coli* отрицательно коррелировали с численностью целлюлозолитических микроорганизмов ( $r = -0,82$ ).

### **Ферментативная активность почвы в условиях воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды**

Ферментативная активность почвы отражает функциональное состояние почвенной биоты. Среди ферментов, обнаруживаемых в почве, каталазе уделяется особое внимание в связи с ее значимой ролью в регуляции скорости окислительно-восстановительных реакций. По степени обогащенности каталазой исследуемые пробы относились к категории бедных почв ( $< 1 \text{ см}^3 \text{ O}_2/\text{г} \cdot \text{мин.}$ ). Под действием исследуемых факторов каталазная активность почвы варьировала в узком диапазоне значений и достоверно не отличалась от контроля (Рис. 6А). На уровне тенденции была отмечена более высокая чувствительность каталазы к кислотности ( $F = 3,36$ ;  $P = 0,1042$ ).

Уреаза, как и каталаза, является одним из наиболее изученных почвенных ферментов. Ее роль в почве сводится к участию в цикле превращения азота. Согласно полученным данным, уреазная активность почвы, в отличие от каталазной, варьировала в более широком диапазоне значений (Рис. 6В). Загрязнение почвы кадмием и кратковременная засуха не вызвали значимого изменения в уровне уреазной активности почвы, тогда как кислотность снижала ее. Наибольшую чувствительность уреазы отмечали по отношению к кислотности ( $F = 35,4$ ;  $P = 0,0003$ ). Корреляционный анализ данных показал, что активность каталазы и уреазы тесно взаимосвязаны с ответны-

ми реакциями лабораторных организмов *P. caudatum* ( $r = -0.98$  и  $r = -0.77$  соответственно) и *E. coli* ( $r = -0.73$ ;  $r = -0.97$ ), а также сильно коррелируют с численностью аммонификаторов ( $r = 0.89$ ).

## Обсуждение результатов

В проведенном эксперименте моделировалось воздействие на почву неблагоприятных факторов, которые нельзя назвать экстремальными, однако они относились к пессимальным для растений и педобионтов: загрязнение кадмием до уровня обнаружения его подвижных форм ( $Cd^{2+}$ ) составило  $6.4 \pm 0.5$  мг/кг почвы, кратковременная засуха продолжалась в течение 25 дней, уровень pH почвенной среды был снижен до 4.8 по сравнению с 6.5 в контрольном образце. Нами были изучены показатели экологического состояния почвы, способные отражаться на состоянии микроорганизмов.

Комплексом независимых анализов было подтверждено, что кислотность почвы в большей степени влияет на показатели экологического состояния почвы, чем засуха и загрязнение кадмием (в пределах сравниваемых уровней нагрузок). Так, возрастание индексов токсичности вытяжек из среднекислой почвы по сравнению с контрольным вариантом составило 1.37 раза и 1.8 раза в тестах на *P. caudatum* и *E. coli* соответственно. Известно, что реакция среды значительно влияет на жизненные функции организмов (Куценко, 2004; Олькова и Ашихмина, 2021). В почве это может быть усилено тем, что низкий уровень pH почвенного раствора увеличивает растворимость гуминовых веществ, особенно фульвокислот, а также приводит к увеличению лабильности многих микроэлементов (Орлов, 1990; Varshal et al., 1999).

Высокая чувствительность тест-организмов (*ex situ*) и биоиндикаторов (*in situ*) к уровню pH почвы является проблемой, поскольку естественно кислые почвы широко распространены. В качестве одного из вариантов решения в работе P.A. Chapman et al. (2013) выделены организмы, чувствительные к тяжелым металлам и не чувствительные к кислотности почвы: *Dendrobaena octaedra* (Savigny, 1826), *Folsomia candida* (Willem, 1902), *Caenorhabditis elegans* (Maupas, 1900), *Oppia nitens* (Koch, 1836), *Brassica rapa* L., *Trifolium pratense* L., *Allium cepa* L., *Quercus rubra* L. и *Acer rubrum* L.

