УДК 631.42:631.465
DOI 10.30914/2411-9687-2025-11-1-16-24

ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ВЕРХНЕГО ГОРИЗОНТА ГОРОДСКИХ ПОЧВ

Е. С. Закамская

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация. ***Введение.*** Интенсивная антропогенная деятельность ведет к деградации почв, проявляющейся в изменении их физических, химических и биологических характеристик. Один из первых признаков такой деградации – изменение активности почвенных ферментов, являющихся ключевыми участниками процессов круговорота питательных веществ и формирования почвенной структуры. ***Цель*** – оценка состояния городских почв по активности почвенных ферментов. ***Материал и методы.*** Исследования проводились в ряде районов города Йошкар-Олы. Была определена активность почвенных ферментов (уреаза, инвертаза, протеаза, каталаза, интенсивность почвенного дыхания). Анализ проводился с использованием стандартных методов энзимологии и статистической обработки данных. ***Результаты***. Активность каталазы варьирует от 1,29 до 2,82 мл O_2 / 1 мин / г почвы и не зависит от района исследования. По степени обогащенности каталазой по шкале Д. Г. Звягинцева относятся к бедным, со слабой активностью. Активность уреазы составила 1,13–1,6 ч., инвертазы – 0,12–2,86 мг глюкозы / г почвы / 24 ч, протеазы 0,24–1,23 мг глицина / 1 г почвы / 24 ч, что свидетельствует об очень слабой активности этих ферментов и в то же время зависит от места отбора проб. Также было установлено, что для почв г. Йошкар-Олы характерна низкая интенсивность выделения углекислоты. В городских урбаноземах в общей ферментативной активности выше доля каталазы и уреазы, в контрольных образцах почвы – инвертазы. ***Заключение***. Исследование почв на территории г. Йошкар-Олы показало, что урбаноземы характеризуются низкой ферментативной активностью, что указывает на ухудшение состояния почвы в условиях антропогенного воздействия.

Ключевые слова: городские почвы, ферментативная активность, каталаза, уреаза, протеаза, почвенное дыхание

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Закамская Е. С.* Ферментативная активность верхнего горизонта городских почв // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2025. Т. 11. № 1. С. 16–24. DOI: https://doi.org/10.30914/2411-9687-2025-11-1-16-24

ENZYMATIC ACTIVITY OF THE UPPER HORIZON OF URBAN SOILS

E. C. Zakamskaya

Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract. ***Introduction*** Intensive anthropogenic activity leads to soil degradation, which is manifested in changes in their physical, chemical and biological characteristics. One of the first signs of such degradation is a change in the activity of soil enzymes, which are key participants in the processes of nutrient cycling and formation of soil structure. ***The purpose*** is to assess the condition of urban soils by the activity of soil enzymes. Material and methods. The research was carried out in a number of districts of the city of Yoshkar-Ola. The activity of soil enzymes (urease, invertase, protease, catalase, intensity of soil respiration) was determined. The analysis was carried out using standard methods of enzymology and statistical data processing. ***Results***. The catalase activity varied from 1.29 to 2.82 ml O_2 / 1 min/g soil and was independent of the study area. According to the degree of catalase enrichment on the scale of D. G. Zvyagintsev they belong to poor, with weak activity. The activity of urease was 1.13–1.6 h, invertase 0.12–2.86 mg glucose / g soil / 24 h, protease 0.24–1.23 mg glycine / 1 g soil / 24 h, which indicates very weak activity of these enzymes and, at the same time, depends on the sampling site. It was also found that the soils of Yoshkar-Ola are characterised by low intensity of carbon dioxide release. In urban urban soils the share of catalase and urease in the total enzymatic activity is higher, in the control soil samples – invertase. ***Conclusion.*** The study of soils in the territory of Yoshkar-Ola showed that urban urban soils are characterised by low enzymatic activity, which indicates deterioration of soil condition under anthropogenic impact.

© Закамская Е. С., 2025

Key words: urban soils, enzymatic activity, catalase, urease, protease, soil respiration

The author declares no conflict of interest.

For citation: *Zakamskaya E. C.* Enzymatic activity of the upper horizon of urban soils. *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 16–24. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30914/2411-9687-2025-11-1-16-24

Введение

Городские почвы – это сложная и динамичная экосистема, играющая критически важную роль в функционировании мегаполиса. Они выполняют множество функций, от средообразующих (фильтрация воды, регулирование водного баланса, снижение уровня шума) до защитных (предотвращение эрозии, стабилизация склонов, накопление и удержание загрязняющих веществ) [1]. Однако интенсивное антропогенное воздействие в городской среде – загрязнение тяжелыми металлами, нефтепродуктами, бытовым мусором, изменение водного режима, уплотнение почвы – приводит к деградации почв и нарушению их естественных функций. Этот процесс, называемый антропогенной трансформацией почв, проявляется в изменении физических, химических и биологических свойств почвенного покрова [2]. Одним из наиболее ранних и чувствительных индикаторов этой деградации является изменение активности почвенных ферментов [3; 4; 5].

