

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214

EDN: DSYDJQ

УДК 57.04



Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, ЗАСУХИ И ЗАКИСЛЕНИЯ ПОЧВЫ НА ЕЕ ИНДИКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е.В. Товстик, А.С. Олькова

Аннотация

Обоснование. Биотестовые и биоиндикационные показатели состояния почвы могут изменяться не только в результате загрязнения, но и в силу действия неблагоприятных факторов окружающей среды.

Целью исследования было сравнение влияния химического загрязнения, кратковременной засухи и закисления на токсикологические и биоиндикационные характеристики дерново-подзолистой почвы.

Методы исследования. Объектом исследования служили пробы дерново-подзолистой почвы, испытавшей независимое действие трех факторов: загрязнение кадмием ($6,4 \pm 0,5$ мг/кг), средний уровень кислотности (4,8 ед. рН), недостаток увлажнения (25 суток). При биотестировании использовали культуры *Paramecium caudatum* и препарат на основе *Escherichia coli*, при биоиндикации – каталазную и уреазную активность, численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов в почве.

Результаты. Биотестирование водных вытяжек из почвы показало, что за 30 мин. тест-реакции индексы токсичности повышаются только в пробах со среднекислой реакцией среды; за 180 мин. экспозиции *E. coli* чувствительны к пробам почвы, испытавшей засуху и загрязнение кадмием, *P. caudatum* – только засуху. Уровень каталазной активности почвы при всех воздействиях был сопоставим с контролем (почва без воздействия); активность уреазы значительно снизилась только в почве со среднекислой реакцией среды. Численность аборигенных аммонификаторов в почве снижалась при всех видах воздействия; олиготрофы и олигокарбофилы – получали преимущество (относительно контроля).

Выводы. Природные экологические факторы могут изменять параметры экологического состояния почвы так же, как и антропогенные.

Ключевые слова: кадмий; кислотность почвы; засуха; реакции организмов; ферментативная активность; каталаза; уреазы; эколого-трофические группы; микроорганизмы; однофакторный анализ; корреляционный анализ

Для цитирования. Товстик, Е. В., & Олькова, А. С. (2025). Сравнительная оценка влияния загрязнения, засухи и закисления почвы на ее индикационные характеристики. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 109-123. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214>

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF POLLUTION, DROUGHT AND ACIDIFICATION OF THE SOIL ON ITS INDICATIVE CHARACTERISTICS

E.V. Tovstik, A.S. Olkova

Abstract

Background. Toxicity and biological indicators of soil condition can change not only as a result of pollution, but also under the action of unfavorable environmental factors.

The aim of the study was to compare the effects of chemical pollution, short-term drought and acidification on the toxicological and bioindication characteristics of sod-podzolic soil.

Research methods. The object of the study was samples of sod-podzolic soil, which experienced the independent action of three factors: cadmium pollution (6.4 ± 0.5 mg/kg), average acidity level (pH 4.8), lack of moisture (25 days). During bioassay, *Paramecium caudatum* cultures and a preparation based on *Escherichia coli* were used, during bioindication, catalase and urease activity, the number of the main ecological and trophic groups of microorganisms in the soil were used.

Results. Bioassay of water extracts from the soil showed that in 30 min test reactions, the toxicity indices increase only in samples with a medium acid reaction of the medium. *E. coli* in 180 minutes showed sensitivity to soil samples that had experienced drought and cadmium pollution, *P. caudatum* – only to drought. The level of catalase activity of the soil under all influences was comparable to the control (soil without exposure); urease activity significantly decreased only in soil with a medium acidic reaction of the medium. The number of native ammonifiers

in the soil decreased with all types of exposure; oligotrophes and oligocarbophiles gained an advantage (relative to control).

Conclusion. Thus, natural environmental factors can change the parameters of the ecological state of the soil in the same way as anthropogenic factors.

Keywords: cadmium; soil acidity; drought; reactions of organisms; enzymatic activity; catalase; urease; ecological and trophic groups; microorganisms; one-factor analysis; correlation analysis

For citation. Tovstik, E. V., & Olkova, A. S. (2025). Comparative assessment of the impact of pollution, drought and acidification of the soil on its indicative characteristics. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 109-123. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1214>

Введение

Почва и её характеристики являются отражением совокупности экологических факторов: состава почвообразующей породы, климатических характеристик местности, растительного покрова, способа обработки [13]. Интерпретация результатов биотестирования и биоиндикации почв всегда должна проходить с учётом основных действующих факторов среды.

