

УДК 504.06:631.41:550.42

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТЕКСТУРНО-ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ И АЛЬФЕГУМУСОВЫХ ПОЧВ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

И.Н. Лиходумова¹, И.Ю. Багайчук¹, М.В. Панина², С.Г. Левина², А.В. Малаев²,
Н.В. Кутяшева¹, А.А. Дорохова¹

¹ООО Уральская комплексная лаборатория промышленного и гражданского строительства,
г. Челябинск,

²Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет,
г. Челябинск,

E-mail: lichodumov@mail.ru, info@uralstroylab.ru, panina80@mail.ru, levinasg@cspu.ru, malaevav@cspu.ru,
knatali1706@mail.ru, arina_chelyadinova@mail.ru

В статье представлены результаты исследования содержания тяжелых металлов (ТМ) в поверхностном слое текстурно-дифференцированных (подзолистых, дерново-подзолистых) и альфегумусовых (подзолов) почв Ленинградской области. Исследованы 23 участка с различными биоценозами, выбранные с учетом удаленности от источников загрязнения. Проведен анализ агрохимических свойств почв и валового содержания Hg, Pb, As, Cd, Zn, Ni, Co, Cu, Cr, Mn. С помощью индексов геоаккумуляции (Igeo) и Немерова (NCPI) установлены различные уровни загрязнения почв области. Выявлено, что, несмотря на отсутствие критического загрязнения большинством тяжелых металлов, в почвах фиксируется повышенное содержание Cr, Hg, As и Ni. Доминирующим загрязнителем является хром, аккумулирующийся в суглинистых разновидностях почв. Показано, что накопление ряда металлов связано не только с антропогенным воздействием, но и с природными биогеохимическими процессами.

Ключевые слова: тяжелые металлы; загрязнение почв; подзолистые почвы; Ленинградская область; индекс геоаккумуляции (Igeo).

DOI: 10.24412/2410-1192-2026-18102

Дата поступления: 5.03.2026. Принята к печати: 30.04.2026

Современный этап развития производства характеризуется активным вовлечением в биогеохимический круговорот большого количества химических соединений и увеличением миграции не только элементов-биогеофитов, но и ряда металлов [Ермаков, 2015]. Попадая в почву в результате антропогенной деятельности, тяжелые металлы характеризуются высокими ми-

грационными и аккумулятивными процессами, что способствует включению данных поллютантов в биогеохимические циклы.

Тяжелые металлы (ТМ) при попадании в почву связываются почвенными компонентами, при этом происходит либо образование их труднорастворимых соединений, либо адсорбция на почвенных коллоидах, либо валентные трансформации, которые

изменяют подвижность элементов-токсикантов и доступность их растениям [Протасова, Щербаков, 2003; Стахурлова, Бахтин, 2020]. Однако, при повышенном содержании в почве тяжелые металлы могут вступать в трофические цепи и вместе с продукцией растениеводства и животноводства попадать в рацион человека, что может негативно повлиять на его здоровье [Brevik, Sauer, 2015; Tong et al., 2020; Панов и др., 2023].

Территория Ленинградской области расположена на границе средней и южной подзон центральной таежно-лесной биоклиматической области умеренно-холодного пояса. В пределах области встречаются все разновидности подзолистых почв, что объясняется неоднородностью механического состава почвообразующих пород, различиями рельефа местности, составом и свойствами растительности.

Значение дерново-подзолистых почв таежно-лесной зоны заключается в том, что они являются важным фактором сохранения экологического равновесия лесных экосистем, а также выступают объектом труда и средством производства, определяя направленность производственной деятельности. Многочисленными исследованиями [Зырин, Садовникова, 1985; Алексеенко и др., 1992; Овчаренко, 1997; Алексеев, 2008; Федорец и др., 2015] установлено, что естественное содержание ТМ в дерново-подзолистых и подзолистых почвах определяется разнообразием почвообразующих пород, форм рельефа, пестротой агрохимических свойств почв.

Вышеизложенное обуславливает актуальность изучения современного состояния подзолистых почв в условиях разно-

плановой антропогенной нагрузки.

Цель исследования – экологическая оценка содержания ТМ поверхностного слоя текстурно-дифференцированных и альфегумусовых почв Ленинградской области.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выступили текстурно-дифференцированные и альфегумусовые почвы Ленинградской области разной степени оподзоленности и оглеенности на моренных суглинках и озерно-ледниковых супесях и суглинках под различными биоценозами (хвойный и хвойно-смешанный, мелколиственный лес). При выборе места взятия почвенных проб учитывалось расстояние от возможных источников загрязнения по направлению господствующих ветров. Всего было определено 23 участка, где были отобраны почвенные образцы (рис. 1).

Полевые работы проводились в июне-июле 2025 года. Пробы отбирались по общепринятой методике согласно ГОСТ [2017]. На каждом участке из поверхностного (0–20 см) слоя почвы пробы отбирались методом конверта, на месте составлялась смешанная проба. Исследования проб почвы были проведены в аккредитованном Испытательном лабораторном центре ООО «УралСтройЛаб» в соответствии с действующими нормативными документами. Базовые показатели почвенного плодородия (кислотность, содержание гумуса, азота) определяли общепринятыми методами ГОСТ [1985; 2019; 2021]. Содержание тяжелых металлов определяли методом эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре (модель Avio 560 Max) [ПНД Ф, 1998].