В современной городской планировке и экологическом мониторинге оценка ферментативной активности почвы становится все более важной. Использование биохимических показателей позволяет выявлять ранние признаки деградации почвы и принимать превентивные меры по защите этой важной части городской экосистемы. Это важно не только для сохранения биоразнообразия и продуктивности почв, но и для обеспечения здоровья населения и качества жизни в городе. Почвенные ферменты – это биологические катализаторы, белки, ускоряющие биохимические реакции в почве. Они играют центральную роль в круговороте питательных веществ (углерода, азота, фосфора, серы и других элементов), разложении органического вещества, образовании гумуса и формировании почвенной структуры. Изменение активности ферментов отражает изменение состояния всей почвенной экосистемы, включая микрофлору и микрофауну. Наблюдение за ферментативной активностью позволяет оценить влияние антропогенных факторов на почву на ранних стадиях, до того, как произойдут видимые и необратимые изменения [6; 7]. Различные группы ферментов отражают разные аспекты почвенной биологии. Например, активность дегидрогеназ свидетельствует об общем уровне биологической активности в почве, интенсивности дыхания микроорганизмов и скорости разложения органического вещества [8]. Активность уреазы характеризует процессы минерализации азота [9], а активность фосфатаз – доступность фосфора для растений [10]. Инвертазы участвуют в гидролизе сахаров, а протеазы – в разложении белков. Изменение активности этих и других ферментов (например, пероксидазы, каталазы, целлюлазы) служит чувствительным индикатором стресса, вызванного антропогенными факторами [11]. Влияние различных антропогенных воздействий на ферментативную активность почвы различно и зависит от многих факторов: типа и интенсивности воздействия, типа почвы, климатических условий и других факторов. Например, загрязнение тяжелыми металлами может ингибировать активность многих ферментов, приводя к снижению скорости разложения органического вещества и накоплению токсичных веществ в почве [12]. Уплотнение почвы ухудшает аэрацию и водопроницаемость, что также негативно сказывается на деятельности почвенной биоты и ферментативной активности [13]. Загрязнение нефтепродуктами приводит к изменению состава и численности микроорганизмов, что также влияет на активность ферментов [14]. Полученные данные ферментативной активности почв позволяют не только оценивать уровень антропогенного воздействия, но и прогнозировать дальнейшие изменения в почвенной системе, разрабатывать меры по рекультивации загрязненных почв и восстановлению их функций.

Целью настоящей работы явилась оценка состояния городских почв по активности почвенных ферментов.

Материалы и методы

Объектом исследования служили почвы ряда районов города Йошкар-Олы: ул. Я. Эшпая (около ОАО «Йошкар-Олинская кондитерская фабрика»), ул. Луначарского (около ОАО «Марбиофарм»), ул. Крылова (около ЗАО «НП «Завод Искож»), ул. 8 Марта (индивидуальный жилой сектор), Медведевский район, пойменный луг (контроль) (рис. 1.)

Рис. 1. Карта-схема мест отбора почвенных проб на территории г. Йошкар-Олы /
Fig. 1. Map-scheme of soil sampling locations in the territory of Yoshkar-Ola city

Почвы г. Йошкар-Олы относятся к дерново-подзолистым [15], легко- и среднесуглинистым [16]. Почвенные образцы отбирались с верхних горизонтов, так как для них наиболее характерна ферментативная активность [17], согласно ГОСТ Р ГОСТ 17.4.4.02-2017[1]. Интенсивность дыхания оценивали по количеству выделившейся из почвенных проб углекислоты за определенный промежуток времени[2]. Активность каталазы, протеазы определяли по методу Ф. Х. Хазиева времени[2] [18], уреазную активность определяли экспресс-методом по Т. В. Аристовской, М. В. Чугуновой [19]. Определение инвертазы проводили методом И. Н. Ромейко, С. М. Малиновской [18]. Степень обогащенности почв ферментами определяли по шкалам Д. Г. Звягинцева [20], оценку биологической активности почвы проводили по [21].

Данные обработаны статистически в STATISTICA 10.0 и Microsoft Excel 2010. Результаты по содержанию ферментов представлены в виде средней арифметической с доверительными интервалами, повторность пятикратная.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследованные почвы относятся к урбаноземам, т.е. представляют собой насыпной, перемешанный горизонт, состоящий из слоев грунта разного гранулометрического состава и насыщенности органическими соединениям с примесью антропогенных включений. Результаты ферментативной активности исследованных почвенных образцов представлены в таблице 1.