На кадмиевый стресс в нашем исследовании все эколого-трофические группы микроорганизмов, кроме аммонификаторов, ответили гормезисом (в ряде случаев достоверным). Наибольшую стимуляцию проявили амилолитики и олигокарбофилы – увеличение их численности относительно контроля составило 6.4 и 13 раза соответственно. Активность уреазы также имела тенденцию к возрастанию в условиях воздействия кадмия. Стимуляция хемотаксиса инфузорий составила 1.13 раза, а биолюминесценции бактериального препарата – 1.17 раза в сравнении с контрольными данными, но не достигла достоверных отличий. Таким образом, большинство микробиологических характеристик почвы согласуются между собой в части ответных реакций на загрязнение почвы кадмием, что подтверждено корреляционным анализом. Объяснением большинства наблюдаемых реакций по типу гормезиса является относительно низкий уровень созданного загрязнения (превышение ОДК в 3.2 раза). Имеется множество примеров, демонстрирующих, что при загрязнении почвы выше установленных нормативов значимой реакции педобионтов не наблюдается, или же происходит рост оцениваемых параметров. Так, описана токсическая нагрузка, наиболее близкая к нашему эксперименту: обработка почвы кадмием на уровне 2 мг Cd/кг, а также обработка бинарными смесями 4.0 мг Cd/кг + 200 мг Pb/кг приводила к стимуляции бактериальных и грибных популяций (Fan et al., 2021).

Низкий уровень токсического стресса даже предлагается использовать для контролируемой стимуляции роста и общей производительности сельскохозяйственных растений, что показано на лекарственном растении *Polygonatum sibiricum* Tourn. ex Mill., у которого накопление Cd оставалось на безопасном уровне при концентрации кадмия в почве 1 мг/кг (Mengdi et al., 2021).

Вклад кратковременной засухи в изменение показателей экологического состояния почвы был менее значим по сравнению с другими моделируемыми факторами. Активность каталазы и уреазы не отличалась от показателей контрольной почвы; индексы токсичности по двум биотестам также были наиболее близки к контрольным значениям по сравнению с итогами действия других факторов. Хотя реакция аборигенной микрофлоры колебалась от стимуляции до угнетения у разных групп организмов, в большинстве случаев она была ближе всего к показателям контрольной почвы. Только олиготрофы положительно и наиболее ярко реагировали на произошедшую засуху по сравнению с действием на них других факторов. Их численность по сравнению с контролем возросла в 22 раза. Вероятно, они получили максимальную возможность реализовать свой экологический потенциал в засушливой почве на фоне угнетения аммонификаторов и целлюлозо-

