

УДК 631.453:631.445.41:632.122.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4893
Шифр специальности ВАК: 1.5.15, 1.5.19
Обзорная статья



Активность ферментов цикла углерода в почвах при загрязнении свинцом

Т.В. Минникова✉, А.А. Кузина, С.И. Колесников

Южный федеральный университет, Россия, г. Ростов-на-Дону

✉loko261008@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Цикл углерода (С) в почве тесно связан с циклами азота, серы и фосфора. При загрязнении почв тяжелыми металлами происходит нарушение функционирования микробиоты почв, что влияет на биогеохимические циклы элементов, проходящие в почве. Проведены исследования активности ферментов цикла углерода (С) почв России с разными физико-химическими свойствами. **Цель:** оценить влияние загрязнения свинцом на активность ферментов цикла углерода чернозема обыкновенного и дерново-подзолистого почв. **Объекты.** В лабораторном модельном эксперименте были исследованы активности двух типов почв: чернозема обыкновенного и дерново-подзолистого почв. Почвы, загрязненные свинцом (Pb) в дозах 100, 1000 и 10000 мг/кг, инкубировали в постоянных условиях (влажности почвы и температуре воздуха) в течение 30 суток. По окончании эксперимента каждый вариант каждого типа почв высушивали и проводили определение ферментативной активности в 3–6-кратной повторности. **Методы.** Была исследована активность восьми ферментов цикла С классов оксидоредуктазы и гидролазы: дегидрогеназы, пероксидазы, полифенолоксидазы, глюкозооксидазы, инвертазы, β -глюкозидазы, целлюлазы, хитиназы. В результате определения активности ферментов оценивали интегральный показатель ферментативной активности почв. **Результаты.** Целлюлаза и хитиназа дерново-подзолистого почв были простимулированы при наименьшей концентрации – 100 мг Pb /кг почвы. Ферменты класса оксидоредуктазы более чувствительны, чем класса гидролазы, но гидролазы более информативны, чем оксидоредуктазы. Целлюлаза – самый чувствительный и информативный фермент в дерново-подзолистом почве при загрязнении свинцом. Для чернозема обыкновенного самый чувствительный фермент – глюкозооксидаза, а наиболее информативный – инвертаза. Наибольшей информативностью по всем классам активности ферментов в черноземе обыкновенном обладает инвертаза, а в дерново-подзолистом почве – целлюлаза и β -глюкозидаза. Наибольшей чувствительностью по всем классам активности ферментов в черноземе обыкновенном обладает глюкозооксидаза, а в дерново-подзолистом почве – пероксидаза. Результаты исследования можно использовать при ферментативной диагностике состояния почв после загрязнения тяжелыми металлами.

Ключевые слова: чернозем обыкновенный, дерново-подзолистая почва, загрязнение, свинец, ферменты, интегральный показатель ферментативной активности, цикл углерода

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») по созданию молодежной лаборатории экобиотехнологий диагностики и охраны здоровья почв (№ СП-12-23-01), проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории в рамках межрегионального НОЦ Юга России (FENW 2024-0001).

Для цитирования: Минникова Т.В., Кузина А.А., Колесников С.И. Активность ферментов цикла углерода в почвах при загрязнении свинцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 112–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4893

UDC 631.453:631.445.41:632.122.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4893
Review article



Activity of enzymes of carbon cycle in soils under lead pollution

T.V. Minnikova✉, A.A. Kuzina, S.I. Kolesnikov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉loko261008@yandex.ru

Abstract. Relevance. The carbon cycle (C) in the soil is closely related to the cycles of nitrogen, sulfur and phosphorus. When soils are contaminated with heavy metals, the functioning of the soil microbiota is disrupted, which affects the biogeochemical cycles of elements occurring in the soil. The authors have studied the activity of enzymes of carbon cycle (C) of Russian soils with different physicochemical properties. **Aim.** To assess the effect of lead pollution on the activity of enzymes of carbon cycle in ordinary chernozem and sod-podzolic soil. **Objects.** In a laboratory model experiment, the activities of two types of soils were studied: ordinary chernozem and sod-podzolic soil. Soils contaminated with lead (Pb) at doses of 100, 1000 and 10000 mg/kg were incubated under constant conditions (soil moisture and air temperature) for 30 days. At the end of the experiment, each variant of each soil type was dried, and the enzymatic activity was determined in 3–6 replicates. **Methods.** The authors studied the activity of eight enzymes of the oxidoreductase and hydrolase classes of carbon cycle: dehydrogenase, peroxidase, polyphenol oxidase, glucose oxidase, invertase, β -glucosidase, cellulase, chitinase. As a result of determining the enzyme activity, the integral index of soil enzymatic activity was estimated. **Results.** Cellulase and chitinase of sod-podzolic soil were stimulated at the lowest concentration – 100 mg Pb/kg soil. Enzymes of the oxidoreductase class are more sensitive than hydrolases, but hydrolases are more informative than oxidoreductases. Cellulase is the most sensitive and informative enzyme in sod-podzolic soil contaminated with lead. For ordinary chernozem, the most sensitive enzyme is glucose oxidase, and the most informative is invertase. Invertase has the greatest informativeness for all enzyme activity classes in ordinary chernozem, and cellulase and β -glucosidase have it in sod-podzolic soil. Glucose oxidase has the greatest sensitivity for all enzyme activity classes in ordinary chernozem, and peroxidase has it in sod-podzolic soil. The results of the study can be used in enzymatic diagnostics of the state of soils after contamination with heavy metals.

Keywords: ordinary chernozem, sod-podzolic soil, pollution, lead, enzyme, integral index of enzymatic activity, carbon cycle

Acknowledgements: The study was financially supported by the project of the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University ("Priority 2030") (No. SP-12-23-01), project of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (FENW-2024-0001).

For citation: Minnikova T.V., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I. Activity of enzymes of carbon cycle in soils under lead pollution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 112–126. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/4893

Введение

Биогеохимический цикл углерода (C) является важнейшим индикатором состояния и здоровья экосистемы. Цикл углерода в почве тесно связан с очень сложным процессом: разложением органического вещества, попадающего в почву в виде растительных, микробных и животных органических остатков, до аминокислот, нуклеотидов, органические кислот, моносахаридов, CO_2 , NH_3 , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- и прочих соединений. Существует множество теорий гумификации органического вещества в почве с образованием гумуса при разложении растительных остатков [1–3] (рис. 1). На стадии разложения растительных остатков (гумификации) и в последующей постепенной минерализации ферментативная активность в почве выражена че-

рез сложную систему гидролитических и оксидоредуктазных ферментов: целлюлазы, инвертазы, глюкозидазы, пероксидазы, дегидрогеназы и другие ферменты [4–6]. Путь гумификации с участием ферментов в разных типах почв тесно связан с микробиологической активностью почвы: в черноземах с высокой микробиологическую активностью с конденсационным путем с глубоким распадом растительных остатков, а в дерново-подзолистых почвах глубокого распада растительных остатков не происходит и активность снижена [7].

Сниженная микробиологическая активность дерново-подзолистых почв обусловлена медленной трансформацией лигнина, белков, полисахаридов, пигментов в гумусовые вещества [4]. Почвенные ферменты участвуют в биогеохимических циклах

С, N и P в почве, которые могут использоваться в качестве ранних чувствительных индикаторов изменения содержания питательных веществ, вызванных изменением климата и при химическом загрязнении [8–12].

Пути гумификации:

по М.М. Кононовой:

1) разложение исходных органических остатков до более простых химически индивидуальных мономеров и продуктов частичного расщепления

2) синтез органических соединений с образованием высокомолекулярных специфической природы гумусовых веществ.



М.М. Кононова (1898-1979), д.б.н., лауреат Государственной премии СССР (1968)

по Л.Н. Александровой:

1) происходит процесс биохимического окислительного карбоксилирования продуктов частичного распада при непосредственном участии оксидов микроорганизмов,

2) характерны процессы дальнейшей трансформации молекул гуминовых кислот и фульвокислот путем роста степени их ароматизации вследствие частичной деструкции новообразованных гуминовых кислот.



Л.Н. Александрова (1908-1983), д.с.-х.н., профессор, заведующая кафедрой почвоведения Ленинградского сельскохозяйственного института

Рис. 1. Пути гумификации органического вещества
Fig. 1. Paths of organic matter humification

Смена типа землепользования влияет на содержание С и N, что оказывает прямое воздействие на активность ферментов цикла С (фенолоксидазы, пероксидазы, α-глюкозидаза, β-глюкозидаза, целлюбиогидролаза и b-1,-4-N ацетилглюкозаминидаза) в почве [13]. Важнейшую роль в процессе разложения и минерализации органического вещества в почве играют ферменты класса гидролаз (протеазы, хитиназы, целлюлазы, инвертазы, уреазы, глюкозидазы и др.) и оксидоредуктаз (каталазы, дегидрогеназы, пероксидазы, полифенолоксидазы, нитрат-, нитритредуктазы и др.) [14–16].

Активность ферментов как важнейших биохимических показателей широко используется в качестве диагностического показателя активности бактерий, грибов, водорослей в почвенной экосистеме и при оценке плодородия почвы после различных видов техногенного загрязнения [17–19]. Кроме того, была обнаружена сильная связь между различными функциональными генами и соответствующей им активностью ферментов в почвах Австралии [20]. Преобразование водно-болотных угодий приводит к потере запасов С и N в почве, что установлено по снижению содержания органического углерода почвы, активного углерода, растворенного органического углерода, общего содержания азота, микробной биомассы и активности β-

глюкозидазы и целлюбиогидролазы были ингибированы, тогда как активность полифенолоксидазы была простимулирована [21].

