








DOI 10.23859/estr-230626

EDN GHNLKU

УДК 504.064.2:631.465

*Научная статья*

## **Комплексная эколого-биологическая оценка почв среднего по численности города Центрального федерального округа**

А.Г. Космачева<sup>1\*</sup> , Т.А. Трифонова<sup>1,2</sup> , А.А. Марцев<sup>1</sup> ,  
О.Г. Селиванов<sup>1</sup> , А.О. Ростунов<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

\*hijadelaluna@mail.ru

**Аннотация.** Проведена комплексная оценка эколого-биологического состояния почвенного покрова типичного среднего города Центрального федерального округа с численностью населения до 100 тысяч человек и развитым промышленным производством на примере г. Гусь-Хрустальный Владимирской области. Полученные результаты демонстрируют неоднородность почв по содержанию органического вещества (0–10.22%), активности ферментов каталазы (0.26–2.71 мл O<sub>2</sub>/мин × 1 г) и уреазы (0–0.69 мг NH<sub>3</sub>/10 г почвы × 24 ч), интегральному показателю эколого-биологического состояния почвы (39.13–100%). Исследуемые образцы характеризуются как бедные и очень бедные по степени обогащенности каталазой, очень бедные по степени обогащенности уреазой. Показатели ферментативной активности являлись более чувствительными к изменению свойств почв в сравнении с фитотестированием. Полученные результаты свидетельствуют о сильном неравномерном антропогенном воздействии на городские почвы, что приводит к изменению их биологических показателей и неоднородности почвенного покрова урбанизированных территорий.

**Ключевые слова:** ферментативная активность, фитотестирование, интегральный показатель эколого-биологического состояния почвы

### **ORCID:**

А.Г. Космачева, <https://orcid.org/0000-0002-1988-8615>

Т.А. Трифонова, <https://orcid.org/0000-0002-1628-9430>

А.А. Марцев, <https://orcid.org/0000-0002-3572-9163>

О.Г. Селиванов, <https://orcid.org/0000-0003-3674-0660>

А.О. Ростунов, <https://orcid.org/0000-0002-6609-5634>

**Для цитирования:** Космачева, А.Г. и др., 2025. Комплексная эколого-биологическая оценка почв среднего по численности города Центрального федерального округа. *Трансформация экосистем* 8 (1), 21–33. <https://doi.org/10.23859/estr-230626>

Поступила в редакцию: 26.06.2023

Принята к печати: 26.09.2023

Опубликована онлайн: 21.02.2025

---





DOI 10.23859/estr-230626

EDN GHNLKU

UDC 504.064.2:631.465

## Article

# Comprehensive ecological and biological assessment of soils of a medium-sized city in the Central Federal District, Russia

A.G. Kosmacheva<sup>1\*</sup>, T.A. Trifonova<sup>1, 2</sup>, A.A. Martsev<sup>1</sup>,  
O.G. Selivanov<sup>1</sup>, A.O. Rostunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Gorky St. 87, Vladimir, 600000 Russia

<sup>2</sup> Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory 1, building 12, Moscow, 119991 Russia

\*hijadelaluna@mail.ru

---

**Abstract.** The ecological and biological state of the soil cover has been assessed comprehensively in the typical medium-sized industrial city of Gus-Khrustalny (population of up to 100000) in the Vladimir Oblast, Central Federal District, Russia. The results obtained demonstrate the heterogeneity of the soils in terms of organic matter content (0–10.22%), the activity of catalase (0.26–2.71 mL O<sub>2</sub>/(min × g)) and urease (0–0.69 mg NH<sub>3</sub>/(10 g of soil × 24 h)), and the integral indicator of the ecological and biological state of the soil (39.13–100%). The studied samples are characterized as ‘poor’ and ‘very poor’ in terms of catalase activity and as ‘very poor’ in terms of urease activity. The indices of enzymatic activity were more sensitive to changes in soil properties in comparison with plant testing methods. A strong uneven anthropogenic impact on urban soils is detected, changing soil biological indices and resulting in the soil cover heterogeneity in urbanized areas.

**Keywords:** enzymatic activity, plant testing methods, integral indicator of ecological and biological state of soil

## ORCID:

A.G. Kosmacheva, <https://orcid.org/0000-0002-1988-8615>

T.A. Trifonova, <https://orcid.org/0000-0002-1628-9430>

A.A. Martsev, <https://orcid.org/0000-0002-3572-9163>

O.G. Selivanov, <https://orcid.org/0000-0003-3674-0660>

A.O. Rostunov, <https://orcid.org/0000-0002-6609-5634>

**To cite this article:** Kosmacheva, A.G. et al., 2025. Comprehensive ecological and biological assessment of soils of a medium-sized city in the Central Federal District, Russia. *Ecosystem Transformation* 8 (1), 21–33. <https://doi.org/10.23859/estr-230626>

Received: 26.06.2023

Accepted: 26.09.2023

Published online: 21.02.2025

## Введение

Почвы урбанизированных территорий подвергаются высокой техногенной нагрузке, в первую очередь вблизи промышленных предприятий и автомобильных дорог (Зыкова и др., 2017; Корикина и др., 2016; Николаева и др., 2019; Скугорева и др., 2019; Трояновская и др., 2011). Высокое содержание поликомпонентных загрязнителей и ограниченное количество нормативов, устанавливающих ПДК химических веществ, обуславливает трудности в гигиенической и эколого-биологической оценке антропогенно измененных городских территорий. Поэтому в мониторинговых исследованиях наравне с физико-химическими методами определения поллютантов большое значение имеет оценка эколого-биологического состояния почв. Широко распространенными и информативными в данных исследованиях являются методы биодиагностики (Бардина и др., 2020; Донерьян и Водянова, 2018; Зыкова и др., 2017; Калинкина и др., 2016; Корикина и др., 2016; Николаева и др., 2019; Олькова и Маханова, 2020; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018; Скугорева и др., 2019; Трифонова и Забелина, 2017; Трояновская и др., 2011; Хазиев, 2018; Чеснокова и др., 2016; Girotti et al., 2008). В частности, активность ферментов характеризует интенсивность биохимических процессов. В связи с ролью почвы в биогеохимическом круговороте и регуляции газового обмена энзимодиагностика служит существенным показателем ее экологического состояния (Бардина и др., 2020; Казеев и др., 2003; Хазиев, 2005, 2018). Фитотестирование является одним из наиболее часто используемых контактных биотестов в экотоксикологических исследованиях, так как состояние растений – важный индикатор качества почвы (Бардина и др., 2020; Зыкова и др., 2017; Николаева и др., 2019; Олькова и Маханова, 2020; Скугорева и др., 2019; Трояновская и др., 2011).