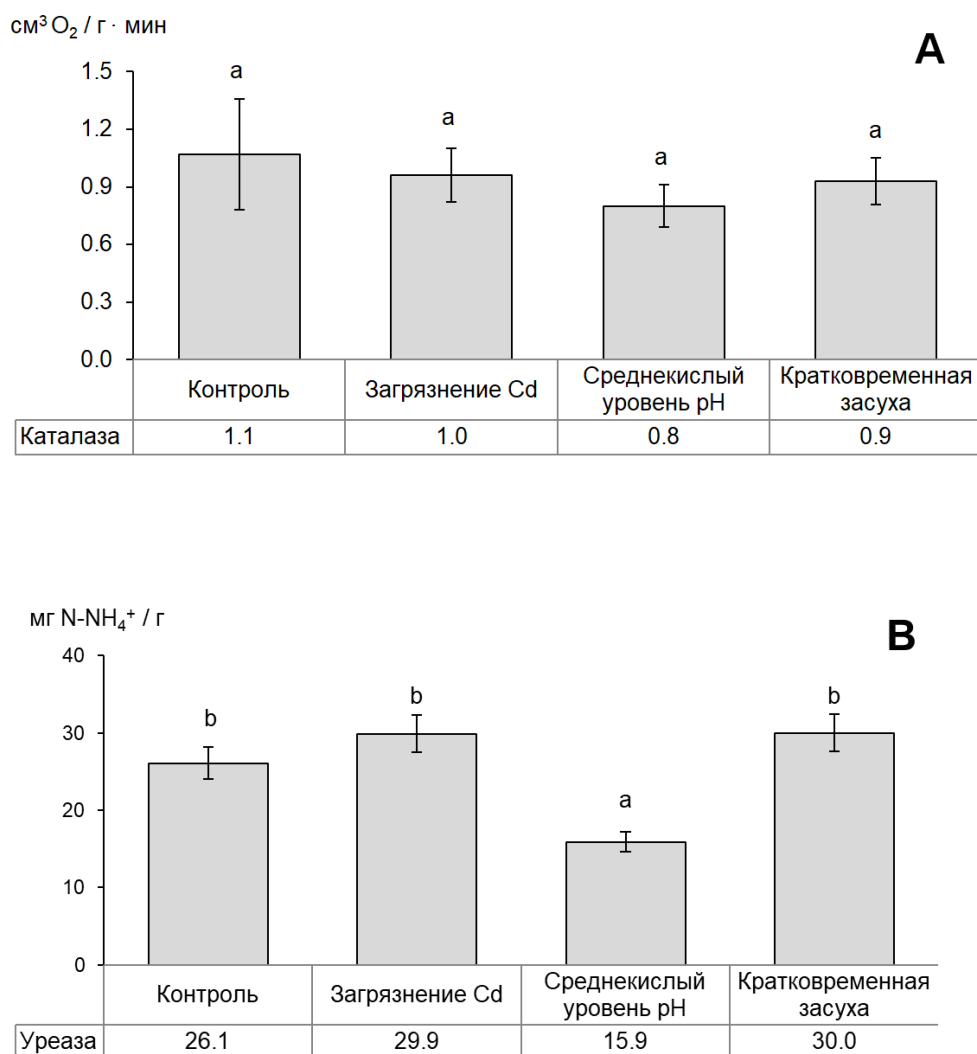


Рис. 6. Ферментативная активность почвы. **A** – активность каталазы; **B** – активность уреазы.

литиков. Согласно литературным данным, засуха может вызывать трансформацию микробного комплекса почвы (Ушаков и Ручкина, 2020). В условиях засухи более интенсивное развитие получают микроорганизмы, использующие минеральный азот – амилотитики (Лоскутов и др., 2019), что в нашем эксперименте не подтвердилось. Среди косвенных факторов, способных влиять на модификацию почвенного микросообщества в результате засухи, является изменение синтеза корневых экссудатов растений (Суздалева и др., 2022).

## Заключение

Таким образом, 6 из 9 изученных параметров экологического состояния почвы реагировали на один из неблагоприятных факторов положительной реакцией. Согласно концепции экологического гормезиса, стимуляция может быть вызвана любыми низкодозированными стрессорами (абиотическими, биотическими, антропогенными) (Егофеева, 2022). Однако некоторые виды нагрузок, как было показано в данной работе, даже при низких уровнях значительно влияют на микробиологические показатели почвы, смещая ответные реакции в зону угнетения. Так, амилотитические микроорганизмы были чувствительны к загрязнению кадмием и кислотности почвы, целлюлозолитики – к кислотности и засухе, лабораторные инфузории *P. caudatum* – к кислотности, экзофермент уреаза – к кислотности. Это является основанием считать такие параметры наиболее информативными по отношению к изменениям исследованных факторов. Сочетание фактов угнетения аборигенной микрофлоры, требующей высокоэнергетических ресурсов, и развития олиготрофов также может являться индикатором неблагоприятного воздействия на почву.