Ферменты, участвующие в цикле С (целлюлаза, амилаза, хитиназа, ксиланаза, триглицерол липаза), гидролизуют крупные органические соединения и расщепляют дисахариды и олигосахариды на простые сахара (β-глюкозидаза, α- и β-глюкозидазы, α- и β-галактозидазы и N-ацетил-β-глюкозаминидаза, инвертаза, пероксидаза, полифенолоксидаза) и участвуют в окислительно-восстановительных реакциях с органическими соединениями (аскорбатоксидаза, глюкозооксидаза, лакказа) [22–24]. Ферменты класса оксидоредуктазы (полифенолоксидазы и пероксидазы) участвуют в биогеохимическом цикле С и О, а именно в процессах минерализации фенольных соединений в почве при окислении сложных ароматических структур лигнина и гумусовых кислот [19, 25, 26]. Метаанализ экспериментов по потеплению климата позволил установить, что при потеплении менее чем на 1,5 °С происходит стимуляция активности инвертазы на 22 %, в то время как потепление более чем на 1,5 °С стимулировало активность фермента на 29 % [27]. Дегидрогеназы в почвах встречаются только внутри почвенных бактерий (рода *Pseudomonas*, *Pseudomonas entomophila* как наиболее распространенный). Поэтому, говоря о высокой активности дегидрогеназ, автоматически утверждают о качественном составе микробиоты и обилии почвенных бактерий, в частности рода *Pseudomonas* [28]. Хитин в присутствии целлюлазы индуцирует синтез хитиназы и других литических ферментов, которые способствуют высвобождению β-глюкозидазы. Целлюлазы играют важнейшую роль в переработке самого важного органического полимера – целлюлозы [29]. Целлюлаза обычно встречается в аэробных микроорганизмах, таких как грибы и бактерии [30]. При загрязнении почв разного гранулометрического состава тяжелыми металлами установлено, что кадмий наиболее эффективный ингибитор активности ферментов целлюлазы и β-глюкозидазы, менее токсичны, но не менее опасны, кобальт, свинец и никель [31]. При химическом загрязнении почв активность ферментов цикла С ингибируется в различной степени [9, 32–34]. Оценить изменение активности ферментативной системы необходимо с учетом вида загрязнения (нефтяное, моно- и полиметаллическое, удобрения, пестициды и пр.) и физико-химических показателей почв (структура, pH, содержание органического вещества, емкость катионного обмена и пр.) [4, 35, 36]. При загрязнении нефтью и нефтепродуктами наиболее чувствительны ферменты биогеохимического цикла N и С, а при загрязнении тяжелыми металлами чувствительность и информативность ферментов применительно к биогеохимическим

циклам мало изучена [37–39]. Установлено, что при загрязнении оксидами и нитратами Ag, Bi, Tl и Te наиболее информативными показателями являются ферменты цикла C (инвертаза) и P (фосфатаза), а наиболее чувствительными – ферменты циклов P (фосфатаза) и O (каталаза) [40]. Свинец в почве вызывает снижение численности отдельных микроорганизмов, ингибирует процессы минерализации органических соединений в почвах, подавляет дыхание почвенных микроорганизмов и жизнедеятельность растений [41–43]. Как следствие происходит снижение ферментативной активности почвы и плодородия почвы.

Цель – оценить влияние загрязнения свинцом чернозема обыкновенного и дерново-подзолистого почвы на активность ферментов цикла углерода: дегидрогеназы, пероксидазы, полифенолоксидазы, глюкозооксидазы, инвертазы, β -глюкозидазы, целлюлазы, хитиназы.

Материалы и методы

Для модельного эксперимента по загрязнению почв свинцом были выбраны два типа почв, различающихся по своим физико-химическим свойствам: чернозем обыкновенный (место отбора – пашня (Апах 0–20 см), Воронежская область) и дерново-подзолистая почва (место отбора – лес (0–5 см), Московская область).

Поскольку ПДК для типов и подтипов черноземов еще не разработаны, для исследования загрязнения чернозема обыкновенного свинцом приняты немецкие ПДК [44–47]. Самая меньшая концентрация (100 мг/кг) соответствует ПДК Pb в Германии. Свинец вносили в почву в виде оксида (PbO_2) в пересчете на атом свинца в концентрациях 100, 1000 и 10000 мг/кг.

В подготовленную почву (массой 300 г) в трехкратной повторности вносили навеску Pb и тщательно перемешивали. После этого сосуд поливали до влажности 30–33 %. Инкубацию вегетационных сосудов проводили в течение 30 суток. По истечении периода инкубации почвы высушивали и просеивали через сито 1 мм. Далее проводили определение активности ферментов цикла углерода: дегидрогеназы, пероксидазы, полифенолоксидазы, глюкозооксидазы, инвертазы, β -глюкозидазы, целлюлазы, хитиназы. Методы исследования ферментативной активности почвы представлены в табл. 1 [35].

Расчет интегрального показателя ферментативной активности (ИПФА) почв по каждому классу ферментов проводили согласно формуле, представленной в [48] при оценке ИПФА чернозема, загрязненного Ag, Bi, Te и Tl для 10 ферментов классов оксидоредуктаз и гидролаз.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного пакета Statistica

12.0. Статистические данные (средние значения, дисперсия) были определены, а надежность различных образцов была установлена с использованием дисперсионного анализа (Student t-test).

Активность пероксидазы при загрязнении чернозема обыкновенного свинцом 100, 1000 и 10000 мг/кг снижается на 14, 15 и 23 % соответственно. В дерново-подзолистой почве активность пероксидазы снижается практически в два раза: уже при 100 мг/кг активность фермента была ингибирована на 44 %, при 1000 мг/кг – 50 %, при 10000 мг/кг – на 60 % относительно контроля.

Полифенолоксидаза чернозема обыкновенного была ингибирована только при 1000 и 10000 мг/кг на 14 и 32 %. По сравнению с пероксидазой в дерново-подзолистой почве активность полифенолоксидазы была простимулирована при загрязнении свинцом 100, 1000 мг/кг на 18 и 7 % относительно контроля. Активность глюкозооксидазы чернозема обыкновенного при загрязнении свинцом 100, 1000 и 10000 мг/кг была ингибирована на 19, 68 и 100 %. В дерново-подзолистой почве активность фермента при 100 мг/кг Pb была простимулирована на 43 %. При повышении дозы до 1000 и 10000 мг/кг глюкозооксидаза была ингибирована на 22 и 100 %.

Активность оксидоредуктаз чернозема обыкновенного и дерново-подзолистой почвы при загрязнении Pb различалась. Активность оксидоредуктаз в дерново-подзолистой почве была выше на 8 %, чем в черноземе обыкновенном. С ростом концентрации Pb во всех почвах значительно снижается активность пероксидазы и глюкозооксидазы. При этом в дерново-подзолистой почве отмечена стимуляция на наименьшей концентрации Pb активности полифенолоксидазы и глюкозооксидазы.

Ферменты класса гидролазы, участвующие в цикле C

Активность почвенных гидролаз цикла углерода при загрязнении Pb представлена на рис. 3. Активность инвертазы чернозема обыкновенного при загрязнении Pb была ингибирована при максимальной дозе 10000 мг/кг на 25 %. В дерново-подзолистой почве ингибирование активности фермента при 1000 и 10000 мг/кг Pb – на 37 и 50 % относительно контроля.

Результаты и обсуждение

Ферменты класса оксидоредуктазы, участвующие в цикле C

Активность ферментов класса оксидоредуктазы в почвах, загрязненных Pb, представлена на рис. 2. Активность дегидрогеназ при загрязнении чернозема обыкновенного Pb снижалась с ростом дозы металла на 16–42 %; при загрязнении дерново-подзолистой почвы – на 21–46 % относительно контроля.

Таблица 1. Методы измерения ферментативной активности почв в биогеохимическом цикле C

Table 1. Methods for measuring the enzymatic activity of soils in the biogeochemical cycle C