Каталаза – фермент класса оксидоредуктаз, разлагающий перекись водорода на воду и молекулярный кислород. При невысокой концентрации перекиси этот фермент проявляет пероксидазную активность, окисляя полифенолы и низшие спирты. Она является одним из показателей стабилизации почвенных условий. поэтому рекомендуется при биоиндикации и биомониторинге загрязнения почв [22]. Активность каталазы варьирует от 1,29 до 2,82 мл O_2 / 1 мин / г почвы. По степени обогащенности каталазой по шкале Д. Г. Звягинцева относятся к бедным, со слабой активностью. Активность каталазы в почве в значительной степени определяется условиями аэрации, структурой и гранулометрическим составом почвы, а также окислительно-восстановительным потенциалом. Под воздействием урбанизации изменяются свойства почвы, что, в свою очередь, влияет на активность каталазы [23]. В нашей работе влияние района отбора почвенных проб на каталазную активность не выявлено (P=0,120649).

[1] ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с Изменением № 1). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200158951

[2] Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв / под ред. С. Г. Малахова. М. : Гидрометеоиздат, 1984. Ч. II. 76 с.

Таблица 1 / Table 1

Ферментативная активность почв на территории г. Йошкар-Олы / Enzymatic activity of soils on the territory of Yoshkar-Ola city

Район / Neighbourhood	Показатель / Indicator				
	Каталаза, мл O2 / 1 мин / г почвы / Catalase, ml O2 / 1 min / g soil	Уреаза, ч./ Urease, h.	Протеаза, мг глицина / 1 г почвы / 24 ч/ Protease, mg glycine / 1 g soil / 24 h	Инвертаза мг глюкозы / г почвы / 24 ч. / Invertase mg glucose / g soil / 24 h.	Дыхание мг CO2 / сутки / 10 г почвы / Respiration mg CO2 / day / 10 g soil
Эшпая	1,93±0,236	1,47±0,090	0,58±0,087	0,82±0,010	0,14±0,030
Луначарского	1,57±0,178	1,47±0,133	0,43±0,059	0,89±0,003	0,47±0,336
Крылова	1,59±0,202	1,60±0,000	0,32±0,062	1,00±0,007	0,09±0,038
8 Марта	1,29±0,122	1,33±0,176	0,24±0,049	0,75±0,006	0,17±0,003
контроль	2,82±0,132	1,13±0,145	1,23±0,060	2,86±0,008	1,56±0,348

Одним из надежных индикаторов состояния почв является активность уреазы. Уреаза – это фермент класса гидролаз, который играет важную роль в превращении азотсодержащих соединений, и его активность определяет ключевые этапы превращения азотсодержащих веществ в почве. В условиях антропогенного воздействия активность уреазы может меняться, что может привести к нарушению одной из основных функций почв − поддержанию экологического равновесия в урбоэкосистеме [24].

Однако уреаза, содержащаяся в почве, может оказывать и отрицательное влияние. Повышенная активность уреазы в почвах с нейтральным и особенно щелочным уровнем pH может привести к значительным газообразным потерям азота в виде аммиака и оксидов азота из внесенной в почву мочевины. Было выявлено, что самая низкая скорость разложения мочевины до аммиака почвенным ферментом уреазой относится к почвам с ул. Крылова – время экспозиции 1,63 ч, самая высокая в контроле, на пойменном лугу – 1,33 ч, что в целом свидетельствует об очень слабой активности этого фермента. В результате проведенных множественных сравнений значений скорости разложения мочевины во всех случаях разница значимая (кроме ул. Эшпая и Луначарского). Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил, что зависимость активности уреазы от района отбора почвенных проб ($P=2{,}79\cdot10^{-6}$).

Инвертаза – представитель класса гидролаз – встречается почти во всех типах почв. Активность инвертазы четко коррелирует с содержанием гумуса и почвенным плодородием. Самая высокая инвертазная активность была характерна для природных почв пойменного луга (2,86±0,008 мг глюкозы на 1 г за 24 ч), что выше, чем в городских урбаноземах в 2,8–23,3 раза. Тем не менее обогащенность почв этим ферментом очень бедная и активность инвертазы очень слабая. Статистический анализ данных по активности инвертазы показал статически значимую разницу по данному показателю между всеми районами исследования и зависит от места отбора почвенных проб ($P<0{,}01$).

