



# Почвоведение и агрохимия

## Soil science and agrochemistry

DOI: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-589-605

EDN CCFFJY

УДК 631.452

*Научная статья / Research article*

### Оценка плодородия почв арктических городов с применением почвенно-экологического индекса

А.И. Лосев  , В.И. Васенев , Е.Д. Бережной , Ю.Л. Сотникова 

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

 [losev-ai@rudn.ru](mailto:losev-ai@rudn.ru)

**Аннотация.** Плодородие городских почв Арктики лимитируется суровыми климатическими условиями и высокой антропогенной нагрузкой. Кроме типичного для любых урбанизированных территорий воздействия селитебного использования, рекреации и транспорта экосистемы арктических городов России испытывают техногенное воздействие очагов тяжелой промышленности, зачастую являющихся градообразующими. В таких условиях формируется почвенный покров крупнейших городов России — оценка их плодородия и лимитирующих его влияний необходимы для создания и содержания городской зеленой инфраструктуры — одного из ключевых факторов экологической комфортности жизни в городе. Приведена оценка кислотности, содержания органического вещества и общего азота, обеспеченности подвижными формами фосфора и калия верхнего слоя почв этих городов, а также дана интегральная оценка их плодородия на основе почвенно-экологического индекса (ПЭИ) И.И. Карманова, адаптированного в рамках исследования для применения к северным почвам и территориям. Показано, что по совокупности показателей почвы объектов формируют ряд Мурманск > Воркута > Норильск от наиболее плодородных к менее плодородным. Отмечено влияние антропогенного фактора на свойства почв, которые имеют как положительный (уменьшение средней кислотности почв на всех объектах), так и отрицательный (токсичные концентрации подвижного фосфора в почвах Мурманска) характер. По величине полученных ПЭИ сделан вывод об относительно высокой совокупной плодородности почв объектов исследования, сопоставимой с плодородностью почв средней и южной тайги.

**Ключевые слова:** показатели плодородия почв, арктические урбозкосистемы, бонитировка почв

**Вклад авторов:** Лосев А.И. — статистическая обработка, анализ и интерпретация результатов, построение графики, подготовка текста, работа с источниками; Васенев В.И. — постановка целей и задач, выбор точек отбора образцов и методов анализа, подготовка и редакция текста; Бережной Е.Д. — отбор, пробоподготовка и анализ почвенных образцов; Сотникова Ю.Л. — организация работы по пробоподготовке и анализу образцов, подготовка и редакция текста. Все авторы ознакомились с окончательной версией рукописи и одобрили ее.

© Лосев А.И., Васенев В.И., Бережной Е.Д., Сотникова Ю.Л., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования в рамках темы НИР по госзаданию FSSF-2024-0023.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**История статьи:** поступила в редакцию 2 сентября 2025 г., принята к публикации 3 октября 2025 г.

**Для цитирования:** Лосев А.И., Васенев В.И., Бережной Е.Д., Сотникова Ю.Л. Оценка плодородия почв арктических городов с применением почвенно-экологического индекса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2025. Т. 20. № 4. 589–605. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-589-605 EDN: CCFFJY

## Assessment of soil fertility in Arctic cities using the soil-ecological index

Artem I. Losev  , Vyacheslav I. Vasenev ,  
Egor D. Berezhnoy , Yulia L. Sotnikova 

RUDN University, Moscow, Russian Federation  
 losev-ai@rudn.ru

**Abstract.** The fertility of urban soils in the Arctic is limited by harsh climatic conditions and high anthropogenic pressure. In addition to the typical impacts of residential use, recreation, and transportation common in any urbanized areas, the ecosystems of Russian Arctic cities are subject to the technogenic influence of heavy industry hubs, which often serve as the foundation for these cities. Under such conditions, the soil cover of the largest cities in the Russian Arctic — Murmansk, Vorkuta, and Norilsk — has formed. An analysis of the physical and chemical properties of urban soils, an assessment of their fertility, and the limiting factors are necessary for the creation and maintenance of urban green infrastructure, which is one of the key factors in the ecological comfort of city life. This study evaluates the acidity, organic matter and total nitrogen content, availability of mobile forms of phosphorus and potassium in the topsoil of these cities and provides an integrated assessment of their fertility based on the soil-ecological index (SEI) by I.I. Karmanov, adapted within the study for application to northern soils and territories. It is shown that, based on the combination of indicators, the soils of the studied sites form the sequence Murmansk > Vorkuta > Norilsk, from the most fertile to the least fertile. The influence of anthropogenic factors on soil properties is noted, which can be both positive (a decrease in average soil acidity across all sites) and negative (toxic concentrations of mobile phosphorus in the soils of Murmansk). Based on the obtained SEI values, it is concluded that the soils of the studied sites have relatively high overall fertility, comparable to that of soils in the middle and southern taiga.

**Keywords:** soil fertility indicators, Arctic urban ecosystems, soil bonification

**Author contributions:** A.I. Losev — statistical processing, analysis, and interpretation of results, graphics generation, text preparation, and source review; V.I. Vasenev — setting goals and objectives, selecting sampling sites and analytical methods, and preparing and editing the text; E.D. Berezhnoy — collecting, preparing, and analyzing soil samples; Yu.L. Sotnikova — organizing the sample preparation and analysis, and preparing and editing the text. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

**Funding.** This work was supported by the Ministry of Science and Education under state contract FSSF-2024–0023.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Article history:** received 2 September 2025; accepted 3 October 2025.

**For citation:** Losev AI, Vasenev VI, Berezhnoy ED, Sotnikova Yu L. Assessing soil fertility in Arctic cities using a soil-ecological index. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2025;20(4):589–605. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-4-589-605 EDN: CCFFJY

## Введение

Почвы городских экосистем играют ключевую роль в поддержании устойчивости урбанизированных территорий, обеспечивая такие экосистемные услуги, как депонирование углерода, регулирование гидрологического режима и поддержание биоразнообразия [1].

Плодородие почв — способность обеспечивать жизнедеятельность растений — в первую очередь критично для поддержания устойчивого озеленения и проектирования зеленой инфраструктуры, которая в условиях севера, помимо эстетических и рекреационных, выполняет ряд специфических утилитарных функций, связанных с природными и техногенными условиями. Например, противодействие эрозии, таянию многолетней мерзлоты, ветру, снегу и пыли, что в рамках северных регионов, подчеркивает важность и сложность поддержания зеленой инфраструктуры и, как следствие, плодородия почв, которые должны обеспечивать ее жизнедеятельность [2].