Фермент Enzyme	Методика, единицы измерения активности Methodology, units of measurement of activity	Роль в биогеохимическом цикле C Role in the biogeochemical cycle C
класс оксидоредуктазы/oxidoreductase class		
Активность дегидрогеназ (субстрат: НАД (Ф) – оксидоредуктазы, КФ 1.1.1.1) Dehydrogenases activity (substrate: NAD(P) – oxidoreductase, EC 1.1.1.1)	По восстановлению солей тетразолия в формазан, мг трифенилформазана в 1 г почвы за 24 часа By tetrazolium salts reduction to formazan, mg of triphenylformazan in 1 g of soil in 24 hours	Катализируют процессы дегидрирования органических субстратов Dehydrogenation processes of organic substrates are catalyzed
Активность полифенолоксидазы (О-дифенол:кислород – оксидоредуктаза. КФ 1.10.3.1) Polyphenoloxidase activity (O-diphenol:oxygen – oxidoreductase. EC 1.10.3.1)	По окислению гидрохинона до хинонов, мг 1, 4 бензохинона в 1 г почвы за 30 мин By hydroquinone oxidation to quinones, mg of 1,4 benzoquinone in 1 gram of soil in 30 min	Участвует в деградации лигнина и способствует образованию гуминовых веществ посредством катализа реакций окисления полифенолов Participates in lignin degradation and promotes the formation of humic substances by catalyzing the oxidation reactions of polyphenols
Активность пероксидазы (донор: H ₂ O ₂ – оксидоредуктаза. КФ 1.11.1.7) Peroxidase activity (donor: H ₂ O ₂ – oxidoreductase. EC 1.11.1.7)	По окислению гидрохинона до хинонов в присутствии перекиси водорода, мг 1,4 бензохинона в 1 грамме почвы за 30 мин By hydroquinone oxidation to quinones in the presence of hydrogen peroxide, mg of 1,4 benzoquinone in 1 g of soil in 30 min	Участвует в процессах гумификации. Служит индикатором интенсивности процессов гумусообразования и влияет на запас органического вещества Participates in humification. Serves as an indicator of humus formation intensity and affects the reserve of organic matter
Активность глюкозооксидазы (β-Д-глюкоза:кислород-1-оксидоредуктаза, КФ 1.1.3.4) Glucose oxidase activity (β-D-glucose:oxygen-1-oxidoreductase, EC 1.1.3.4)	По количеству кислорода, используемому для окисления глюкозы, мкмоль глюкозы на 1 г почвы за 24 часа By the oxygen amount used to oxidize glucose, μmol of glucose per 1 g of soil in 24 hours	Участвует в метаболизме почвенных углеводов, окисляя глюкозу Participates in the metabolism of soil carbohydrates, oxidizing glucose
класс гидролазы/hydrolase class		
Активность инвертазы (инвертазы, сахаразы, КФ 3.2.1.26) Invertase activity (invertase, sucrase, EC 3.2.1.26)	По количеству глюкозы при гидролизе сахарозы, колориметрически с помощью реактива Феллинга, мг глюкозы в 1 г почвы за 24 часа By the glucose amount during sucrose hydrolysis, colorimetrically using Felling's reagent, mg of glucose in 1 g of soil per 24 hours	Осуществляет гидролитическое разложение сахарозы, обеспечивая поступление в почву растворимых низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы Carries out hydrolytic decomposition of sucrose, providing the soil with soluble low-molecular sugars, glucose and fructose
Активность хитиназы (поли[1,4-β-(2-ацетоамидо-2-дезоксид-Д-глюкозид)] гликаногидролаза КФ 3.2.1.14) Chitinase activity (poly[1,4-β-(2-acetoamido-2-deoxy-D-glucoside)] glycanohydrolase EC 3.2.1.14)	По количеству конечного продукта гидролиза хитина – N-ацетил-Д-глюкозамин, мг N-ацетил-Д-глюкозамина на 1 г почвы за сутки By the amount of the final product of chitin hydrolysis – N-acetyl-D-glucosamine, mg of N-acetyl-D-glucosamine per 1 g of soil per day	Участие в разложении органического материала. Регулирование содержания органического углерода Participates in organic material decomposition. Regulation of organic carbon content
Активность β-глюкозидазы (β-Д-глюкозид-глюкогидролаза. КВ 3.2.1. 21) β-glucosidase activity (β-D-glucoside glucohydrolase. EC 3.2.1. 21)	По измерению β-глюкозидов (целлобиозе, гентиобиозе, амигдалине, арбутине и др., поступающих в почву в виде растительных остатков, грибов и дрожжей, мг глюкозы на 1 г почвы за 24 часа By measuring β-glucosides (cellobiose, gentiobiose, amygdalin, arbutin, etc.) entering the soil in the form of plant residues, fungi and yeast, mg of glucose per 1 g of soil in 24 hours	Участвует в преобразовании углеводов в составе растительных остатков и грибов. Гидролизует глюкозиды (ди-, полисахариды, целлобиоза и др.) с образованием глюкозы Participates in the transformation of carbohydrates in plant residues and fungi. Hydrolyzes glucosides (di-, polysaccharides, cellobiose, etc.) to form glucose
Активность целлюлазы (1,4-β-Д-глюкан- глюканогидролаза. КФ 3.2.1.4) Cellulase activity (1,4-β-D-glucan glucohydrolase. EC 3.2.1.4)	По измерению количества глюкозы колориметрическим методом при образовании окрашенных комплексов после реакции с антроном, мг глюкозы в 2 г почвы за 48 часов By measuring the glucose amount by the colorimetric method during the formation of colored complexes after the reaction with anthrone, mg of glucose in 2 g of soil in 48 hours	С разложением целлюлозы связано образование в почве гумусовых веществ и формирование её структуры. Обеспечивает возврат основной массы углекислого газа в атмосферу Cellulose decomposition is associated with the formation of humic substances in the soil and the formation of its structure. Ensures the return of the bulk of carbon dioxide to the atmosphere

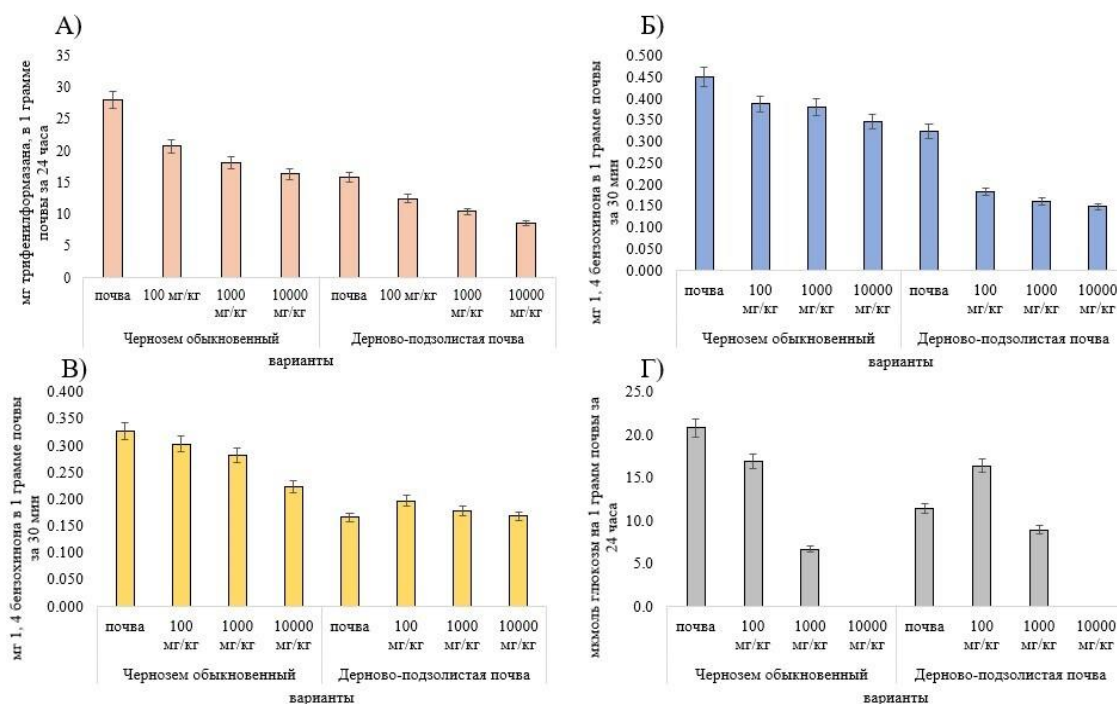


Рис. 2. Изменение активности ферментов цикла C класса оксидоредуктазы чернозема обыкновенного и дерново-подзолистой почвы при загрязнении свинцом: А) дегидрогеназы; Б) пероксидаза; В) полифенолоксидаза; Г) глюкозооксидаза

Fig. 2. Changes in the activity of enzymes of the C of the oxidoreductase class of ordinary chernozem and sod-podzolic soil when contaminated with lead: А) dehydrogenases; Б) peroxidase; В) polyphenoloxidase; Г) glucoseoxidase

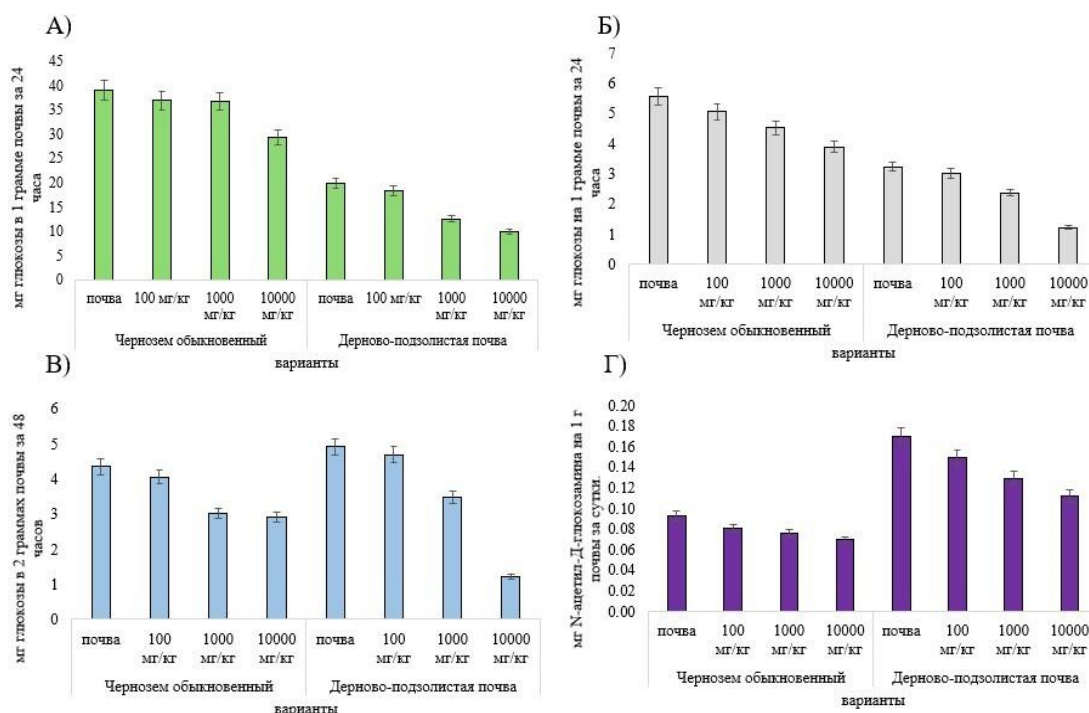


Рис. 3. Изменение активности ферментов цикла C класса гидролазы чернозема обыкновенного и дерново-подзолистой почвы при загрязнении Pb: А) инвертаза; Б) β-глюкозидаза; В) целлюлаза; Г) хитиназа

Fig. 3. Change in the activity of the C of hydrolase class enzymes of ordinary chernozem and sod-podzolic soil when contaminated with Pb: А) invertase; Б) β-glucosidase; В) cellulase; Г) chitinase

Активность β -глюкозидазы в черноземе обыкновенном была ингибирована при 1000 и 10000 мг/кг Pb на 19 и 30 %. В дерново-подзолистой почве активность фермента при 1000 и 10000 мг/кг Pb была ингибирована на 27 и 63 % соответственно.

Активность целлюлазы в черноземе обыкновенном была ингибирована при 1000 и 10000 мг/кг Pb на 31 и 33 %. В дерново-подзолистой почве активность фермента при загрязнении 1000 и 10000 мг/кг Pb снижалась на 29 и 75 %.