Для сравнительной оценки совокупностей различных показателей применяется комплексный подход, позволяющий учесть неблагоприятные воздействия на различные компоненты экосистем (Донерьян и Водянова, 2018; Калинкина и др., 2016; Корикина и др., 2016; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018; Скугорева и др., 2019). Одним из таких методов является расчет интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы (ИПЭБСП) (Казеев и др., 2003). Применение комплексных исследований для определения степени загрязнения городских почв описано в литературе (Калинкина и др., 2016; Корикина и др., 2016; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018; Скугорева и др., 2019). Выбор определяемых показателей не стандартизирован, рекомендуется использовать наиболее информативные из них, в связи с чем широко применяются следующие: ферментативная активность (Калинкина и др., 2016; Корикина и др., 2016; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018; Скугорева и др., 2019), содержание органического углерода (Корикина и др., 2016; Скугорева и др., 2019), данные фитотестирования (Скугорева и др., 2019).

По численности населения городские поселения подразделяются на группы согласно СП 42.13330.2016<sup>1</sup>: крупнейшие – свыше 1 млн человек, крупные – 250 тыс.–1 млн, большие – 100–250 тыс., средние – 50–100 тыс., малые – до 50 тыс. Наиболее часто исследования почв проводятся в крупнейших (Еремченко и др., 2014), крупных (Калинкина и др., 2016; Олькова и Маханова, 2020; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018; Скугорева и др., 2019; Трифонова и Забелина, 2017; Трояновская и др., 2011) и больших (Корикина и др., 2016) городах. Однако эколого-биологическая оценка средних и малых городов также весьма актуальна по причине их преимущественной распространенности на территории Российской Федерации при сочетании с высокой антропогенной нагрузкой (Зыкова и др., 2017; Олькова и Маханова, 2020; Смирнов, 2019; Чеснокова и др., 2016).

Во Владимирской области исследования почв урбанизированных территорий ранее выполнялись для городов Владимир (численность населения 346771 человек) и Судогда (10150); проводилось определение биологических показателей ферментативной активности, а также кислотности и содержания тяжелых металлов (Трифонова и Забелина, 2017; Чеснокова и др., 2016).

Гусь-Хрустальный, являющийся пятым по численности населения и площади во Владимирской области, обладает развитым производством, представленным в основном предприятиями

<sup>1</sup> СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.

стекольной промышленности (Трифонова и др., 2023). Поскольку Гусь-Хрустальный – один из типичных средних городов, число которых в 2010 г. составляло 155 в Российской Федерации (из них 40 – в Центральном федеральном округе), и характеризуется высокой техногенной нагрузкой, изучение состояния почвенного покрова города очень актуально (Смирнов, 2019). К настоящему времени проведено и опубликовано исследование, посвященное эколого-гигиенической оценке загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почвенного покрова г. Гусь-Хрустальный. Показано наличие полиэлементного загрязнения, связанного с функционированием стекольного производства. Установлено, что большая часть населения проживает в зонах с почвами умеренно опасной и опасной категорий, приоритетными загрязнителями являются Zn, Pb, As (Трифонова и др., 2023). Таким образом, выявленное загрязнение тяжелыми металлами обуславливает актуальность исследования эколого-биологического состояния почв г. Гусь-Хрустальный.

Цель данного исследования – проведение комплексной оценки эколого-биологического состояния почвенного покрова г. Гусь-Хрустальный Владимирской области как типичного среднего города ЦФО РФ.

## Материалы и методы

Объектами исследования являлись почвы г. Гусь-Хрустальный (N55°37' E 40°39') – административного центра Гусь-Хрустального района Владимирской обл., общая площадь которого составляет 43 км<sup>2</sup>, численность населения 51552 человек (на 2021 г.). Карта с точками отбора проб почвы представлена на Рис. 1. Пробы отбирали преимущественно вблизи промышленных предприятий (точки № 4–10) и автомобильных дорог (№ 11–14), являющихся источниками загрязнения. Большинство точек отбора в промышленной зоне расположены вблизи предприятий стекольной промышленности, преобладающих в данном городе: образец № 4 – АО «ОС Стекловолокно», № 5 и № 6 – АО «Гусевский стекольный завод им. Ф.Э. Дзержинского», № 7 – ООО «Гусевской хрустальный завод им. Мальцова», № 8 – ООО «Опытный стекольный завод». Также произведен отбор почв на территориях, расположенных около предприятий по производству трубопроводной арматуры: точка №9 – ООО «Гусевский арматурный завод «Гусар», № 10 – ОАО «Армагус». В качестве геохимического фона выбрана ландшафтно-рекреационная зона: пригородная дачная территория (№ 1, 3), городской парк культуры отдыха «Барина роща» (№ 2).

Отбор почвенных проб проводили в августе 2022 г. в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017<sup>2</sup> на глубине 0–10 см.

Содержание органического вещества определяли согласно ГОСТ 26213–2021<sup>3</sup>.

Каталазную активность устанавливали газометрическим методом А.Ш. Галстяна по скорости распада перекиси водорода при взаимодействии с почвой по объему кислорода, выделяющегося в процессе реакции (Хазиев, 2005).

Определение уреазной активности осуществляли фотоколориметрическим методом на основе измерения количества аммиака, образующегося при гидролизе вносимой мочевины, через 24 ч инкубации (Казеев и др., 2003).