Антропогенная трансформация почвенного покрова в городах приводит к формированию специфических антропогенно-преобразованных и искусственных почв, свойства которых существенно отличаются от природных аналогов [3]. В условиях интенсивного техногенного воздействия городские почвы часто характеризуются ухудшением качества органического вещества, повышенным содержанием тяжелых металлов и измененными физико-химическими свойствами, включая уплотнение и запечатывание почвенного покрова, что ограничивает их функциональный потенциал [4–6].

В арктических городах эти процессы усугубляются экстремальными климатическими условиями, которые накладывают дополнительные ограничения на почвообразование и функционирование экосистем [7–9]. Низкие температуры, короткий вегетационный период и периодическое промерзание-оттаивание почв замедляют микробиологическую активность и процессы гумификации, снижая естественное плодородие [10]. Кроме того, промышленные выбросы от горнодобывающих, сталелитейных и прочих отраслей тяжелой промышленности, широко распространенных за полярным кругом, приводят к накоплению токсичных элементов, что дополнительно угнетает почвенную биоту и дестабилизирует экосистемы [11–13].

Таким образом, плодородие почв — их ключевое свойство — в городах Арктики лимитируется одновременно всеми перечисленными факторами, природными и антропогенными, включая как нагрузку, присущую всем урбанизированным территориям, так и специфическую для промышленных городов техногенную.

В условиях урбанизированных территорий оценка состояния почв требует особого внимания, что отражено в практике экологического нормирования, например, в Постановлении Правительства Москвы № 514-ПП. Однако для арктических городов отсутствие разработанных систем нормирования и контроля качества почв остается одной из проблем.

Для комплексной оценки состояния и плодородия почв перспективным подходом, таким образом, является использование интегральных индексов, объединяющих физические, химические и зачастую биологические показатели [14–16].

Интегральные индексы позволят не только диагностировать текущее состояние почв, но и оценить их потенциал в сравнении с фоновыми почвами, почвами других городов, в т. ч. расположенных в иных климатических зонах, с целью прогнозирования возможности применения этих индексов при проектировании зеленой инфраструктуры и устойчивости к дальнейшему антропогенному воздействию.

Один из наиболее распространенных в России индексов — почвенно-экологический индекс И.И. Карманова (ПЭИ) — разработан и применяется преимущественно для почв сельскохозяйственного использования, к тому же расположенных в более южных регионах [17, 18].

Таким образом, **цель исследования** — это комплексная оценка плодородия почвенного покрова крупных городских экосистем Арктики (на примере Мурманска, Норильска и Воркуты) в условиях антропогенного воздействия с применением и адаптацией методики почвенно-экологических индексов (ПЭИ) И.И. Карманова для определения потенциала и ограничений их использования в озеленении и благоустройстве.

## Материалы и методы исследования

**Объекты исследования.** Изучен почвенный покров трех крупнейших в России (и в мире, не считая Норвежского Тромсё, находящегося на третьем месте) городов с населением больше 50 тыс. жителей, расположенных за Северным полярным кругом, — Мурманска, Норильска и Воркуты [19].

Сведения об объектах исследования и их географическое расположение приведены в табл. 1 и на рис. 1 соответственно.

Таблица 1

Почвенно-географическая характеристика объектов исследования

Город	$\sum t > 10^\circ\text{C}$ (САТ)	Дней $ct >$		Почвенно-географическое районирование	Количество точек	
		$10^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$			
Мурманск (68.970606 с. ш., 33.074749 в. д.)	~800	30...60	~90	Фация холодных, промерзающих почв (Кольско-Карельская провинция)	76	
Воркута (67.493512 с. ш., 64.050145 в. д.)	~650	30...60	<65	Фация очень холодных, длительно промерзающих почв (Канинско-Печорская провинция)	37	
Норильская агломерация [7]	~688 [22]	30...60	~65	Граница между фацией очень холодных, длительно промерзающих почв и горной Анабаро-Путоранской провинцией	37	
					17	
					11	
					13	

Источник: выполнил А.И. Лосев с использованием данных из [7, 20, 22].



**Рис. 1.** Объекты исследования и точки отбора образцов  
 Источник: выполнил А.И. Лосев, QGIS Desktop 3.40.4.

*Отбор образцов* производился по генетическим горизонтам (и слоям, в случае большой мощности горизонтов) путем заложения почвенных разрезов/полюям/прикопок, либо бурением ручным буром Эдельмана.

*Определение плотности почв.* Плотность сложения определяли методом режущего кольца, путем отбора известного объема почвы в естественном сложении буриком Качинского / режущим кольцом и последующем гравиметрическим измерением влажности и массы образца.

*Определение общего углерода почв.* Содержание общего углерода определяли на анализаторе Elementar Vario TOC Select методом сухого каталитического сжигания при температуре 950 °С с детектированием выделившегося CO<sub>2</sub> недеспергирующим инфракрасным сенсором (NDIR).

*Определение органического вещества почв.* Органическое вещество (ОВ) почв определяли методом бихроматного окисления при нагреве до 100 °С с фотометрическим окончанием по ГОСТ 26213–2021<sup>1</sup>.

*Определение общего азота почв.* Содержание общего азота определяли методом Кьельдаля, основанном на минерализации навески почвы серной кислотой при нагревании до 400 °С в присутствии катализаторов, отгонке щелочного раствора, окисленного до аммонийной формы азота почвы, в борную кислоту и титровании

<sup>1</sup> ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Введ. 2022-07-01. М. : Стандартинформ, 2021. 16 с.

образовавшегося аммоний-боратного комплекса серной кислотой, в соответствии с ГОСТ Р 58596–2019<sup>2</sup>.

*Определение кислотности почв.* pH водных (соотношение почва/раствор 1:10) и солевых вытяжек (соотношение почва/раствор 1:2,5) почв определяли прямым потенциометрическим методом с помощью pH-метра ЭКОТЕСТ-2000.

*Определение подвижных форм фосфора и калия.* Подвижные формы фосфора и калия определяли преимущественно методом Кирсанова (извлечение элементов раствором соляной кислоты концентрацией 0,2 моль/л) по ГОСТ Р 54650–2011<sup>3</sup>. Для образцов, содержащих карбонаты, применяли метод Мачигина (извлечение элементов раствором углекислого аммония концентрацией 10 г/л) по ГОСТ 26205–91<sup>4</sup>. Фосфор в обоих вытяжках определяли фотометрически на Nach Lange DR3900, калий методом ICP-OES на Perkin Elmer AVIO 200.