Активность хитиназы чернозема обыкновенного при загрязнении 100, 1000 и 10000 мг/кг Pb была ингибирована на 13, 19 и 26 %. В дерново-подзолистой почве при загрязнении 100, 1000 и 10000 мг/кг Pb была ингибирована на 12, 24, 34 % соответственно.

Активность гидролаз в черноземе обыкновенном была больше на 12 %, чем в дерново-подзолистой почве. По сравнению с оксидоредуктазами в дерново-подзолистой почве отмечена большая активность целлюлазы и хитиназы, чем в черноземе обыкновенном. Загрязнение свинцом оказывало максимальное ингибирующее воздействие в черноземе на активность β -глюкозидазы, а в дерново-подзолистой почве – на активность целлюлазы.

Интегральный показатель ферментативной активности

По данным активности оксидоредуктаз и гидролаз был рассчитан ИПФА (рис. 4). Установлено, что вклад каждого фермента в зависимости от концентрации Pb различается. В контрольных вариантах и при минимальной концентрации Pb

(100 мг/кг) активности ферментов как оксидоредуктаз, так и гидролаз в черноземе обыкновенном в одинаковых пропорциях.

При повышении концентрации до 1000 и 10000 мг/кг Pb доля глюкозооксидазы в черноземе обыкновенном снижается более чем на 50 и 100 %.

В дерново-подзолистой почве в контроле чернозема обыкновенного активность ферментов изменялась в равной степени. Однако при минимальной концентрации Pb (100 мг/кг) доля глюкозооксидазы увеличивается, а пероксидазы значительно снижается. При 1000 мг/кг доля глюкозооксидазы снижается по сравнению с 100 мг/кг на 45 %, при повышении дозы до 10000 мг/кг доля фермента 100 %. В контроле и минимальной дозе Pb (100 мг/кг) ИПФА гидролаз дерново-подзолистой почвы также в равных долях изменяется активность всех ферментов. При повышении концентрации до 1000 мг/кг доли изменения ферментов тоже одинаковые. При максимальной дозе Pb (10000 мг/кг) активность целлюлазы и β -глюкозидазы меньше в процентном соотношении, чем при 1000 мг/кг.

Информативность и чувствительность ферментов цикла C в почвах при загрязнении свинцом

Была оценена информативность и чувствительность ферментов цикла C в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве (табл. 2, 3). Среди оксидоредуктаз в черноземе обыкновенном наиболее информативная активность полифенолоксидазы, а среди ферментов класса гидролазы – активность инвертазы.

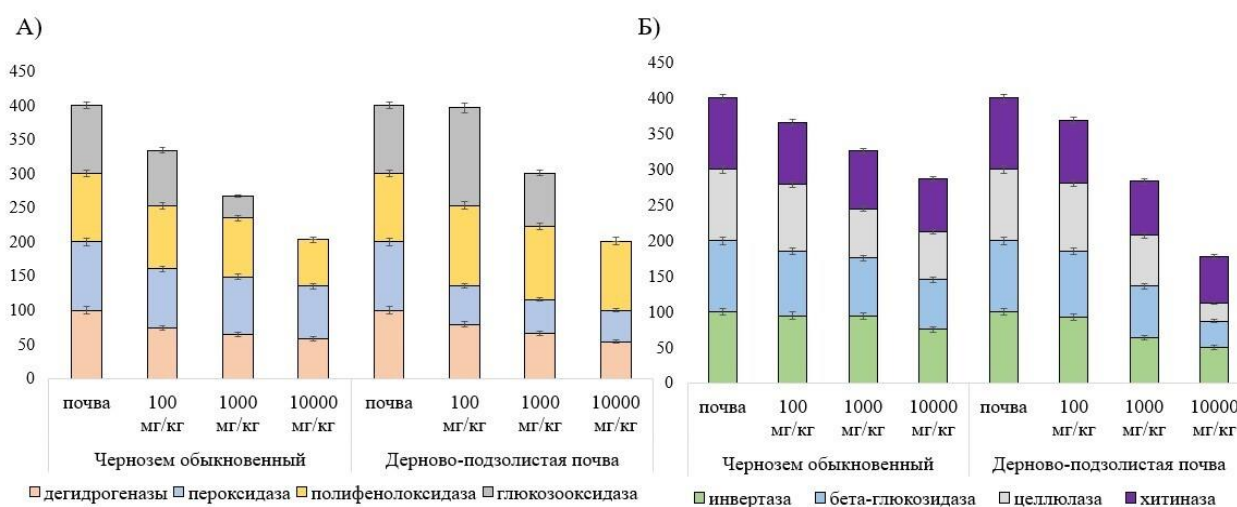


Рис. 4. Интегральный показатель ферментативной активности цикла C в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве при загрязнении Pb, % от контроля: А) оксидоредуктазы; Б) гидролазы
Fig. 4. Integral index of enzymatic activity of cycle C in ordinary chernozem and sod-podzolic soil with Pb contamination, % of control: А) oxidoreductases; Б) hydrolases

Таблица 2. Информативность ферментов цикла C в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве при загрязнении Pb

Table 2. Information content of enzymes of cycle C in ordinary chernozem and sod-podzolic soil with Pb contamination

Фермент/Enzyme	Чернозем обыкновенный Ordinary chernozem	Дерново- подзолистая почва Sod-podzolic soil
класс оксидоредуктазы/oxidoreductase class		
Дегидрогеназы Dehydrogenases	–0,63	–0,75
Пероксидаза/Peroxidase	–0,74	–0,51
Полифенолоксидаза Polyphenoloxidase	–0,94	–0,43
Глюкозооксидаза Glucoseoxidase	–0,83	–0,92
класс гидролазы/hydrolase class		
Инвертаза/Invertase	–0,98	–0,80
β-глюкозидаза β-glucosidase	–0,85	–0,95
Целлюлаза/Cellulase	–0,68	–0,96
Хитиназа/Chitinase	–0,74	–0,80

Примечание: серым цветом отмечены наиболее информативные ферменты каждого класса.

Note: The most informative enzymes of each class are marked in gray.

Наибольшей чувствительностью по всем классам активности ферментов в черноземе обыкновенном обладает глюкозооксидаза, а в дерново-подзолистой почве – пероксидаза.

Таблица 3. Чувствительность ферментов цикла C в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве при загрязнении Pb

Table 3. Sensitivity of enzymes of cycle C in ordinary chernozem and sod-podzolic soil under Pb contamination

Фермент/Enzyme	Чернозем обыкновенный Ordinary chernozem	Дерново- подзолистая почва Sod-podzolic soil
класс оксидоредуктазы/oxidoreductase class		
Дегидрогеназы Dehydrogenases	66	66
Пероксидаза/Peroxidase	83	51
Полифенолоксидаза Polyphenoloxidase	82	109
Глюкозооксидаза Glucose oxidase	38	74
класс гидролазы/hydrolase class		
Инвертаза/Invertase	88	68
β-глюкозидаза β-glucosidase	81	68
Целлюлаза/Cellulase	77	64
Хитиназа/Chitinase	81	77

Примечание: серой заливкой отмечены наиболее чувствительные ферменты каждого класса.

Note: The most sensitive enzymes of each class are marked in gray.

Таким образом, ферменты цикла C, относящиеся к классу оксидоредуктазы более чувствительны к загрязнению Pb, чем гидролазы, но гидролазы более информативны, чем оксидоредуктазы. Среди ферментов оксидоредуктазы наиболее информативные ферменты полифенолоксидаза (в черноземе обыкновенном) и глюкозооксидаза (в дерново-подзолистой почве); среди ферментов класса гидролазы – инвертаза (в черноземе обыкновенном), β-глюкозидаза и целлюлаза (в дерново-подзолистой почве). Среди ферментов класса оксидоредуктазы наиболее чувствительные ферменты – глюкозооксидаза (в черноземе обыкновенном) и пероксидаза (в дерново-подзолистой почве); среди ферментов класса гидролазы – целлюлаза (в черноземе обыкновенном и дерново-подзолистой почве). Целлюлаза самый чувствительный и информативный фермент в дерново-подзолистой почве при загрязнении Pb. Для чернозема обыкновенного при загрязнении Pb самый чувствительный фермент – глюкозооксидаза, а наиболее информативный – инвертаза.

При загрязнении почв Pb происходит нарушение функционирования почвенной биоты, что вызывает гибель микроорганизмов как основных деструкторов органического вещества в почве с образованием токсичных микотоксинов [49–52]. Микотоксинами являются вторичные метаболиты, вырабатываемые определенными грибами (*Aspergillus flavus*, *Aspergillus tubingensis*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, *Fusarium lateritium*, *Penicillium verrucosum* и др.), которые оказывают вредное воздействие на животных и людей [53]. На полигоне твердых бытовых отходов «Саларьево» в Московской области численность микроскопических грибов в загрязненной почве увеличилась в 7 раз, а фитотоксичных грибов рода *Alternaria* – в 1,8 раза выше контроля [51]. В этих почвах содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в почве превышало ПДК в 2–4 раза, содержание Pb составило 56,7±5,2 мг/кг, а Cd – 1,1±0,89 мг/кг, концентрация поверхностно-активных веществ в почве полигона составила 1,38±0,12 мг/кг. Активность *Bacillus subtilis* ATCC 6633 наблюдалась у 75 % штаммов антарктических микромицетов из Арктики и Антарктиды [54]. При этом максимальная активность была продемонстрирована *Paecilomyces marquandii* 166, *Penicillium janczewskii* 165, *Penicillium roseopurpureum* 169 и *Thelebolus ellipsoideus* 210.

Экотоксичность моно- и полиэлементного загрязнения Pb, Zn и Cd дерново-подзолистой (Albeluvisols) и серой лесной (Luvisols) почв выявлена для овса посевного (*Avena sativa* L.), горчицы белой (*Sinapis alba* L.), ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.) и дыхания почвенной биоты [55]. Почвенное дыхание отражает состояние и функционирование почвы в рамках биогеохимиче-

ского цикла С при различных видах химического загрязнения [56–58].