## Список литературы

- Акименко, Ю.В., Чуvaraева, О.В., Колесников, С.И., Казеев, К.Ш., Минникова, Т.В., 2019. Оценка экологического состояния основных почв юга России в условиях загрязнения антибиотиками. Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, 114 с.
- Коновалов, А.Г., Рисник, Д.В., 2017. Применение метода локальных экологических норм для определения влияния содержания тяжелых металлов на дыхание почв провинции Павия (Италия). *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки* 11, 15–21.
- Куценко, С.А., 2004. Основы токсикологии. Фолиант, Санкт-Петербург, Россия, 715 с.
- Лоскутов, С.И., Пухальский, Я.В., Шапошников, А.И., Воробьев, Н.И., Белимов, А.А., 2019. Молекулярная экология – новое направление в изучении изменения биоразнообразия микрофлоры различных типов почв под воздействием засухи. *Сборник докладов 3-й Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов с международным участием, посвященная 145-летию со дня рождения Дояренко А.Г. «Экология, ресурсосбережение и адаптивная селекция»*, Саратов, 20–22.03.2019. Саратов, Россия, 146.
- Олькова, А.С., Ашихмина, Т.Я., 2021. Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор). *Теоретическая и прикладная экология* 2, 22–30. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-022-030>
- Орлов, Д.С., 1992. Химия почв. МГУ, Москва, Россия, 400 с.
- Практикум по микробиологии, 2005. Нетрусов, А.И. (ред.). Академия, Москва, Россия, 603 с
- Суздалева, А.В., Шейн, Е.В., Абросимов, К.Н., Дембовецкий, А.В., 2022. Структура порового пространства почв, прорастающих корней и микробного сообщества в консорциуме «почва – растения – микроорганизмы» в почвах модельного семенного ложа ячменя. *Проблемы агрохимии и экологии* 2, 45–50. <https://doi.org/10.26178/AE.2022.19.44.001>
- Ушаков, Р.Н., Ручкина, А.В., 2020. Влияние плодородия агросерой почвы на активность микрофлоры в условиях засухи в нечерноземной зоне России. *Агрохимия* 6, 69–77. <https://doi.org/10.31857/s0002188120060137>
- Хазиев, Ф.Х., 2005. Методы почвенной энзимологии. Наука, Москва, Россия, 252 с.
- Чупис, В.Н., Маликов, А.Н., Мартынов, В.В., Бахрах, П.Л., 2013. Принципы комплексного экологического мониторинга зоны влияния атомных электростанций. *Поволжский торгово-экономический журнал* 5 (33), 29–47.
- Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Levizou, E., Shahid, M., Niazi, N.K. et al., 2019. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective concerning health risk assessment? – A review. *Environment International* 127, 819–847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G. et al., 2018. Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Chapman, E.E.V., Dave, G., Murimboh, J.D., 2013. A review of metal (Pb and Zn) sensitive and pH tolerant bioassay organisms for risk screening of metal-contaminated acidic soils. *Environmental Pollution* 179, 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.027>

- Fan, D., Sun, J., Liu, C., Wang, S., Han, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., 2021. Measurement and modeling of hormesis in soil bacteria and fungi under single and combined treatments of Cd and Pb. *Science of The Total Environment* **783**, 147494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147494>
- Farooq, T.H., Kumar, U., Mo, J., Shakoob, A., Wang, J. et al., 2021. Intercropping of peanut-tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical southern China. *Plants-Basel* **10** (5), 881. <https://doi.org/10.3390/plants10050881>
- Garcia-Ruiz, R., Ochoa, V., Vinegla, B., Hinojosa, M.B., Pena-Santiago, R. et al., 2009. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Applied soil ecology* **41** (3), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>
- Islam, W., Noman, A., Naveed, H., Huang, Z., Chen, H.Y.H., 2020. Role of environmental factors in shaping the soil microbiome. *Environmental Science and Pollution Research* **27**, 41225–41247. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10471-2>
- Li, T., Liu, Y., Lin, S., Liu, Y., Xie, Y., 2019. Soil pollution management in China: a brief introduction. *Sustainability* **11** (3), 556. <https://doi.org/10.3390/su11030556>
- Mengdi, X., Wenqing, C., Haibo, D., Xiaoqing, W., Li, Y. et al., 2021. Cadmium-induced hormesis effect in medicinal herbs improves the efficiency of safe utilization for low cadmium-contaminated farmland soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **225**, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112724>
- Msimbira, L.A., Smith, D.L., 2020. The roles of plant growth promoting microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **4**, 106. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00106>
- Odum, E.P., 1983. *Basic Ecology*. Harcourt Brace College Publishers, New York, USA, 613 p.
- Olkova, A.S., Tovstik, E.V., 2022. Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering and Environmental Technology* **23** (1), 42–48. <https://doi.org/10.12912/27197050/143003>
- Terekhova, V.A., 2022. Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: Modern approaches to integration for environmental assessment (a review). *Eurasian Soil Science* **55**, 601–612. <https://doi.org/10.1134/S106422932205009X>
- Varshal, G.M., Koshcheeva, I.Y., Khushvakhtova, S.D., Velyukhanova, T.K., Tatsii, Y.G. et al., 1999. Complex formation of mercury with humus acids: An important stage of the biospheric mercury cycle. *Geochemistry international* **37** (3), 229–234.
- Zuccarini, P., Asensio, D., Ogaya, R., Sardans, J., Peñuelas, J., 2020. Effects of seasonal and decadal warming on soil enzymatic activity in a P-deficient Mediterranean shrubland. *Global Change Biology* **26** (6), 3698–3714. <https://doi.org/10.1111/gcb.15077>

