

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173



Ссылки для цитирования:

Захарченко А.В., Пасько О.А., Горячкин В.Н., Тигеев А.А. Содержание подвижных форм Cd и Pb в почвах земель сельскохозяйственного назначения и нормирование их загрязнения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2026. Вып. 128. С. 147-173. DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173

Cite this article as:

Zakharchenko A.V., Pasko O.A., Goryachkin V.N., Tigeev A.A., The content of mobile forms of Cd and Pb in agricultural soils and standardization of their pollution, Dokuchaev Soil Bulletin, 2026, V. 128, pp. 147-173, DOI: 10.19047/0136-1694-2026-128-147-173

Благодарность:

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2026-0022).

Acknowledgments:

The work was performed in accordance with the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRZ-2026-0022).

Содержание подвижных форм Cd и Pb в почвах земель сельскохозяйственного назначения и нормирование их загрязнения

© 2026 г. А. В. Захарченко^{1*}, О. А. Пасько^{2**},
В. Н. Горячкин^{3***}, А. А. Тигеев^{1****}

¹Тюменский научный центр СО РАН,
Институт проблем освоения Севера, Россия,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86,

* <https://orcid.org/0000-0001-9201-5733>, e-mail: avzakh@gmail.com,
*** <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, e-mail: trruubbaa@mail.ru.

²Национальный открытый институт, Россия,
197183, Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая, д. 6,
** <https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>, e-mail: pasko@noispb.ru.

³Ленинградский филиал ФГБУ "РосАгрохимслужба", Россия,
196608, Санкт-Петербург, шоссе Подбельского, 9,
*** e-mail: vova.goryk1978@mail.ru.

*Поступила в редакцию 26.06.2025, после доработки 21.10.2025,
принята к публикации 29.04.2026*

Резюме: Оценка загрязненности подвижными формами Cd и Pb агрогенных почв вызвана необходимостью введения региональных нормативов, которые основаны на принципах предела baseline (ULBL). Показана зависимость их содержания от гранулометрического состава почв (1113 наблюдений). Использование кластерного анализа позволило установить для суглинков пределы фонового содержания подвижного Pb (менее 5.53 ± 0.08 мг/кг). Кластеры, загрязненные подвижным Pb, имеют достоверно более высокие содержания органического углерода (%), подвижного фосфора и калия, pH_{KCl} . Пороговое содержание подвижного свинца (ULBL) – 11.5 мг/кг. Оно выше ПДК (6 мг/кг) и отражает допустимое антропогенное воздействие. Превышение порога Pb отмечено на 6% почв изученной площади. Их местоположение охватывает северные, центральные и южные регионы Ленинградской области. Фоновое значение содержания подвижного Cd менее 0.05 и не более 0.08, предельное пороговое значение концентрации подвижного Cd равно 0.16 мг/кг (ULBL). Загрязненные Cd земли, превышающие ULBL, распространены с севера на юг относительно областного центра и охватывают 6.2% от общей площади. Показано увеличение обобщенных показателей качества земель, таких как индекс окультуренности и комплексный агрохимический показатель с переходом от фоновых значений содержания Pb и Cd за пределы ULBL. В случае залежных земель установлено увеличение разброса значений по Pb и достоверное увеличение Cd относительно пашни.

Ключевые слова: подвижный свинец; подвижный кадмий; загрязнение почв; пороговое значение; фоновое содержание; Ленинградская область.

The content of mobile forms of Cd and Pb in agricultural soils and standardization of their pollution

© 2026 A. V. Zakharchenko^{1*}, O. A. Pasko^{2**},
V. N. Goryachkin^{3***}, A. A. Tigeev^{1****}

¹Tyumen Scientific Center SB RAS,

Institute of Problems of the Development of the North,

86 Malygina str., Tyumen 625026, Russian Federation,

*<https://orcid.org/0000-0001-9201-5733>, e-mail: avzakh@gmail.com,

***<https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>, e-mail: tttruubbaa@mail.ru.

²*National Open Institute Saint Petersburg,
6 Sestroretskaya str., Saint Petersburg 197183, Russian Federation,
**<https://orcid.org/0000-0001-8322-834X>, e-mail: pasko@noispb.ru.*

³*Leningradsky Agrochemical Service Center,
Podbelsky Highway 9, 196608, Saint Petersburg, Russian Federation,
***e-mail: vova.goryk1978@mail.ru.*

Received 26.06.2025, Revised 21.10.2025, Accepted 29.04.2026

Abstract: The assessment of soil contamination with mobile forms of Cd and Pb in agricultural lands is due to the need to introduce regional standards based on the principles of the limiting baseline (ULBL). The dependence of their content on the particle size distribution of soils is shown (1113 observations). The use of cluster analysis made it possible to establish the limits of background content of mobile Pb for loams (less than 5.53 ± 0.08 mg/kg). Clusters contaminated with mobile Pb have significantly higher contents of organic carbon (%), mobile phosphorus and potassium, pH_{KCl} . The threshold content of mobile lead (ULBL) is 11.5 mg/kg. It is higher than the maximum allowable concentration (6 mg/kg) and reflects the permissible anthropogenic impact. Exceeding the Pb threshold was noted on 6% of soils in the studied area. They are located across the northern, central, and southern regions of the Leningrad Region. The background value of available Cd is less than 0.05 and no more than 0.08, and the maximum threshold value for available Cd is 0.16 mg/kg (ULBL). Cd-contaminated soils exceeding the ULBL are distributed from north to south relative to the regional center and cover 6.2% of the total area. An increase in generalized land quality indicators, such as the cultivation index and the complex agrochemical indicator, is demonstrated with a transition from background values of Pb and Cd beyond the ULBL. In the case of fallow lands, an increase in the spread of Pb values and a significant increase in Cd relative to arable lands was observed.

Keywords: mobile lead; mobile cadmium; soil pollution; threshold value; background content; Leningrad region.

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственные земли нуждаются в рациональном подходе при эксплуатации (Захарченко, Пасько, 2019), так как они определяют экологическую и продовольственную безопасность региона (Threshold and guideline..., 2007). Пахотные земли вокруг

крупных промышленных агломераций подвержены наибольшему риску загрязнения тяжелыми металлами (далее ТМ) по сравнению с удаленными от них землями (Jarva, 2016). Экологическое законодательство Финляндии, которая граничит на севере с Ленинградской областью и обладает с ней сходными природно-климатическими условиями, признает важным экологический контроль сельскохозяйственных земель, территорий детских садов, где содержание загрязняющих веществ должно быть близким к естественному фону (Threshold and guideline..., 2007). Фоновая концентрация химического элемента, соответствующая естественному содержанию без антропогенного воздействия, плюс антропогенное воздействие до пороговых значений baseline (upper limit of baseline – ULBL), можно принять как безопасное (Jarva, 2016; Семенов, Королева, 2019; Плеханова, Золотарева, 2020; Яковлев, 2022).