Для проведения фитотестирования использовали стандартную методику М-П-2006 ФР.1.39.2006.02264 (Капелькина и др., 2009). Тест-объектом являлась пшеница яровая мягкая (*Triticum aestivum* L.) сорта «Сударыня». Чашки Петри инкубировали в течение 5 суток при температуре 25 °С и освещении 4000 лк. Определены показатели длины корней, высоты побегов и всхожести растений.

Все исследования проводились в трехкратной повторности.

Для сравнительной оценки совокупности полученных данных использовали интегральный показатель эколого-биологического состояния почвы (ИПЭБСП), рассчитываемый по следующей формуле (Казеев и др., 2003):

$$ИПЭБСП = \frac{Б_{ср.}}{Б_{ср.макс.}} \times 100 \%,$$

где Б<sub>ср.</sub> – средний оценочный балл всех показателей, Б<sub>ср.макс.</sub> – максимальный оценочный балл всех показателей.

<sup>2</sup> ГОСТ 17.4.4.02-2017. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

<sup>3</sup> ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества.

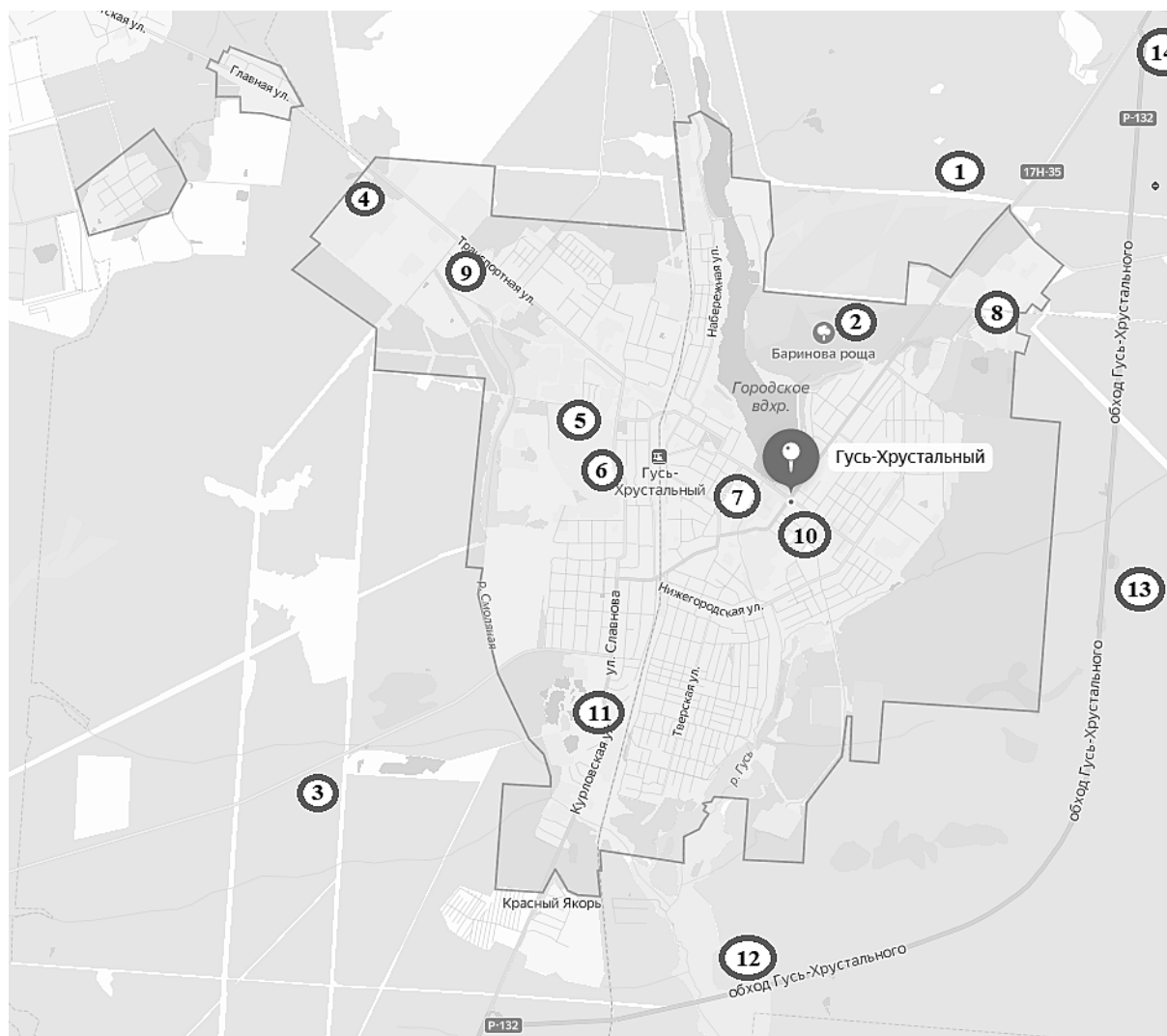


Рис. 1. Карта города Гусь-Хрустальный. Цифрами обозначены точки отбора проб.

Максимальное значение каждого из показателей принимали за 100%, по отношению к нему в процентах выражали значение показателя в остальных образцах согласно формуле (Казеев и др., 2003):

$$Б = \frac{Бх}{Б_{\max}} \times 100\%,$$

где Б – относительный балл показателя, Бх – фактическое значение показателя, Б<sub>max</sub> — максимальное значение показателя. Оценивались относительные баллы показателей содержания органического вещества (Бо), каталазной активности (Бк), уреазной активности (Бу), длины корней (Бдк), высоты побегов (Бвп), всхожести пшеницы (Бвсх).

Средний оценочный балл изученных показателей определяли по следующей формуле (Казеев и др., 2003):

$$Б_{\text{ср.}} = \frac{(Бо + Бк + Бу + Бдк + Бвп + Бвсх)}{6}$$

где Б<sub>ср.</sub> – средний оценочный балл показателей, 6 – число показателей.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Statistica 7.0. Вычислены показатели среднего и ошибка среднего, проведен корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Пирсона.

## Результаты и обсуждение

Результаты определения содержания органического вещества, ферментативной активности почв, а также длины корней, высоты побегов и всхожести растений представлены в Табл. 1.