## References

- Akimenko, Yu.V., Chuvaraeva, O.V., Kolesnikov, S.I., Kazeev, K.Sh., Minnikova, T.V., 2019. Otsenka ekologicheskogo sostoiianiia osnovnykh pochv iuga Rossii v usloviakh zagriazneniia antibiotikami [Assessment of the ecological state of the main soils of the south of Russia under antibiotic pollution conditions]. Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, 114 p. (In Russian).
- Antoniadis, V., Shaheen, S.M., Levizou, E., Shahid, M., Niazi, N.K. et al., 2019. A critical prospective analysis of the potential toxicity of trace element regulation limits in soils worldwide: Are they protective

concerning health risk assessment? – A review. *Environment International* **127**, 819–847. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.039>

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G. et al., 2018. Soil quality – a critical review. *Soil Biology and Biochemistry* **120**, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

Chapman, E.E.V., Dave, G., Murimboh, J.D., 2013. A review of metal (Pb and Zn) sensitive and pH tolerant bioassay organisms for risk screening of metal-contaminated acidic soils. *Environmental Pollution* **179**, 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.027>

Chupis, V.N., Malikov, A.N., Martynov, V.V., Bakhrakh, P.L., 2013. Printsipy kompleksnogo ekologicheskogo monitoringa zony vliianiia atomnykh elektrostantsii [Principles of integrated environmental monitoring of nuclear power plant influence zones]. *Povolzhskii torgovo-ekonomicheskii zhurnal [Volga Region Trade and Economic Journal]* **5** (33), 29–47. (In Russian).

Fan, D., Sun, J., Liu, C., Wang, S., Han, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., 2021. Measurement and modeling of hormesis in soil bacteria and fungi under single and combined treatments of Cd and Pb. *Science of The Total Environment* **783**, 147494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147494>

Farooq, T.H., Kumar, U., Mo, J., Shakoor, A., Wang, J. et al., 2021. Intercropping of peanut-tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical southern China. *Plants-Basel* **10** (5), 881. <https://doi.org/10.3390/plants10050881>

Garcia-Ruiz, R., Ochoa, V., Vinegla, B., Hinojosa, M.B., Pena-Santiago, R. et al., 2009. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Applied soil ecology* **41** (3), 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>

Islam, W., Noman, A., Naveed, H., Huang, Z., Chen, H.Y.H., 2020. Role of environmental factors in shaping the soil microbiome. *Environmental Science and Pollution Research* **27**, 41225–41247. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10471-2>

Konovalov, A.G., Risnik, D.V., 2017. Primenenie metoda lokal'nykh ekologicheskikh norm dlia opredeleniia vliianiia sodержaniia tiazhelykh metallov na dykhanie pochv provintsii Paviia (Italiia) [Application of the method of local ecological norms to determine the effect of heavy metal content on soil respiration in the province of Pavia (Italy)]. *Sovremennaiia nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences]* **11**, 15–21. (In Russian).

Khaziev, F.Kh., 2005. Metody pochvennoi enzimologii [Methods of soil enzymology]. Nauka, Moscow, Russia, 252 p. (In Russian).

Kutsenko, S.A., 2004. Osnovy toksikologii [Fundamentals of toxicology]. Foliant, St. Petersburg, Russia, 715 p. (In Russian).