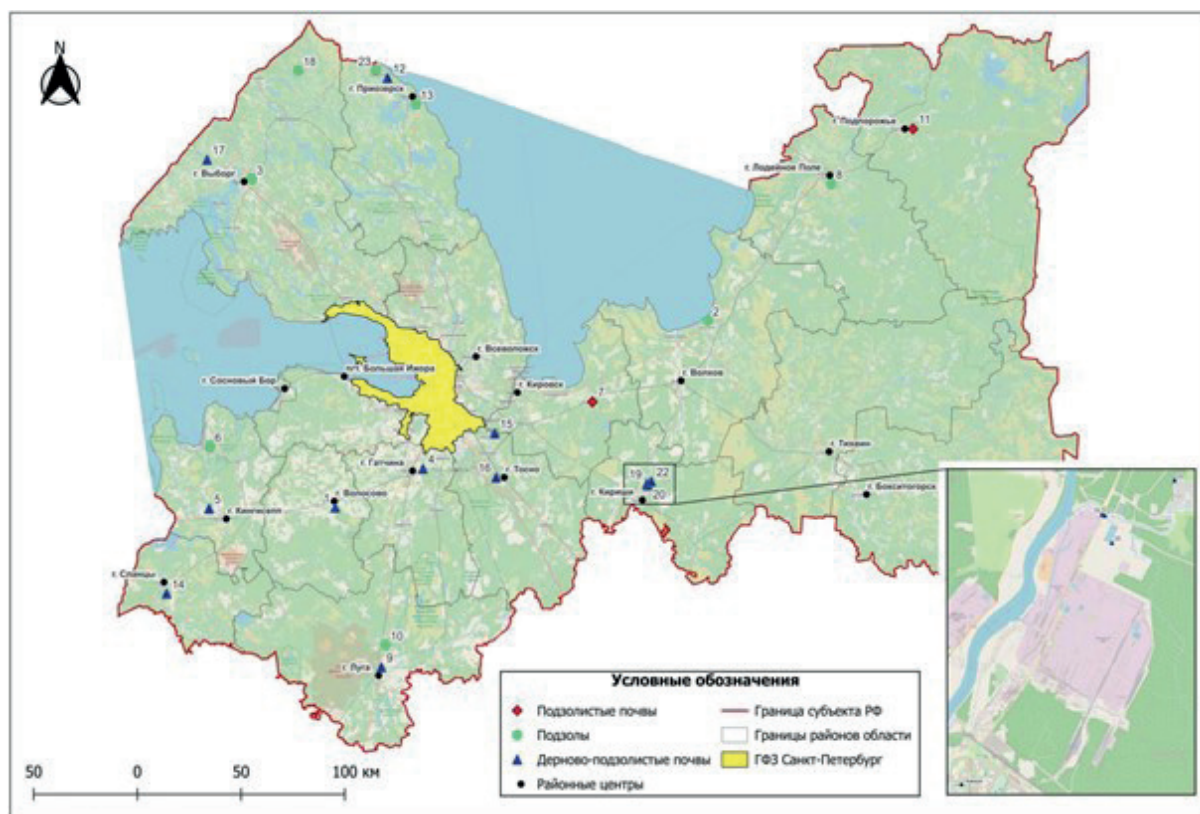


Рис. 1. Участки отбора почв Ленинградской области

Fig. 1. Soil sampling sites in the Leningrad region

Расчеты показателей загрязнения проводились по следующим методикам.

Для оценки загрязнения поверхностного слоя почв ТМ рассчитывался индекс геоаккумуляции (Geoaccumulation Index, I_{geo}) [Muller, 1969; Tyopine et al., 2018; Авдощенко, Климова, 2022] по формуле:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_n} \right),$$

где C_i – содержание элемента в почве; B_n – геохимический фон; 1.5 – коэффициент, компенсирующий фоновое содержание за счет литогенных факторов. Этот показатель ранжирует состояние почв на следующие семь классов: $I_{geo} < 0$ – незагрязненные; $0 < I_{geo} < 1$ – слабая степень загрязнения; $1 < I_{geo} < 2$ – умеренная степень загрязнения; $2 < I_{geo} < 3$ – достаточно сильная степень загрязнения; $3 < I_{geo} < 4$

– сильная степень загрязнения; $4 < I_{geo} < 5$

– очень сильная степень загрязнения, $5 < I_{geo}$ – чрезвычайно сильная степень загрязнения [Бабошкина и др., 2025].

Уровень загрязнения почв ТМ определялся с использованием интегрального индекса загрязнения Немерова (NCPI) – распространенного способа оценки загрязнения почв, оценивающего не только среднее значение однофакторных показателей, но и учитывающего их максимальную величину [Liu et al., 2017; Опекунова и др., 2022]. Для определения NCPI сначала рассчитывался индекс однофакторного загрязнения:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i},$$

где P_i – индекс однофакторного загрязнения; C_i (мг/кг) – измеренная концентрация отдельного элемента; и S_i (мг/кг) – норма-

тивное значение загрязняющих веществ. В качестве стандартов содержаний тяжелых металлов использованы фоновые значения содержания ТМ в почвах Ленинградской области [Сорокин и др., 2012].

Индекс загрязнения Немерова рассчитывался по формуле:

$$NCPI = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{i\max})^2}{2}},$$

где NCPI – индекс загрязнения Немерова; $P_{i\max}$ – максимальный единичный индекс загрязнения среди загрязняющих веществ, а $\bar{P}_i$ – среднее значение единичных индексов загрязнения среди всех загрязняющих веществ. Значение индекса загрязнения Немерова для почв: $NCPI \leq 0.7$ – безопасное, $0.7 < NCPI \leq 1.0$ – повышенное внимание, $1.0 < NCPI \leq 2.0$ – слабое загрязнение, $2.0 < NCPI \leq 3.0$ – среднее загрязнение, $NCPI > 3.0$ – сильное загрязнение [Hu et al., 2017].

Результаты и обсуждение

В ходе исследования были изучены почвы, относящиеся к отделам текстурно-дифференцированных (подзолистые и дерново-подзолистые) и альфегумусовых (подзолы) почв, расположенных на различных расстояниях от источников загрязнения (табл. 1).

Подзолы Ленинградской области формируются на слабодренированных формах рельефа озерных, озерно-аллювиальных и флювиогляциальных равнин, на породах легкого состава под заболоченными сосновыми и елово-сосновыми кустарничково-зеленомошными и долгомошными лесами. Почвы имеют легкий гранулометрический состав – супесчаный, что способствует хорошей вертикальной миграции

влаги и растворенных в ней химических элементов. Общими чертами является наличие в их профиле белесого подзолистого горизонта и обычно яркого (охристого, красноватого, кофейного др.) срединного альфегумусового горизонта.