Протеаза почвы представляет собой фермент, способный расщеплять белки и полипептиды. Этот процесс обусловлен активностью ферментов-протеаз, которые продуцируются почвенными организмами. Протеаза играет важную роль в жизни почвы, поскольку она участвует в мобилизации и круговороте азота [25]. *Самая низкая активность протезы была на ул. 8 Марта и пойменном лугу (0,23–0,24 мг глицина на 1 г почвы*

за 24 ч), самая высокая – в контрольных образцах (1,23 мг глицина на 1 г почвы за 24 ч). В результате однофакторного дисперсионного анализа выявлена зависимость активности протеазы почв от района отбора почвенных образцов (P=0,016). Н. В. Фоминой [26] показано, что при невысоком нефтяном загрязнении происходит усиление протеазой активности почв.

Одним из наиболее распространенных методов оценки биологической активности почвы является измерение интенсивности ее дыхания как интегрального показателя работы всей биоты. Интенсивность выделения углекислого газа дает достоверную информацию о микробиально-биохимических процессах, трансформации органического вещества и позволяет судить о самоочищении антропогенно нарушенных почв [27]. Интенсивность выделения углекислого газа отражает активность почвенной биоты, скорость разложения органических веществ и напрямую связана с плодородием почвы. Однако при рассмотрении особенностей почв «дыхание» нельзя считать независимой переменной, поскольку этот показатель относится к динамичным современным признакам и связан с общей биологической активностью и является четким показателем измерения скоростей процессов в сезонной динамике, при изменении погодных условий, загрязнении почвы и внесении гербицидов [28].

В результате проведенных исследований по интенсивности дыхания почв было установлено, что для почв г. Йошкар-Олы характерна низкая интенсивность выделения углекислоты (от 0,09 на 10 г почвы за 24 ч на ул. Крылова до 0,47 на 10 г почвы за 24 ч. на ул. Луначарского), максимальные значения зафиксированы в пробах, собранных на пойменном лугу.

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что район отбора почвенных проб не влияет на интенсивность дыхания почвы (P=0,406).

Таблица 2 / Table 2

Сравнение средних значений интенсивности дыхания почвы (критерий Стьюдента) / Comparison of mean values of soil respiration intensity (Student's criterion)

	Район / Neighbourhood	**{1}**	**{2}**	**{3}**	**{4}**	**{5}**
1	ул. Эшпая		0,038914	0,999896	0,999734	0,03386
2	ул. Луначарского	**0,038914**		0,036388	0,027847	0,029085
3	ул. Крылова	0,999896	**0,036388**		0,999999	0,026154
4	ул. 8 Марта	0,999734	**0,027847**	0,999999		0,014716
5	Контроль	**0,033860**	**0,029085**	**0,026154**	**0,014716**	

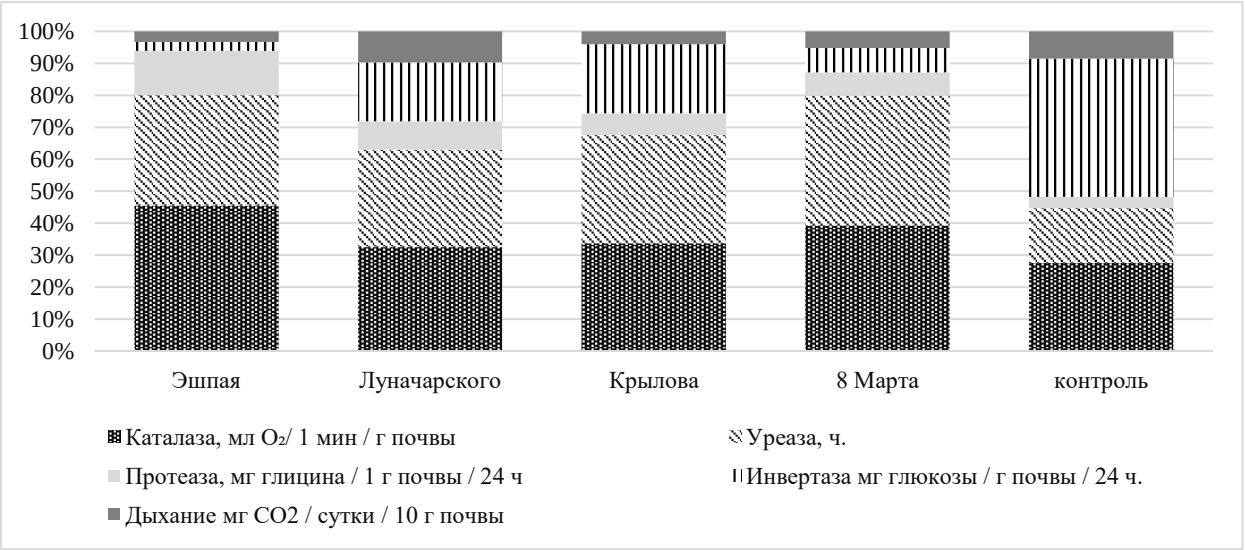

Рис. 2. Относительный вклад в общую ферментативную активность / Fig. 2. Relative contribution to total enzymatic activity

Как видно из рис. 2, в городских урбаноземах в общей ферментативной активности выше доля каталазы и уреазы, в контрольных образцах почвы – инвертазы.