Li, T., Liu, Y., Lin, S., Liu, Y., Xie, Y., 2019. Soil pollution management in China: a brief introduction. *Sustainability* **11** (3), 556. <https://doi.org/10.3390/su11030556>

Loskutov, S.I., Pukhalsky, Ya.V., Shaposhnikov, A.I., Vorobyov, N.I., Belimov, A.A., 2019. Molekuliarnaia ekologiia – novoe napravlenie v izuchenii izmeneniia bioraznoobraziia mikroflory razlichnykh tipov pochv pod vozdeistviem zasukhi [Molecular ecology – a new direction in the study of changes in biodiversity of microflora of various types of soils under the influence of drought]. *Sbornik dokladov 3-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov s mezhdunarodnym uchastiem, posviashchennaia 145-letiiu so dnia rozhdeniia Doiarenko A.G. "Ekologiia, resursosberezhenie i adaptivnaia selektsiia" [Proceedings of the 3rd All-Russian scientific and practical Internet conference of young scientists and specialists with international participation,*

*dedicated to the 145th anniversary of A. G. Doyarenko "Ecology, resource conservation and adaptive selection"*, Saratov, 20–22.03.2019. Saratov, Russia, 146. (In Russian).

Mengdi, X., Wenqing, C., Haibo, D., Xiaoqing, W., Li, Y. et al., 2021. Cadmium-induced hormesis effect in medicinal herbs improves the efficiency of safe utilization for low cadmium-contaminated farmland soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **225**, 112724. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112724>

Msimbira, L.A., Smith, D.L., 2020. The roles of plant growth promoting microbes in enhancing plant tolerance to acidity and alkalinity stresses. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **4**, 106. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00106>

Odum, E.P., 1983. *Basic Ecology*. Harcourt Brace College Publishers, New York, USA, 613 p.

Olkova, A.S., Ashikhmina, T.Ya., 2021. Faktory polucheniia reprezentativnykh rezul'tatov biotestirovaniia vodnykh sred (obzor) [Factors for obtaining representative results of bioassaying of aquatic environments (review)]. *Teoreticheskaiia i prikladnaia ekologiia [Theoretical and Applied Ecology]* **2**, 22–30. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-022-030>

Olkova, A.S., Tovstik, E.V., 2022. Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering and Environmental Technology* **23** (1), 42–48. <https://doi.org/10.12912/27197050/143003>

Orlov, D.S., 1992. *Khimiya pochv [Soil chemistry]*. Moscow State University, Moscow, Russia, 400 p. (In Russian).

Praktikum po mikrobiologii [Microbiology practical guide], 2005. Netrusov, A.I. (ed.). Akademiya, Moscow, Russia, 603p. (In Russian).

Suzdaleva, A.V., Shein, E.V., Abrosimov, K.N., Dembovetsky, A.V., 2022. Struktura porovogo prostranstva pochv, prorastaiushchikh kornei i mikrobnogo soobshchestva v konsortsiime "pochva – rasteniia – mikroorganizmy" v pochvakh model'nogo semennogo lozha iachmenia [The structure of the pore space of soils, germinating roots and microbial community in the soil-plant-microorganism consortium in the soils of a model barley seedbed]. *Problemy agrokhimii i ekologii [Problems of Agrochemistry and Ecology]* **2**, 45–50. (In Russian). <https://doi.org/10.26178/AE.2022.19.44.001>

Terekhova, V.A., 2022. Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: Modern approaches to integration for environmental assessment (a review). *Eurasian Soil Science* **55**, 601–612. <https://doi.org/10.1134/S106422932205009X>

Ushakov, R.N., Ruchkina, A.V., 2020. Vliianie plodorodiia agroseroi pochvy na aktivnost' mikroflory v usloviakh zasukhi v nechernozemnoi zone Rossii [The influence of agro-gray soil fertility on the activity of microflora under drought conditions in the non-chernozem zone of Russia]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]* **6**, 69–77. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/s0002188120060137>

Varshal, G.M., Koshcheeva, I.Y., Khushvakhtova, S.D., Velyukhanova, T.K., Tatsii, Y.G. et al., 1999. Complex formation of mercury with humus acids: An important stage of the biospheric mercury cycle. *Geochemistry international* **37** (3), 229–234.

Zuccarini, P., Asensio, D., Ogaya, R., Sardans, J., Peñuelas, J., 2020. Effects of seasonal and decadal warming on soil enzymatic activity in a P-deficient Mediterranean shrubland. *Global Change Biology* **26** (6), 3698–3714. <https://doi.org/10.1111/gcb.15077>