По данным лабораторных исследований, верхний горизонт *подзолов* характеризуется содержанием: органического вещества – от низкого (2.2%) до высокого (7.1%), общего азота – от низкого (0.114%) до высокого (0.771%), обогащенность гумуса азотом – от очень низкой (16.2) до очень высокой (4.7). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) – от сильнокислой (4.0) до среднекислой (4.8). Исследованные нами подзолы относятся к классу супесчаных почв.

Подзолистые почвы формируются под темно-хвойными лесами с моховым или мохово-кустарничковым растительным покровом в умеренно дренированных местоположениях (вершины холмов и привершинные части склонов, озерно-ледниковые и озерные террасы) на различных породах. Характерным признаком для этой почвы является подзолистый горизонт мощностью от 18 до 25 см.

По данным химических анализов, верхний горизонт *подзолистых почв* исследованных участков характеризуется очень низким (0.5–1.35%) содержанием органического вещества, содержанием общего азота – от очень низкого (0.042%) до низкого (0.126%), обогащенность гумуса азотом – высокая (6.2–6.9). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) – от среднекислой (4.7) до близко к нейтральной (5.7). По гранулометрическому составу изученные подзолистые почвы относятся к классу супесчаных и легкосуглинистых.

Таблица 1

Расположение участков отбора проб относительно источников загрязнения

Table 1

Location of sampling sites relative to pollution sources

№ участка п/п	Расстояние от источника загрязнения	Тип почвы	Гранулометрический состав	pH _{KCl} , ед. pH	Гумус, %
1	3.33 км ЮВ ООО КФ «Ленинградская», г. Волосово	Дерново- скрытоподзолистая супесчаная на моренных суглинках	Легко суглинистый	5.1	1.39
2	3.54 км ССВ ОАО «Сясь- ский целлюлозно-бумаж- ный комбинат», г. Сясьстрой	Подзол грубо-гумусовый супесчаный на тонких огненных озерно- ледниковых песках	Легко суглинистый	4.1	2.2
3	2.31 км СВ Вы- боргский завод металлоконструкций, г. Выборг	Подзол скрытоподзолистый контактно-осветленный на озерно-ледниковой супеси	Супесчаный	4.5	7.1
4	1.18 км ВЮВ ООО «Новый Свет - Эко», пос. Новый Свет	Дерново-подзолистая суглинистая на моренах	Легко суглинистый	5.1	4.1
5	860 м С ПГ «Фосфорит», г. Кингисепп	Дерново-глубоко- подзолистая легкосуглинистая на тонкой озерно-ледниковой супеси	Средне суглинистый	4.4	85.8*
6	3.49 км ЮВ Порт «Усть-Луга», Кингисеппский район	Подзол перегнойно- темногумусовый супесчаный на оглеенной озерно-ледниковой супеси	Супесчаный	4	2.3
7	1.41 км В ЗАО «НТК», гп. Назия, р-н Кировский	Подзолистая грубогумусированная супесчаная на оглеенных озерно-ледниковых суглинках	Супесчаный	4.7	0.5
8	5.09 км ЮВ ООО «ЦСП-Свирь», г. Лодейное Поле	Подзол иллювиально- железистый супесчаный на тонко оглеенной озерно- ледниковой супеси	Супесчаный	4.8	3.4
9	1.88 км СВ Лужский химический завод, г. Луга	Дерново-подзолистая суглинистая на моренах	Легко суглинистый	4.3	4.6
10	0.5 км ЮВ АО Лужский комбикормовой завод 0.6 км Ю ОАО «Толмачёвский завод ЖБ и МК», п. Толмачево	Подзол иллювиально- железистый супесчаный на камовых песках	Супесчаный	4	2
11	1.90 км В АО «Подпо- рожский механический завод», г. Подпорожье	Подзолистая грубогумусированная супесчаная на моренных суглинках	Легко суглинистый	5.7	1.35
12	5.14 км ЮЗ Дробильно-сортировоч- ный завод №3 2.23 км В Дробильно-со- ртировочный завод №2 пгт. «Кузнечное, Приозерский р-н	Дерново-подзолистая супесчаная глееватая на моренных суглинках	Легко суглинистый	3.9	96.71*

№ участка п/п	Расстояние от источника загрязнения	Тип почвы	Гранулометрический состав	pH _{KCl} , ед. рН	Гумус, %
13	0.79 км ССЗ ГК «Приозерский лесокombинат», пос. Ларионово Приозерский район	Подзол иллювиально-железистый супесчаный на водно-ледниковых песках	Супесчаный	4.4	3.9
14	0.56 км В ООО «Цементный завод «Петербургцемент», г. Сланцы	Дерново-слабоподзолистая суглинистая на моренах	Легко суглинистый	6	5.2
15	1.98 км ВСВ ОАО «Никольский кирпичный завод», г. Никольское	Дерново-подзолистая глееватая легкосуглинистая на моренных суглинках	Легко суглинистый	6.1	1.7
16	1.0 км на юг от промышленной зоны, г. Тосно	Дерново-подзолистая глееватая легкосуглинистая на моренных суглинках	Легко суглинистый	4.3	97*
17	Выборгский район, Селезневское сельское поселение, ст. Лужайка	Дерново-подзолистая глееватая легкосуглинистая на озерно-ледниковых оглеенных глинах	Легко суглинистый	4.2	6.6
18	Выборгский район, граница Светогорского и Каменногорского городских поселений, северо-западнее пос. Дымово	Подзол грубогумусированный супесчаный иллювиально-железистый на озерно-ледниковой супеси	Супесчаный	4.3	4.6
19	0.34 км СВ от Киришской ГРЭС; 1.96 км ССЗ от ООО «КИНЕФ», г. Кириши	Дерново-подзолистая суглинистая на тонкой озерно-ледниковой супеси	Средне суглинистый	3.9	4.6
20	0.55 км СВ Киришская ГРЭС, 2.17 км С ООО «КИНЕФ», г. Кириши	Дерново-мелкоподзолистая суглинистая на моренных суглинках	Легко суглинистый	5.5	0.43
21	0.49 км СВ Киришская ГРЭС 1.92 км С ООО «КИНЕФ», г. Кириши	Дерново-подзолистая суглинистая на тонкой озерно-ледниковой супеси	Средне суглинистый	5.7	3.2
22	2.58 км СВ Киришская ГРЭС 3.37 км СВ ООО «КИНЕФ», г. Кириши	Дерново-неглубокоподзолистая суглинистая на моренных суглинках	Средне суглинистый	6.4	0.56
23	1.39 км ССВ Дробильно-сортировочный завод №3 3.27 км СЗ Дробильно-сортировочный завод №2, пгт. «Кузнечное, Приозерский р-н	Подзол грубогумусированный супесчаный иллювиально-железистый на озерно-ледниковой супеси	Супесчаный	4.6	2.0

Примечание: *Содержание органического вещества, определяемое как потеря массы при прокаливании.