*Оценка/бонитировка почв с использованием почвенных индексов.* Для проведения интегральной оценки плодородия исследуемых почв использовали почвенно-экологический индекс (ПЭИ) И.И. Карманова [18, 17]. Данный индекс представляет собой произведение параметров, отражающих почвенные (физико-химические и агрохимические) и климатические особенности изучаемой территории:

- физико-химический параметр включает данные о содержании гумуса, плотности почвы, гранулометрическом составе и уровне гидроморфизма;
- агрохимический параметр учитывает pH почвы, концентрацию подвижного фосфора и калия;
- климатический параметр основан на среднегодовой сумме температур выше 10 °С, коэффициентах увлажнения и континентальности.

Индекс рассчитывается по формуле

$$\text{ПЭИ} = 12,5(2 - V) \cdot \Pi \cdot \text{ДС} \cdot \text{А} \frac{\sum t > 10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (\text{КУ} - 0,05)}{\text{КК} + 1000},$$

где ПЭИ — почвенно-экологический индекс, балл; 12,5 — постоянный множитель для всех почв; 2 — максимально возможная плотность при их предельном уплотнении, г/см<sup>3</sup>; V — плотность для метрового слоя почвы, г/см<sup>3</sup>; Π — коэффициент на полезный объем почвы (учитывает тип почвы и гранулометрический состав); ДС — дополнительно учитываемые свойства почв (учитывает гумусовое состояние);  $\sum t > 10 \text{ }^\circ\text{C}$  — среднегодовая сумма температур выше 10 °С; КУ — коэффициент увлажнения; КК — коэффициент континентальности климата; А — итоговый агрохимический индекс (учитывает кислотность, содержание фосфора и калия).

Коэффициенты для учета перечисленных факторов приведены авторами индекса [17] для оценки пахотных земель более южных регионов, где земледелие

<sup>2</sup> ГОСТ Р 58596–2019. Почвы. Методы определения общего азота. Введ. 2020–07–01. М. : Стандартинформ, 2019. 20 с.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 54650–2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 2013–01–01. М. : Стандартинформ, 2011. 12 с.

<sup>4</sup> ГОСТ 26205–91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО. Введ. 1993–01–07. М. : Стандартинформ, 2015. 12 с.

и бонитировка почв более распространены и ограничиваются северной частью таежно-лесной почвенно-биоклиматической зоной.

В связи с этим для проведения интегральной оценки плодородия исследуемых почв мы применили этот индекс с рядом модификаций для почв полярного пояса (подробнее в разделе «Результаты исследования и обсуждение»).

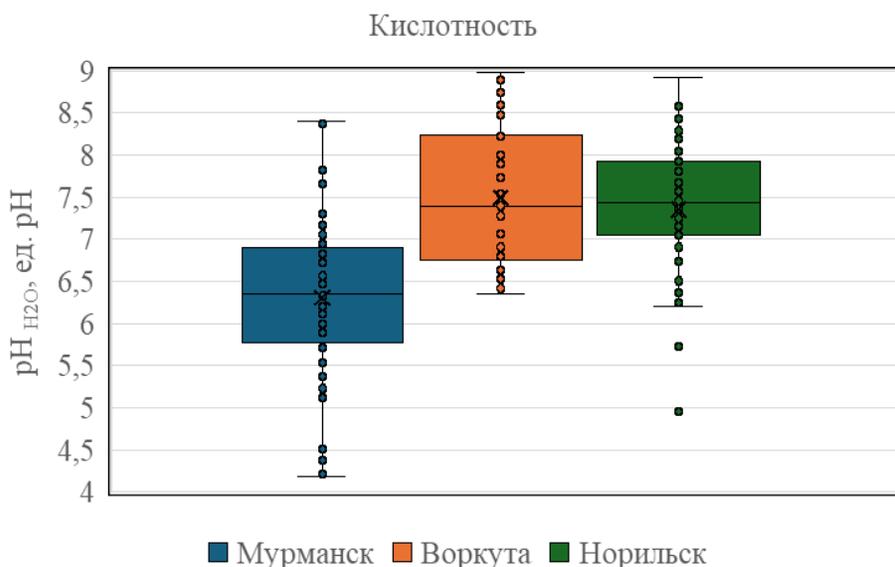
Для оценки статистической достоверности различий результатов между городами использовался многовариантный дисперсионный анализ (ANOVA), критерий Бонферрони для попарных сравнений (ввиду сравнения выборок разной величины) и коэффициент корреляции Пирсона.

Вычисления и построение диаграмм произведены в Microsoft Excel 2024 MSO.

Анализ и визуализация картографического материала выполнены на базе QGIS 3.40.

## Результаты исследования и обсуждение

**Кислотность почв.** В Мурманске рН водной вытяжки верхних горизонтов (рис. 2) в среднем составляет 6,31, варьируя в пределах от 4,18 до 8,40, что достоверно ниже, чем в Воркуте, где рН в среднем равен 7,50 (варьирует от 6,36 до 8,98), и Норильске со средним рН 7,36 (варьирует от 4,96 до 8,93). В свою очередь показатели кислотности почв Воркуты и Норильска значимо не различаются, однако отмечается заметная разница в величине стандартных отклонений (0,128 и 0,086 соответственно), что свидетельствует о более однородном по величине рН почвенном покрове на территории Норильска.



**Рис. 2.** Кислотность водной вытяжки верхних горизонтов почв Мурманска, Воркуты и Норильска

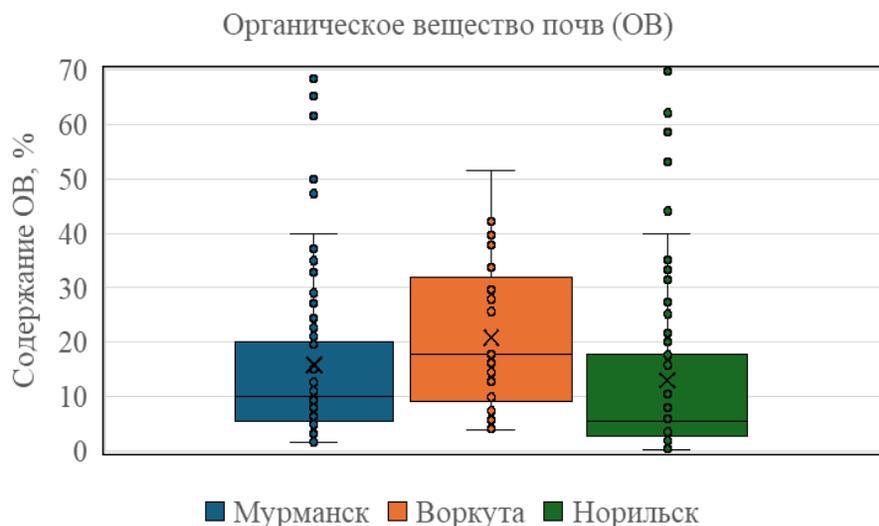
Источник: выполнил А.И. Лосев с помощью Microsoft Excel 2024 MSO.