Содержание органического вещества колеблется от 0 до 10.22% (Табл. 1). Максимальное значение установлено в почве, отобранной в точке № 10, расположенной в промышленной зоне в центральной части города. Минимальное содержание органического вещества выявлено в северо-восточной части города (образцы из ландшафтно-рекреационной зоны № 1 и № 2, промышленной зоны – № 8), а также в пробе № 13 вблизи автомобильной дороги. Подобное варьирование свойств городских почв по содержанию органического вещества отмечено при исследовании г. Перми (0.3–16.49%) и г. Кирова (2.4–13.0%) (Еремченко и др., 2014; Скугорева и др., 2019); авторы объясняли это явление сильным изменением почв города вследствие антропогенного воздействия: перемешивания, замены почв на почвогрунты различного химического состава, техногенного загрязнения.

Каталазная активность почв г. Гусь-Хрустальный варьирует в диапазоне 0.26–2.71 мл  $O_2$ /мин × 1 г (Табл. 1). Максимальное значение показателя установлено для почвы, отобранной в точке № 11 в транспортной зоне юго-западной части города. Минимальная каталазная активность выявлена в почвенных образцах из разных функциональных зон северо-восточной части: № 2 – ландшафтно-рекреационной, № 8 – промышленной, № 13 – транспортной. Согласно шкале для оценки степени обогащенности почв ферментами по Д.Г. Звягинцеву (Казеев и др., 2003), по степени обогащенности каталазой почвы, отобранные в точках № 1, 3 (ландшафтно-рекреационная зона), № 7, 10 (промышленная зона), № 11, 12 (транспортная зона) характеризуются как бедные; № 2 (ландшафтно-рекреационная зона), № 4, 5, 6, 8, 9 (промышленная зона), № 13, 14 (транспортная зона) – очень бедные, что согласуется с результатами исследований Кирова (Скугорева и др., 2019) и Астрахани (Калинкина и др., 2016; Сальников и др., 2018). В аналогичных исследованиях почв г. Владимира (Трифонов и Забелина, 2017), г. Перми (Еремченко и др., 2014), г. Таганрога (Корикова и др., 2016), г. Астрахани (Калинкина и др., 2016; Пархоменко, 2018; Сальников и др., 2018) также показано, что каталазная активность варьирует в широких пределах в зависимости от уровня техногенной нагрузки, актуальной кислотности почвы, содержания органического вещества, тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Величина уреазной активности находится в диапазоне 0–0.69 мг  $NH_3$ /10 г почвы × 24 ч (Табл. 1). Минимальное значение показателя установлено в образце № 2, отобранном в ландшафтно-рекреационной зоне северо-восточной части города, а также в почвах точек № 12 и № 13, представляющих транспортную зону. Максимальная уреазная активность выявлена в образце № 14 вблизи автомобильной дороги. Согласно шкале Д.Г. Звягинцева (Казеев и др., 2003), все исследуемые образцы являются очень бедными по степени обогащенности уреазой. Полученные результаты согласуются с данными исследования почв г. Судогды Владимирской обл., согласно которым величина уреазной активности составляла 0.052–1.54 мг  $NH_3$ /10 г почвы × 24 ч (Чеснокова и др., 2016), что демонстрирует низкую активность фермента в городах Владимирской области. Высокий разброс данного показателя отмечен для г. Судогды (Чеснокова и др., 2016), г. Владимира (Трифонов и Забелина, 2017), г. Таганрога (Корикова и др., 2016), г. Перми (Еремченко и др., 2014), г. Астрахани (Калинкина и др., 2016; Сальников и др., 2018) и связывается авторами с антропогенным воздействием, содержанием тяжелых металлов и органического вещества.

Результаты фитотестирования также демонстрируют, что длина корней и высота побегов пшеницы варьируют в широком диапазоне (Табл. 1). Минимальное значение длины корней установлено в почве, отобранной в точке № 14 (транспортная зона), максимальное – в точке № 7 (промышленная зона). Минимальная высота побегов выявлена для образцов почвы № 13 (транспортная зона) и № 2 (ландшафтно-рекреационная зона), максимальная – № 11 (транспортная зона) и № 7. Всхожесть являлась менее чувствительным показателем, что согласуется с другими исследованиями (Николаева и др., 2019). Как показывают результаты фитотестирования, образцы № 13 и № 14, отобранные вблизи автодороги, были наиболее токсичными для растений по воздействию на длину корней, образцы № 2, 13, 14 – на длину побегов. Почвы, отобранные в точках № 2 и № 13, характеризовались также отсутствием органического вещества, низкой активностью каталазы и уреазы. В то же время почва в образце № 14, оказывающая ингибирующее воздействие на рост растений, обладает максимальной уреазной активностью.

Полученные данные содержания органического вещества, ферментативной активности почв, длины корней, высоты побегов, всхожести пшеницы, ИПЭБСП подчиняются закону нормального

Табл. 1. Эколого-биологические показатели почвы г. Гусь-Хрустальный.