Нами проведен корреляционный анализ между всеми изученными показателями ферментативной активности почвы. Он показал значимую отрицательную зависимость между активностью уреазы и других изученных ферментов и дыханием почвы. В остальных случаях значимая положительная зависимость (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Ранговые корреляции Спирмена ферментативной активности почв / Spearman rank correlations of soil enzymatic activity

	Каталаза / Catalase	Уреаза / Urease	Протеаза / Protease	Инвертаза / Invertase
Уреаза	-0,6815	1		
Протеаза	0,990463	-0,75777	1	
Инвертаза	0,927786	-0,78807	0,941762	1
Дыхание	0,629327	-0,67173	0,713348	0,711478

Заключение

Исследование почв на территории г. Йошкар-Олы показало, что урбаноземы характеризуются низкой ферментативной активностью, что указывает на ухудшение состояния почвы в условиях антропогенного воздействия. Наиболее выраженные зависимости отмечены для активности уреазы, протеазы и инвертазы, в то время как активность каталазы и интенсивность дыхания почвы не зависит от места отбора проб.

1. Gorbov S. N., Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh. Enzyme activity of soils in urban landscapes of the lower Don area, Southern Russia // Land Degradation and Development. 2020. Vol. 32. No. 4. Pp. 1618–1631. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.3752

2. Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review // Enzyme and Microbial Technology. 2004. Vol. 35. Pp. 339–354. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006

3. Галстян А. Ш. Об устойчивости ферментов почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 108–110.

4. Акименко Ю. В., Казеев К. Ш., Колесников С. И. Изменение биохимических свойств чернозема обыкновенного при загрязнении биоцидами // Агрохимия. 2015. № 3. С. 81–87. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24872534_68699624.pdf (дата обращения: 25.10.2024).

5. Изменение ферментативной активности почвенных образцов при их хранении / Е. В. Даденко, К. Ш. Казеев [и др.] // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1481–1486. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12988857 (дата обращения: 25.10.2024).

6. Баранова Е. В., Илюшкина Л. Н., Полякова А. В. Изменение ферментативной активности почв в условиях города // Антропогенная трансформация природной среды. 2010. № 1. С. 144–149. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26636632_86897103.pdf (дата обращения: 01.11.2024).

7. Поляк Ю. М., Сухаревич В. И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодеградация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83–93. DOI: https://doi.org/10.31857/S0002188120010123

8. Kaczynska G., Borowik A., Wyszkowska J. Soil dehydrogenases as an indicator of contamination of the environment with petroleum products // Water Air and Soil Pollution. 2015. Vol. 226. Art. 372. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-015-2642-9

9. Новоселова Е. И., Киреева Н. А. Ферментативная активность почв в условиях нефтяного загрязнения и ее биодиагностическое значение // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 2. URL: http://envjournal.ru/ari/v2009/v2/09201.pdf (дата обращения: 27.10.2024).

10. Фосфатный режим и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном при возделывании нута / О. И. Наими, О. С. Безуглова [и др.] // Агрохимический вестник. 2020. № 3. С. 25–29. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fosfatnyy-rezhim-i-aktivnost-fosfatazy-v-chernozeme-obyknovennom-pri-vozdelyvanii-nuta?ysclid=m7ecr43d7s637011463 (дата обращения: 01.11.2024).

11. Реакция ферментативной активности почв ксерофитных лесов черноморского побережья Кавказа на пирогенное воздействие / В. В. Вилкова, К. Ш. Казеев [и др.] // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28. № 1 (90). С. 107–114. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/reaktsiya-fermentativnoy-aktivnosti-pochv-kserofitnyh-lesov-chernomorskogo-poberezhya-kavkaza-na-pirogennoe-vozdeystvie (дата обращения: 12.11.2024).

12. Effects of heavy metals on soil enzyme activities / A. Namli, S. Camci Cetin, O. Turgay, R. Kizilkaya // Soil Heavy Metals. 2010. Vol. 9. Pp. 237–262. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_11

13. Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92. URL: http://ecobiotech-journal.ru/2018/pdf/ecbtch1802080.pdf (дата обращения: 27.10.2024).

14. 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

15. Смирнов В. Н. Почвы Марийской АССР, их генезис, эволюция и пути улучшения. Йошкар-Ола : Марийское книжное издательство, 1968. 532 с.

16. Экологическое состояние почвы урбанизированных территорий общего и ограниченного пользования при ландшафтном анализе объектов Йошкар-Олы Республики Марий Эл / И. И. Митякова, Е. А. Медведкова [и др.] // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 7. С. 13–15. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29810103_40320565.pdf (дата обращения: 12.11.2024).