Типология почвы, особенности её генезиса и текущие физико-химические особенности в первую очередь влияют на её устойчивость к неблагоприятным факторам как природного, так и антропогенного происхождения. Известно, что почвы легкого гранулометрического состава являются более слабым геохимическим барьером при загрязнении по сравнению с почвами, содержащими больше глинистой фракции [1]. Высокая обеспеченность почвы органическим веществом способствует снижению подвижности многих поллютантов, в том числе тяжелых металлов [19]. Разнообразие типов почв приводит к тому, что один и тот же уровень загрязнения в разной степени оказывает влияние на её токсичность и биоиндикационные характеристики. Помимо загрязнения, почва может испытывать воздействие и других неблагоприятных факторов. Например, снижение среднегодовой температуры при прочих равных условиях, замедляет процессы жизнедеятельности почвенных организмов, что в свою очередь ведет к замедлению скорости минерализации органического вещества, сорбции токсикантов неорганической природы и биологической деструкции органических загрязнителей [3]. Содержание влаги в почве во время засухи или при повышении температуры в значительной степени контролируется водоудерживающей способностью почвы, которая увеличивается с уменьшением размера пор (пустот) между почвенными части-

цами [14]. В связи с этим песчаные и супесчаные почвы более устойчивы к летней засухе, чем суглинистые и глинистые.

Установлено, что активность экзоферментов почвы южной тайги и смешанных лесов больше всего зависит от среднегодовой температуры и уровня pH, а зависимости между активностью ферментов и содержанием органического вещества не прослеживается [18]. Изменение родового и видового разнообразия актиномицетов, степени минерализации органического вещества отмечается в почвах, заселяемых инвазивной растительностью [10].

То есть природные экологические факторы, как и антропогенные, могут влиять на индикаторные характеристики почвы, используемые для заключения об экологическом состоянии почвенного покрова на территории исследования.

Сравнительная оценка воздействия на почву загрязнения и других экологических факторов – вопрос слабо изученный. Исходя из этого, *целью работы* было сравнение влияния химического загрязнения, кратковременной засухи и закисления на токсикологические и биоиндикаторные характеристики дерново-подзолистой почвы.

Материалы и методы исследования

Концепцией данной работы было выявление степени воздействия факторов разной этиологии (загрязнение, повышенная кислотность, засуха) на изолированные почвенные модели. Обособленная оценка воздействия каждого из экологических факторов была направлена на проверку гипотезы о том, что причиной изменения индикаторных характеристик почвы может быть не только загрязнение. Работа дополняет результаты, представленные в работе [7], где более подробно анализируются вариации индикаторных признаков почвы под влиянием созданной нагрузки. В представленной работе сделан акцент на вопросах факториальной экологии с выходом на практические рекомендации по выбору методов исследования состояния почвы в зависимости от факторов её формирования и текущих антропогенных воздействий.

Объектом исследования была дерново-подзолистая среднесуглинистая среднегумусная (1,9–2,5% по ГОСТ 26213-91) почва, обеспеченность подвижным фосфором и нитратным азотом низкая (20–50 и 1,1–1,7 мг/кг соответственно по ГОСТ 26207-91 и 26951-86), pH 6,5±0,1 (вытяжка 1 н. раствор KCl по ГОСТ 26423-85) и 4,8±0,1 для варианта с повышенной кислотностью.

Моделирование действия разных факторов на почву проводилось в изолированных ёмкостях, размещенных на открытой площадке в естественных условиях вегетационного сезона (90 суток) среднетаежной подзоны. Модельное загрязнение почвы кадмием осуществлялось путем внесения в нее ацетата кадмия. Содержание подвижных соединений кадмия, извлекаемых из почвы ацетатно-аммонийным буфером, по данным атомно-абсорбционной спектроскопии составило при этом $6,4 \pm 0,5$ мг/кг, что соответствует 3,2 кратности превышения ориентировочно допустимой концентрации (ОДК).

Действие фактора повышенной кислотности оценивалось в варианте со среднекислой природной почвой ($\text{pH}_{\text{KCl}} = 4,8 \pm 0,1$), которая по другим физическим и физико-химическим характеристикам была близка к почве контрольного варианта (pH 6,5). Уровень pH почвы определяли в солевой вытяжке из почв согласно ГОСТ 26483-85 с помощью pH-метра марки pH-МИ150 (Россия).

Кратковременная засуха создавалась изоляцией емкости с почвой полимерным навесом на 25 суток.

Контрольный вариант не подвергался воздействию.