Таким образом, по величине кислотности почвы Мурманска классифицируются в широком диапазоне от сильно кислых до щелочных, а почвы Воркуты и Норильска — от нейтральных до щелочных. При зональном уровне pH почв в арктической зоне (по данным исследований почв Мурманска [22, 23], Салехарда [24], Воркуты [25] и окрестностей [26]) порядка 3,5...5 (ближе к 7 в горной тундре) уменьшение кислотности почв исследуемых объектов объясняется различными антропогенными воздействиями, начиная с загрязнений техногенного характера и заканчивая полностью искусственным формированием почвенных горизонтов [27, 28].

**Органическое вещество почв.** Ввиду высокой вариабельности содержания ОВ в верхних горизонтах (рис. 3), среди которых встречались как минеральные горизонты, так и органоминеральные с полностью органогенными (торфяными), значимых различий по данному показателю между городами не обнаружено. Однако следует отметить тенденцию к увеличению среднего содержания ОВ в Воркуте (варьирует от 3,9 до 51,5 %, в среднем 20,9 %), в сравнении с Мурманском (варьирует от 1,5 до 68,7 %, в среднем 15,9 %) и Норильском (варьирует от 0,3 до 69,7 %, в среднем 13,1 %).

Данные диапазоны, в целом, покрывают разброс показателя в зональных почвах: 1...3 % в неторфяных горизонтах почв горных тундровых ландшафтов, 5...7 % в органо-аккумулятивных горизонтах дерново-подзолистых почв, до 50 % в оторфованных горизонтах подзолов [24–26, 29].

В урбанизированных городах Арктики содержание ОВ также описано в широких пределах от 2 до 50 % [22, 27].



**Рис. 3.** Содержание органического вещества в верхних горизонтах почв Мурманска, Воркуты и Норильска

Источник: выполнил А.И. Лосев с помощью Microsoft Excel 2024 MSO.

**Содержание элементов питания.** Описательные статистические данные о содержании в почвах объектов общего азота и подвижных форм фосфора и калия представлены в виде  $\frac{\text{mean} \pm \text{SD}}{(\text{min} - \text{max})}$ , для Норильска дополнительно приведены содержания фосфора и калия методом Мачигина, ввиду наличия карбонатов в большом количестве образцов (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание элементов питания в верхних горизонтах почв Мурманска, Воркуты и Норильска**

Объект	N <sub>общ</sub> , %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв., мг/кг	K <sub>2</sub> O подв., мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> подв., мг/кг	K <sub>2</sub> O подв., мг/кг
		По Кирсанову		По Мачигину	
Мурманск	0,4 ± 0,33	1357,6 ± 987,2	233,5 ± 138,2	—*	—
	(0,02–1,74)	(42–4674)	(49–668)		
Воркута	0,54 ± 0,35	280,9 ± 210	199,8 ± 129	—	—
	(0,08–1,43)	(10–815)	(19–640)		
Норильск	0,25 ± 0,32	264,3 ± 256,6	312,2 ± 212,8	50,8 ± 107,9	213,1 ± 95,8
	(0,01–1,7)	(11–845)	(83–825)	(3–795)	(61–572)

Примечание. \* — нет данных.

Источник: выполнил А.И. Лосев.

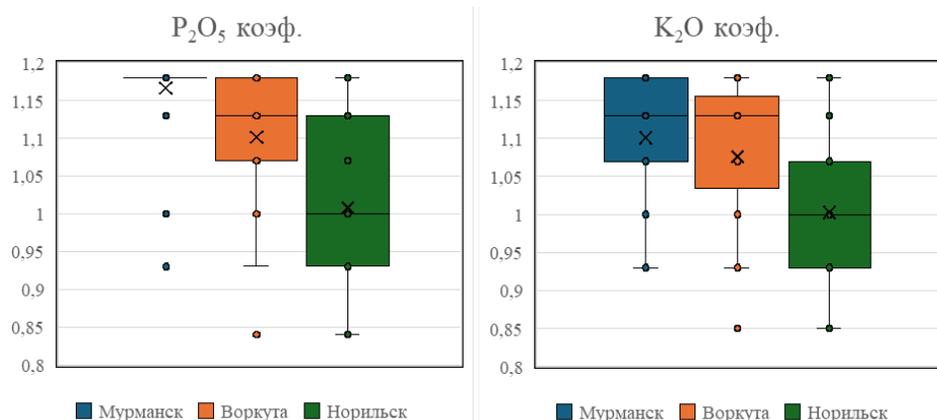
Содержание общего азота хорошо коррелировано с содержанием органического вещества (0,93 в Мурманске, 0,85 в Воркуте и 0,88 в Норильске), однако в отличие от ОВ, отмечается статистически достоверное различие по содержанию азота между Воркутой (0,54 % в среднем) и Норильском (0,25 % в среднем), что также свидетельствует о меньшей обеспеченности почв Норильска органикой, в дополнение к тенденции, выявленной ранее.

Отношение C/N в Норильске также самое высокое (41 в среднем) в сравнении с Воркутой (24 в среднем) и Мурманском (22 в среднем), из чего следует наименьшая обеспеченность ОВ почв Норильска азотом. При этом следует отметить, что обеспеченность азотом во всех исследуемых почвах не превышает среднего класса обеспеченности по Гришиной и Орлову (C/N = 8...11), а в основном характеризуется как очень низкая (C/N > 14).

По содержанию подвижных форм фосфора и калия на всех объектах отмечается сильная вариабельность показателей и, в среднем, высокая и очень высокая степень обеспеченности элементами. В случае с содержанием фосфора по Кирсанову, шкала обеспеченности, заканчивающаяся на 250 мг/кг, на объектах исследования превышает, за частую, в 2–4 раза, а в Мурманске вплоть до 18 раз. Это делает Мурманск наиболее обеспеченным по содержанию подвижного фосфора, среди прочих, объектом. Однако, согласно [35], такие концентрации фосфора уже могут быть токсичными для растений.

При условии, что содержание фосфора и калия для большинства образцов в Норильске определено методом, отличным от остальных городов, для проведения корректного сравнения объектов по степени обеспеченности этими элементами, использовали коэффициенты, применяемые при расчете ПЭИ, и присеваемые для каждого образца в зависимости от содержания элементов питания (очень низкая — 0,85, низкая — 0,93, средняя — 1,00, повышенная — 1,07, высокая — 1,13, очень высокая — 1,18).

При такой оценке по степени обеспеченности элементами питания от большей к меньшей объекты формируют ряд следующим образом: Мурманск>Воркута>Норильск (рис. 4).