Подвижные Pb и Cd в большей степени отражают загрязнение почв, чем валовые, так как они легкорастворимы и могут попадать в сельскохозяйственную продукцию. Их валовое содержание имеет устоявшиеся по времени использования экологических нормативов ПДК, чего нельзя сказать о подвижных формах. Для подвижного Pb ПДК/ОДК содержания в почвах составляет 6 мг/кг (Ориентировочно допустимые концентрации, 2009; Водяницкий, 2011), а для подвижного Cd норматив отсутствует (ГН 2.1.7.2041–06...). Следовательно, как точку отсчета загрязнения почв необходимо использовать фоновые значения. Естественное содержание ТМ в почвах включает антропогенное загрязнение, а также естественные аномалии, например, содержание мышьяка в почвах Финляндии (Threshold and guideline..., 2007; Jarva, 2016; Плеханова, Золотарева, 2020). В геохимии такой фон называли Baseline (Jarva, 2016). Он допускает поступление загрязняющих веществ и превышение естественного фона до некоторых пределов по содержанию микроэлементов (*Guideline value*), установленных Постановлением Правительства Финляндии 214/2007 (Threshold and guideline..., 2007). Пределы регионального Baseline полезны при оценке промышленного загрязнения почв (Mimba et al., 2018; Li et al., 2019). В экологическом почвоведении обосновывается возможность принять за норму природно-антропогенный фон (ПАФ)

(Яковлев, 2022). Из этого вытекает необходимость пересмотра региональных нормативов, согласно постановлению Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149 (О разработке, установлении и пересмотре нормативов, 2019).

Целью работы является агрохимическая характеристика почв с оценкой содержания подвижных Pb и Cd для контроля экологической безопасности сельскохозяйственных земель.

Выявление загрязненных ТМ земель являлось сопутствующей целью агрохимического исследования, поэтому исключается субъективный фактор, а также сокрытие неудобных фактов загрязнения ими сельскохозяйственных земель Ленинградской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Ленинградская область расположена на северо-западе европейской части России, вдоль берега Финского залива. Растительность относится к подзонам средней (на севере области) и южной тайги. В структуре почвенного покрова выделены шесть основных типов почв: подзолистый, болотно-подзолистый, дерново-глеевый, торфяно-болотный, дерново-карбонатный, дерново-аллювиальный.

Центр агрохимической службы “Ленинградский” провел агрохимический анализ почв 224 полей девяти районов (Волосовский, Волховский, Гатчинский, Кингисеппский, Ломоносовский, Лужский, Приозерский, Тихвинский и Тосненский) в соответствии с общепринятыми рекомендациями (Методические указания..., 2003). Картографической основой служили копии землеустроительных планов масштаба 1 : 10 000. При отборе проб почв использован GPS-навигатор Garmin GPSMAP 78s. Результаты обработаны при помощи программного обеспечения BaseCamp. Отбор объединенных почвенных проб произведен по элементарным участкам тростевым буром на глубину гумусового (пахотного) горизонта. Каждая объединенная проба составлена из 40 точечных проб и имеет массу не менее 400 г. Общее число проб – 1113 шт.

В каждой точке наблюдения учтены: площадь и вид угодий, характер растительности, гранулометрический состав и тип почвы. Кислотность солевой вытяжки pH (KC1), гидролитическая

кислотность и сумма обменных катионов определены по ГОСТ 26583-85, содержание подвижных P_2O_5 и K_2O – по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 54650 2011), органического вещества – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 23740-2016); подвижных ТМ – по РД 52.18.289 (РД 52.18.289).

$$\text{Иотн} = \frac{X_{\text{фак}} - X_{\text{мин}}}{X_{\text{опт}} - X_{\text{мин}}}, \quad (1)$$

где $X_{\text{опт}}$ – относительное значение показателя, $X_{\text{фак}}$ – наблюдаемое значение показателя, $X_{\text{мин}}$ – минимальное значение. При превышении оптимального значения текущим, отношение приравнено единице.

В расчетах использованы следующие минимальные значения агрохимических показателей: $pH_{\text{КС1}}$ – 3.5; содержание P_2O_5 и K_2O – 20 мг/кг почвы и 100 мг/кг (для торфяно-болотных почв); содержание гумуса – 0.5%. При превышении значением фактического показателя значения оптимального, относительный индекс приравнен 1.0. После нормирования (1) по всем показателям рассчитан индекс окультуренности ($I_{\text{окульт}}$) (Кулаковская, 1990):

$$\text{Индекс окульт} = \frac{I_{pH} + I_{p2O5} + I_{K2O} + I_{\text{гум}}}{4}, \quad (2)$$

где I_{pH} – относительный индекс pH, I_{p2O5} – индекс содержания подвижного фосфора, I_{K2O} – индекс содержания подвижного калия, $I_{\text{гум}}$ – индекс содержания органического вещества.

Расчет комплексного агрохимического показателя (КАП) осуществлен поэтапно по формулам (3–6) (Кулаковская, 1990):

$$B_i = \frac{X_{\text{фак}} - X_{\text{мин}}}{X_{\text{макс}} - X_{\text{мин}}}, \quad (3)$$

где B_i – значения показателя, нормированные на мини-макс, $X_{\text{фак}}$ – наблюдаемое значение, $X_{\text{мин}}$ – минимальное, $X_{\text{макс}}$ – максимальное. Далее рассчитан обобщенный показатель (ОП) как средняя величина B_i (3):

$$\text{ОП} = \frac{\sum B_i}{n}, \quad (4)$$

где ОП – обобщенный показатель, $\sum B_i$ – сумма используемых показателей B_i , n – количество показателей.

По разнице значений, полученных по формулам (3) и (4),

рассчитан коэффициент оптимальности (Копт) (Кулаковская, 1990):

$$\text{Копт} = 1 - \frac{ABS(\sum(\text{ОП}_i - B_i))}{n\text{ОП}}, \quad (5)$$

где $ABS(\sum(\text{ОП}_i - B_i))$ – сумма отклонений значений ОП от B_i по абсолютной величине (5), деленное на сумму ОП_i , по формуле (6) вычислено значение КАП:

$$\text{КАП} = \text{ОП} * \text{Копт}. \quad (6)$$

Статистический анализ выборки и корреляционный анализ проведены с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 12, Qgis и MapInfo 15.2. Для выявления фонового содержания ТМ использованы стандартизация и кластеризация, применяемые в иерархическом кластерном анализе (Orange 3.29.3), Евклидово расстояние и метод Ward (Захарченко и др., 2023; Захарченко, 2024). Далее для каждого кластера рассчитано среднее значение агрохимических показателей.