Среди всех изученных ферментов именно по активности глюкозооксидазы в дерново-подзолистой почве установлена стимуляция при малой дозе Pb. Глюкозооксидаза в почве непосредственно участвует в метаболизме углеводов [35]. Из различных образцов почвы были выделены штаммы микроорганизмов, продуцирующие фермент глюкозооксидазу, среди которых способность окислять глюкозу в присутствии кислорода наиболее выражена у представителей родов *Aureobasidium*, *Aspergillus*, *Penicillium* [59]. Стимуляцию активности ферментов при малых дозах Pb ранее наблюдали по активности каталазы и инвертазы [60]. Стимуляция активности целлюлазы и хитиназы в дерново-подзолистой почве связана с наличием микроскопических грибов [61–64]. Хитиназам, так же, как фосфатазам, ацетилазам, глюканазам, протеинкиназам и другим ферментам, отводится роль защитных белков, ответственных за оперативную систему противодействия растения стрессу [65, 66]. При загрязнении Pb (0, 1000, 2000 и 3000 мг/кг), хотя активность почвенной инвертазы остается относительно стабильной, транспортер ABC, хининредуктаза и АТФ-связывающий белок были значительно увеличены у ризосферных почвенных бактерий при выращивании *Pogonatherum crinitum* [67]. В условиях добычи тяжелых металлов установлено, что увеличение содержания органического вещества снижает токсическое воздействие Zn и Pb на ферментативную активность, а также на количество почвенных бактерий [68]. Активность дегидрогеназ при загрязнении нефтью и нефтепродуктами: биодизелем, дизельным топливом и мазутом, простимулирована, а при загрязнении бензином ингибирована [69]. Установлена эффективность использования общей гидролазной активно-

сти (суммарная активность липазы, ацилазы, неспецифические эстеразы и протеазы), активности дегидрогеназ и пероксидазы при оценке воздействия на дерново-подзолистую почву нитрата свинца [70]. Чувствительность ферментов цикла С, относящихся к классу оксидоредуктазы, к загрязнению Pb большая, чем для класса гидролазы, обусловлена окислительным воздействием Pb на биоту почвы. Свинец воздействует на клетки микроорганизмов с образованием свободных радикалов за счет усиления процессов перекисного окисления липидов в клеточных мембранах [43, 71, 72]. Свинец оказывает влияние на растения путем транспортировки через окислительно-восстановительный процесс [73]. Супероксидные радикалы ($O_2^{\cdot-}$), гидроксильные радикалы ($\cdot OH$) и перекись водорода (H_2O_2) также вырабатываются после воздействия свинца в клетках аэробных организмов, вызывая окислительный стресс [74–76].

Заключение

Ферменты класса оксидоредуктазы биогеохимического цикла углерода в почве при загрязнении Pb более чувствительны, чем гидролазы. Целлюлаза и хитиназа дерново-подзолистой почвы были простимулированы при малых дозах Pb. Ферменты класса оксидоредуктазы более чувствительны, чем класса гидролазы, но ферменты класса гидролазы более информативны, чем класса оксидоредуктазы. Целлюлаза – самый чувствительный и информативный фермент в дерново-подзолистой почве при загрязнении свинцом. Для чернозема обыкновенного самый чувствительный фермент – глюкозооксидаза, а наиболее информативный – инвертаза. Результаты исследования можно использовать при ферментативной диагностике состояния почв после загрязнения тяжелыми металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуминовые вещества – гипотезы и реальность (обзор) / А.Г. Заварзина, Н.Н. Данченко, В.В. Демин, З.С. Артемьева, Б.М. Когут // Почвоведение. – 2021. – С. 1449–1480. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169>
2. Кононова М.М. Органическое вещество почвы. – М.: АН СССР. 1963. – 315 с.
3. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. – М.: Наука, 1980. – 288 с.
4. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – Т. 20. – № 2 (78). – С. 14–24.
5. Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro / E. Blagodatskaya, S. Blagodatsky, N. Khomyakov, O. Myachina, Y. Kuzyakov // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – P. 22240. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep22240>
6. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies / D.P. German, M.N. Weintraub, A.S. Grandy, C.L. Lauber, Z.L. Rinkes, S.D. Allison // Soil Biology & Biochemistry. – 2011. – Vol. 43. – P. 1387–1397. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2011.03.017>
7. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1974. – 333 с.
8. Soil enzyme activities and their relationships with soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China / C. Liu, Y. Song, X. Dong, X. Wang, X. Ma, G. Zhao, S. Zang // Frontiers in Environmental Science. – 2021. – Vol. 9. – P. 670769. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.670769>
9. Оценка влияния бенз(а)пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области / Т.В. Минникова, С.Н. Сушкова, С.С. Манджиева, Т.М. Минкина, С.И. Колесников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/12/2396>

10. Минникова Т.В., Колесников С.И., Минин Н.С. Интегральная фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 95–106. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/5/4337>
11. Soil organic carbon dynamics in response to tillage practices in the steppe zone of Southern Russia / T. Minnikova, G. Mokrikov, K. Kazeev, A. Medvedeva, O. Biryukova, C. Keswani, T. Minkina, S. Sushkova, H. Elgendy, S. Kolesnikov // Processes. – 2022. – Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020244>
12. Биотехнологический потенциал микробиома почв / Н.А. Манучарова, А.П. Власова, М.А. Коваленко, Е.А. Овчинникова, А.Д. Бабенко, Г.А. Терегулова, Г.В. Уваров, А.Л. Степанов // Микробиология. – 2024. – Т. 93. – № 2. – С. 128–132. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0026365624020056>
13. Carbon, nitrogen, phosphorus, and extracellular soil enzyme responses to different land use / Y. Uwituze, J. Nyiraneza, T.D. Fraser, J. Dessureaut-Rompré, N. Ziadi, J. Lafond // Frontiers in Soil Science. – 2022. – Vol. 2. – P. 814554. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.814554>
14. Влияние сельскохозяйственных культур на ферментативную активность черноземов Ростовской области при использовании различных агротехнологий / Т.В. Минникова, Г.В. Мокриков, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников // Агрохимия. – 2020. – № 10. – С. 20–27.
15. Use of soil enzyme activity in assessing the effect of No-Till in the South of Russia / G. Mokrikov, T. Minnikova, K. Kazeev, S. Kolesnikov // Agronomy Research. – 2021. – Vol. 19 (1). – P. 171–184. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.20.240>
16. Антимикробная активность специализированных метаболитов почвенных стрептомицетов-хитинолитиков / Г.А. Терегулова, Н.А. Манучарова, Н.А. Уразбахтина, Н.С. Жемчужина, Л.И. Евтушенко, А.Л. Степанов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2024. – № 1. – С. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-1-51-60>
17. Soil quality indices for metal(loid) contamination: an enzymatic perspective / H. Aponte, J. Medina, B. Butler, S. Meier, P. Cornejo, Y. Kuzyakov // Land Degradation & Development. – 2020. – Vol. 31. – P. 2700–2719. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3630>
18. Effects of vegetation restoration on soil enzyme activity in copper and coal mining areas / H. Sun, J. Zhang, R. Wang, Z. Li, S. Sun, G. Qin, Y. Song // Environmental Management. – 2021. – Vol. 68. – P. 366–376. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01509-3>
19. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции / И.Н. Курганова, В.М. Телеснина, В.О. Лопес де Гереню, В.И. Личко, Л.А. Овсепян // Почвоведение. – 2022. – № 7. – С. 825–842. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070073>
20. Microbial regulation of the soil carbon cycle: evidence from gene-enzyme relationships / P. Trivedi, M. Delgado-Baquerizo, C. Trivedi, H. Hu, I.C. Anderson, T.C. Jeffries, J. Zhou, B.K. Singh // The ISME Journal. – 2016. – Vol. 10 (11). – P. 2593–2604. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.65>
21. Effects of different land types on soil enzyme activity in the Qinghai Lake region / Y. Yang, Y. Yang, Y. Geng, G. Huang, X. Cui, M. Hou // Wetlands. – 2018. – Vol. 38. – P. 711–721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-018-1014-9>
22. Piotrowska-Długosz A. Significance of the enzymes associated with soil C and N transformation // Carbon and Nitrogen Cycling in Soil / Eds. R. Datta, R. Meena, S. Pathan, M. Ceccherini. – Singapore: Springer, 2020. – P. 399–437. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-7264-3_12
23. Characterization and evaluation of stress and heavy metal tolerance of some predominant *Gram negative* halotolerant bacteria from mangrove soils of Bhitarkanika, Orissa, India / R.R. Mishra, T.K. Dangar, B. Rath, H.N. Thatoi // African Journal of Biotechnology. – 2009. – Vol. 8 (10). – P. 2224–2231.
24. Potential of glucose measurement in soil and food sample using low molecular weight O-(2-hydroxyl)propyl-3-trimethylammonium chitosan chloride nanoparticle-glucose oxidase immobilised on a natural fibre membrane / M. Russel, Y. Qian, J. Yao, M.F. Choi // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2014. – Vol. 94 (13). – P. 1317–1329.
25. Зависимость активности полифенолпероксидаз и полифенолоксидаз в современных и погребенных почвах от температуры / А.В. Якушев, И.Н. Кузнецова, Е.В. Благодатская, С.А. Благодатский // Почвоведение. – 2014. – № 5. – С. 1–7.
26. Zavarzina A.G. Heterophase synthesis of humic acids in soils by immobilized phenol oxidases // Soil Enzymology. – Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2011. – P. 207–228.
27. Meta-analysis of experimental warming on soil invertase and urease activities / Y. Bai, F. Li, G. Yang, S. Shi, F. Dong, M. Liu, X. Nie, J. Hai // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science. – 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2017.1375140>
28. Utobo E.B., Tewari L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. Applied ecology and environmental research. – 2015. – Vol. 13 (1). – P. 147–169. DOI: https://doi.org/10.15666/aer/1301_147169
29. Das S.K., Varma A. Role of enzymes in maintaining soil health // Soil Enzymology. Soil Biology / Eds. G. Shukla, A. Varma. – Berlin; Heidelberg; USA: Springer-Verlag, 2011. – Chapter 2. – P. 25–42. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_2
30. Datta R. Enzymatic degradation of cellulose in soil: a review // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – e24022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24022>
31. Haddad S.A., Lemanowicz J., Abd El-Azeim M.M. Cellulose decomposition in clay and sandy soils contaminated with heavy metals // International Journal of Environmental Science & Technology. – 2019. – Vol. 16. – P. 3275–3290 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1918-1>
32. Минникова Т.В., Русева А.С., Колесников С.И. Оценка ферментативной активности нефтезагрязненного чернозема после биоремедиации // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 5. – С. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-5-5-20>
33. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. – 2020. – № 3. – С. 83–93. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120010123>