**Рис. 4.** Коэффициенты степени обеспеченности верхних горизонтов почв Мурманска, Воркуты и Норильска подвижными формами фосфора и калия

Источник: выполнил А.И. Лосев с помощью Microsoft Excel 2024 MSO.

*Оценка/бонитировка почв с использованием почвенных индексов.* В целях оценки почв арктических городов для ряда показателей коэффициенты проэкстраполировали до зоны тундровых глеевых почв и подбуров Субарктики полярного пояса (табл. 3).

Таблица 3

**Модифицированные для северных территорий коэффициенты, использованные для расчета ПЭИ**

Полезный объем почвы (коэффициент П)					
Глина	Тяжелый суглинок	Средний суглинок	Легкий суглинок	Супесь	Песок
0,63	0,74	0,85	0,85	0,84	0,71
Обеспеченность подвижными формами фосфора (входит в коэффициент А)					
Очень низкое	Низкое	Среднее	Повышенное	Высокое	Очень высокое
0,84	0,93	1,00	1,07	1,13	1,18

Обеспеченность подвижными формами калия (входит в коэффициент А)					
Очень низкое	Низкое	Среднее	Повышенное	Высокое	Очень высокое
0,85	0,93	1,00	1,07	1,13	1,18
Кислотность почв (входит в коэффициент А)					
Сильнокислая	Среднекислая	Слабокислая	Близкая к нейтральной	Нейтральная	
0,91	0,98	1,03	1,10	1,18	

Источник: выполнил А.И. Лосев.

В рамках оценки исследуемых городов структуру ПЭИ можно представить четырехчастной:

1) неизменная для всех городов, в которую входят постоянный множитель, разница между максимальной возможной и фактической плотностью, коэффициент на полезный объем почвы. Ввиду особенностей индекса и предельных значений для некоторых коэффициентов, их произведение у всех трех городов было равно 4,57, что делает первую часть ПЭИ константой;

2) гумусовый коэффициент, определяемый по отношению фактического содержания ОВ к средней величине в исследуемой зоне;

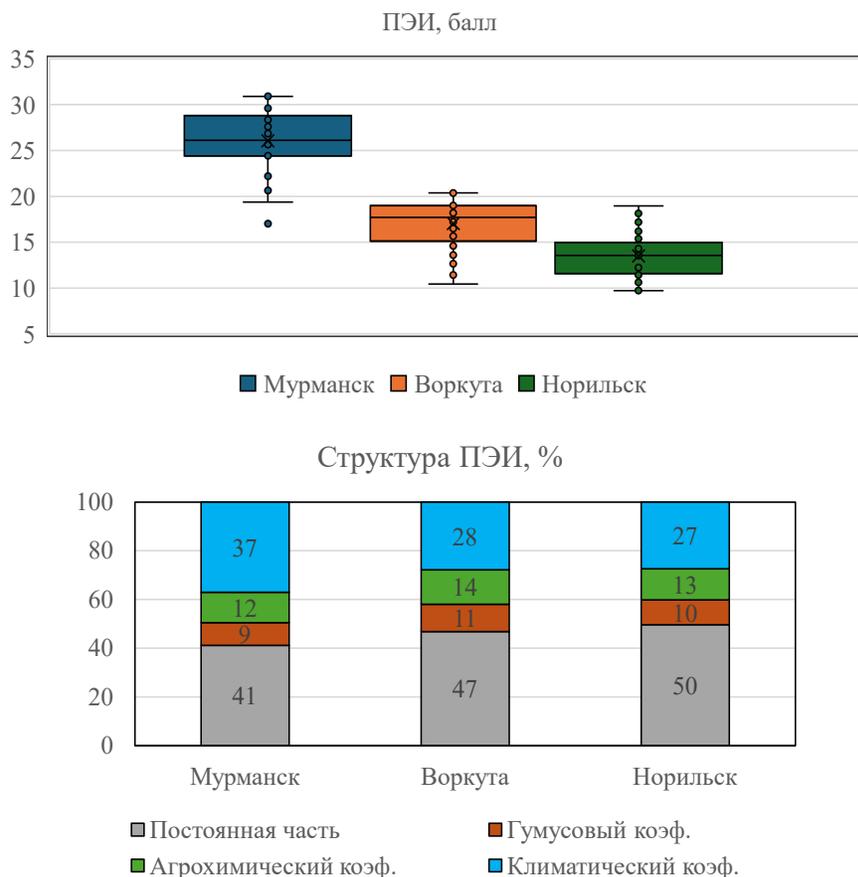
3) агрохимический коэффициент, представленный произведением приведенных в табл. 3 модифицированных коэффициентов агрохимических свойств;

4) климатический коэффициент, высчитываемый по климатическим данным, приведенным в разделе «Материалы и методы исследования».

Исследуемые города значительно отличаются друг от друга по совокупности ПЭИ, рассчитанных для каждой точки отбора, что хорошо видно на графике (рис. 5). Почвы Мурманска имеют самые высокие баллы (26 в среднем, варьируют от 17 до 31), затем следуют почвы Воркуты (17 в среднем, варьируют от 10 до 20), и наименьшая оценка у почв Норильска (13 в среднем, варьируют от 10 до 19).

Однако, при оценке вклада каждого коэффициента в итоговый ПЭИ (рис. 5, диаграмма с накоплением) отмечено, что среди переменных коэффициентов вклад климатического был существенно бóльшим (в 1,5–2 раза), чем остальные, в каждом городе.

Несмотря на то, что климатический фактор является критически важным в контексте вегетации растений и их продуктивности (для оценки чего в первую очередь и разрабатывался ПЭИ), дисбаланс, который он вносит в структуру ПЭИ, в рамках этого исследования отводит почвенные факторы на второй план. Для сравнения почвенного покрова исследуемых городов в отрыве от климатических различий рассчитали ПЭИ, климатический коэффициент в котором для всех городов усреднен. Ключевыми климатическими особенностями для всех трех городов, несмотря на различия в абсолютных значениях в рамках ПЭИ, остаются промывной (гумидный) тип водного режима, короткий и холодный вегетационный период, в связи с чем такое усреднение в рамках оценки почв можно считать релевантным.



**Рис. 5.** ПЭИ Мурманска, Воркуты и Норильска и их структура  
 Источник: выполнил А.И. Лосев с помощью Microsoft Excel 2024 MSO.