Значение порогового содержания (upper limit of baseline – ULBL) микроэлемента x определялось по формуле (Jarva, 2016):

$$ULBL_x = P_{75} + 1,5(P_{75} - P_{25}). \quad (7)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема определения фонового содержания ТМ вызвана использованием их подвижных форм и выделением с помощью ацетатно-аммонийного буфера, что позволяет ускорять химико-аналитические работы, и тем самым охватывать большие территории при обследовании сельскохозяйственных земель. Для оценки загрязнения почв подвижным Pb используют ПДК = 6 мг/кг, а ПДК/ОДК подвижного кадмия (Cd) отсутствует (ГН 2.1.7.2041–06). Решением проблемы может стать установление региональной пороговой нормы содержания вещества. Разница между фоновым и пороговым значениями отразит антропогенное загрязнение выбросами веществ. Этот способ является наиболее продуктивным для выделения фоновых и загрязненных кластеров (Семенов, Королева, 2019). Предварительно следует отсеять внешние факторы, способные исказить результаты. Известно, что ПДК почв в отно-

шении валового содержания Pb и Cd разделяют по гранулометрическому составу и pH_{KCl} . Можно предположить, что для подвижных форм также выполняется эта зависимость (рис. 1).

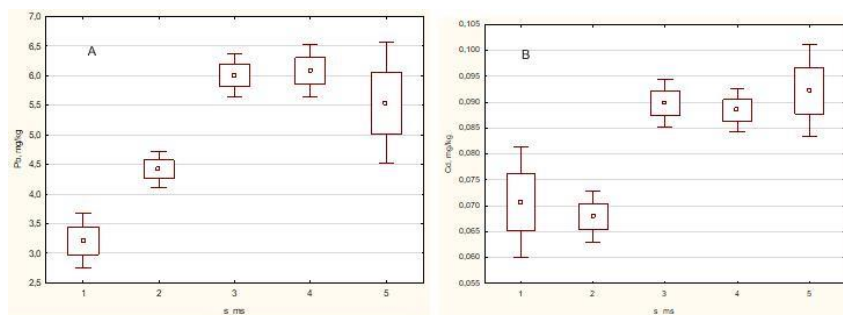


Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа содержания Pb (А) и Cd (В) от гранулометрического состава почв: 1 – песчаные, 2 – супесчаные, 3 – легкий суглинок, 4 – средний суглинок, 5 – тяжелый суглинок, 6 – торфяник.

Fig. 1. Results of the dispersion analysis of Pb (А) and Cd (В) content from the granulometric composition of soils: 1 – sandy, 2 – sandy loam, 3 – light loam, 4 – medium loam, 5 – heavy loam, 6 – peat.

Видно, что “ящики с усами” 1 и 2 (песчаные и супесчаные почвы) не соприкасаются, значит, они достоверно отделяются от суглинистых (3–5) по содержанию Pb и Cd, что следует учитывать при кластеризации исходных данных. Все значения песчаных и супесчаных почв ниже ПДК подвижного Pb. Средние значения для легкого и среднего суглинка равны ПДК. Для тяжелого суглинка средние значения ниже ПДК, но попадают в доверительный интервал. Торфяники выделяются средним значением $>$ ПДК и сопровождаются существенным разбросом значений, и охватывают как загрязненные подвижным Pb участки, так и “чистые” от него участки. Из этого следует, что перед использованием кластерного анализа следует исключить исходные данные, относящиеся к пескам, супесям и торфяникам. Используемые в анализе суглинки по содержанию Pb разделились на пять кластеров, послед-

ний из которых (C5) имеет значения ниже ПДК, но на верхнем пределе доверительного интервала захватывает его (табл. 1).

Выделяются два кластера с чрезвычайно высоким (C1) и высоким (C2) уровнями загрязнения сельскохозяйственных земель подвижным свинцом ($C1 = 26 \pm 2.5$ и $C2 = 17 \pm 0.8$). Их общая площадь составляет 1 367.7 га или 3.5% от площади суглинистых почв. Эти почвы достоверно отличаются по благоприятным агрохимическим показателям от показателей кластеров C3–C5. Органическое вещество загрязненных земель меняется в пределах 6–6.6%, pH_{KCl} – 6.1–6.3, P_2O_5 – 411–433 мг/кг, K_2O – 183–194 мг/кг. Кластер C4 объединяет участки с фоновым содержанием подвижного свинца – 3 ± 0.08 мг/кг площадью 12 373 га (31.4% от общей площади). Аналогичный результат для фоновых наблюдений составляет (0.165–2.733 мг/кг), он получен в схожих условиях (Кулаковская, 1990). Расчет верхнего предела базовой линии (7) содержания подвижного свинца составляет:

$$ULBL_{Pb} = 6.7 + 1.5 \times (6.7 - 3.5) = 11.5 \text{ мг/кг.}$$

Кластеры, в которых содержание Pb выше $ULBL_{Pb}$, имеют достоверно ($p < 0.05$) высокие агрохимические показатели содержания P_2O_5 , K_2O и органического вещества (гумус). Выше $ULBL_{Pb}$ (2 766 га пашни или 6%) почвы представляются как опасные для сельскохозяйственного использования. Кластеры C4–C5 можно отнести к относительно чистой базовой линии по содержанию подвижного свинца, C3 – требует дополнительных исследований и контроля за содержанием Pb в продукции.

В Постановлении (214/2007) (Threshold and guideline..., 2007) используются показатели валового содержания свинца в почвах, которые существенно выше подвижных форм. Фоновое валовое содержание находится в пределах 0.1–5 мг/кг, что соответствует пределам кластеров C4 и C5. Пороговое значение существенно выше (60 мг/кг) того, что следует из законодательства РФ (ГОСТ 23740-2016, 2013) (32 мг/кг для супесей и 65 мг/кг – для суглинков при $pH_{KCl} < 5.5$, при $pH > 5.5$ ПДК = 130 мг/кг).

Таблица 1. Агрохимические характеристики кластеров содержания подвижного свинца (ПДК = 6 мг/кг) в суглинистых почвах

Table 1. Agrochemical characteristics of mobile lead clusters (MPC = 6 mg/kg) in loamy soils

Кластер	N (шт.)	Площадь		Содержание				
		га	%	органичес- кого вещества, %	pH _{KCl} , ед.	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Pb, мг/кг
C1	8	330.0	0.84	6.6±1.2	6.3±0.6	433±144	183±8	26.34±2.5
C2	25	1037.7	2.64	6.0±0.6	6.1±0.2	411±68	194±3	16.98±0.8
C3	145	6517.6	16.57	5.1±0.3	5.7±0.1	306±26	144±1	8.97±0.27
C4	339	12372.7	31.45	4.7±0.2	5.8±0.1	229±15	118±9	3.09±0.08
C5	410	19081.1	48.50	4.8±0.2	5.7±0.07	237±15	113±6	5.53±0.08

Следует иметь в виду, что данное Постановление (Threshold and guideline..., 2007) касается селитебных и промышленных территорий. Нижний предел ULBL равен 200 мг/кг, он характеризует риск для здоровья человека, а верхний (750 мг/кг) – экологические проблемы и необходимость рекультивации земель.