Номер пробы	Органическое вещество, %	Каталазная активность, мл O <sub>2</sub> /мин × 1 г почвы	Уреазная активность, мг NH <sub>3</sub> /10 г почвы × 24 ч	Показатели фитотестирования по <i>Triticum aestivum</i> L.		
				Длина корней, мм	Высота побегов, мм	Всхожесть, %
Ландшафтно-рекреационная зона						
1	0.74 ± 0.1	1.01 ± 0.12	0.13 ± 0.06	74.3 ± 6.0	51.9 ± 7.9	98.33 ± 1.67
2	0	0.26 ± 0.04	0	73.9 ± 0.6	43.3 ± 0.9	98.33 ± 1.67
3	8.68 ± 0.85	1.24 ± 0.21	0.64 ± 0.01	97.3 ± 2.6	84.6 ± 5.1	98.33 ± 1.67
Промышленная зона						
4	2.20 ± 0.4	0.51 ± 0.09	0.47 ± 0.09	102.0 ± 1.7	80.0 ± 3.2	98.33 ± 1.67
5	2.40 ± 0.47	0.63 ± 0.09	0.18 ± 0.00	99.5 ± 6.2	67.0 ± 6.0	98.33 ± 1.67
6	3.78 ± 0.56	0.66 ± 0.13	0.05 ± 0.02	82.5 ± 3.4	83.3 ± 1.1	95.0 ± 2.89
7	4.09 ± 0.6	1.63 ± 0.23	0.6 ± 0.05	103.2 ± 3.9	85.0 ± 2.8	93.33 ± 4.41
8	0.1 ± 0.0	0.33 ± 0.06	0.25 ± 0.02	93.4 ± 9.5	76.7 ± 8.1	93.33 ± 4.41
9	2.28 ± 0.45	0.92 ± 0.17	0.27 ± 0.01	92.3 ± 2.7	79.6 ± 3.9	96.67 ± 1.67
10	10.22 ± 0.95	1.93 ± 0.26	0.6 ± 0.04	89.6 ± 5.6	71.0 ± 2.4	91.67 ± 3.33
Транспортная зона						
11	2.87 ± 0.56	2.71 ± 0.3	0.41 ± 0.07	96.2 ± 3.3	85.5 ± 3.8	88.33 ± 6.01
12	6.15 ± 0.6	1.44 ± 0.11	0.0	84.9 ± 5.8	64.2 ± 5.4	93.33 ± 1.67
13	0	0.27 ± 0.07	0.0	61.3 ± 4.2	41.5 ± 2.6	85.0 ± 5.0
14	3.74 ± 0.56	0.69 ± 0.12	0.69 ± 0.03	56.5 ± 2.3	48.9 ± 1.2	88.33 ± 1.67

распределения. Корреляционный анализ Пирсона выявил положительные корреляционные зависимости активности каталазы ( $r = 0.5653$ ;  $p = 0.035$ ), уреазы ( $r = 0.5531$ ;  $p = 0.040$ ) и содержания органического вещества в почве, что соответствует литературным данным (Корикова и др., 2016). Выявлена положительная корреляционная зависимость между длиной корня и высотой побега пшеницы ( $r = 0.8506$ ,  $p = 0.000$ ). Установлено отсутствие корреляционных зависимостей между длиной корня и содержанием органического вещества ( $r = 0.2420$ ,  $p = 0.405$ ), активностью каталазы ( $r = 0.2622$ ,  $p = 0.365$ ), активностью уреазы ( $r = 0.2345$ ,  $p = 0.420$ ), а также отсутствие корреляции между высотой побега и содержанием органического вещества ( $r = 0.3780$ ,  $p = 0.183$ ), активностью каталазы ( $r = 0.3921$ ,  $p = 0.166$ ), активностью уреазы ( $r = 0.3847$ ,  $p = 0.174$ ).

Проведен анализ зависимости содержания органического вещества, активности каталазы и уреазы, длины корней и высоты побегов пшеницы от pH, удельной электропроводности почвенной вытяжки и суммарного показателя загрязнения почвы, опубликованных ранее (Трифонов и др., 2023). Корреляционный анализ Пирсона выявил отсутствие зависимостей между величиной pH и содержанием органического вещества ( $r = -0.3820$ ,  $p = 0.178$ ), активностью каталазы ( $r = -0.1849$ ,  $p = 0.527$ ), уреазы ( $r = 0.0930$ ,  $p = 0.752$ ), длиной корней ( $r = -0.1412$ ,  $p = 0.630$ ), высотой

побегов ( $r = -0.0106$ ,  $p = 0.971$ ) пшеницы. Установлено отсутствие корреляционных зависимостей между величиной удельной электропроводности и содержанием органического вещества ( $r = 0.2256$ ,  $p = 0.438$ ), активностью каталазы ( $r = 0.1878$ ,  $p = 0.520$ ), длиной корней ( $r = -0.2845$ ,  $p = 0.324$ ), высотой побегов ( $r = 0.0223$ ,  $p = 0.940$ ) пшеницы, а также наличие положительной зависимости между удельной электропроводностью и уреазной активностью ( $r = 0.6115$ ,  $p = 0.020$ ) почвенных образцов. Обнаружено отсутствие корреляционных зависимостей между суммарным показателем загрязнения почвы ( $Z_c$ ) и содержанием органического вещества ( $r = 0.1258$ ,  $p = 0.668$ ), активностью каталазы ( $r = -0.0440$ ,  $p = 0.881$ ), уреазы ( $r = -0.1892$ ,  $p = 0.517$ ), длиной корней ( $r = -0.0198$ ,  $p = 0.946$ ) и высотой побегов ( $r = 0.3231$ ,  $p = 0.260$ ) пшеницы.

Полученные результаты корреляционного анализа демонстрируют, что содержание органического вещества в почве может являться лимитирующим фактором для активности ферментов, но не оказывает столь сильного влияния на прорастание растений. Кроме того, показано повышение уреазной активности при увеличении концентрации ионов в почвенном растворе. Таким образом, содержание органического вещества и активность ферментов г. Гусь-Хрустальный не обусловлены принадлежностью к определенной функциональной зоне и загрязнением тяжелыми металлами, но связана с сочетанием ряда факторов.

Результаты рассчитанных средних оценочных баллов изученных показателей и интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы представлены в Табл. 2.

Согласно результатам расчетов, относительные баллы показателей (Табл. 2) колебались в широких пределах, что связано с большим диапазоном полученных результатов (Табл. 1). Наибольшая вариабельность отмечена для относительных баллов органического вещества (Бо), активности ферментов уреазы (Бу) и каталазы (Бк). Наименьшие колебания относительных баллов установлены для всхожести пшеницы (Бвсх). Величина интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы колеблется в диапазоне 39.13–100% (Табл. 2), что указывает на неоднородность почв г. Гусь-Хрустальный, вероятно, связанную с антропогенным воздействием, различающимся на разных участках территории города. Наиболее высокими значениями ИПЭБСП характеризуются образцы № 10 (в промышленной зоне центральной части города) и № 3 (в ландшафтно-рекреационной зоне пригородной дачной территории с юго-западной стороны). Наименьшие значения ИПЭБСП установлены в пробах почвы из точки № 13, расположенной в транспортной зоне к востоку от города, и точки № 2 – в ландшафтно-рекреационной зоне северо-восточной части города.