Сравнение городов по ПЭИ с уравненным климатическим коэффициентом (табл. 4) показало менее выраженную дифференциацию городов по потенциальному уровню плодородия, чем по полному ПЭИ. Почвы Мурманска ( $19,7 \pm 2,1$  баллов в среднем) значительно не отличаются от почв Воркуты ( $19,6 \pm 3,0$  баллов в среднем), однако почвы Норильска по-прежнему имеют достоверно наименьшие показатели ( $16,7 \pm 2,9$  баллов в среднем).

Таблица 4

**Статистическая характеристика коэффициентов  
 для расчета ПЭИ Мурманска, Воркуты и Норильска**

Показатель	Мурманск	Воркута	Норильск
Постоянный множитель	4,57		
Гумусовый коэффициент*	$1,04 \pm 0,17$ (0,70–1,15)	$1,1 \pm 0,11$ (0,78–1,15)	$0,94 \pm 0,20$ (0,70–1,15)

Окончание табл. 4

Показатель	Мурманск	Воркута	Норильск
Агрохим коэффициент*	$\frac{1,4 \pm 0,10}{(0,91-1,64)}$	$\frac{1,4 \pm 0,20}{(0,84-1,64)}$	$\frac{1,2 \pm 0,20}{(0,84-1,64)}$
Климатический коэффициент	4,12	2,71	2,52
ПЭИ*	$\frac{26,1 \pm 2,8}{(17-30,9)}$	$\frac{17 \pm 2,6}{(10,4-20,4)}$	$\frac{13,5 \pm 2,3}{(9,7-19,0)}$
Усредненный климатический коэффициент	3,12		
ПЭИ с урвненным климатическим коэффициент*	$\frac{19,7 \pm 2,1}{(12,9-23,4)}$	$\frac{19,6 \pm 3,0}{(12,0-23,4)}$	$\frac{16,7 \pm 2,9}{(12,0-23,4)}$

Примечание. \* Данные приведены в виде  $\frac{\text{mean} \pm \text{SD}}{(\text{min} - \text{max})}$ .

Источник: выполнил А.И. Лосев.

Таким образом, экстремальные уровни загрязнения тяжелыми металлами, сформировавшиеся в Норильске и его окрестностях под воздействием металлургической промышленности, находят свое отражение в биогеохимических циклах. Через нарушение деятельности почвенной биоты, ухудшение структуры почвы, качества и циклов минерализации органического вещества, снижение содержания и доступности макроэлементов, загрязнение почв приводит к уменьшению их плодородия и естественных экологических функций. ПЭИ остальных исследованных городов можно рассматривать как потенциал и основание ремедиации почв Норильска, улучшения их свойств и обеспечения таким образом их более эффективного вовлечения в решение задач по озеленению города и улучшению экологической обстановки в целом.

При разработке индекса за ПЭИ, равный 100, был принят ПЭИ чернозема Краснодарского края, не подверженного эрозии, оглеению и прочим негативным факторам почвообразования. Фактические индексы, получаемые при исследованиях почвенного покрова черноземной зоны, варьируют в пределах 60...80 в случае типичных и обыкновенных черноземов [31, 32], могут снижаться вплоть до 30...40 для выщелоченных и оподзоленных черноземов [33], но в целом варьируют около 50 [34]. Для серых лесных почв характерен индекс 20...40 в пределах градации от светло к темным серым лесным [35]. Для дерново-подзолистых описан широкий диапазон от 15...20 баллов в восточной части РФ [32, 34, 35] до 30...80 в европейской части страны [36–38] (аналогичный диапазон ПЭИ характерен для урбаноземов Московской области, но может превышать и 100 баллов [36, 39]).

Опираясь на эти значения, с помощью полученных индексов (варьирующих в среднем пределах от 10 до 31), можно не только оценить различие почвенного покрова объектов, но и констатировать, что в совокупности почвы арктических городов сопоставимы по бонитету с зональными почвами южной и средней тайги — дерново-подзолистыми, пусть и наименее плодородными их представителями в рамках почвенного типа, но все же более плодородными, чем зональные почвы Арктики.

## Заключение

Мурманск, Норильск и Воркута — крупные городские экосистемы, расположенные за полярным кругом. Характеристика почвенного покрова подобных территорий не столь широко освещена в литературе и представляет научный интерес в рамках исследований арктических территорий в условиях изменения климата и урбанизации.

В результате антропогенного воздействия на территории всех городов отмечается повышение уровня рН водной вытяжки относительно значений зональных почв на 1–2 ед. рН в среднем.

Объекты сопоставимы по содержанию органического углерода, однако по совокупности агрохимических характеристик (содержание подвижных форм фосфора и калия, обеспеченность органического вещества азотом) почвы Норильска характеризуется как наименее плодородные.

При в целом хорошей обеспеченности всех объектов подвижными элементами питания в верхних горизонтах почв Мурманска содержание подвижного фосфора часто превышает порог токсичности ( $> 800$  мг/кг).

Для интегральной оценки плодородия городских почв арктического пояса путем экстраполяции коэффициентов учета различных свойств почв применена методика почвенно-экологических индексов И.И. Карманова.

В результате бонитировки выявлено, что в рамках применения рассмотренной системы индексов максимальный вклад в итоговый балл на территории имеет климатический фактор, который способствует четкой градации городов по уровню плодородия в ряду: Мурманск  $>$  Воркута  $>$  Норильск. Оценка объектов без учета климатического фактора статистически уравнивает почвы Мурманска и Воркуты, однако почвы Норильска по-прежнему оцениваются как наименее плодородные, что связывается с нарушением естественных биогеохимических циклов и процессов по причине экстремальных уровней загрязнения почв Норильска поллютантами техногенной природы.

В совокупности ПЭИ арктических городов варьирует от 10 до 31 балла, что можно приблизительно сопоставить со значениями ПЭИ целинных дерново-подзолистых почв таежной зоны, а это свидетельствует о достаточном потенциале почвенного покрова исследуемых городов для озеленения при реализации проектов по их озеленению и благоустройству.

Однако, выявлены и ключевые ограничения применения ПЭИ при оценке городских почв и почв городов Арктики, в частности: климатическая зависимость — в условиях Арктики температурный фактор резко снижает общий балл, что может маскировать реальные возможности почв при локальном улучшении микроклимата (например, в урбанизированных зонах); неучет специфики загрязнения — методика не всегда отражает последствия химического загрязнения (например, токсичность избытка фосфора в Мурманске или тяжелых металлов в Норильске), что требует дополнительных корректировок при нормировании; учет свойств только поверхностного горизонта почв — при оценке почв городов,

зачастую сложенных искусственно и характеризующихся высокой вертикальной анизотропностью, оптимален был учет строения и характеристик как минимум корнеобитаемого слоя почвы.