34. Новоселова Е.И., Киреева Н.А. Ферментативная активность почв в условиях нефтяного загрязнения и ее биодиагностическое значение // Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – № 2. – С. 4–12.
35. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 2005. – 252 с.
36. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. – 2018. – Т. 1. – № 2. – С. 80–92.
37. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation / T. Minnikova, S. Kolesnikov, S. Revina, A. Ruseva, V. Gaivoronsky // Toxics. – 2023. – Vol. 11. – P. 355. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11040355>
38. Ecological state of haplic chernozem after pollution by oil at different levels and remediation by biochar / A. Ruseva, T. Minnikova, S. Kolesnikov, S. Revina, A. Trushkov // Sustainability. – 2023. – Vol. 15 (18). – P. 13375. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151813375>
39. Assessment of the ecological state of haplic chernozem contaminated by oil, fuel oil and gasoline after remediation / A. Ruseva, T. Minnikova, S. Kolesnikov, D. Trufanov, N. Minin., S. Revina, V. Gaivoronsky // Petroleum Research. – 2024. – Vol. 9. – P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2023.03.002>
40. Estimation of the enzymatic activity of haplic chernozem under contamination with oxides and nitrates of Ag, Bi, Te and Tl / T. Minnikova, S. Kolesnikov, N. Evstegneeva, A. Timoshenko, N. Tsepina // Agronomy. – 2022. – Vol. 12. – P. 2183. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092183>
41. Биогенная миграция Cd, Pb, Ni и As в системе «почва–растения» и изменение биологической активности почвы / Е.В. Плешакова, М.В. Решетников, Е.В. Любунь, А.Ю. Беляков, О.В. Турковская // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2010. – № 10 (2). – С. 59–66.
42. Влияние свинца на живые организмы / А.Ф. Титов, Н.М. Казнина, Т.А. Карапетян, Н.В. Доршакова // Журнал общей биологии. – 2020. – Т. 81. – № 2. – С. 147–160.
43. Иванищев В.В., Сиголаева Т.Е., Переломов Л.В. Влияние загрязнения почв свинцом на растения // Агрохимия. – 2024. – № 6 (2024). – С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124060118>
44. Голов В.И. Экологически и агрохимически обоснованные композиции удобрений для возделываемых на Дальнем Востоке культур // Вестник Дальневосточной государственной академии экономики и управления. – 2002. – № 3 (23). – С. 82–101.
45. Соколов О.А., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 1. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. – Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. – 164 с.
46. Ярославцев М.В., Колесников С.И. Биодиагностика устойчивости черноземов Юга России к загрязнению тяжелыми металлами // Юг России: экология, развитие. – 2011. – Т. 6. – № 3. – С. 16–20
47. Klocke A. Orientierungsdaten for tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturbuden // Mitteilungen VDLUFA. – 1980. – Vol. 1 (3). – P. 9–11.
48. Assessment of enzymatic activity of haplic chernozem soils contaminated with Ag, Bi, Te, and Tl / T.V. Minnikova, S.I. Kolesnikov, N.A. Evstegneeva, A.N. Timoshenko, N.I. Tsepina, K.Sh. Kazeev // Eurasian Soil Science. – 2024. – Vol. 57. – № 3. – P. 395–408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323603037>
49. Экологическая опасность загрязнения почвы тяжелыми металлами (на примере свинца) / Л.В. Мосина, Э.А. Довлетярова, С.Ю. Ефремова, Ж. Норвосурэн // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – 2012. – № 29. – С. 383–386.
50. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Токсины почвенных микроскопических грибов: распространение, экологическая роль, биодegradация // Агрохимия. – 2023. – № 10. – С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123100125>
51. Heavy metal and mycotoxin-producing fungi contamination of coffee consumed in Saudi Arabia / M.A. Mir, S.K. Chang, M.W. Ashraf, K. Andrews // Food Chemistry Advances. – 2024. – Vol. 5. – P. 100798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100798>
52. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil / L.V. Mosina, G.N. Chupakhina, P.V. Maslennikov, J.A. Zhandarova, E.A. Dovletyarova // AGRITECH-III-2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548. – P. 022063. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/2/022063>
53. Juraschek L.M., Kappenberg A., Amelung W. Mycotoxins in soil and environment // Science of the Total Environment. – 2022. – Vol. 814. – № 25. – P. 152425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152425>
54. Enzymatic and antimicrobial activities in polar strains of microscopic soil fungi / D.A. Nikitin, V.S. Sadykova, A.E. Kuvarin, A.G. Dakh, M.V. Biryukov // Doklady Biological Sciences. – 2022. – Vol. 507. – P. 380–393. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0012496622060151>
55. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. – 2020. – № 10. – С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>
56. Soil respiration as an indicator of soil quality under agrochemical treatment in a semi-arid area of southern Mediterranean / R. Laalaouna, N. Ababsa, Y. Dellaa, S. Boudjabi // Arabian Journal of Geosciences. – 2023. – Vol. 10 (9). – P. 531 DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11649-x>
57. Analysis of CO₂ emission from urban soils of the Kola Peninsula (European Arctic) / M.V. Korneykova, V.I. Vasenev, N.V. Saltan, M.V. Slukovskaya, A.S. Soshina, M.S. Zavodskikh, Yu.L. Sotnikova, A.V. Dolgikh // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56. – P. 1653–1666. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323601749>
58. Kudeyarov V.N. Soil respiration and carbon sequestration: a review // Eurasian Soil Science. – 2023. – Vol. 56. – P. 1191–1200. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229323990012>
59. Smotrova N.G., Kremenchutskii G.N. Isolation from the environment of strains of microorganisms with glucose oxidase activity // Microbiological Journal. – 2002. – Vol. 64 (6). – P. 28–34.
60. Рафикова Г.Ф., Кузина Е.В., Коршунова Т.Ю. Влияние биоремедиации на биологическую активность чернозема выщелоченного, загрязненного нефтью и свинцом // Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 354–369. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22030121>

61. Сабо Е.Д., Кормилицына О.В. Биологическая активность дерново-подзолистых суглинистых почв и методы их микробиологической характеристики // Лесной вестник. – 2001. – № 1. – С. 75–79.
62. Микроскопические грибы дерново-подзолистой почвы Республики Татарстан как продуценты целлюлаз / И.А. Дегтярева, И.А. Яппаров, А.Я. Давлетшина, С.К. Зарипова, Т.Ю. Мотина // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 24. – С. 146–148.
63. Микроорганизмы дерново-подзолистой почвы, деградирующие нефть и полициклические ароматические углеводороды / Н.А. Манучарова, М.А. Большакова, Т.Л. Бабич, Т.П. Турова, Е.М. Семенова, А.С. Янович, А.Б. Полтараус, А.Л. Степанов, Т.Н. Назина // Микробиология. – 2021. – Т. 90. – № 6. – С. 706–717.
64. Оценка хитинолитической и антибиотической активности актиномицетов *Streptomyces avidinii* INA 01467 и *Micromonospora aurantiaca* INA 01468 / Г.А. Терегулова, О.Н. Синева, Н.Н. Маркелова, В.С. Садыкова, Г.В. Уваров, М.А. Коваленко, Н.А. Манучарова // Почвоведение. – 2023. – № 5. – С. 594–602. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601207>
65. Максимов И.В. Оксидоредуктазы и фитогормоны в регуляции устойчивости пшеницы к фитопатогенным грибам: дис. ... д-ра биол. наук. – Уфа, 2005. – 349 с.
66. Петухова Е.В., Крыницкая А.Ю. Хитиназы и экологическая безопасность продуктов питания // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 18 (6). – С. 242–245.
67. Lead contamination alters enzyme activities and microbial composition in the rhizosphere soil of the hyperaccumulator *Pogonatherum crinitum* / X.L. Hou, H. Han, M. Tigabu, Q.Y. Li, Z.X. Li, C.L. Zhu, S.Q. Huang, L.P. Cai, A.Q. Liu // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2021. – Vol. 207. – P. 111308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111308>
68. Soil organic matter prevails over heavy metal pollution and vegetation as a factor shaping soil microbial communities at historical Zn-Pb mining sites / A.M. Stefanowicz, P. Kapusta, S. Zubeck, M. Stanek, M.W. Woch // Chemosphere. – 2020. – Vol. 240. – P. 124922. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124922>
69. Kaczyńska G., Borowik A., Wyszowska J. Soil Dehydrogenases as an indicator of contamination of the environment with petroleum products // Water, Air, & Soil Pollution. – 2015. – Vol. 226. – P. 372 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2642-9>
70. Влияние нитрата и ацетата свинца на биоиндикационные показатели при внесении в дерново-подзолистую почву / М.И. Панова, М.А. Пукальчик, П.В. Учанов, В.А. Терехова // Поволжский экологический журнал. – 2017. – № 4. – С. 382–393. DOI: <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2017-4-382-393>
71. Карпухина О.В., Гумаргалиева К.З., Иноземцев А.Н. Исследование металл-индуцированного окислительного стресса у одноклеточных организмов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11 (часть 4). – С. 671–674.
72. Muller L. Consequences of cadmium toxicity in rat hepatocytes: mitochondrial dysfunction and lipid peroxidation // Toxicology. – 1986. – Vol. 40. – P. 285–292.
73. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants / B. Pourrut, M. Shahid, C. Dumat, P. Winterton, E. Pinelli // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. – 2011. – Vol. 213. – P. 113–136. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6_4
74. Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots / B. Pourrut, G. Perchet, J. Silvestre, M. Cecchi, M. Guirese, E. Pinelli // Journal of Plant Physiology. – 2008. – Vol. 165 (6). – P. 571–579.
75. Yadav S. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants // South African Journal of Botany. – 2010. – Vol. 76 (2). – P. 167–179.
76. Lead bioaccumulation potential of an aquatic macrophyte *Najas indica* are related to antioxidant system / R. Singh, R.D. Tripathi, S. Dwivedi, A. Kumar, P.K. Trivedi, D. Chakrabarty // Bioresource Technology. – 2010. – Vol. 101. – P. 3025–3032.