Формирование дерново-подзолистых почв происходит на достаточно дренированных ровных поверхностях с мощным чехлом валунных суглинков под хвойно-лиственными и хвойно-широколиственными мохово-травянистыми и травянистыми лесами. Дерново-подзолистые почвы отличаются от подзолистых как строением

своего профиля, так и физико-химическими свойствами. Отличительной чертой дерново-подзолистых почв является наличие перегнойно-аккумулятивного горизонта, формирующегося на участках, где преобладают растения с развитой корневой системой. Дерново-подзолистые почвы формируются на более тяжелых по гранулометрическому составу породах, что обеспечивает лучшее снабжение макро- и микроэлементами растений и большую продуктивность фитомассы. Поэтому в рассматриваемых почвах выше содержание гумуса и элементов биофилов.

По данным лабораторных анализов верхний горизонт дерново-подзолистых почв участков характеризуется содержанием: органического вещества – от очень низкого (0.43%) до высокого (6.6%), общего азота – от очень низкого (0.036%) до высокого (4.8%), обогащенность гумуса азотом

– от очень низкой (19.2) до высокой (5.6). Реакция почвенного раствора (pH_{KCl}) – от очень сильнокислой (3.2) до нейтральной (6.2). В гранулометрическом составе преобладающими фракциями дерново-подзолистых почв были легкий и средний суглинок.

По агрохимическим характеристикам исследованные почвенные образцы практически не отличаются от показателей, приведенных в литературных источниках для почв данного типа [Гришина, Орлов, 1978; Сапрыкин, 1984; Ковда, Розанов, 1988; Орлов и др., 2005; Национальный атлас почв..., 2011].

Концентрация тяжелых металлов в поверхностном слое почв сильно варьирует (табл. 2), что обусловлено разнообразием почвообразующих пород, неоднородностью гидроклиматических условий, особенностями рельефа и влиянием антропогенных факторов [Горький, 2007].

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов и мышьяка в почвах Ленинградской области

Table 2

Heavy metal and arsenic content in the soils of the Leningrad region

Элемент	Содержание элемента в почвах, мг/кг				ПДК/ОДК*, с учётом фона (кларка), мг/кг	Региональный фоновый уровень***, мг/кг			Кк
	среднее	ошибка	min	max		среднее	min	max	
Hg	0.04	0.009	0.01	0.017	2.1/-	0.03	0.01	0.12	1.37
Pb	20.78	1.5	2.1	30	-/32; 65; 130**	19.11	2.00	44.0	1.09
As	3.4	0.51	0.6	7.8	-/2.0; 5.0; 10.0**	2.62	1.5	6.0	1.24
Cd	0.15	0.006	0.1	0.22	-/0.5; 1.0; 2.0**	0.17	0.01	0.57	0.83
Zn	46.41	6.86	7.2	98	-/55.0; 110.0; 22.00**	43.10	10.0	70.0	1.04
Ni	17.86	1.7	0.7	39	-/2.0; 5.0; 10.0**	15.30	5.0	30.0	1.17
Co	4.42	0.55	0.2	11	5.0/-	4.10	2.5	7.0	1.08
Cr	43.87	4.09	5.1	77	-	12.5	0.1	30	3.51
Cu	12.74	2.02	0.9	36	-/33.0; 66; 132.00	18.0	10.0	30.0	0.71
Mn	270.87	36.77	12	613	1500/-	117.7	50.0	300.0	2.3

Примечания: * СанПиН 1.2.3685–2021 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»; ** /ОДК песчаные и супесчаные почвы; кислые (суглинистые и глинистые), $pH_{KCl} < 5.5$; близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), $pH_{KCl} > 5.5$; *** Горький А.В., 2007.

Содержание ряда элементов (кадмий, цинк, кобальт, никель) в исследуемых почвах не отличается от среднего содержания в почвах мира, России и находится на уровне их фоновых концентраций по Ленинградской области [Виноградов, 1957; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Горький, 2007; Побилат, Волошин, 2021]. Содержание кадмия в верхних горизонтах почв области невысокое, не превышает ПДК и ОДК в почвах, изменяется в довольно узком диапазоне (от 0.11 до 0.22 мг/кг), вариабельность значений средняя ($C_v=12-16\%$). Тоже самое можно отметить и для никеля, содержание которого в почвах области изменяется от 10 до 30 мг/кг, вариабельность не превышает 40%.

Обращает на себя внимание довольно равномерное содержание свинца, элемента 1 класса опасности. Во всех образцах его концентрации изменяются в пределах от 2 до 30 мг/кг и варьирует умеренно (коэффициенты вариации в выборках не превышают 28%). Однако, содержание свинца в изученных нами почвах заметно выше содержания меди (примерно в 1.5 раза), что отличает почвы Ленинградской области от почв подзолистого ряда соседних регионов. Так, например для дерново-подзолистых почв Северо-Запада России содержание меди изменяется от 25.6 до 83.1 мг/кг, содержание свинца – от 14 до 23.6 мг/кг [Сапрыкин, 1984], в почвах Карелии средние значения содержания меди составляют 18 мг/кг, свинца – 15.5 мг/кг [Федорец и др., 2015]. Аналогичное превышение свинца над медью наблюдается в поверхностных горизонтах дерново-подзолистых почв южно-таежной подзоны Западно-Си-

бирской равнины [Сысо, 2007].