Тем не менее, применение ПЭИ в качестве основы для разработки региональных нормативов плодородия городских почв представляется перспективным, особенно при адаптации коэффициентов под арктические условия.

## Список литературы

1. Vasenev V.I., Ivashchenko K.V., Smagin A.V., Prokofeva T.V., Gosse D.D., Ananyeva N.D., Gavrilenko E.G., Paltseva A., Stoorvogel J.J., Valentini R. Urban Soil's functions: monitoring, assessment, and management // Adaptive soil management: from theory to practices / ed. By A. Rakshit, P. Abhilash, H. Singh, S. Ghosh. Springer Singapore, 2017. P. 359–409. doi: 10.1007/978-981-10-3638-5\_18 EDN: WTLBDG
2. Moskovchenko D., Fedorov R., Fakhretdinov A. Green infrastructure dynamics in the urban areas of subarctic Western Siberia // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. P. 155. doi: 10.1007/s11252-025-01759-7 EDN: UYYFZG
3. Korneykova M., Vasenev V., Kozlova E., Soshina A., Nikitin D., Dolgikh A., Saltan N. Microbial communities of urban and industrial polluted soils in the Russian Arctic // Geoderma Regional. 2024. Vol. 39. P. e00890. doi: 10.1016/j.geodrs.2024.e00890 EDN: BJCPAY
4. Saltan N., Vasenev V., Korneykova M., Slukovskaya M., Zavodskikh M., Sarzhanov D. The effect of urbanisation on wintertime soil respiration in the Russian Arctic // Journal of Soils and Sediments. 2024. Vol. 25. P. 343–450. doi: 10.1007/s11368-024-03885-9 EDN: OXJBMI
5. Dvornikov Y.A., Vasenev V., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Gosse D.D. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // Geoderma. 2021. Vol. 399. P. 115039. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115039 EDN: HZVXKN
6. Корнейкова М.В., Салтан Н.В., Козлова Е.В., Васильева М.Н., Давыдова П.Д., Бережной Е.Д. Микробные сообщества городских почв Норильской агломерации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. 2024. Т. 19. № 3. С. 431–446. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-431-446 EDN: BVDKCD
7. Unc A., Altdorff D., Abakumov E., Adl S., Baldursson S., Bechtold M., Cattani D.J., Firbank L.G., Grand S., Guðjónsdóttir M., Kallenbach C., Kedir A.J., Li P., McKenzie D.B., Misra D., Nagano H., Neher D.A., Niemi J., Oelbermann M., Overgård Lehmann J., Parsons D., Quideau S., Sharkhuu A., Smreczak B., Sorvali J., Vallotton J.D., Whalen J.K., Young E.H., Zhang M., Borchard N. Expansion of agriculture in Northern cold-climate regions: a cross-sectoral perspective on opportunities and challenges // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2021. Vol. 5. P. 663448. doi: 10.3389/FSUFS.2021.663448 EDN: ZGJJDW
8. Ji X., Abakumov E., Polyako V., Xie X., Dongyang W. The ecological impact of mineral exploitation in the Russian Arctic: a field-scale study of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in permafrost-affected soils and lichens of the Yamal-Nenets autonomous region // Environmental Pollution. 2019. Vol. 255. P. 113239. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113239 EDN: ZRHIAD
9. Abakumov E., Polyakov V., Morgun E., Pechkin A. Abandoned agricultural soils from the central part of the Yamal region of Russia: morphology, diversity, and chemical properties // Open Agriculture. 2020. Vol. 5. № 1. P. 94–106. doi: 10.1515/opag-2020-0010 EDN: FUZDUX
10. Корнейкова М.В., Васенев В.И., Салтан Н.В., Слуковская М.В., Сошина А.С., Заводских М.С., Сотникова Ю.Л., Долгих А.В. Анализ эмиссии CO<sub>2</sub> городскими почвами в условиях Крайнего Севера // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1385–1399. doi: 10.31857/S0032180X23600373 EDN: МЕРСМН
11. Slukovskaya M.V., Vasenev V.I., Ivashchenko K.V., Morev D.V., Drogobuzhskaya S.V., Ivanova L.A., Kremenetskaya I.P. Technosols on mining wastes in the subarctic: efficiency of remediation under Cu-Ni atmospheric pollution // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7. № 3. P. 297–307. doi: 10.1016/j.iswcr.2019.04.002 EDN: WLDEWR
12. Dvornikov Y., Slukovskaya M., Gurinov A., Vasenev V. Soil type and content of macro-elements determine hotspots of Cu and Ni accumulation in soils of subarctic industrial barren: inference from a cascade machine learning // Environmental Pollution. 2025. Vol. 377. P. 126457. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126457
13. Dvornikov Y., Slukovskaya M., Yaroslavtsev A., Ryazanov A., Sarzhanov D., Meshalkina J., Vasenev V. High resolution mapping of soil pollution by Cu and Ni at a polar industrial barren area using proximal and remote

sensing // Land Degradation and Development. 2022. Vol. 33. № 10. P. 1731–1744. doi: 10.1002/ldr.4261 EDN: RZEMJD

14. Гутников В.А., Клюкин Н.Ю. Интегральная характеристика плодородия почвы для градостроительства // Градостроительство. 2017. № 4 (50). С. 43–46. EDN: ZUKGNZ

15. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 586–599. doi: 10.31857/S0032180X22050094 EDN: RAQEFC

16. Тикунов В.С., Белоусов С.К. Интегральная оценка и картографирование антропогенного воздействия на природную среду регионов России // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 1. С. 89–106. doi: 10.37493/2308-4758.2021.1.6 EDN: BTWMAO

17. Карманов И.И. Почвенно-экологическая оценка // Теоретические основы и пути регулирования плодородия почв. М. : Агропромиздат, 1991. С. 161–233.

18. Булгаков Д.С., Карманов И.И. Методика почвенно-агроклиматической оценки пахотных земель для кадастра. М. : Почв. ин-т им. В.В. Докучаева; АПР, 2012. 122 с.

19. Бульчева А.И. Современные тенденции экологического проектирования общественных пространств за Северным полярным кругом // Город, пригодный для жизни : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 11–12 нояб. 2021 г. / отв. за вып. Д.Е. Лемьтская. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022. С. 133–137. EDN: BWDNEO

20. Шоба С.А., Алябина И.О., Урусевская И.С., Чернова О.В. Национальный атлас почв Российской Федерации / науч. конс. Г.В. Добровольский. М. : Астрель; Фак. почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. 631 с.