17. Поляков В. Ю., Ревуцкая И. Л. Ферментативная активность верхних диагностических горизонтов городских антропогенных почв Биробиджана // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 1 (189). С. 95–99. URL: http://vestnik.osu.ru/2016_1/18.pdf (дата обращения: 27.10.2024).

18. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М. : Наука, 2005. 252 с. URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01002807734 (дата обращения: 27.10.2024).

19. Аристовская Т. В., Чугунова М. В. Экспресс-метод определения биологической активности почв // Почвоведение. 1989. № 11. С. 142–147.

20. Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

21. Гапонюк Э. И., Малахов С. В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Труды 4-го Всесоюзного совещания. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. С. 3–10.

22. Дырин В. А. Активность каталазы в торфе целинного и рекультивируемого участков болотной экосистемы низинного типа // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. № 6. С. 121–125. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-katalazy-v-torfe-tselinnogo-i-rekultiviruemogo-uchastkov-bolotnoy-ekosistemy-nizinnogo-tipa?ysclid=m7egjm9fk7502520555 (дата обращения: 25.10.2024).

23. Mikayilov F. Оценка основных кинетических параметров каталазы в почве // Живые и биокосные системы. 2018. № 25. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44583426 (дата обращения: 25.10.2024).

24. Гиззатова Г. Л., Шипаева Т. А. Уреаза – ключевой фермент биодеградации мочевины // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 3-3 (45). С. 88–90. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ureaza-klyuchevoy-ferment-biodegradatsii-mocheviny?ysclid=m7eh1rmm6t866239725 (дата обращения: 12.11.2024).

25. Белоусов А. А., Белоусова Е. Н. Активность ферментов азотного цикла агрочерноземов в условиях перехода на минимальные технологии обработки // Вестник КрасГАУ. 2022. № 12 (189). С. 3–9. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-fermentov-azotnogo-tsikla-agrochernozemov-v-usloviyah-perehoda-na-minimalnye-tehnologii-obrabotki?ysclid=m7ehh8x2uy465080393 (дата обращения: 12.11.2024).

26. Фомина Н. В. Протеолитическая активность почвогрунта при использовании биосорбента // Системы контроля окружающей среды. 2017. № 7 (27). С. 151–154. URL: https://msoe.ru/articles/2017/27-22/?ysclid=m7ei6e1bgd310085607 (дата обращения: 25.10.2024).

27. Маячкина Н. В., Чугунова М. В. Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки // Вестник ННГУ. 2009. № 1. С. 84–93. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-biotestirovaniya-pochv-s-tselyu-ih-ekotoksikologicheskoy-otsenki (дата обращения: 12.11.2024).

28. Казеев К. Ш., Колесников С. И., Вальков В. Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований : монография. Ростов на Дону : Изд-во РГУ, 2003. 204 с. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27625613 (дата обращения: 25.10.2024).

Статья поступила в редакцию 17.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 16.01.2025 г.; принята к публикации 22.01.2025 г.

Об авторе

Закамская Елена Станиславовна
кандидат биологических наук, доцент, Марийский государственный университет (424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3204-2892, *zakamskay@mail.ru*

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

1. Gorbov S. N., Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh. Enzyme activity of soils in urban landscapes of the lower Don area, Southern Russia. *Land Degradation and Development*, 2020, vol. 32, no. 4, pp. 1618–1631. (In Eng.). DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.3752

2. Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, vol. 35, pp. 339–354. (In Eng.). DOI: https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006

3. Galstjan A. Sh. Ob ustoichivosti fermentov pochv [Enzymatic activity of the upper horizon of urban soils]. Pochvovedenie = Soil science, 1982, no. 4, pp. 108–110. (In Russ.).

4. Akimenko Ju. V., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. Izmenenie biokhimicheskikh svoistv chernozema obyknovennogo pri zagryaznenii biotsidami [Change of biochemical properties of the chernozem ordinary at pollution by biocides]. *Agrokhimiya* = Agrochemistry, 2015, no. 3, pp. 81–87. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24872534_68699624.pdf (accessed 25.10.2024). (In Russ.).

5. Dadenko E. V., Kazeev K. S., Kolesnikov S. I., Valkov V. F. Izmenenie fermentativnoj aktivnosti pochvennyh obrazcov pri ih hranenii [Changes in the enzymatic activity of soil samples upon their storage]. Pochvovedenie = Soil science, 2009, no. 12, pp. 1481–1486. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12988857 (accessed 25.10.2024). (In Russ.).