Для анализа почву сушили до постоянной массы, пропускали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Предметом исследования в пробах почвы служили интегральные показатели экологического состояния почвы.

Токсичность почвы оценивали по ответным реакциям *Paramecium caudatum* (Биотестер, Россия) [11] и бактериального препарата на основе *Escherichia coli* (Биотокс-10М, Россия) [8]. Тест реакцией *P. caudatum* было изменение хемотаксиса организмов, препарата *E. coli* – биOLUMИнесценции бактериальной суспензии. Вычисляли индекс токсичности почвы по формуле: $T = (T_{\text{пр}} - T_{\text{к}}) / T_{\text{пр}}$, где T – индекс токсичности, $T_{\text{пр}}$ – средние показания прибора для пробы, $T_{\text{к}}$ – средние показания приборы для контроля (10% среда Лозина-Лозинского для теста по *P. caudatum*, дистиллированная вода для теста по *E. coli*). Оба теста проводили с экспозицией 30 минут, а также с увеличением времени контакта тест-организмов с вытяжками до 180 минут.

Активность каталазы в почве определяли газометрическим методом с оценкой объема кислорода, выделившегося за минуту ($\text{см}^3 \text{O}_2/\text{г мин}$). Активность уреазы определяли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре марки ПЭ 5300ВИ (ООО «Экротех», Россия) с расчетом количества расщепившейся мочевины (мг $\text{N-NH}_4^+/\text{г}$) [12]. Численность основных эколого-трофических групп микроорганизмов (КОЕ/г почвы)

оценивали на селективных питательных средах методом прямого подсчета колоний.

Статистический анализ был выполнен с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим защищенным тестом наименьшей значимой разницы Фишера (критерий LSD). Оценку влияние каждого фактора на индикационные показатели почвы проводили по отдельности. Данные представляли в виде средних значений $\pm$ стандартные отклонения ($n = 3$). Разными буквенными индексами указывали достоверные отличия массивов данных (при $p < 0,05$).

Результаты

Индикационные показатели почвы при действии разных факторов

Дисперсионный анализ данных позволил провести сравнительную оценку влияния факторов разной этиологии на экотоксикологические, биохимические и биоиндикационные показатели почвы (табл. 1).

Таблица 1.

Токсикологические и биоиндикационные показатели дерново-подзолистей почвы, испытавшей воздействие разной этиологии

Показатель	Контроль	Кадмий	Кислотность	Засуха
Токсичность почвы при контакте 30 мин				
<i>P. caudatum</i>	0,55 $\pm$ 0,015 ^a	0,62 $\pm$ 0,06 ^a	0,75 $\pm$ 0,03 ^b	0,62 $\pm$ 0,09 ^a
<i>E. coli</i>	-118 $\pm$ 17 ^a	-138,9 $\pm$ 21,7 ^a	-67,4 $\pm$ 21,5 ^b	-121,5 $\pm$ 22,4 ^a
Токсичность почвы при контакте 180 мин				
<i>P. caudatum</i>	0,55 $\pm$ 0,012 ^a	0,57 $\pm$ 0,02 ^a	0,57 $\pm$ 0,01 ^a	0,68 $\pm$ 0,09 ^b
<i>E. coli</i>	6,6 $\pm$ 2,0 ^b	78,90 $\pm$ 11,06 ^c	-133 $\pm$ 69 ^a	51,6 $\pm$ 20,4 ^{b,c}
Ферментативная активность почвы				
Каталаза, см ³ O ₂ /г-мин	1,10 $\pm$ 0,29 ^a	0,96 $\pm$ 0,014 ^a	0,80 $\pm$ 0,11 ^a	0,90 $\pm$ 0,12 ^a
Уреаза, мг N-NH ₄ ⁺ /г	26,1 $\pm$ 2,1 ^b	29,9 $\pm$ 2,4 ^b	15,9 $\pm$ 1,3 ^a	30,0 $\pm$ 2,4 ^b
Численность аборигенной микрофлоры, $\times 10^5$ КОЕ / г				
Аммонификаторы	75 $\pm$ 8 ^d	25,0 $\pm$ 2,5 ^b	14,0 $\pm$ 1,4 ^a	32,0 $\pm$ 3,2 ^c
Амилолитики	50 $\pm$ 5 ^a	320 $\pm$ 32 ^c	310 $\pm$ 31 ^c	80 $\pm$ 8 ^b
Целлюлозолитики	5,0 $\pm$ 0,5 ^b	7,0 $\pm$ 0,7 ^c	2,00 $\pm$ 0,20 ^a	3,00 $\pm$ 0,30 ^a
Олиготрофы	3,00 $\pm$ 0,30 ^a	12,0 $\pm$ 1,20 ^b	8,3 $\pm$ 0,8 ^b	66 $\pm$ 7 ^c
Оликарбофилы	6,0 $\pm$ 0,6 ^a	78 $\pm$ 8 ^d	17,0 $\pm$ 1,7 ^c	10,0 $\pm$ 1,0 ^b