Информация об авторах

Татьяна Владимировна Минникова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. loko261008@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>

Анна Андреевна Кузина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. puuta_1990@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8816-5288>

Сергей Ильич Колесников, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. kolesnikov@sfnu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2124-6328>

Поступила в редакцию: 08.11.2024

Поступила после рецензирования: 27.12.2024

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Zavarzin A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M. Humic substances - hypotheses and reality (review). *Eurasian soil science*, 2021, pp. 1449–1480. (In Russ.) DOI: [10.31857/S0032180X21120169](https://doi.org/10.31857/S0032180X21120169)
2. Kononova M.M. *Soil organic matter*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1963. 315 p. (In Russ.)
3. Aleksandrova L.N. *Soil organic matter and its transformation processes*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 288 p. (In Russ.)
4. Khaziev F.Kh. Functional role of enzymes in soil processes. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 2015, vol. 20, no. 2 (78), pp. 14–24. (In Russ.)
5. Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Khomyakov N., Myachina O., Kuzyakov Y. Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 22240. DOI: [10.1038/srep22240](https://doi.org/10.1038/srep22240)

6. German D.P., Weintraub M.N., Grandy A.S., Lauber C.L., Rinkes Z.L., Allison S.D. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, vol. 43, pp. 1387–1397. DOI: 10.1016/J.SOILBIO.2011.03.017
7. Orlov D.S. *Humus acids of soils*. Moscow, Moscow State University Publ. house, 1974. 333 p. (In Russ.)
8. Liu C., Song Y., Dong X., Wang X., Ma X., Zhao G., Zang S. Soil enzyme activities and their relationships with Soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, vol. 9, pp. 670769. DOI: 10.3389/fenvs.2021.670769
9. Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Kolesnikov S.I. Assessment of the influence of benzo(a)pyrene on the biological activity of chernozem in the Rostov region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 91–102. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2396
10. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Minin N.S. Integral phytotoxicity of oil-contaminated chernozem after remediation with biochar and a bacterial preparation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 95–106. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337
11. Minnikova T., Mokrikov G., Kazeev K., Medvedeva A., Biryukova O., Keswani C., Minkina T., Sushkova S., Elgendy H., Kolesnikov S. Soil organic carbon dynamics in response to tillage practices in the steppe zone of Southern Russia. *Processes*, 2022, vol. 10. DOI: 10.3390/pr10020244
12. Manucharova N.A., Vlasova A.P., Kovalenko M.A., Ovchinnikova E.A., Babenko A.D., Teregulova G.A., Uvarov G.V., Stepanov A.L. Biotechnological potential of the soil microbiome. *Microbiology*, 2024, vol. 93, no. 2, pp. 128–132. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0026365624020056>
13. Uwituze Y., Nyiraneza J., Fraser T.D., Dessureaut-Rompré J., Ziadi N., Lafond J. Carbon, nitrogen, phosphorus, and extracellular soil enzyme responses to different land use. *Frontiers in Soil Science*, 2022, vol. 2, pp. 814554. DOI: 10.3389/fsoil.2022.814554
14. Minnikova T.V., Mokrikov G.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. The influence of agricultural crops on the enzymatic activity of chernozems of the Rostov region when using various agricultural technologies. *Agrochemistry*, 2020, no. 10, pp. 20–27. (In Russ.)
15. Mokrikov G., Minnikova T., Kazeev K., Kolesnikov S. Use of soil enzyme activity in assessing the effect of No-Till in the South of Russia. *Agronomy Research*, 2021, vol. 19 (1), pp. 171–184. DOI: 10.15159/AR.20.240
16. Teregulova G.A., Manucharova N.A., Urazbakhitina N.A., Zhemchuzhina N.S., Evtushenko L.I., Stepanov A.L. Antimicrobial activity of specialized metabolites of soil chitinolytic streptomycetes. *Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil Science*, 2024, no. 1, pp. 51–60. (In Russ.) DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-1-51-60
17. Aponte H., Medina J., Butler B., Meier S., Cornejo P., Kuzyakov Y. Soil quality indices for metal(loid) contamination: an enzymatic perspective. *Land Degradation & Development*, 2020, vol. 31, pp. 2700–2719. DOI: 10.1002/ldr.3630
18. Sun H., Zhang J., Wang R., Li Z., Sun S., Qin G., Song Y. Effects of vegetation restoration on soil enzyme activity in copper and coal mining areas. *Environmental Management*, 2021, vol. 68, pp. 366–376. DOI: 10.1007/s00267-021-01509-3
19. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopez de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Ovsepyan L.A. Changes in carbon reserves, microbial and enzymatic activity of agrosod-podzols of the southern taiga during postagrogenic evolution. *Eurasian soil science*, 2022, no. 7, pp. 825–842. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032180X22070073
20. Trivedi P., Delgado-Baquerizo M., Trivedi C., Hu H., Anderson I.C., Jeffries T.C., Zhou J., Singh B.K. Microbial regulation of the soil carbon cycle: evidence from gene-enzyme relationships. *The ISME Journal*, 2016, vol. 10 (11), pp. 2593–2604. DOI: 10.1038/ismej.2016.65
21. Yang Y., Yang Y., Geng Y., Huang G., Cui X., Hou M. Effects of different land types on soil enzyme activity in the Qinghai Lake region. *Wetlands*, 2018, vol. 38, pp. 711–721. DOI: 10.1007/s13157-018-1014-9
22. Piotrowska-Długosz A. Significance of the enzymes associated with soil C and N transformation. *Carbon and Nitrogen Cycling in Soil*. Eds. R. Datta, R. Meena, S. Pathan, M. Ceccherini. Singapore, Springer, 2020. pp. 399–437. DOI: 10.1007/978-981-13-7264-3_12
23. Mishra R.R., Dangar T.K., Rath B., Thatoi H.N. Characterization and evaluation of stress and heavy metal tolerance of some predominant *Gram negative* halotolerant bacteria from mangrove soils of Bhitarkanika, Orissa, India. *African Journal of Biotechnology*, 2009, vol. 8 (10), pp. 2224–2231.
24. Russel M., Qian Y., Yao J., Choi M.F. Potential of glucose measurement in soil and food sample using low molecular weight O-(2-hydroxyl)propyl-3-trimethylammonium chitosan chloride nanoparticle-glucose oxidase immobilised on a natural fibre membrane. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2014, vol. 94 (13), pp. 1317–1329.
25. Yakushev A.V., Kuznetsova I.N., Blagodatskaya E.V., Blagodatsky S.A. Dependence of the activity of polyphenol peroxidases and polyphenol oxidases in modern and buried soils on temperature. *Eurasian soil science*, 2014, no. 5, pp. 1–7. (In Russ.)
26. Zavarzina A.G. Heterophase synthesis of humic acids in soils by immobilized phenol oxidases. *Soil Enzymology*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2011. pp. 207–228.
27. Bai Y., Li F., Yang G., Shi S., Dong F., Liu M., Nie X., Hai J. Meta-analysis of experimental warming on soil invertase and urease activities. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 2017. DOI: 10.1080/09064710.2017.1375140
28. Utobo E.B., Tewari L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied ecology and environmental research*, 2015, vol. 13 (1), pp. 147–169. DOI: 10.15666/aeer/1301_147169
29. Das S.K., Varma A. Role of enzymes in maintaining soil health. *Soil Enzymology, Soil Biology*. Eds. G. Shukla, A. Varma. Berlin, Heidelberg, USA, Springer-Verlag, 2011. Ch. 2, pp. 25–42. DOI: 10.1007/978-3-642-14225-3_2
30. Datta R. Enzymatic degradation of cellulose in soil: a review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, pp. 24022 DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24022