Поля, загрязненные подвижным свинцом, расположены в Ленинградской области с севера на юг (рис. 2А).

На севере выявлены два поля дерново-подзолистых почв с высоким уровнем загрязнения (рис. 2А). В районе пос. Глобицы обнаружено восемь полей (рис. 2В). Подзолистые, серые почвы и карболитоземы наиболее распространены в районе Красного Села (рис. 2С). Высокий уровень загрязнения характерен для точек 22 и 43, меньший, но опасный уровень загрязнения отмечается для точек 13–15 и 20. На юге выявлено три точки дерново-подзолистых почв с очень высоким уровнем загрязнения подвижным Pb. Особенно высок уровень загрязнения Pb в подзолистых почвах в точках 676 и 1206.

В отличие от подвижного свинца, ПДК для кадмия не определена, но для оценки загрязненности почв можно с помощью иерархического кластерного анализа выделить фоновые значения (табл. 2).

Медианное значение 0.08 мг/кг совпадает со средним значением подвижного кадмия в кластере С2. Соответственно, участки кластера С1 можно классифицировать как фоновые ($M = 0.052 \pm 0.001$), участки С1 и С2, отнесенные к базовой линии, – как неопасные. Кластер С3 отражает высокий уровень антропогенного воздействия на почву, что требует повышенного внимания к качеству сельскохозяйственной продукции. Нижний квартиль базовой линии (P_{25}) содержания Cd равен 0.06; предельное значение базовой линии (7) (Jarva, 2016; Плеханова, Золотарева, 2020):

$$ULBL_{Cd} = 0.01 + 1.5 \times (0.1 - 0.06) = 0.16 \text{ мг/кг.}$$

Площадь земель с загрязнением почв выше этого значения составляет 2866 га (6.2% от площади). Значения С4 и С5 больше $ULBL_{Cd}$. Следовательно, все эти участки необходимо признать загрязненными Cd и нуждающимися в экотоксикологическом обследовании почв и сельскохозяйственной продукции.

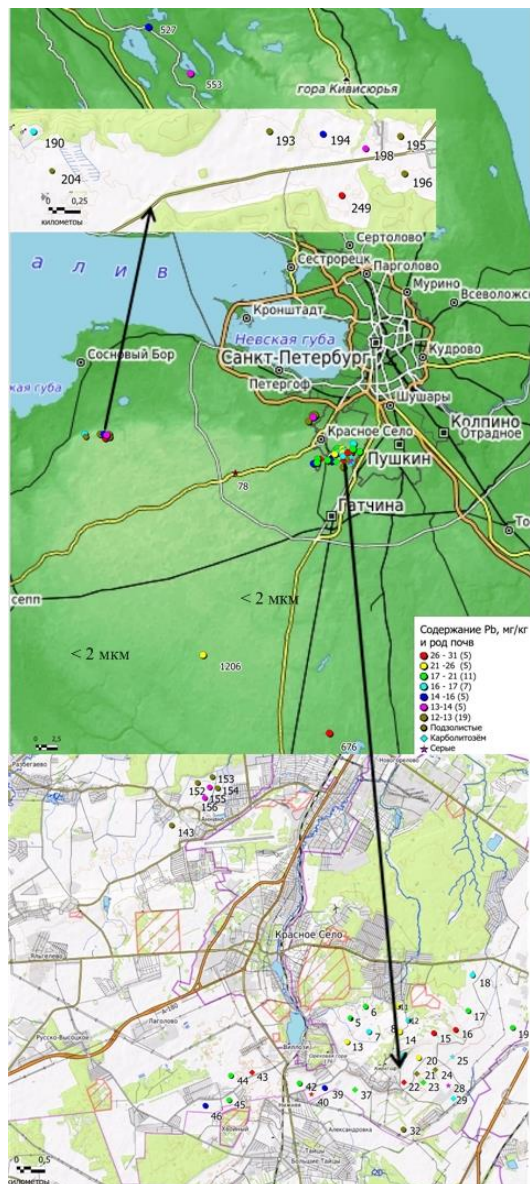


Рис. 2. Картограмма сельскохозяйственных полей, подверженных загрязнению подвижным свинцом. Цветом показан диапазон содержания подвижного Рb. Форма знаков отражает почвы по классификации 2004 г. Общее расположение точек наблюдения – А, район пос. Габицы – В, район Красное Село – С.

Fig. 2. Cartography of agricultural fields exposed to mobile lead contamination. The color shows the range of mobile Pb content. The shape of the signs reflects the soils according to the 2004 classification. The general location of the observation points – А, the area of the Gabitsy village – В, Krasnoye Selo – С.

Таблица 2. Агрохимические характеристики кластеров содержания подвижного кадмия в суглинистых почвах
Table 2. Agrochemical characteristics of mobile cadmium clusters in loamy soils

Кластер	N (шт.)	Площадь		Содержание				
		га	%	органического вещества, %	pH _{KCl} , ед.	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	Cd, мг/кг
C1	307	9947.7	25.29	4.1±0.1	5.6±0.09	248±17	106±7	0.050±0.001
C2	352	15837.7	40.26	4.7±0.2	5.7±0.08	246±16	127±7	0.080±0.001
C3	196	10161.3	25.83	5.5±0.3	5.8±0.11	255±23	138±1	0.11±0.001
C4	4	126.3	0.32	7.7±6.5	5.5±0.47	102±109	64±89	0.38±0.04
C5	68	3266.1	8.30	6.7±0.6	5.9±0.18	287±41	133±18	0.17±0.01

Максимальный уровень среднего содержания Cd в кластере С4 равен 0.38 ± 0.04 мг/кг. Следует отметить, что содержание органического вещества (гумуса) достоверно ($p < 0.05$) выше в кластерах с уровнем загрязнения ТМ более ULBL (С4, С5). По данным Постановления правительства Финляндии (214/2007) (Threshold and guideline..., 2007), фоновое значение валового Cd равно 0.03 мг/кг, и оно изменяется в пределах 0.01–0.15 мг/кг. Отмечается, что в почвах Европейского Севера фоновое содержание подвижного Cd находится в пределах 0.004–0.095; пороговое значение равно 1 мг/кг; нижнее нормативное значение валового содержания – 10, а верхнее – 20 мг/кг. Такие уровни загрязнения встречаются на селитебных и промышленных территориях и вызывают экологические риски деградации почв. ОДК валового Cd, используемое в России для песков и супесей, равно 0.5 мг/кг, для кислых суглинистых почв – 1.0 мг/кг, близких к нейтральным суглинкам – 2 мг/кг.