Примечание: результаты представлены в виде $M \pm \delta$, где M – среднее значение опытных показателей ($n=3$), δ – стандартное отклонение; разноименные буквенные индексы указывают на достоверные различия в ряду сравнений «контроль-кадмий-кислотность-засуха» по одному показателю.

Тест по хемотаксису *P. caudatum* за 30 минут показал, что токсичность среднекислой почвы выше, чем в контроле в 1,4 раза, с кадмием и при засухе в 1,2 раза ($p < 0,05$). Почва, испытывавшая воздействие кадмия и засухи, характеризовалась повышенными значениями индексов токсичности по сравнению с контролем, но достоверный уровень отличий не был достигнут ($p > 0,05$). За увеличенное время экспозиции проявилась токсичность почвы, подвергшейся засухе ($p < 0,05$), разница с контролем составила 1,2 раза.

Особенностью реакции бактериальной тест-системы оказалась стимуляция биолюминесценции во всех пробах, однако, этот эффект был минимален в среднекислой почве. В данном случае реакцию можно считать снижением биолюминесценции бактериальной суспензии по сравнению с контролем (в 1,8 раз, $p < 0,05$). При увеличении экспозиции до 180 минут реакция *E. coli* кардинально менялась. Контрольная почва оставалась нетоксичной: индекс Т имел положительное значение, но относился к I группе токсичности (не токсично). Действие вариантов «кадмий» и «засуха» становилось значительным: индексы Т достоверно отличались от контроля и характеризовали пробы как сильно токсичные. При этом реакция *E. coli* на вытяжку из среднекислой почвы оставалась в зоне стимуляции биолюминесценции, то есть данная проба по сравнению с другими вариантами была нетоксична.

Каталазная активность в почве значимо не менялась ни при одном из оцениваемых воздействий ($p > 0,05$ при сравнении с контролем), однако тенденция к снижению значений показателя наблюдалась во всех вариантах. Максимальное снижение при этом регистрировали в среднекислой почве (в 1,4 раза по сравнению с контролем). Аналогично каталазной активности, уровень уреазы значительно снижался в среднекислой почве: в 1,6 раз по сравнению с контрольными значениями ($p < 0,05$). Химический стресс и засуха не угнетали активность уреазы в почве.

Представители аборигенной микрофлоры опытной почвы в силу разной трофической принадлежности реагировали на оцениваемые факторы более разнообразно. Численность аммонификаторов и целлюлозолитиков максимально снижалась в среднекислой почве (в 5,4 и 2,5 раза по сравнению с контролем). Амилолитики, амилокарбофилы и олиготрофы присутствовали в составе сообщества контрольной почвы в качестве минорного компонента, а в опытных вариантах их численность повышалась. Представители этих же групп микроорганизмов были обнаружены в наибольшей численности в варианте «кадмий», кроме олиготрофов, которые получили численное преимущество при засухе.

Обсуждение результатов

В совокупности результаты показали, что загрязнение почвы кадмием на уровне 3,2 ОДК является не критичным воздействием, значимо не меняющим острую токсичность почвы по биотестам, которые, согласно предыдущим исследованиям, были отнесены к чувствительным по отношению к тяжелым металлам [6]. При этом средний уровень кислотности почвы (4,8 ед. рН) и кратковременная засуха (25 дней) повлияли на интегральную токсичность. Это говорит о том, что неблагоприятные природные факторы могут не только напрямую влиять на продуктивность экосистем, в том числе агроэкосистем [4, 9], но и косвенно – через изменение свойств почвы.

Выявлено, что время контакта тест-организмов с тестируемой средой является крайне важным фактором, влияющим на заключение о токсичности проб почвы. В исследовании [17] показано, что не только состав загрязнения, но и продолжительность воздействия на тест-организмы влияют на результаты исследований. В наших экспериментах токсичность экзогенного кадмия для *E. coli* стала очевидной только через 3 часа экспозиции. Для улучшения прогнозов о токсичности веществ необходимы подробные лабораторные исследования продолжительностью не менее 24 часов [16]. Отметим, что экспресс-биотесты позволяют отслеживать динамику развития токсического процесса за относительно короткие промежутки времени, что необходимо внедрять в природоохранную практику для вынесения объективного заключения о токсичности пробы.