Корреляционный анализ Пирсона выявил положительные зависимости между ИПЭБСП и каталазной активностью ( $r = 0.7489$ ,  $p = 0.002$ ), уреазной активностью ( $r = 0.7926$ ,  $p = 0.001$ ), длиной корня ( $r = 0.5645$ ,  $p = 0.035$ ), высотой побега ( $r = 0.7113$ ,  $p = 0.004$ ), содержанием органического вещества ( $r = 0.7987$ ;  $p = 0.001$ ). Обнаружено отсутствие корреляционной зависимости между ИПЭБСП и суммарным показателем загрязнения почвы ( $Z_c$ ) ( $r = 0.0162$ ,  $p = 0.956$ ), которое демонстрирует отсутствие зависимости величины интегрального показателя эколого-биологического состояния почвы от загрязнения тяжелыми металлами.

Почва из точки № 2 в городском парке культуры отдыха «Баринова роща», выбранная в качестве геохимического фона, характеризуется одним из наименьших значений ИПЭБСП, связанным с отсутствием содержания органического вещества и, как следствие, низкой ферментативной активностью. Таким образом, полученные данные демонстрируют необходимость в проведении дополнительных исследований для выявления причин снижения биологических показателей почв на территории, удаленной от промышленных предприятий и автомобильных дорог. Кроме того, представляет интерес изучение причин высокого содержания органического вещества в точке № 10, расположенной в центральной части города и подверженной повышенной техногенной нагрузке.

## Заключение

Впервые проведена комплексная оценка эколого-биологического состояния почвенного покрова г. Гусь-Хрустальный Владимирской обл., выступающего как типичный средний город Центрального федерального округа по численности населения и промышленному потенциалу. Результаты исследования демонстрируют неоднородность почв г. Гусь-Хрустальный по основным эколого-биологическим показателям, что может свидетельствовать о неравномерности антропогенного воздействия. Содержание органического вещества варьирует в диапазоне 0–10.22%, каталазная активность – в диапазоне 0.26–2.71 мл  $O_2$ /мин  $\times$  1 г, уреазная активность – от 0 до 0.69 мг  $NH_3$ /10 г почвы  $\times$  24 ч. Все исследуемые образцы являются очень бедными по степени обогащенности уреазой, а также бедными и очень бедными по степени обогащенности катала-



**Табл. 2.** Средние оценочные баллы изученных показателей почвы г. Гусь-Хрустальный. Бо – содержание органического вещества, Бк – каталазная активность, Бу – уреазная активность, Бдк – длина корней (Бдк), Бвп – высота побегов Бвх – всхожесть пшеницы (Бвх), ИБЭСП – интегральный показатель эколого-биологического состояния почвы.

Номер пробы	Бо, %	Бк, %	Бу, %	Бдк, %	Бвп, %	Бвх, %	Бср, %	ИБЭСП, %
Ландшафтно-рекреационная зона								
1	7.24	37.18	19.55	71.99	60.69	100	49.44	56.85
2	0	9.44	0	71.56	50.57	100	38.60	44.38
3	84.93	45.81	92.68	94.24	98.89	100	86.09	98.99
Промышленная зона								
4	21.53	18.74	67.93	98.85	93.5	100	66.76	76.76
5	23.48	23.28	26.1	96.37	78.28	100	57.92	66.59
6	36.99	24.27	7.5	79.92	97.39	96.61	57.11	65.67
7	40.02	59.94	86.72	100	99.31	94.92	80.15	92.15
8	0.98	12.28	36.86	90.53	89.61	94.92	54.20	62.31
9	22.31	33.90	38.9	89.45	93.09	98.31	62.66	72.04
10	100	71.12	87.67	86.85	82.98	93.23	86.97	100
Транспортная зона								
11	28.08	100	59.69	93.16	100	89.83	78.46	90.21
12	60.18	53.26	0	82.29	75.0	94.92	60.94	70.07
13	0	9.85	0	59.42	48.51	86.44	34.04	39.13
14	36.59	25.41	100	54.73	57.15	89.83	60.62	69.7

зой. Средняя длина корней пшеницы (*Triticum aestivum* L.) находится в диапазоне 56.5–103.2 мм, высота побегов – 41.5–85.5 мм, всхожесть – 85–98.33%. Показатели ферментативной активности в данном исследовании проявили большую чувствительность к изменению свойств почв по сравнению с фитотестированием. Значительные колебания величины интегрального показателя эколого-биологического состояния (39.13–100%) не обусловлены принадлежностью к определенной функциональной зоне и загрязнением тяжелыми металлами и связаны с сочетанием ряда факторов, установление вклада которых требует дополнительных исследований.

Использование различных методов биологической индикации и применение комплекса тест-объектов с разной степенью чувствительности к токсикантам позволяет наиболее полно охарактеризовать эколого-биологическое состояние исследуемых почв и оценить уровень техногенной нагрузки. Полученные данные представляют интерес как для экологов при разработке мероприятий, направленных на усиление экологической безопасности, улучшение состояния окружающей природной среды Владимирской области, так и для специалистов в области почвоведения. Выявлена необходимость в проведении дополнительных исследований для установления причин значительного изменения биологических показателей почв г. Гусь-Хрустальный, в

том числе в ландшафтно-рекреационной зоне. С целью предотвращения деградации почв и для восстановления нарушенных территорий рекомендуется проведение регулярного мониторинга с применением физико-химических и биодиагностических методов исследования, а также активное внедрение мер по детоксикации загрязненных почв.