31. Haddad S.A., Lemanowicz J., Abd El-Azeim M.M. Cellulose decomposition in clay and sandy soils contaminated with heavy metals. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 16, pp. 3275–3290 DOI: 10.1007/s13762-018-1918-1
32. Minnikova T.V., Ruseva A.S., Kolesnikov S.I. Evaluation of enzymatic activity of oil-contaminated chernozem after bioremediation. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2022, no. 5, pp. 5–20. (In Russ.) DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-5-20
33. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication. *Agrochemistry*, 2020, no. 3, pp. 83–93. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002188120010123
34. Novoselova E.I., Kireeva N.A. Enzymatic activity of soils under oil pollution conditions and its biodiagnostic significance. *Theoretical and Applied Ecology*, 2009, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.)
35. Khaziev F.Kh. *Methods of soil enzymology*. Moscow, Nauka Publ., 2005. 252 p. (In Russ.)
36. Khaziev F.Kh. Ecological connections of enzymatic activity of soils. *Ecobiotech*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 80–92. (In Russ.)
37. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the south of Russia after bioremediation. *Toxics*, 2023, vol. 11, pp. 355. DOI: 10.3390/toxics11040355
38. Ruseva A., Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Trushkov A. Ecological state of haplic chernozem after pollution by oil at different levels and remediation by biochar. *Sustainability*, 2023, vol. 15 (18), pp. 13375. DOI: 10.3390/su151813375
39. Ruseva A., Minnikova T., Kolesnikov S., Trufanov D., Minin N., Revina S., Gaivoronsky V. Assessment of the ecological state of haplic chernozem contaminated by oil, fuel oil and gasoline after remediation. *Petroleum Research*, 2024, vol. 9, pp. 155–164. DOI: 10.1016/j.ptlrs.2023.03.002
40. Minnikova T., Kolesnikov S., Evstegneeva N., Timoshenko A., Tsepina N. Estimation of the Enzymatic activity of haplic chernozem under contamination with oxides and nitrates of Ag, Bi, Te and Tl. *Agronomy*, 2022, vol. 12, pp. 2183. DOI: 10.3390/agronomy12092183
41. Pleshakova E.V., Reshetnikov M.V., Lyubun E.V., Belyakov A.Yu., Turkovskaya O.V. Biogenic migration of Cd, Pb, Ni and As in the soil-plant system and changes in soil biological activity. *Bulletin of the Saratov University. New series. Earth Sciences Series*, 2010, no. 10 (2), pp. 59–66. (In Russ.)
42. Titov A.F., Kaznina N.M., Karapetyan T.A., Dorshakova N.V. Effect of lead on living organisms. *Journal of General Biology*, 2020, vol. 81, no. 2, pp. 147–160. (In Russ.)
43. Ivanishchev V.V., Sigolaeva T.E., Perelomov L.V. The effect of soil pollution with lead on plants. *Agrochemistry*, 2024, no. 6, pp. 90–96. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002188124060118
44. Golov V.I. Ecologically and agrochemically substantiated fertilizer compositions for crops cultivated in the Far East. *Bulletin of the Far Eastern State Academy of Economics and Management*, 2002, no. 3 (23), pp. 82–101. (In Russ.)
45. Sokolov O.A., Chernikov V.A. *Environmental safety and sustainable development. B. 1. Atlas of distribution of heavy metals in environmental objects*. Pushchino, ONTI PSC RAS Publ., 1999. 164 p. (In Russ.)
46. Yaroslavtsev M.V., Kolesnikov S.I. Biodiagnostics of resistance of chernozems of the South of Russia to pollution by heavy metals. *South of Russia: ecology, development*, 2011, vol. 6, no. 3, pp. 16–20. (In Russ.)
47. Klocke A. Orientation data for tolerable total levels of some elements in cultural booths. *Mitteilungen VDLUFA*, 1980, vol. 1 (3), pp. 9–11. (In Germ.)
48. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Evstegneeva N.A., Timoshenko A.N., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh. Assessment of enzymatic activity of haplic chernozem soils contaminated with Ag, Bi, Te, and Tl. *Eurasian Soil Science*, 2024, vol. 57, no. 3, pp. 395–408. DOI: 10.1134/S1064229323603037
49. Mosina L.V., Dovletyarova E.A., Efremova S.Yu., Norvosuren J. Environmental hazard of soil pollution with heavy metals (on the example of lead). *Bulletin of the Perm State Pedagogical Univ. of V.G. Belinsky*, 2012, no. 29, pp. 383–386. (In Russ.)
50. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Toxins of soil microscopic fungi: distribution, ecological role, biodegradation. *Agrochemistry*, 2023, no. 10, pp. 87–96. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002188123100125
51. Mir M.A., Chang S.K., Ashraf M.W., Andrews K. Heavy metal and mycotoxin-producing fungi contamination of coffee consumed in Saudi Arabia. *Food Chemistry Advances*, 2024, vol. 5, pp. 100798 DOI: 10.1016/j.focha.2024.100798
52. Mosina L.V., Chupakhina G.N., Maslennikov P.V., Zhandarova J.A., Dovletyarova E.A. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil. *AGRITECH-III-2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 548, pp. 022063 DOI: 10.1088/1755-1315/548/2/022063
53. Juraschek L.M., Kappenberg A., Amelung W. Mycotoxins in soil and environment. *Science of the Total Environment*, 2022, no. 25, vol. 814, pp. 152425. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152425.
54. Nikitin D.A., Sadykova V.S., Kuvarin A.E., Dakh A.G., Biryukov M.V. Enzymatic and antimicrobial activities in polar strains of microscopic soil fungi. *Doklady Biological Sciences*, 2022, vol. 507, pp. 380–393. DOI: 10.1134/S0012496622060151
55. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A. Environmental regulation of the state of soils contaminated with heavy metals. *Agrochemistry*, 2020, no. 10, pp. 79–88. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0002188120100099
56. Laalouna R., Ababsa N., Dellaa Y., Boudjabi S. Soil respiration as an indicator of soil quality under agrochemical treatment in a semi-arid area of southern Mediterranean. *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, vol. 10 (9), pp. 531. DOI: 10.1007/s12517-023-11649-x
57. Korneykova M.V., Vasenev V.I., Saltan N.V., Slukovskaya M.V., Soshina A.S., Zavodskikh M.S., Sotnikova Yu.L., Dolgikh A.V. Analysis of CO₂ Emission from urban soils of the Kola Peninsula (European Arctic). *Eurasian Soil Science*, 2023, vol. 56, pp. 1653–1666. DOI: 10.1134/S1064229323601749
58. Kudiyarov V.N. Soil respiration and carbon sequestration: a review. *Eurasian Soil Science*, 2023, vol. 56, pp.1191–1200. DOI: 10.1134/S1064229323990012
59. Smotrova N.G., Kremenchutskii G.N. Isolation from the environment of strains of microorganisms with glucose oxidase activity. *Microbiological Journal*, 2002, vol. 64 (6), pp. 28–34.

60. Rafikova G.F., Kuzina E.V., Korshunova T.Yu. Effect of bioremediation on the biological activity of leached chernozem contaminated with oil and lead. *Eurasian Soil Science*, 2022, no. 3, pp. 354–369. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032180X22030121
61. Sabo E.D., Kormilitsyna O.V. Biological activity of sod-podzolic loamy soils and methods of their microbiological characteristics. *Forest Bulletin*, 2001, no. 1, pp. 75–79. (In Russ.)
62. Degtyareva I.A., Yapparov I.A., Davletshina A.Ya., Zaripova S.K., Motina T.Yu. Microscopic fungi of sod-podzolic soil of the Republic of Tatarstan as producers of cellulases. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2016, vol. 19, no. 24, pp. 146–148. (In Russ.)
63. Manucharova N.A., Bolshakova M.A., Babich T.L., Turova T.P., Semenova E.M., Yanovich A.S., Poltareus A.B., Stepanov A.L., Nazina T.N. Microorganisms of soddy-podzolic soil, degrading oil and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Microbiology*, 2021, vol. 90, no. 6, pp. 706–717. (In Russ.)
64. Teregulova G.A., Sineva O.N., Markelova N.N., Sadykova V.S., Uvarov G.V., Kovalenko M.A., Manucharova N.A. Evaluation of chitinolytic and antibiotic activity of actinomycetes *Streptomyces avidinii* INA 01467 and *Micromonospora aurantiaca* INA 01468. *Eurasian Soil Science*, 2023, no. 5, pp. 594–602. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0032180X22601207
65. Maksimov I.V. *Oxidoreductases and phytohormones in the regulation of wheat resistance to phytopathogenic fungi*. Dr. Diss. Ufa, 2005. 349 p. (In Russ.)
66. Petukhova E.V., Krynskaya A.Yu. Chitinases and environmental safety of food products. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2015, no. 18 (6), pp. 242–245. (In Russ.)
67. Hou X.L., Han H., Tigabu M., Li Q.Y., Li Z.X., Zhu C.L., Huang S.Q., Cai L.P., Liu A.Q. Lead contamination alters enzyme activities and microbial composition in the rhizosphere soil of the hyperaccumulator *Pogonatherum crinitum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 207, pp. 111308. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111308
68. Stefanowicz A.M., Kapusta P., Zubek S., Stanek M., Woch M.W. Soil organic matter prevails over heavy metal pollution and vegetation as a factor shaping soil microbial communities at historical Zn-Pb mining sites. *Chemosphere*, 2020, vol. 240, pp. 124922. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124922
69. Kaczyńska G., Borowik A., Wyszowska J. Soil Dehydrogenases as an Indicator of Contamination of the Environment with Petroleum Products. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, vol. 226, pp. 372. DOI: 10.1007/s11270-015-2642-9
70. Panova M.I., Pukalchik M.A., Uchanov P.V., Terekhova V.A. Effect of lead nitrate and acetate on bioindication indicators when applied to sod-podzolic soil. *Volga Region Ecological Journal*, 2017, no. 4, pp. 382–393. (In Russ.) DOI: 10.18500/1684-7318-2017-4-382-393
71. Karpushina O.V., Gumargalieva K.Z., Inozemtsev A.N. Study of metal-induced oxidative stress in unicellular organisms. *Fundamental research*, 2013, no. 11 (P. 4), pp. 671–674. (In Russ.)
72. Muller L. Consequences of cadmium toxicity in rat hepatocytes: mitochondrial dysfunction and lipid peroxidation. *Toxicology*, 1986, vol. 40, pp. 285–292.
73. Pourrut B., Shahid M., Dumat C., Winterton P., Pinelli E. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, vol. 213, pp. 113–136. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6_4
74. Pourrut B., Perchet G., Silvestre J., Cecchi M., Guisresse M., Pinelli E. Potential role of NADPH-oxidase in early steps of lead-induced oxidative burst in *Vicia faba* roots. *Journal of Plant Physiology*, 2008, vol. 165 (6), pp. 571–579.
75. Yadav S. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, 2010, vol. 76 (2), pp. 167–179.
76. Singh R., Tripathi R.D., Dwivedi S., Kumar A., Trivedi P.K., Chakrabarty D. Lead bioaccumulation potential of an aquatic macrophyte *Najas indica* are related to antioxidant system. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, pp. 3025–3032.

Information about the authors

Tatiana V. Minnikova, Cand. Sc., Leading Researcher, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. loko261008@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>

Anna A. Kuzina, Cand. Sc., Senior Researcher, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. nyuta_1990@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8816-5288>

Sergey I. Kolesnikov, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, Southern Federal University, 194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation. kolesnikov@sfedu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2124-63287>

Received: 08.11.2024

Revised: 27.12.2024

Accepted: 04.08.2025