Содержание меди в поверхностных горизонтах почв отличается значительной вариабельностью ($C_v=73-82\%$), что определяется пестротой состава почвообразующих пород. В среднем количество меди в исследуемых почвах находится на уровне 12.7 мг/кг, что ниже уровня фонового содержания элемента – 18.0 мг/кг в почвах Ленинградской области [Горький, 2007]. Пониженное содержание меди в подзолистых почвах Ленинградской области обусловлено, с одной стороны, низкой ее концентрацией в почвообразующих породах. По данным Ф.Я. Сапрыкина [1984] региональный фоновый уровень концентрации меди в почвообразующих породах составляет 41 мг/кг, что ниже кларка меди в земной коре – 47 мг/кг [Виноградов, 1957]. С другой стороны, отмечаемая рядом авторов [Национальный атлас почв..., 2011; Симонова и др., 2025], высокая подвижность меди в условиях кислой реакции и обилие водорастворимых органических веществ, также влияет на низкое содержание Cu в почвах.

Таким образом, пониженное содержание меди в изученных почвах области, а также концентрации Cd, Ni в большей степени определяются природными геохимическими особенностями, а также их содержанием в почвообразующих породах региона и пока мало зависят от антропогенного воздействия со стороны промышленных предприятий. В то же время, содержание таких опасных токсикантов, как Hg и As, а также Zn в верхних горизонтах почв области колеблются в более широких пределах, их максимальные значения могут на порядок превышать величину минималь-

ного, хотя, при этом не превышают ПДК и ОДК в почвах.

Медь, цинк и никель относятся к химическим элементам энергичной миграции в кислой среде и сорбируются алюмосиликатами и гидроксидами железа и марганца, характерными для зональных подзолистых почв региона и сконцентрированными преимущественно в верхней части профиля почвы.

Анализ валового содержания тяжелых металлов (Hg, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Cr, Cu, Mn) в подзолистых почвах и подзолах области показал, что ни один из определенных нами элементов не достиг предельно или ориентировочно допустимых концентраций, т. е. почвы не являются загрязненными (табл. 2). Исключение составило только содержание мышьяка (элемент 1 класса опасности), где концентрация его в супесчаных почвах превышает ОДК в 1.65 р.

Классики почвоведения и биогеохимии, такие как В.А. Ковда [1985], М.А. Глазовская [1988], А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас [1989], В.В. Добровольский [1997] считали, что при оценке загрязнения почв металлами целесообразно ориентироваться на их фоновые значения. От содержания в почве питательных элементов, гумуса, вторичных минералов, окислительно-восстановительных условий и рН среды зависит доступность химических элементов растениям, что определяет допустимые концентрации и токсичность. Уровни веществ, превышающие их естественное (фоновое) содержание в 5–10 и более раз, по мнению Аллаяровой и др. [2021], вне зависимости от свойств почвы, считаются токсичными.

Согласно результатам нашего исследования в почвах Ленинградской области металлов, обладающих токсичностью, не выявлено (рис. 2).

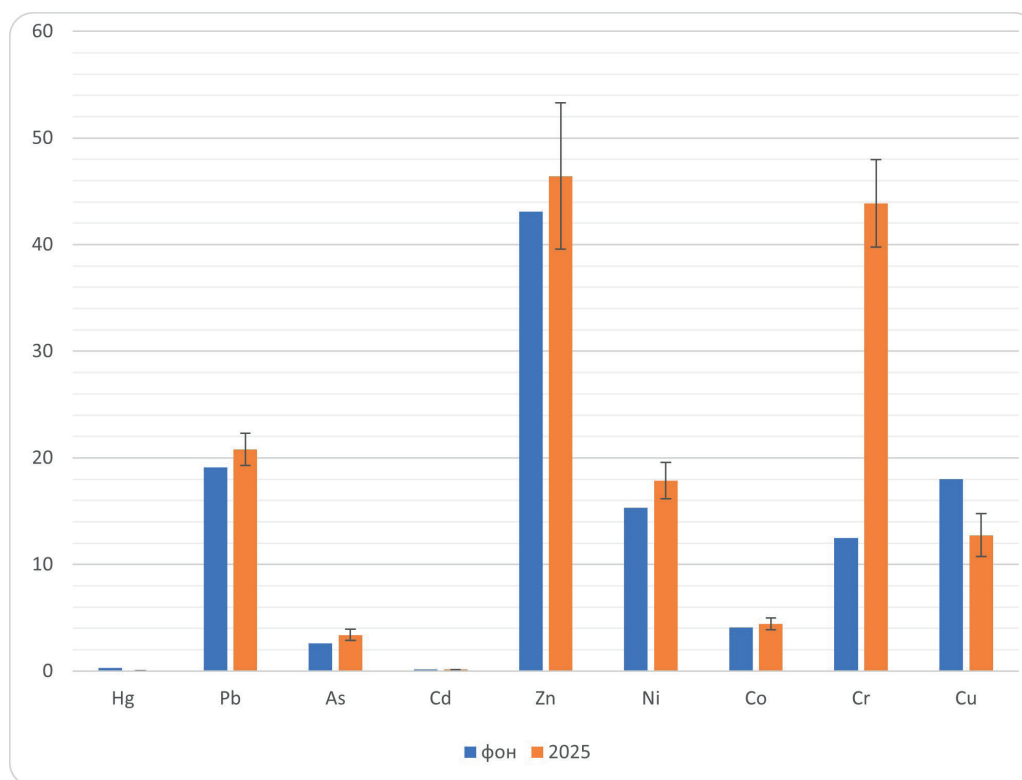


Рис. 2. Средняя концентрация ТМ в поверхностном слое почв
Fig. 2. Average concentration of HM in the surface layer of soils

Анализ данных показал, что наиболее высокие концентрации Hg и Cd (элементы 1 класса опасности) установлены в образцах почв, отобранных в 500 м от источников загрязнения в Лужском и Кингисеппском районах (табл. 3), что согласуется с результатами ранее проведенных исследований на указанной территории [Жукова, 2017; Елсукова и др., 2022; Симонова и др., 2025].