Географическое расположение точек, в которых обнаружено превышение содержания Cd относительно предела базовой линии во многом совпадает с распределением свинцового загрязнения (рис. 3).

Обозначилась точка с высоким загрязнением почв Cd на севере от Санкт-Петербурга, среди озер (рис. 3А); к востоку от него (пос. Сибола) также присутствуют точки загрязнения Cd (рис. 3В). Загрязненные земли наиболее часто встречаются вблизи Красного Села, в центральном и южном регионах Ленинградской области (дерново-подзолистые, редко серые почвы) и в районе Кингисеппа (почвы – глеевые). На юге области подвижным Cd загрязнены серые почвы и карболитоземы.

Показательно, что загрязнение подвижными Pb и Cd наблюдается на участках с высоким индексом окультуренности и высокими значениями комплексного агрохимического показателя (рис. 4).

Окультуренность считается “очень низкой” при значении ниже 0.40, “низкой” – в пределах 0.41–0.60 (как в нашем случае), “средней” – 0.61–0.80 и “высокой” – 0.81–1.00.

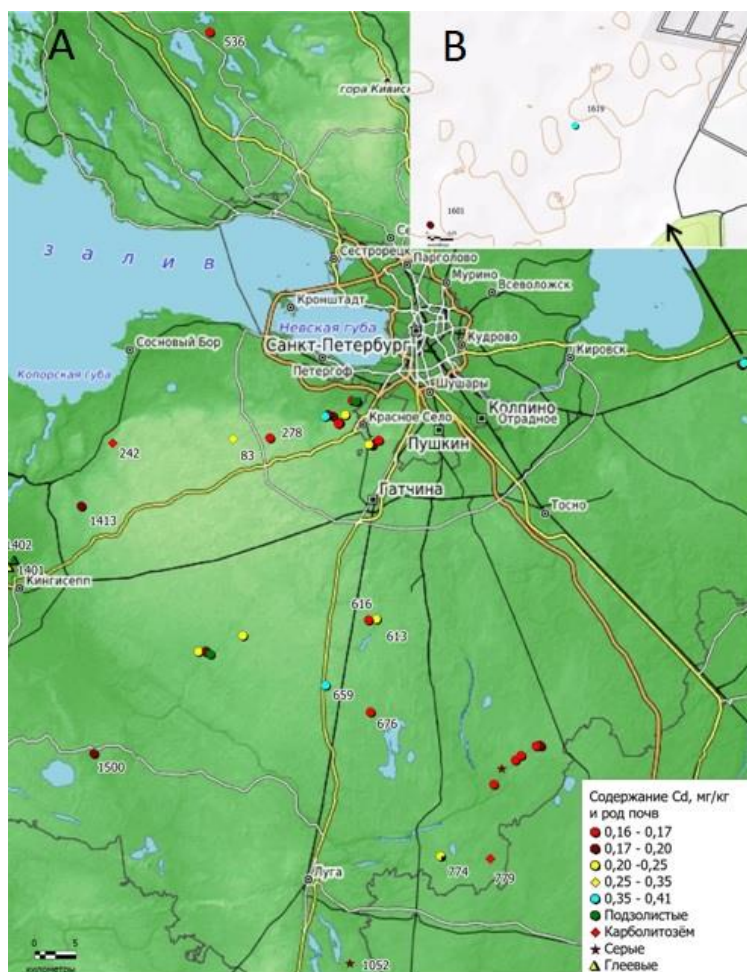


Рис. 3. Картограмма расположения сельскохозяйственных земель, загрязненных подвижным Cd. Цветом показан диапазон содержания. Форма знаков отражает род почв по классификации 2004 г. Общее расположение точек наблюдения – А, район пос. Сиболо – В.

Fig. 3. A cartographic diagram of the location of agricultural lands contaminated with mobile cadmium. The color shows the range of content. The shape of the signs reflects the soil type according to the 2004 classification. General location of observation points – А, area of the village Sibola – В.

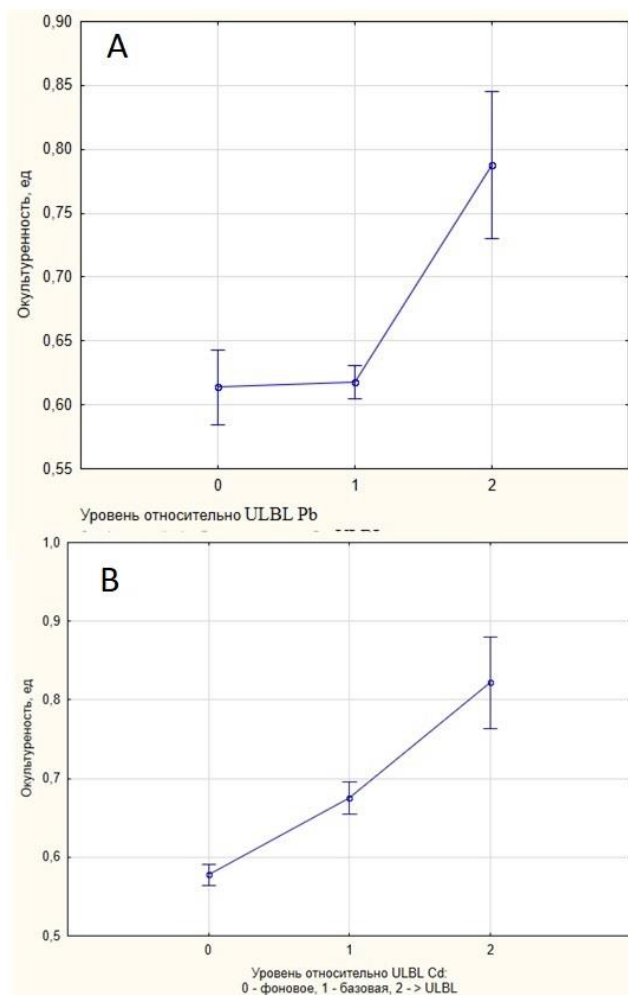


Рис. 4. Зависимость индекса окультуренности (ед.) от уровня загрязнения почв свинцом (**А**), кадмием (**Б**) относительно ULBL: 0 – фоновый, 1 – базовая линия, 2 – $\geq$ ULBL.

Fig. 4. Dependence of the cultivation index (units) on the level of soil contamination with lead (**A**), cadmium (**B**) relative to ULBL: 0 – background, 1 – baseline, 2 – $\geq$ ULBL.

Низкая окультуренность наблюдается в случае фоновом и базовом уровнй содержания подвижного Pb, причем достоверные различия (при $p > 0.95$) наблюдаются между 1-ым и 2-ым уровнем загрязнения (рис. 4А). В случае с Cd наблюдается линейное увеличение комплексного показателя, различия между уровнями загрязнения достоверны (рис. 4В). Предположительно, сам процесс окультуривания земель сопровождается внесением больших доз азотных, фосфатных и калийных удобрений, и с ними вместе в почву попадают ТМ (особенно Cd) (Бакаева, Еремейшвили, 2015; Комаров и др., 2019).