6. Baranova E. V., Iljushkina L. N., Poljakova A. V. Izmenenie fermentativnoi aktivnosti pochv v usloviyakh goroda [The change of enzymatic activity of soils under city conditions]. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy* = Anthropogenic Transformation of Nature, 2010, no. 1, pp. 144–149. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26636632_86897103.pdf (accessed 01.11.2024). (In Russ.).

7. Polyak Yu. M., Sukcharevich V. I. Pochvennye fermenty i zagryaznenie pochv: biodegradatsiya, bioremediatsiya, bioindikatsiya [Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication]. *Agrokhimiya* = Agrochemistry, 2020, no. 3, pp. 83–93. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0002188120010123

8. Kaczynska G., Borowik A., Wyszkowska J. Soil dehydrogenases as an indicator of contamination of the environment with petroleum products. *Water Air and Soil Pollution*, 2015, vol. 226, art. 372. (In Eng.). DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-015-2642-9

9. Novosjolova E. I., Kireeva N. A. Fermentativnaya aktivnost' pochv v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya i ee biodiagnosticheskoe znachenie [Enzymatic activity of soils under conditions of oil pollution and its biodiagnostic value]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology, 2009, no. 2. Available at: http://envjournal.ru/ari/v2009/v2/09201.pdf (accessed 27.10.2024). (In Russ.).

10. Naimi O. I., Bezuglova O. S. [et al.] Fosfatnyi rezhim i aktivnost' fosfatazy v chernozeme obyknovennom pri vozdelyvanii nuta [Phosphate regime and phosphatase activity in ordinary chernozem when cultivating chickpeas]. *Agrokhimicheskii vestnik* = Agrochemical Herald, 2020, no. 3, pp. 25–29. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/fosfatnyy-rezhim-i-aktivnost-fosfatazy-v-chernozeme-obyknovennom-pri-vozdelyvanii-nuta?ysclid=m7ecr43d7s637011463 (accessed 1.11.2024). (In Russ.).

11. Vilkova V. V., Kazeev K. Sh. [et al.] Reaktsiya fermentativnoi aktivnosti pochv kserofitnykh lesov chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza Na pirogennoe vozdeistvie [Response of enzyme activity of arid forest soils of the black sea coast of the Caucasus to pyrogenic effects]. *Aridnye ekosistemy* = Arid Ecosystems, 2022, vol. 28, no. 1 (90), pp. 107–114. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/reaktsiya-fermentativnoy-aktivnosti-pochv-kserofitnyh-lesov-chernomorskogo-poberezhya-kavkaza-na-pirogennoe-vozdeystvie (accessed 12.11.2024). (In Russ.).

12. Namli A., Camci Cetin S., Turgay O., Kizilkaya R. Effects of heavy metals on soil enzyme activities. *Soil Heavy Metals*, 2010, vol. 9, pp. 237–262. (In Eng.). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02436-8_11

13. Khaziev F. Kh. Ekologicheskie svyazi fermentativnoi aktivnosti pochv [Ecological relations of the enzymatic activity of soil]. *Ekobiotekh* = Ecobiotech, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 80–92. Available at: http://ecobiotech-journal.ru/2018/pdf/ecbtch1802080.pdf (accessed 27.10.2024). (In Russ.).

14. Minnikova T. V., Ruseva A. S., Kolesnikov S. I. Otsenka fermentativnoi aktivnosti neftezagryaznennogo chernozema posle bioremediatsii [Evaluation of the enzymatic activity of haplic chernozem contaminated by petroleum hydrocarbons after bioremediation]. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy, 2022, no. 5, pp. 5–20. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-5-5-20

15. Smirnov V. N. Pochvy Mariiskoi ASSR, ikh genezis, evolyutsiya i puti uluchsheniya [Soils of the Mari ASSR, their genesis, evolution and ways of improvement]. Joshkar-Ola, Marijskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1968, 532 p. (In Russ.)

16. Mityakova I. I., Medvedkova E. A. [et al.] Ekologicheskoe sostoyanie pochvy urbanizirovannykh territorii obshchego i ogranichennogo pol'zovaniya pri landshaftnom ana-lize ob"ektov Ioshkar-Oly Respubliki Marii El [Ecological state of soil of urbanized territories of general and limited use in landscape analysis of Yoshkar-Ola objects Republic of Mari El]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gu-manitarnykh i estestvennykh nauk* = International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2017, no. 7, pp. 13–15. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29810103_40320565.pdf (accessed 12.11.2024). (In Russ.).

17. Poljakov V. Ju., Revuckaja I. L. Fermentativnaya aktivnost' verkhnikh diagnosticheskikh gorizontov gorodskikh antropogennykh pochv Birobidzhana [The enzymatic activity of the upper diagnostic horizons of urban anthropogenic soils of birobidzhan]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik of Orenburg State Pedagogical University, 2016, no. 1 (189), pp. 95–99. Available at: http://vestnik.osu.ru/2016_1/18.pdf (accessed 27.10.2024). (In Russ.).