Активность каталазы почвы оказалась не чувствительна к загрязнению кадмием, увеличению кислотности почвы и засухе. Вероятно, это связано с тем, что уровень испытываемой нагрузки не являлся экстремальным. Так, в работе [5] показано, что изменение активности каталазы при загрязнении почвы кадмием на уровне 5 и 10 мг/кг, было менее значимым, чем при 20 и 40 мг/кг. При этом отмечали снижение активности уреазы – только в варианте со слабокислой почвой. Это также подтверждает, что уровень моделируемого загрязнения кадмием не являлся экстремальным, а также, что кислотность почвы – важный фактор, влияющий не только на доступность питательных веществ для растений [20], но и на индикаторные параметры почвы.

Реакцию аборигенной микрофлоры, а именно повышение численности колоний амилолитиков, амилокарбофилов и олиготрофов, можно отнести к начальной стадии их стресса [2], что наблюдалось при всех трех видах воздействия на почву. При уменьшении влажности снижается интенсивность естественного гидролиза питательных веществ, что ограничило раз-

множение многих групп микробов, кроме неприхотливых олиготрофов. Стимуляция аборигенных почвенных микроорганизмов относительно невысоким химическим воздействием отмечается многими исследователями [15; 21], что мы и наблюдали в наших экспериментах.

Таким образом, подтвердилась недооцененная роль фактора почвенного увлажнения и уровня pH в формировании структуры почвенных сообществ, о чем сообщалось ранее [17]. Новизной нашей работы является демонстрация экотоксикологических и биохимических откликов почвы на неблагоприятные факторы физической и физико-химической природы.

Результаты выполненного анализа позволили составить ряд информативности показателей экологического состояния почвы в условиях исследуемых абиотических факторов: численность аборигенной микрофлоры > биотесты $\geq$ ферментативная активность почвы.

Заключение

Результаты работы показали, что экологические факторы разной этиологии могут одинаково влиять на показатели почвы, которые используются для оценки ее экологического состояния.

В результате сравнения действия на почву загрязнения кадмием, повышенной кислотности и кратковременной засухи оказалось, что при экспресс-биотестировании (30 мин.) только фактор кислотности увеличивал токсичность почвы. Более длительный контакт тест-организмов с почвенными вытяжками привел к регистрации токсичности в загрязненной почве (*E. coli*) и в почве, испытывавшей засуху (*P. caudatum* и *E. coli*).

Действие повышенной кислотности оказалось значимым для уреазной активности почвы, активность каталазы была стабильной.

Все факторы влияли на численность аборигенной микрофлоры в соответствии с трофическими предпочтениями групп. Так, численность аммонификаторов и олиготрофов снижалась в ряду «засуха-загрязнение-кислотность». Кислотность и засуха угнетали целлюлозолитиков на одинаковом уровне. Развитие амилитиков и олиготрофов одинаково стимулировалось действием кадмия и кислой реакции среды, а стимуляция олигокарбофилов возрастала в ряду «засуха-кислотность-загрязнение».

Выполненный анализ позволил рекомендовать индикаторные показатели для оценки состояния почвы в разных условиях. К загрязнению кадмием оказались наиболее чувствительны биотест по *E. coli* (180 мин.) и биоиндикация по амилитической микрофлоре. О повышенной кислотности будут свидетельствовать результаты биотестов по *P. caudatum* и *E.*

coli (30 мин.), биоиндикация по целлюлозолитикам и уреазной активности почвы. В засушливой почве следует ожидать увеличения токсичности по *P. caudatum* и *E. coli* (180 мин.) и снижения численности целлюлозолитиков.

Каждый фактор был представлен одним уровнем воздействия, что влечет за собой ограничения в применении сформулированных рекомендаций и выводов. Однако, исследованные уровни загрязнения, кислотности и действия засухи являются распространенными.