Для выделения базовой линии содержания ТМ (фоновые территории с незначительным антропогенным воздействием) следует удалить точки наблюдения, отражающие содержание подвижных ТМ выше ULBL (загрязненные). Тем самым определены территории в малой степени подверженные антропогенному воздействию (табл. 3). Агрохимические свойства таких точек наблюдения формируют образ модельной экологически безопасной почвы, который можно использовать для сравнительного анализа с почвами, подверженными интенсивному воздействию.

Комплексный агрохимический показатель (КАП) изменяется в пределах 0–100%, поэтому значение 0.33% отнесено к “низкому” (ГОСТ 23740-2016, 2013). Содержание органического вещества, равное $4.7 \pm 0.2\%$, относится к категории “среднее” (диапазон 4.1–6.0%). Максимальное значение – “очень высокое” ($> 10\%$). pH_{KCl} имеет оптимальное значение 5.8 ± 0.1 , учитывая, что почвы в большинстве относятся к кислым дерново-подзолистым. Минимальное значение – “очень кислое” – 3.7 (< 4.0), а максимальное значение – 7.6 – “щелочное”. Гидролитическая кислотность (Нг) равна 3.6 ± 0.3 ммоль(экв)/100г, является “слабокислой” (3.1–4.0) и в максимуме – “очень кислой” (> 6 ммоль(экв)/100 г.). Средняя сумма поглощенных оснований (ммоль /100 г) равна 16.0 ± 1.3 , она является “повышенной” (15.1–20.0), и в максимуме – “очень высокой” (> 30). Почвы базовой линии (Jarva, 2016) характеризуются очень высоким содержанием подвижного фосфора (253 ± 20 мг/кг) и относятся к градации “с высоким содержанием”.

Таблица 3. Статистические показатели агрохимических свойств базовой геохимической линии сельскохозяйственных земель (без торфяных почв) относительно содержания Pb и Cd

Table 3. Statistical indicators of agrochemical properties of the basic geochemical line of agricultural lands (without peat soils) relative to the content of Pb and Cd

Агрохимические показатели	N	Mean $\pm \Delta$	Median	P₂₅	P₇₅
Комплексный агрохимический показатель, %	980	33.5 $\pm$ 0.6	34.1	30.5	37.0
Органическое вещество, %	976	4.7 $\pm$ 0.2	4.4	3.7	5.2
pH KCl	980	5.8 $\pm$ 0.1	5.7	5.2	6.4
Hг, ммоль(экв)/100 г	475	3.6 $\pm$ 0.3	3.3	2,4	4.3
S, ммоль /100 г	517	16.0 $\pm$ 1.3	15.0	12.0	19.0
P ₂ O ₅ , мг/кг	980	253 $\pm$ 20	216	125	353
K ₂ O, мг/кг	980	122 $\pm$ 9	106	68	157
Pb, мг/кг	980	4.8 $\pm$ 0.2	4.5	3.4	6.0
Cd, мг/кг	980	0.079 $\pm$ 0.003	0.08	0.06	0.10

По среднему содержанию калия (122 ± 9 мг/кг) отмечена “очень высокая обеспеченность” ($120\text{--}180$ мг/кг), значение максимума расценивается как “загрязнение” (600 мг/кг). Среднее содержание ТМ можно отнести к фоновым значениям, не превышающим установленного предела ULBL. С практической точки зрения в таблице 3 отражены региональные агрохимические свойства, в пределах которых почвы считаются безопасными, а их превышение позволяет относить почвы к загрязненным.

По географическим координатам точек отбора проб проведен анализ космических снимков (Google Earth Pro). Большая часть участков на снимках имеет дешифровочные признаки пашни (полосы следов от сеялок и других ходовых агрегатов), однако на поверхности ряда участков заметны бугристая поверхность, кустарниковая и/или древесная растительность. Участки с признаками пашни (1) составляют 79.6% от площади, а вторые – целинные (2) – 20.4%. Представляют интерес изменения содержания ТМ (Pb и Cd) в случае снижения интенсивности использования земель (рис. 5).

По снижению индекса окультуренности и КАП выявлено, что на залежных землях (целина) снижена антропогенная нагрузка (рис. 5А и 5Б); при ее снятии (целина) среднее содержание свинца не увеличивается, но существенно возрастает размер доверительного интервала (рис. 5В). В одних случаях происходит рост содержания подвижного Pb, в других – снижение. Существует мнение, что загрязнения валовыми Pb и особенно Cd в большей степени определяются внесением калийных и фосфатных удобрений (Водяницкий, 2011; Зубков, Зубкова, 2012; Елсуков и др., 2022; Mauger et al., 2022), что согласуется с данными таблицы 1. Однако не все так однозначно. На целине, с одной стороны, наблюдается снижение окультуренности и КАП, с другой, – достоверное увеличение подвижного Cd в почве (рис. 5D). В залежных землях, возможно, присутствует внутрипочвенная миграция Cd к поверхности при отсутствии ежегодного перемешивания за счет отвальной вспашки.

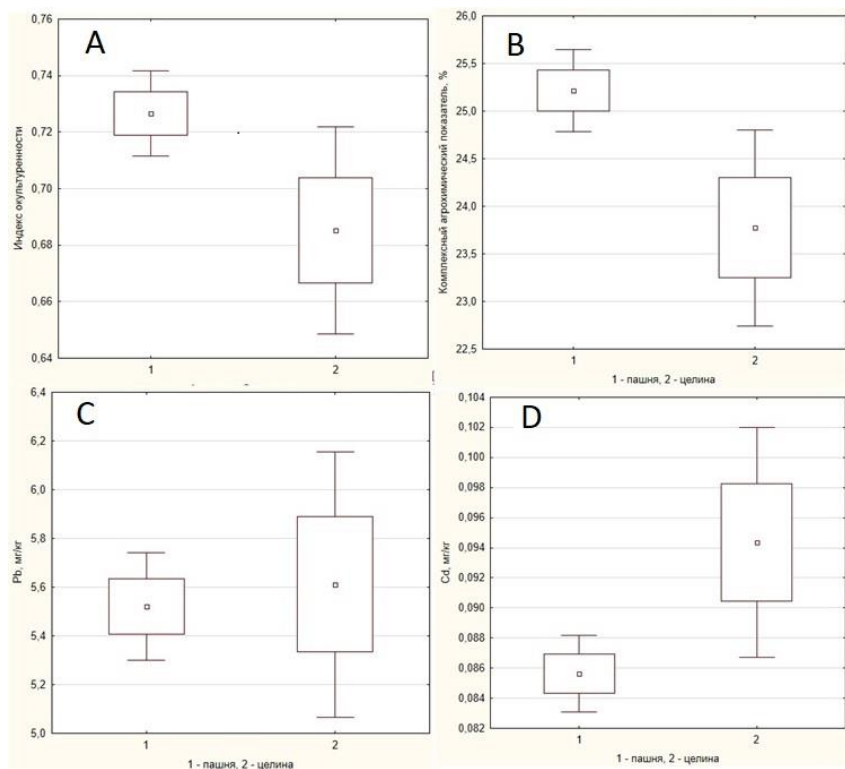


Рис. 5. Зависимость содержания Pb (А), Cd (В), индекса окультуренности (С) и комплексный агрохимический показатель (D) от использования сельскохозяйственных земель (1 – пашня, 2 – целина).