### Список литературы

- Бардина, Т.В., Чугунова, М.В., Кулибаба, В.В., Бардина, В.И., 2020. Использование методов биотестирования для оценки экологического состояния почвогрунтов рекультивированного карьера. *Биосфера* 12 (1–2), 1–11. <https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V12I1.539>
- Донерьян, Л.Г., Водянова, М.А., 2018. Обоснование места альтернативных биологических методов в гигиенических исследованиях. *Гигиена и санитария* 97 (11), 1093–1097.
- Еремченко, О.З., Москвина, Н.В., Шестаков, И.Е., Швецов, А.А., 2014. Использование тест-культур для оценки экологического состояния городских почв. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки* 19 (5), 1280–1284.
- Зыкова, Ю.Н., Скугорева, С.Г., Товстик, Е.В., Ашихмина, Т.Я., 2017. Подходы к оценке состояния городских почв методами биотестирования с использованием организмов различной систематической принадлежности и данных химического анализа. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 38–46.
- Казеев, К.Ш., Колесников, С.И., Вальков В.Ф., 2003. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Издательство РГУ, Ростов-на-Дону, Россия, 216 с.
- Калинкина, В.Е., Сальникова, Н.А., Сальников, А.Л., 2016. Интегральный показатель эколого-биологического состояния нарушенных земель как объектов рекультивации. *Естественные науки* 1 (54), 7–12.
- Капелькина, Л.П., Бардина, Т.В., Бакина, Л.Г., Чугунова, М.В., Герасимов, А.О., Маячкина, Н.В., Галдянец, А.А., 2009. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязненных почв (М-П-2006 ФР.1.39.2006.02264). Фора-принт, Санкт-Петербург, Россия, 19 с.
- Корикова, Н.О., Гусакова, Н.В., Петров, В.В., 2016. Оценка экологического состояния почвы городских территорий на основании показателей биологической активности (на примере г. Таганрога). *Известия вузов. Северокавказский регион. Естественные науки* 4, 87–91.
- Николаева, О.В., Чистова, О.А., Панина, Н.Н., Розанов, М.С., 2019. Экоотоксикологическая оценка почв придорожных территорий Ленинградского шоссе методом лабораторного фитотестирования. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение* 1, 28–34.
- Олькова, А.С., Маханова, Е.В., 2020. Сравнительный анализ экологического состояния почв вблизи полигонов хранения отходов разного времени функционирования. *Теоретическая и прикладная экология* 4, 35–42. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-035-042>
- Пархоменко, А.Н., 2018. Эколого-биологическое состояние почв Астраханской области в условиях антропогенного воздействия. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология* 8 (1), 129–134. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-129-134>
- Сальников, А.Л., Сальникова, Н.А., Синцов, А.В., Валов, М.В., 2018. Особенности системного подхода в экологическом мониторинге урбанизированных почв. *Геология, география и глобальная энергия* 1 (68), 109–119.

- Скугорева, С.Г., Кутявина, Т.И., Огородникова, С.Ю., Кондакова, Л.В., Симакова, В.С. и др., 2019. Комплексный подход в оценке экологического состояния городских почв. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 57–65. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-057-065>
- Смирнов, И.П., 2019. Средние города Центральной России. Тверской государственный университет, Тверь, Россия, 165 с.
- Трифонова, Т.А., Марцев, А.А., Селиванов, О.Г., Курбатов, Ю.Н., 2023. Эколого-гигиеническая оценка почв промышленного города со стекольным производством по содержанию тяжелых металлов и мышьяка. *Гигиена и санитария* 102 (6), 549–555. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-549-555>
- Трифонова, Т.А., Забелина, О.Н., 2017. Изменение биологической активности почвы городских рекреационных территорий в условиях загрязнения тяжелыми металлами и нефтепродуктами. *Почвоведение* 4, 497–505. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17040141>
- Трояновская, Е.С., Абросимова, О.В., Тихомирова, Е.И., 2011. Оценка состояния почв городских территорий методом комплексного биотестирования. *Теоретическая и прикладная экология* 2, 32–36.
- Хазиев, Ф.Х., 2005. Методы почвенной энзимологии. Наука, Москва, Россия, 252 с.
- Хазиев, Ф.Х., 2018. Экологические связи ферментативной активности почв. *ЭКОБИОТЕХ* 1 (2), 80–92. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Чеснокова, С.М., Савельев, О.В., Губская, С.В., 2016. Оценка фитотоксичности и ферментативной активности почв городских ландшафтов, загрязненных тяжелыми металлами (на примере города Судогда). *Успехи современного естествознания* 2, 187–192.
- Girotti, S., Ferri, E.N., Fumo, M.G., Maiolini, E., 2008. Monitoring of environmental pollutants by bioluminescent bacteria. *Analytica Chimica Acta* 608 (1), 2–29. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.12.008>

## References

- Bardina, T.B., Chugunova, M.V., Kulibaba, V.V., Bardina, V.I., 2020. Ispol'zovanie metodov biotestirovaniya dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya pochvogrunтов rekul'tivirovannogo kar'era [The use of biological testing approaches to assessing the ecological conditions of soils in a reclaimed surface mine]. *Biosfera [Biosphere]* 12 (1–2), 1–11. (In Russian). <https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V12I1.539>
- Chesnokova, S.M., Savelev, O.V., Gubskaya, S.V., 2016. Ocenka fitotoksichnosti i fermentativnoi aktivnosti pochv gorodskikh landshaftov, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (na primere goroda Sudogda) [Phytotoxicity assessment and enzymatic activity of soils urban landscape polluted by heavy metals (on the example of Sudogda)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Achievements of Modern Natural Science]* 2, 187–192. (In Russian).
- Doner'yan, L.G., Vodyanova, M.A., 2018. Obosnovanie mesta al'ternativnykh biologicheskikh metodov v gigienicheskikh issledovaniyakh [Substantiation of the place of alternative biological methods in hygienic research]. *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]* 97 (11), 1093–1097. (In Russian).
- Eremchenko, O.Z., Moskvina, N.V., Shestakov, I.E., Shvetsov, A.A., 2014. Ispol'zovanie test-kul'tur dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya gorodskikh pochv [Use of test-cultures to assess ecological condition of urban soils]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences]* 19 (5), 1280–1284. (In Russian).