21. Севастьянов Д.В., Исаченко Т.Е., Гук Е.Н. Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. № 3. С. 82–94. EDN: SJUQN

22. Петрова А.А., Абакумов Е.В. Содержание тяжелых металлов в почвах города Мурманска // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 5. С. 478–482. doi: 10.18821/0016–9900-2019-98-5-478-482 EDN: XXVQFB

23. Вихман М.И., Кислых Е.Е., Лисенко Л.А., Голубева И.В. Мониторинг кислотности почв Мурманской области // Агрохимический вестник. 2006. № 3. С. 7–10. EDN: LLVAND

24. Недбаев И.С., Колесников Р.А., Локтев Р.И., Брючко М.А., Хохлова Л.П., Шацкова С.А., Артамонова А.А. Особенности почв Приуральского района Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2024. № 1 (122). С. 92–107. doi: 10.26110/ARCTIC.2024.122.1.006 EDN: FPAEYT

25. Северьянова Е.Н. Эколого-геохимическая характеристика почвенного покрова в зоне деятельности угледобывающего предприятия на примере города Воркуты республики Коми // Альманах современной науки и образования. 2015. № 10 (100). С. 127–129. EDN: UMDRKH

26. Васильчук Ю.К., Васильчук Д.Ю., Белик А.Д., Гинзбург А.П., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. Криогенные почвы близ пос. Елецкий, северо-восток Республики Коми // Арктика и Антарктика. 2020. № 4. С. 51–79. doi: 10.7256/2453-8922.2020.4.34011 EDN: VXHHGK

27. Несговорова Н.П., Мирская А.С. Состояние системы «почва — растения» как показатель качества окружающей среды горно-металлургического центра города Норильска // Эколого-географические аспекты природопользования, рекреации, туризма : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году экологии в России, Курган, 08–09 нояб. 2017 г. / отв. ред. Н.П. Несговорова. Курган : Курган. гос. ун-т, 2017. С. 100–104. EDN: YKZIGA

28. Вихман М.И., Ингири А.А., Ласкин П.В., Хаитбаев А.Х. Динамика кислотности почв в агрофитоценозах Мурманской области в многолетнем цикле // Известия ОГАУ. 2011. № 2 (30). С. 23–25. EDN: NUUKLZ

29. Сухарева Т.А., Иванова Е.А., Ершов В.В., Зенкова И.В., Корнейкова М.В., Штабровская И.М., Сошина А.С. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6. № 2. С. 49–124. doi: 10.31509/2658-607x-202362-125 EDN: XTDOIM

30. Терехова В.А., Домашнев Д.Б., Каниськин М.А., Степачев А.В. Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям растений на разных стадиях развития // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. № 3. С. 21–26. EDN: KWYOVN

31. Слюсарев В.Н., Онищенко Л.М., Швец Т.В. Почвенно-экологическая оценка чернозема выщелоченного Западного Предкавказья // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 89. С. 960–972. EDN: TJAPXD

32. Аксенова Ю.В., Шпедт А.А., Красницкий В.М., Шмидт А.Г. Оценка почвенных ресурсов Омской области // Земледелие. 2018. № 3. С. 14–18. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10302 EDN: YWZHST

33. Козлова А.А., Иванова Т.С. Почвенно-экологическая оценка земель сельскохозяйственного назначения Иркутской области, республик Хакасии и Тувы // Современное состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса Сибирского региона и сопредельных территорий : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Кызыл, 29–30 мая 2024 г. Кызыл : Тувин. гос. ун-т, 2024. С. 124–128. doi: 10.24412/cl-35112-2024-1-124-128 EDN: GSLNXG

34. Шпедт А.А., Козлова А.А., Белозерцева И.А., Гранина Н.И., Лопатовская О.Г., Киселева Н.Д., Куклина С.Л., Мартынова Н.А., Лопатина Д.Н. Почвенно-экологическая оценка сельскохозяйственных земель Красноярского края, Иркутской области, Республики Бурятия // Земледелие. 2022. № 1. С. 9–13. doi: 10.24412/0044-3913-2022-1-9-13 EDN: JLLQAT

35. Козлова А.А., Жуланова В.Н., Белозерцева И.А., Кутькина Н.В., Иванова Т.С. Сравнительная почвенно-экологическая оценка сельскохозяйственных земель Иркутской области, Республик Бурятия, Хакасия и Тыва // Землеустройство, кадастр недвижимости и мониторинг земельных ресурсов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Улан-Удэ, 25–27 апр. 2022 г. / под общ. ред. Л.О. Григорьевой. Улан-Удэ : Бурят. гос. ун-т им. Доржи Банзарова, 2022. С. 208–212. EDN: ESBPBM

36. Гавриленко Е.Г., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Оценка качества почв разных экосистем (на примере Серпуховского и Подольского районов Московской области) // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1505–1516. doi: 10.7868/S0032180X13120058 EDN: REKCBF

37. Булгаков Д.С., Сорокина Н.П., Карманов И.И., Авдеева Т.Н., Савицкая Н.В., Грибов В.В. Применение и верификация почвенно-экологического индекса при оценке структур почвенного покрова пахотных угодий // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1367–1377. doi: 10.7868/S0032180X13110038 EDN: REKBWF

38. Полякова А.И. Оценка состояния почв сельскохозяйственного назначения на основе почвенно-экологических индексов // Экологический мониторинг, моделирование и проектирование в условиях природных, городских и агроэкосистем : сб. материалов конф., Москва, 01–11 июля 2015 г. / под общ. ред. И.И. Васенева, Р. Валентини. М. : Скрипта Манент, 2015. С. 151–153. EDN: UIDVJD

39. Васнев В.И. Анализ микробного дыхания и углеродных пулов при функционально-экологической оценке конструкторземов Москвы и Московской области : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2011. 24 с. EDN: QHQLPE

#### Об авторах:

*Лосев Артем Иванович* — младший научный сотрудник почвенно-экологической лаборатории Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: losev-ai@rudn.ru

ORCID: 0000-0001-9037-8493 SPIN-код: 9701-2058 Researcher ID: HNQ-5662-2023

*Васнев Вячеслав Иванович* — доктор биологических наук, доцент департамента ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: vasenev-vi@rudn.ru

ORCID: 0000-0003-0286-3021 SPIN-код: 7209-1269 Researcher ID: N-8451-2016

*Бережной Егор Дмитриевич* — специалист почвенно-экологической лаборатории Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: berezhnoy-ed@rudn.ru

ORCID: 0009-0003-0268-9577 SPIN-код: 9576-6005

*Сотникова Юлия Леонидовна* — кандидат химических наук, заведующий Почвенно-экологической лабораторией Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая д. 6, e-mail: sotnikova-yul@rudn.ru

ORCID: 0000-0002-7839-9141 SPIN-код: 8721-0022 Researcher ID: AAM-7906-2021