Список литературы

1. Воронина, Л. П., Поногайбо, К. Э., & Савостикова, О. Н. (2022). Обоснование выбора типов почв для гигиенического нормирования химических веществ (обзор литературы). *Гигиена и санитария*, 101(3), 270–274. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274>. EDN: <https://elibrary.ru/JNUISW>
2. Добровольская, Т. Г., Звягинцев, Д. Г., Чернов, И. Ю., Головченко, А. В., Зенова, Г. М., Лысак, Л. В., Манучарова, Н. А., Марфенина, О. Е., Полянская, Л. М., Степанов, А. Л., Умаров, М. М. (2015). Роль микроорганизмов в экологических функциях почв. *Почвоведение*, 9, 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>. EDN: <https://elibrary.ru/UDEUQV>
3. Добровольский, Г. В., Куст, Г. С., Чернов, И. Ю., Добровольская, Т. Г., Лысак, Л. В., Андреева, О. В., Степанов, А. Л., Ковалева, Н. О., Макеев, А. О., Федотов, Г. Н., Шалаев, В. С., Соколов, М. С., Розов, С. Ю., Смагин, А. В., Ковалев, И. В., Медведева, О. Е., Бессонова, Е. А., Попова, Л. В., Рыхликова, М. Е., Рахлеева, А. А., Мартыненко, И. А. (2012). *Почвы в биосфере и жизни человека* (584 с.). Москва: Московский государственный университет леса (Мытищи). ISBN: 978-5-8135-0575-1. EDN: <https://elibrary.ru/TNBORZ>
4. Кедрова, Л. И., & Уткина, Е. И. (2018). Влияние почвенной кислотности на урожайность озимой ржи и возможности эдафической выборки. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 6(67), 17–25. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2 Newton.67.6.17-25>. EDN: <https://elibrary.ru/VNWWGZ>
5. Новосёлова, Е. И., & Волкова, О. О. (2017). Влияние тяжёлых металлов на активность каталазы разных типов почв. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2(64), 190–193. EDN: <https://elibrary.ru/YMXHIZ>
6. 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>. EDN: <https://elibrary.ru/ANOOJP>

7. 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>. EDN: <https://elibrary.ru/NMVRYS>
8. ПНД Ф 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»* [Документ]. Министерство природных ресурсов РФ, Москва, 2004 (издание 2010 г.).
9. Страшная, А. И., Бирман, Б. А., & Береза, О. В. (2018). Особенности засухи 2012 г. на Урале и в западной Сибири и её влияние на урожайность яровых зерновых культур. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2(368), 154–169. EDN: <https://elibrary.ru/UTCDQO>
10. Товстик, Е. В., Широких, И. Г., Соловьёва, Е. С., Широких, А. А., Ашихмина, Т. Я., & Савиных, В. П. (2018). Изменение почвенной актинобиоты под влиянием инвазии борщевика Сосновского. *Теоретическая и прикладная экология*, 4, 114–118. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118>. EDN: <https://elibrary.ru/YXSUIX>
11. ФР. 1.39.2015.19243. *Методика определения токсичности проб почв и донных отложений экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер»* (16 с.). Санкт-Петербург: ООО «СПЕКТР-М», 2015.
12. Хазиев, Ф. Х. (2005). *Методы почвенной энзимологии* (252 с.). Москва: Наука. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: <https://elibrary.ru/QKXHYJ>
13. Dixon, J. C. (2015). Soil morphology in the critical zone: The role of climate, geology, and vegetation in soil formation in the critical zone. *Developments in Earth Surface Processes*, 19, 147–172. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00005-7>
14. Dong, J., & Ochsner, T. E. (2018). Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. *Water Resources Research*, 54(3), 2199–2211. <https://doi.org/10.1002/2017WR021692>
15. Fan, D., Wang, S., Guo, Y., Liu, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., & Han, J. (2021). The role of bacterial communities in shaping Cd-induced hormesis in ‘living’ soil as a function of land-use change. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124996. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124996>. EDN: <https://elibrary.ru/JLHKTZ>
16. French-McCay, D. P., Robinson, H. J., Adams, J. E., Frediani, M. A., Murphy, M. J., Morse, Ch., Gloekler, M., & Parkerton, Th. F. (2024). Parsing the toxicity