В почвах участков, расположенных на значительном расстоянии от промышленных предприятий, количество Zn в 2 раза, Cr в 1.2 раза превышает их содержание в почвах вблизи источников загрязнения. Содержание Pb, As, Ni, Co, Cu, Mn с расстоя-

нием от источника загрязнения существенно не изменяются.

Рассчитанные геоаккумулятивные индексы для металлов Hg, Pb, As, Cd, Zn, Ni, Co, Cu изменяются в широком диапазоне. Анализ полученных данных выявил, что в 22 точках из 23 наблюдается загрязнение почв хромом от слабого до достаточно сильного. Верхние горизонты почв участков, расположенных в 2 км и дальше от источника загрязнения (ПО «Киришинефтеоргсинтез») загрязнены сильнее ($I_{geo}=2.04$), чем почвы в 200–300 м от источника загрязнения ($I_{geo}=1.81$, $I_{geo}=0.9$). В 500 м от НПЗ загрязнение почв хромом соответствует слабой степени загрязнения ($I_{geo}=0.58$).

Таблица 3

Содержание микроэлементов в поверхностном слое почв исследуемых участков Ленинградской области

Table 3

Content of trace elements in the surface layer of the soils of the studied areas in the Leningrad region

Элемент, мг/кг	500 м от источника загрязнения		2000 м и более от источника загрязнения	
	$\frac{M \pm SE}{lim}$	Cv, %	$\frac{M \pm SE}{lim}$	Cv, %
Mn	$\frac{234 \pm 79.3}{69 - 532}$	75	$\frac{236 \pm 44.5}{100 - 429}$	53
Zn	$\frac{21.4 \pm 5.5}{7.2 - 38}$	58	$\frac{43.8 \pm 11.4}{8.0 - 98}$	73
Cr	$\frac{38.2 \pm 7.4}{24 - 66}$	43	$\frac{47.4 \pm 6.8}{26 - 77}$	40
Pb	$\frac{20.0 \pm 0.8}{17 - 22}$	9	$\frac{22.6 \pm 2.3}{8.6 - 30}$	28
Ni	$\frac{15.4 \pm 2.5}{10 - 25}$	54	$\frac{17.4 \pm 2.3}{11 - 30}$	37
Cu	$\frac{10.4 \pm 3.4}{3.3 - 23}$	73	$\frac{12.8 \pm 3.7}{2.4 - 36}$	82
Co	$\frac{4.0 \pm 0.5}{2.8 - 5.5}$	27	$\frac{4.2 \pm 0.8}{0.6 - 8.0}$	51
As	$\frac{3.0 \pm 1.3}{0.6 - 7.8}$	98	$\frac{3.4 \pm 1.0}{0.6 - 7.0}$	85
Cd	$\frac{0.15 \pm 0.01}{0.11 - 0.17}$	16	$\frac{0.13 \pm 0.005}{0.11 - 0.15}$	12
Hg	$\frac{0.05 \pm 0.03}{0.005 - 0.16}$	134	$\frac{0.03 \pm 0.008}{0.01 - 0.085}$	72

Основная масса хрома в почвах прочно связана с ее минеральной частью. Поэтому в региональных условиях высокая концентрация Cr в почвах относительно его фоновых значений определяется содержанием его в почвообразующих породах. В отношении озерно-ледниковых глин Северо-Запада, на которых формируется большинство исследованных нами почв, известно, что они больше обогащены микроэлементами, в частности Cr, чем другие водно-ледниковые и ледниковые породы за счет большей доли тонких фракций в гранулометрическом составе [Матинян и др. 2007].

В Кингисеппском районе области в точке отбора № 5, находящейся в 800 м от ООО ПГ «Фосфорит» и в Лужском районе, в точке отбора № 10, в 1 км от Лужского комбикормового завода отмечена умеренная степень загрязнения почв ртутью ($I_{geo}=1.9$). В точках, находящихся на расстоянии около 2 км от предприятия металлообработки (г. Выборг и ОАО «Лужский химический завод»), загрязнение ртутью определено, как слабое ($I_{geo}=0.9-0.1$). В остальных точках отбора загрязнение отсутствует.

Значения I_{geo} в почвах области остальных элементов (As, Zn, Ni, Co, Cu) изменяются в следующих пределах: 0.16–0.98 (As); 0.01–0.6 (Zn); 0.06–0.76 (Ni); 0.38–0.83 (Co); 0.2–0.41 (Cu), что характеризует слабую степень загрязненности почв этими элементами.

Загрязнение свинцом отмечено только в одной точке ($I_{geo} = 0.07$), расположенной в 600 м от цементного завода и связано оно с деятельностью промышленных предприятий г. Сланцы и близким расположением

точки отбора к автодороге. Загрязнение почв кадмием не выявлено.

Таким образом, самые низкие значения I_{geo} по всей исследуемой территории установлены для Pb, As, Zn, Ni, Co, Cu. По степени загрязнения этими элементами почвы области относятся к классу 0–1 (слабая степень загрязненности). Вклад этих элементов в суммарное загрязнение почв незначительный, их содержание в основном соответствует фоновому уровню.

Самые высокие значения единичных I_{geo} установлены для хрома – по его содержанию почвы области соответствуют достаточно сильному хромовому загрязнению. Уровень загрязнения почв области ртутью определен как умеренный. На общем фоне выделяются два более загрязненных участка, связанные с нефтепереработкой (г. Кириши) и производством фосфорных удобрений (г. Кингисепп). Загрязнение тяжелыми металлами почв данной территории отмечается и в работах других авторов [Елсукова и др., 2022; Сиимонова и др., 2025].

Значения NCPI в исследованных почвах изменяются от 0 до 4.6, среднее значение NCPI составляет 2.7. Согласно расчетам, наиболее высокие индексы загрязнения Немецова установлены в почвах, прилегающих к Киришскому НПЗ (NCPI = 3.1–4.6) Кингисеппскому ПО «Фосфорит» (NCPI = 3.9). Сильное загрязнение почв по индексу NCPI (свыше 3) отмечены также для почв участков 4, 6, 11, 13, 14, 19, 20, 22. Основной вклад в значение комплексного индекса загрязнения NCPI вносит хром (рис. 3). Значительную долю в загрязнение вносят также Mn, As, Co, Ni, Zn.