18. Haziev F. H. Metody pochvennoi enzimologii [Methods of soil enzymology]. M., Nauka = The science, 2005, 252 p. Available at: https://search.rsl.ru/ru/record/01002807734 (accessed 27.10.2024). (In Russ.).

19. Aristovskaja T. V., Chugunova M. V. Ekspress-metod opredeleniya biologicheskoi aktivnosti pochv [Rapid method for determining biological activity of soils]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 1989, no. 11, pp. 142–147. (In Russ.).

20. Zvjagincev D. G. Biologicheskaja aktivnost' pochv i shkaly dlja ocenki nekotoryh ejo pokazatelej [Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science, 1978, no. 6, pp. 48–54. (In Russ.).

21. Gaponjuk Je. I., Malahov S. V. Kompleksnaya sistema pokazatelei ekologicheskogo monitoringa pochv [Complex system of indicators of ecological monitoring of soils]. *Trudy 4-go Vsesoyuznogo soveshchaniya* = Proceedings of the 4th All-Union Meeting. L., Gidrometeoizdat, 1985, pp. 3–10. (In Russ.).

22. Dyrin V. A. Aktivnost' katalazy v torfe tselinnogo i rekul'tiviruemogo uchastkov bolotnoi ekosistemy nizinnogo tipa [Activity of catalase in peat of virgin and reclamated sites of lowland bog ecosystem]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* = Tomsk State Pedagogical University Bulletin, 2009, no. 6, pp. 121–125. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-katalazy-v-torfe-tselinnogo-i-rekultiviruemogo-uchastkov-bolotnoy-ekosistemy-nizinnogo-tipa?ysclid=m7egjm9fk7502520555 (accessed 25.10.2024). (In Russ.).

23. Mikayilov F. Otsenka osnovnykh kineticheskikh parametrov katalazy v pochve [Assessment of the main parameters of catalase kinetics in soil]. *Zhivye i biokosnye sistemy* = Live and bio-abiotic systems, 2018, no. 25. Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=44583426 (accessed 25.10.2024). (In Eng.).

24. Gizzatova G. L., Shipaeva T. A. Ureaza – klyuchevoi ferment biodegradatsii mocheviny [Urease – a key enzyme in the biodegradation of urea]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* = International Research Journal, 2016, no. 3-3 (45), pp. 88–90. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/ureaza-klyuchevoy-ferment-biodegradatsii-mocheviny?ysclid=m7eh1rmm6t866239725 (accessed 12.11.2024). (In Russ.).

25. Belousov A. A., Belousova E. N. Aktivnost' fermentov azotnogo tsikla agrochernozemov v usloviyakh perekhoda na minimal'nye tekhnologii obrabotki [Enzyme activity of the nitrogen cycle of agrichernozem in conditions of transition to minimum processing technologies]. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU, 2022, no. 12 (189), pp. 3–9. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/aktivnost-fermentov-azotnogo-tsikla-agrochernozemov-v-usloviyah-perehoda-na-minimalnye-tehnologii-obrabotki?ysclid=m7ehh8x2uy465080393 (accessed 12.11.2024). (In Russ.).

26. Fomina N. V. Proteoliticheskaya aktivnost' pochvogrunta pri ispol'zovanii biosorbenta [Proteolytic activity of soils from the use biosorbents]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy* = Monitoring systems of environment, 2017, no. 7 (27), pp. 151–154. Available at: https://msoe.ru/articles/2017/27-22/?ysclid=m7ei6e1bgd310085607 (accessed 25.10.2024). (In Russ.).

27. Majachkina N. V., Chugunova M. V. Osobennosti biotestirovaniya pochv s tsel'yu ikh ekotoksikologicheskoi otsenki [Peculiarities of soil biotests to evaluate soil ecotoxicity]. *Vestnik NNGU* = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod, 2009, no. 1, pp. 84–93. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-biotestirovaniya-pochv-s-tselyu-ih-ekotoksikologicheskoy-otsenki (accessed 12.11.2024). (In Russ.).

28. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Valkov V. F. Biologicheskaja diagnostika i indikacija pochv: metodologija i metody issledovanij [Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovanii]. Rostov on Don, Izd-vo RGU, 2003, 204 c. Available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27625613 (accessed 25.10.2024). (In Russ.).

The article was submitted 17.12.2024; approved after reviewing 16.01.2025; accepted for publication 22.01.2025.

About the author

Elena S. Zakamskaja
Ph. D. (Biology), Associate Professor, Mari State University (1 Lenin Sq., Yoshkar-Ola 424000, Russian Federation), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3204-2892, *zakamskay@mail.ru*

The author has read and approved the final manuscript