- paradox: Composition and duration of exposure alter predicted oil spill effects by orders of magnitude. *Marine Pollution Bulletin*, 202, 116285. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116285>. EDN: <https://elibrary.ru/FOAAFE>
17. Howe, J. A., & Peyton, S. A. (2021). The soil habitat. In T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology* (3rd ed., pp. 23–55). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00002-2>
 18. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2022). Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(1), 42–48. <https://doi.org/10.12912/27197050/143003>. EDN: <https://elibrary.ru/MKSPWQ>
 19. Sohail, M. I., Arif, M., Rauf, A., Rizwan, M., Ali, S., Saqib, M., & Zia-ur-Rehman, M. (2019). Chapter 2: Organic manures for cadmium tolerance and remediation. In: *Cadmium Tolerance in Plants* (pp. 19–67). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00002-3>. EDN: <https://elibrary.ru/YXETYY>
 20. Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2024). Chapter 9: The chemistry of soil acidity. In: *Environmental Soil Chemistry* (3rd ed., pp. 381–410). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14034-1.00009-5>
 21. Zhang, Y., Yang, S., Yang, J., Wu, Z., Liu, H., Nie, Z., Qu, J., Hu, Y., Shao, Y., Liu, J., Liu, F., & Hua, D. (2023). Temporal hormetic response of soil microbes to cadmium: A metagenomic perspective. *Science of the Total Environment*, 891, 164190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164190>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBCKIQ>

References

1. Voronina, L. P., Pongaybo, K. E., & Savostikova, O. N. (2022). Rationale for selecting soil types for hygienic standardization of chemicals (literature review). *Hygiene and Sanitation*, 101(3), 270–274. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-3-270-274>. EDN: <https://elibrary.ru/JNUISW>
2. Dobrovolskaya, T. G., Zvyagintsev, D. G., Chernov, I. Yu., Golovchenko, A. V., Zenova, G. M., Lysak, L. V., Manucharova, N. A., Marfenina, O. E., Polyanskaya, L. M., Stepanov, A. L., & Umarov, M. M. (2015). Role of microorganisms in ecological functions of soils. *Eurasian Soil Science*, 9, 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>. EDN: <https://elibrary.ru/UDEUQV>
3. Dobrovolsky, G. V., Kust, G. S., Chernov, I. Yu., Dobrovolskaya, T. G., Lysak, L. V., Andreeva, O. V., Stepanov, A. L., Kovaleva, N. O., Makeev, A. O., Fedotov, G. N., Shalae, V. S., Sokolov, M. S., Rozov, S. Yu., Smagin, A. V., Kovalev, I. V., Medvedeva, O. E., Bessonova, E. A., Popova, L. V., Rykhlikova, M. E., Rakhleeva, A. A., & Martynenko, I. A. (2012). *Soils in the biosphere and*

- human life* (584 pp.). Moscow: Moscow State Forest University (Mytishchi). ISBN: 978-5-8135-0575-1. EDN: <https://elibrary.ru/TNBORZ>
4. Kedrova, L. I., & Utkina, E. I. (2018). Effect of soil acidity on winter rye yield and possibilities of edaphic selection. *Agricultural Science of the Euro-North-East*, 6(67), 17–25. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2> Newton.67.6.17-25. EDN: <https://elibrary.ru/VNWGUZ>
 5. Novoselova, E. I., & Volkova, O. O. (2017). Effect of heavy metals on catalase activity in different soil types. *Proceedings of Orenburg State Agrarian University*, 2(64), 190–193. EDN: <https://elibrary.ru/YMXHIZ>
 6. Olkova, A. S., & Ashikhmina, T. Ya. (2021). Factors for obtaining representative results in biotesting of aquatic environments (review). *Theoretical and Applied Ecology*, 2, 22–30. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-022-030>. EDN: <https://elibrary.ru/ANOOJP>
 7. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2024). Information value of indicators of soil ecological state under low-level stress conditions: pollution, drought, acidity. *Ecosystem Transformation*, 7(3), 138–152. <https://doi.org/10.23859/estr-230217>. EDN: <https://elibrary.ru/NMVRYS>
 8. PND F T 14.1:2:3:4.11-04. *Method for determining integral toxicity of surface waters (including marine), groundwater, drinking water, wastewater, aqueous extracts of soils, waste, sewage sludge by changes in bacterial bioluminescence using the “Ecolum” test system* [Document]. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Moscow, 2004 (2010 edition).
 9. Strashnaya, A. I., Birman, B. A., & Bereza, O. V. (2018). Features of the 2012 drought in the Urals and Western Siberia and its impact on spring grain crop yields. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2(368), 154–169. EDN: <https://elibrary.ru/UTCDQO>
 10. Tovstik, E. V., Shirokikh, I. G., Solovyova, E. S., Shirokikh, A. A., Ashikhmina, T. Ya., & Savinykh, V. P. (2018). Changes in soil actinobiotics under the influence of *Heracleum sosnowskyi* invasion. *Theoretical and Applied Ecology*, 4, 114–118. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2018-4-114-118>. EDN: <https://elibrary.ru/YXSUIX>
 11. FR. 1.39.2015.19243. *Method for determining toxicity of soil and bottom sediment samples using the express method with the “Biotester” series device* (16 pp.). Saint Petersburg: LLC “SPEKTR M”, 2015.
 12. Khaziev, F. Kh. (2005). *Methods of soil enzymology* (252 pp.). Moscow: Nauka. ISBN: 5-02-033940-7. EDN: <https://elibrary.ru/QKXHYJ>
 13. Dixon, J. C. (2015). Soil morphology in the critical zone: The role of climate, geology, and vegetation in soil formation in the critical zone. *Developments*