- Girotti, S., Ferri, E.N., Fumo, M.G., Maiolini, E., 2008. Monitoring of environmental pollutants by bioluminescent bacteria. *Analytica Chimica Acta* **608** (1), 2–29. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.12.008>
- Kalinkina, V.E., Salnikova, N.A., Salnikov, A.L., 2016. Integral'nyi pokazatel' ekologo-biologicheskogo sostoyaniya narushennykh zemel' kak ob'ektov rekul'tivatsii [Integrated indicator of the ecological and biological condition of the broken lands as objects of recultivation]. *Estestvennye nauki [Natural Sciences]* **1** (54), 7–12. (In Russian).
- Kapel'kina, L.P., Bardina, T.V., Bakina, L.G., Chugunova, M.V., Gerasimov, A.O., Mayachkina, N. V., Galdiyants, A.A., 2009. Metodika vypolneniya izmerenii vskhozhesti semyan i dliny kornei prorstkov vysshikh rastenii dlya opredeleniya toksichnosti tekhnogenno-zagryaznennykh pochv (M-P-2006 FR.1.39.2006.02264) [Method of measurement of seed germination ability and length of the roots of seedlings of higher plants to determine the toxicity of anthropogenically polluted soils (M-P-2006 FR.1.39.2006.02264)]. For a-print, St. Petersburg, Russia, 19 p. (In Russian).
- Kazeev, K.Sh., Kolesnikov, S.I., Valkov, V.F., 2003. Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniya [Biological diagnostic and indication of soils: the methodology and methods of researches]. Publishing House of the Rostov State University, Rostov-on-Don, Russia, 216 p. (In Russian).
- Khaziev, F.Kh., 2005. Metody pochvennoi enzimologii [Methods of soil enzymology]. Nauka, Moscow, Russia, 252 p. (In Russian).
- Khaziev, F.Kh., 2018. Ekologicheskie svyazi fermentativnoi aktivnosti pochv [Ecological relations of the enzymatic activity of soil]. *ECOBIOTECH [ECOBIOTECH Journal]* **1** (2), 80–92. (In Russian). <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-2-80-92>
- Korikova, N.O., Gusakova, N.V., Petrov, V.V., 2016. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya pochvy gorodskikh territorii na osnovanii pokazatelei biologicheskoi aktivnosti (na primere g. Taganroga) [Assessment of environmental status of soils of urban areas on the basis of indicators of biological activity (for example, Taganrog)]. *Izvestiya vuzov. Severokavkazskii region. Estestvennye nauki [Proceedings of Universities. North Caucasus region. Natural sciences]* **4**, 87–91. (In Russian).
- Nikolaeva, O.V., Chistova, O.A., Panina, N.N., Rozanova, M.S., 2019. Ekotoksikologicheskaya otsenka pochv pridorozhnykh territorii Leningradskogo shosse metodom laboratornogo fitotestirovaniya [Environmental toxicity assessment of roadside topsoils across Leningradskoe highway using laboratory phytotest]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie [Moscow University Soil Science Bulletin]* **1**, 28–34. (In Russian).
- Olkova, A.S., Makhanova, E.V., 2020. Sravnitel'nyi analiz ekologicheskogo sostoyaniya pochv vblizi poligonov khraneniya otkhodov raznogo vremeni funktsionirovaniya [Comparative analysis of the ecological state of soils near waste landfills of different periods of operation]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **4**, 35–42. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-035-042>
- Parkhomenko, A.N., 2018. Ekologo-biologicheskoe sostoyanie pochv Astrakhanskoi oblasti v usloviyakh antropogennogo vozdeistviya [Ecological and biological properties of soils of the astrakhan region in the conditions of anthropogenic impact]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]* **8** (1), 129–134. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-129-134>
- Salnikov, A.L., Salnikova, N.A., Sintsov, A.V., Valov, M.V., 2018. Osobennosti sistemnogo podkhoda v ekologicheskom monitoringe urbanizirovannykh pochv [Features of systematic approach to environmental monitoring of urban soils]. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya [Geology, Geography and Global Energy]* **1** (68), 109–119. (In Russian).

- Skugoreva, S.G, Kut'yavina, T.I., Ogorodnikova, S.Yu., Kondakova, L.V., Simakova, V.S. et al., 2019. Kompleksnyi podkhod v otsenke ekologicheskogo sostoyaniya gorodskikh pochv [Integrated approach to environmental assessment of urban soil]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* 3, 57–65. (In Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-057-065>
- Smirnov, I.P., 2019. Srednie goroda Tsentral'noi Rossii [Middle cities of Central Russia]. Tver State University, Tver, Russia, 165 p. (In Russian).
- Trifonova, T.A., Martsev, A.A., Selivanov, O.G., Kurbatov, Yu.N., 2023. Ekologo-gigienicheskaya otsenka pochv promyshlennogo goroda so stekol'nym proizvodstvom po sodержaniyu tyazhelykh metallov i mysh'yaka [Ecological and hygienic assessment of soils on the content of heavy metals and arsenic in an industrial city with glass production]. *Gigiena i sanitariya [Hygiene & Sanitation]* 102 (6), 549–555. (In Russian). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-6-549-555>
- Trifonova, T.A., Zabelina, O.N., 2017. Changes in the biological activity of heavy metal- and oil-polluted soils in urban recreation territories. *Eurasian soil science* 50 (4), 483–490. <https://doi.org/10.1134/S1064229317040147>
- Troyanovskaya, E.S., Abrosimova, O.V., Tikhomirova, E.I., 2011. Otsenka sostoyaniya pochv gorodskikh territorii metodom kompleksnogo biotestirovaniya [Testing of soils in urban areas with the help of bioassay method]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* 2, 32–36. (In Russian).
- Zykova, Yu.N., Skugoreva, S.G., Tovstik, E.V., Ashikhmina, T.Ya., 2017. Podkhody k otsenke sostoyaniya gorodskikh pochv metodami biotestirovaniya s ispol'zovaniem organizmov razlichnoi sistematicheskoi prinadlezhnosti i dannykh khimicheskogo analiza [Estimation of the state of urban soils by methods of biotesting using organisms of different systematic accessory and chemical analysis data]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* 3, 38–46. (In Russian).