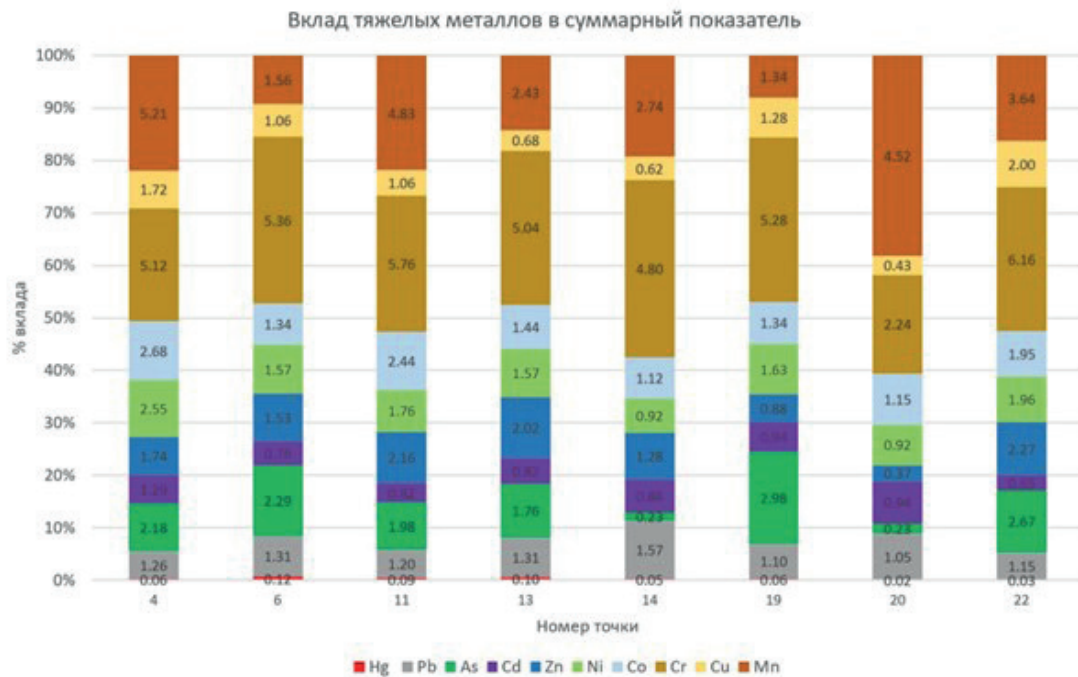


Рис. 3. Вклад тяжелых металлов и мышьяка в интегральный показатель загрязнения почв химическими элементами по индексу Немеорова
 Fig. 3. Contribution heavy metals and arsenic to the integral indicator of soil contamination by chemical elements according to the Nemerov index

Необходимо отметить, что высокий суммарный индекс загрязнения характерен не только для точек, расположенных на расстоянии менее 500 м от источников загрязнения, но и для участков, находящихся свыше 1 км от промышленных предприятий. Для изучаемой территории характерна частая смена воздушных масс, с преобладанием западных и северо-западных ветров, при этом часто повторяются ветры южных румбов. Вероятно, это определяет высокие индексы загрязнения на значительном удалении от источников.

Наиболее высокие показатели загрязнения (3.1–4.5) установлены в дерново-подзолистых суглинистых почвах, что, видимо, обусловлено более тяжелым гранулометрическим составом. Незначительное загрязнение и отсутствие загрязнения отмечены для супесчаных подзолов и супесчаных подзолистых почв (рис. 4).

По всей видимости это обусловлено

тем, что в условиях влажного климата с периодическим увлажнением и преобладанием в составе гумуса фульвокислот миграционная способность микроэлементов значительно возрастает, особенно в почвах с легким механическим составом, с преимущественно промывным водным режимом. Для большинства загрязняющих веществ с утяжелением механического состава почвы возрастает общее содержание микроэлементов. В многочисленных региональных исследованиях указывается на зависимость содержания металлов от гранулометрического состава почв: так, в почвах более тяжелого гранулометрического состава характерно повышенное содержание следующих элементов – ртути [Байдина, 2001; Безносиков и др., 2013; Побилат, Волошин, 2019], кадмия [Побилат, Волошин, 2017а, Сергеев и др., 2017], свинца [Побилат, Волошин, 2017б; Баенгуев и др., 2022], меди, цинка, никеля, кобальта, марганца [Федорец и др., 2015].