- in Earth Surface Processes*, 19, 147–172. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63369-9.00005-7>
14. Dong, J., & Ochsner, T. E. (2018). Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. *Water Resources Research*, 54(3), 2199–2211. <https://doi.org/10.1002/2017WR021692>
 15. Fan, D., Wang, S., Guo, Y., Liu, J., Agathokleous, E., Zhu, Y., & Han, J. (2021). The role of bacterial communities in shaping Cd-induced hormesis in ‘living’ soil as a function of land-use change. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124996. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124996>. EDN: <https://elibrary.ru/JLHKTZ>
 16. French-McCay, D. P., Robinson, H. J., Adams, J. E., Frediani, M. A., Murphy, M. J., Morse, Ch., Gloekler, M., & Parkerton, Th. F. (2024). Parsing the toxicity paradox: Composition and duration of exposure alter predicted oil spill effects by orders of magnitude. *Marine Pollution Bulletin*, 202, 116285. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116285>. EDN: <https://elibrary.ru/FOAAFE>
 17. Howe, J. A., & Peyton, S. A. (2021). The soil habitat. In T. J. Gentry, J. J. Fuhrmann, & D. A. Zuberer (Eds.), *Principles and Applications of Soil Microbiology* (3rd ed., pp. 23–55). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00002-2>
 18. Olkova, A. S., & Tovstik, E. V. (2022). Comparison of natural abiotic factors and pollution influence on the soil enzymatic activity. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(1), 42–48. <https://doi.org/10.12912/27197050/143003>. EDN: <https://elibrary.ru/MKSPWQ>
 19. Sohail, M. I., Arif, M., Rauf, A., Rizwan, M., Ali, S., Saqib, M., & Zia-ur-Rehman, M. (2019). Chapter 2: Organic manures for cadmium tolerance and remediation. In: *Cadmium Tolerance in Plants* (pp. 19–67). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00002-3>. EDN: <https://elibrary.ru/YXETYY>
 20. Sparks, D. L., Singh, B., & Siebecker, M. G. (2024). Chapter 9: The chemistry of soil acidity. In: *Environmental Soil Chemistry* (3rd ed., pp. 381–410). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14034-1.00009-5>
 21. Zhang, Y., Yang, S., Yang, J., Wu, Z., Liu, H., Nie, Z., Qu, J., Hu, Y., Shao, Y., Liu, J., Liu, F., & Hua, D. (2023). Temporal hormetic response of soil microbes to cadmium: A metagenomic perspective. *Science of the Total Environment*, 891, 164190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164190>. EDN: <https://elibrary.ru/ZBCKIQ>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Товстик Евгения Владимировна, канд. биол. наук, доцент, доцент, с.н.с.
кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»
ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Российская Федерация
tovstik2006@inbox.ru*

Олькова Анна Сергеевна, докт. биол. наук, доцент, профессор, с.н.с. кафедры экологии и природопользования
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»
ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Российская Федерация
usr08617@vyatsu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniya V. Tovstik, Candidate of Biological Sciences, Docent, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Fundamental Chemistry and Methods of Teaching Chemistry
*Vyatka State University
36, Moskovskaya Str., 610000, Kirov, Russian Federation
tovstik2006@inbox.ru
SPIN-code: 8792-9281
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>
ResearcherID: ID P-1350-2017
Scopus Author ID: 57004932100*

Anna S. Olkova, Doctor of Biological Sciences, Docent, Professor and Senior Research Fellow of the Department of Ecology and Environmental Management
*Vyatka State University
36, Moskovskaya Str., 610000, Kirov, Russian Federation
usr08617@vyatsu.ru
SPIN-code: 4874-9240
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5798-8211>
Researcher ID: A-4963-2017
Scopus Author ID: 57195523346*

Поступила 08.11.2024
После рецензирования 20.12.2024
Принята 27.12.2024

Received 08.11.2024
Revised 20.12.2024
Accepted 27.12.2024