Fig. 5. Dependence of the content of Pb (A), Cd (B), the index of cultivation (C) and the complex agrochemical indicator (D) on the use of agricultural land (1 – arable land, 2 – virgin land).

После снижения антропогенной нагрузки происходят: достоверный рост органического вещества на 0.6%, снижение солевого pH на 0.1 ед. и увеличение суммы поглощенных оснований на 1.8 ммоль /100 г. На целинных почвах достоверно снижается содержание P_2O_5 (на 88 мг/кг) и K_2O (на 16.2 мг/кг). Подкисление почв усиливает подвижность Cd в почве и его поступление в куль-

турные растения (Зубков, Зубкова, 2012). Можно предположить, что при снятии антропогенной нагрузки на пахотные почвы происходит увеличение содержания гумуса, снижение pH_{KCl} за счет пролонгированного использования накопленных минеральных удобрений. При отсутствии вспашки и перемешивания слоев возможно накопление Cd за счет осаждения из загрязненных воздушных масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подвижные Pb и Cd аналогично валовым имеют меньшие значения в песчаных и супесчаных почвах и достоверно большие – в суглинистых.

2. С помощью иерархического кластерного анализа выделены пределы фоновое содержания подвижного Pb для суглинистых почв сельскохозяйственных полей ($< 5.53 \pm 0.08$) и обусловлены естественными процессами.

3. Содержание тяжелых металлов выше фона, вызванные антропогенными выбросами, внесенными удобрениями допускается в виде базовой линии до некоторого предела, выше которого почвы считаются загрязненными. Предельное пороговое значение концентрации ($ULBL_{Pb}$) подвижного Pb в суглинках равно 11.5 мг/кг. Площадь земель, превышающих эту величину, равняется 6% от общей площади. Кластеры, загрязненные подвижным Pb, имеют достоверно более высокое содержание органического углерода (%), подвижного фосфора и калия, pH_{KCl} .

4. Географическое распределение сельскохозяйственных полей с загрязнением подвижным Pb присутствует как в северных, так центральных и южных регионах Ленинградской области. Наиболее часто встречаются загрязненные поля в районе Красного Села.

5. Кластеры фоновое значения содержания Cd составляют менее 0.050 до 0.080 мг/кг, предельное пороговое значение концентрации подвижного Cd равно 0.16 мг/кг. Почвы, превышающие этот порог, занимают 6.2% от общей обследованной площади. Кластеры, загрязненные подвижным Cd, имеют достоверно более высокое содержание органического углерода (%). Географически загрязненные земли распространены с севера на юг относительно

Санкт-Петербурга. Наиболее высокое загрязнение отмечается на юго-западе от него.

6. Показано увеличение обобщенных показателей качества земель, индекса окультуренности и комплексного агрохимического показателя с переходом содержания Pb и Cd от фоновых за пределы ULBL.

7. Традиционные агрохимические показатели характеризуют базовую линию почв ниже порога загрязнения тяжелыми металлами: КАП = 33.5%; окультуренность – 0.54; органическое вещество – 4.7%; pH_{KCl} – 5.8; гидролитическая кислотность – 3.6 ммоль(экв)/100 г; сумма обменных оснований – 16 ммоль/100 г; подвижный P_2O_5 – 253 мг/кг; подвижный K_2O – 122 мг/кг; Pb – 4.8 мг/кг; Cd – 0.08 мг/кг.

8. В случае залежных земель или при их исключении из пашни наблюдается достоверное снижение индекса окультуренности и КАП. На залежных землях показано увеличение разброса значений по Pb, установлено на них достоверное увеличение содержания Cd относительно пашни.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакаева Е.А., Еремейшвили А.В. Некоторые особенности содержания микроэлементов в почвенном и снежном покрове европейского севера России // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 547–554.
2. Водяницкий Ю.Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2011. Вып. 68. С. 57–82.
3. ГОСТ 26583-85. Почвы. Определение pH солевой вытяжки, обменной кислотности, обменных катионов, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. М.: Гос. комитет СССР по стандартам. 1985.
4. ГОСТ 54650 2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартиформ. 2013.
5. ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартиформ. 2013.
6. ГН 2.1.7.2041–06. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические

нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006.

7. Елсуков Е.Ю., Недбае И.С., Кузьмина Д.С. Загрязнение почв в зоне воздействия производства фосфорных удобрений // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. Т. 67. Вып. 4. С. 652–674. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>.

8. Захарченко А.В., Пасько О.А. Растения, почвы и экологически устойчивое земледелие. СПб.: ООО Национальный информационный канал, 2022. 179 с.

9. Захарченко А.В., Тигеев А.А., Пасько О.А., Московченко Д.В. Кластерный анализ стандартизованных значений содержания микроэлементов твердой фазы снега городов Тобольск и Тюмень // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 4. С. 61–65. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-61-65>.

10. Захарченко А.В. Обоснование методов стандартизации данных для кластеризации микроэлементного состава пыли снегового покрова городских земель // Реалии, тренды и инновации в современном обществе. СПб: Материалы XXI Международной научно-практической конференции. СПб., 2024. С. 171–178.

11. Зубков Н.В., Зубкова В.М. Азотные удобрения и динамика кадмия в системе “почва-растение” // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: “Естественные науки”. 2012. № 1 (9). С. 52–61.

12. Комаров В.И., Селиванов О.Г., Марцев А.А., Подолец А.А., Лукьянов С.Н. Содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте почв сельскохозяйственного назначения Владимирской области // Агрохимия. 2019. № 12. С. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>.

13. Кулаковская Т.Н. Оптимизация агрохимической системы почвенного питания растений. М.: Агропромиздат, 1990. 218 с.

14. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / под ред. Державина Л.М., Булгакова Д.С. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.

15. О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий: Постановление Правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 149. URL: <https://wwwpublication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902190012000>.

16. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 10 с.
17. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10. С. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>.
18. РД 52.18.289. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом ОКСТУ 0017. М.: Гос. комитет СССР по Гидрометеорологии. 1990. 36 с.
19. Семенков И.Н., Королева Т.В. Международные системы нормирования содержания химических элементов в почвах: принципы и методы (обзор) // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100101>.
20. Яковлев А.С. Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов // Почвоведение. 2022. № 2. С. 252–260. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020149>.
21. Jarva J. Geochemical baselines in the assessment of soil contamination in Finland. Espoo: Geological Survey of Finland, 2016. 52 p.
22. Li Z., Deblon Judith Yanqun Zu, Gilles Colinet, Bo Li and Yongmei He. Geochemical Baseline Values Determination and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soils of Lanping Mining Valley (Yunnan Province, China) // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019, Vol. 16. No.16. 4686; P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234686>.
23. Mayer M.M., Basta N.T., Schekel K.G. Using phosphate amendments to reduce bioaccessible Pb in contaminated soils: A meta-analysis // Front Soil Sci. 2022. Vol. 7. No. (2) P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1028328>.
24. Mimba M.E., Ohba T., Nguemhe Fils, S.C. et al. Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a tool for contamination assessment // Geochem Trans. 2018. Vol.19. No.11. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12932-018-0056-5>.
25. Threshold and guideline values for harmful substances in soil. Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs (214/2007). Finland: Legally binding texts are those in Finnish and Swedish Ministry of the Environment, 2007. 6 p.

REFERENCES

1. Bakayeva E.A., Yeremeishvili A.V., Some features of content of trace elements in soils and snow of northern European in Russia, *Modern problems of science and education*, 2015, No. 3, pp. 547–554. (In Russ.)
2. Vodianitsky Y.N., On dangerous heavy metals/metalloids in soil, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2011, No. 68, pp. 56–82, DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-56-82>. (In Russ.)
3. GOST 26583-85, Soils. Determination of salt extract pH, exchangeable acidity, exchangeable cations, nitrate content, exchangeable ammonium and mobile sulfur by TsINAO methods, Moscow: USSR State Committee on Standards, 1985. (In Russ.)
4. GOST 54650-2011, Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by the Kirsanov method modified by TsINAO, Moscow: Standartinform Publ, 2013. (In Russ.)
5. GOST 23740-2016, Soils. Methods for determining the content of organic substances, Moscow: Standartinform Publ, 2013. (In Russ.)
6. GN 2.1.7.2041–06. Hygienic standards. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards, Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2006. (In Russ.)
7. Elsukov E.Y., Nedbaev I.S., Kuzmina D.S., Monitoring of soil pollution in the area affected by the production of phosphorus fertilizers), *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*, 2022, Vol. 67, No. 4, pp. 652–674, DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>. (In Russ.)
8. Zakharchenko A.V., Pas'ko O.A., *Plants, soils, and sustainable agriculture*, St. Petersburg: National Information Channel LLC Publ, 2022, 179 p. (In Russ.)
9. Zakharchenko A.V., Tigeev A.A., Pasko O.A., Mochkovchenko D.V., On the background values of the geochemical spectra of microelements of the solid phase of snow during their comparative analysis in the cities of Tobolsk and Tyumen, *Ecology and industry of Russia*, 2023, Vol. 27, No. 4, pp. 61–65, DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-61-65>. (In Russ.)
10. Zakharchenko A.V., Substantiation of data standardization methods for clustering the trace element composition of dust and snow cover of urban lands, *Realities, trends and innovations in modern society*, Proc. of the 21th Sci. Conf, Saint Petersburg, 2024, pp. 171–178. (In Russ.)
11. Zubkov N.V., Zubkova V.M., Nitrogen Fertilizers and Cadmium Dynamics in the “Soil-Plant” System, *The Academic Journal of Moscow City University, series “Natural Sciences”*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 52–61. (In Russ.)

12. Komarov V.I., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podoletc A.A., Lukyanov S.N., Heavy metals content in agricultural soils of Vladimir region, Russia, *Agricultural Chemistry*, 2019, No. 12, pp. 75–82, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100089>. (In Russ.)
13. Kulakovskaya T.N., *Optimization of agrochemical system of soil nutrition of plants*, Moscow: Agropromizdat Publ, 1990, 218 p. (In Russ.)
14. Guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility on agricultural lands), Ed. L.M. Derzhavina, D.S. Bulgakov, Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003, 240 p. (In Russ.)
15. On the development, establishment and revision of environmental quality standards for chemical and physical indicators of the environment, as well as on the approval of regulatory documents in the field of environmental protection that establish technological indicators of the best available technologies: Decree of the Government of the Russian Federation dated February 13, 2019 No. 149, URL: <https://www.publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201902190012000>. (In Russ.)
16. Approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil: Hygienic standards, Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 10 p. (In Russ.)
17. Plekhanova I.O., Zolotareva O.A., Ecological regulation of the state of soils contaminated heavy metal, *Agricultural Chemistry*, 2020, No. 10, pp. 79–88, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>. (In Russ.)
18. RD 52.18.289 *Methods for measuring the mass fraction of mobile forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium, manganese) in soil samples by atomic absorption analysis* (USSR standard), Moscow: USSR State Committee for Hydrometeorology, 1990. 36 p. (In Russ.)
19. Semenov I.N., Koroleva T.V., International Environmental Legislation on the Content of Chemical Elements in Soils: Guidelines and Schemes, *Eurasian Soil Science*, 2019, No. 10, pp. 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100101>.
20. Yakovlev A.S., Issues of Environmental Regulation and Establishment of Background Values of Soil Properties of Natural and Natural Anthropogenic Objects, *Eurasian Soil Science*, 2022, No. 2, pp. 252–260, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22020149>.
21. Jarva J., Geochemical baselines in the assessment of soil contamination in Finland, *Geological Survey of Finland*, 2016, 52 p.
22. Li Z., Deblon Judith Yanqun Zu, Gilles Colinet, Bo Li, Yongmei He, Geochemical baseline values determination and evaluation of heavy metal contamination in soils of Lanping Mining Valley (Yunnan Province, China),

International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, No. 16, 4686, pp. 1–18, DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16234686>.

23. Mayer M.M., Basta N.T., Schekel K.G., Using phosphate amendments to reduce bioaccessible Pb in contaminated soils: A meta-analysis, *Front Soil Sci*, 2022, Vol. 72, No. 2, pp. 1–14, DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.1028328>.

24. Mimba M.E., Ohba T., Nguemhe Fils S.C. et al., Regional geochemical baseline concentration of potentially toxic trace metals in the mineralized Lom Basin, East Cameroon: a tool for contamination assessment, *Geochem Trans*, 2018, Vol. 19, No. 11, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.1186/s12932-018-0056-5>.

25. Threshold and guideline values for harmful substances in soil. Government Decree on the Assessment of Soil Contamination and Remediation Needs (214/2007), Legally binding texts are those in Finnish and Swedish Ministry of the Environment, Finland: 2007, 6 p.