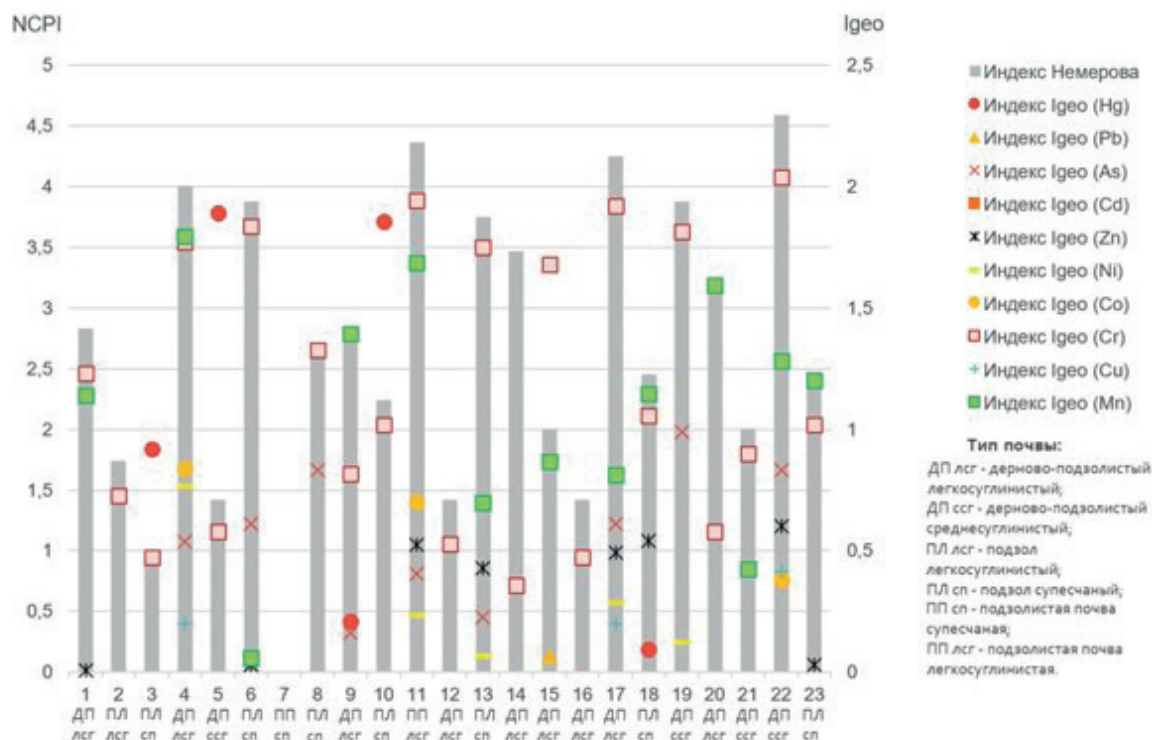


Рис. 4. Индексы геоаккумуляции и NCPI различных типов почв Ленинградской области

Fig. 4. Geoaccumulation and NCPI indices of various soil types in the Leningrad region

В проведенном нами исследовании выделяются легко- и среднесуглинистые почвы, где облигатные микроэлементы (хром, кобальт, никель, цинк, медь, марганец) имеют концентрации превышающие фоновые значения.

Результаты исследования не выявили четкой приуроченности участков с загрязненными почвами к самим источникам загрязнения. Накопление тяжелых металлов в исследуемых почвах связано, на наш взгляд, с биогеохимическими процессами, происходящими в почвенных горизонтах подзолистых почв и описанными в работе Сысо А.И. [2007]. Присутствие в профилях исследованных почв новообразований железа в виде пленок, конкреций может быть природным фактором обогащения почв мышьяком, свинцом, цинком [Нечаева, 1992; Сысо, 2007]. Вероятно, с интенсив-

ным осаждением и аккумуляцией соединений железа в верхних горизонтах оглеенных почв (в слабокислых условиях) также связано накопление Ni, Co, Cr, Cu и других элементов [Водяницкий, 2013].

Таким образом, повышенное относительно фона содержание в почвах Cr, Ni, Co, As, Zn мы не считаем следствием антропогенного загрязнения почв. Накоплению указанных металлов в верхних горизонтах способствуют протекающие в почвах геохимические и биогеохимические процессы.

Выводы

На основании проведенных геохимических исследований выявлено, что почвы Ленинградской области характеризуются кислой реакцией среды и повышенным относительно фоновых значений содержанием

ряда тяжелых металлов и мышьяка. Элементы по их абсолютному содержанию в исследуемых почвах можно расположить в следующий ряд: $Mn > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > Co > As > Cd > Hg$.

Почвы вблизи источников загрязнений (Кингисеппский и Лужский р-ны), характеризуются повышенным содержанием ртути и кадмия. В почвах участков, расположенных на расстоянии свыше 2 км от источников загрязнения, повышено содержание цинка и хрома, что связано с изменчивостью ветрового поля. Содержание в почвах Pb, As, Ni, Co, Cu, Mn не зависит от приближенности участка к источнику загрязнения.

Расчет единичных индексов геоаккумуляции, учитывающих содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах и их фоновые

значения, позволил установить различные уровни загрязнения почв исследованных участков отдельными поллютантами. Среди загрязнителей доминирует хром, уровни загрязнения которым варьируют от слабого до достаточно сильного.

На основании рассчитанных значений суммарного показателя загрязнения NCPI установлено, что почвы участков 4, 6, 11, 13, 14, 19, 20, 22 характеризуются сильным загрязнением. Наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения вносит хром.

Повышенное относительно фона содержание в почвах Cr, Ni, Co, As, Pb является результатом происходящих в почвенных горизонтах природных геохимических процессов и определяется составом материнских горных пород.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

Авдощенко В.Г., Климова А.В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петропавловска-Камчатского, Камчатский край // Вестник КамчатГТУ. 2022. №61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zagryazneniya-tyazhelymi-metallami-pochv-goroda-petropavlovskaya-kamchatskogo-kamchatskiy-kрай> (дата обращения: 02.03.2026).

Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.

Алексеев В.А., Добровольский В.В., Яншин А.Л. Цинк и кадмий в окружающей среде. Москва: Наука, 1992. 197 с.

Аллаярова Г.Р., Ларионова Т.К., Даукаев Р.А., Афонькина С.Р., Аухадиева Э.А., Курилов М.В., Мусабиров Д.Э., Зеленковская Е.Е., Фазлыева А.С. Аккумуляция тяжёлых металлов в системе «почва – растение» на территории с развитой горнорудной промышленностью // Гигиена и санитария. 2021. Т. 100, № 11. С. 1203–1208. doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1203-1208

Бабошкина С.В., Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Трошкова И.А. Экологическая оценка уровня загрязнения почв и субстратов горнопромышленных ландшафтов Северо-Западного Алтая приоритетными тяжелыми металлами // Сибирский экологический журнал. 2025. Т. 32, № 6. С. 985–996. doi: 10.15372/SEJ20250612

Баенгуев Б.А., Белоголова Г.А., Чупарина Е.В., Просекин С.Н., Долгих П.Г., Пастухов М.В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 8. С. 205–214. doi: 10.18799/24131830/2022/8/3670

Байдина Н.Л. Содержание и формы ртути в почвах южной части западной Сибири // Агрохимия. 2001. № 11. С. 59–63.

Безносиков В.А., Ладынин Е.Д., Низовцев А.Н. Пространственное и профильное распределение ртути в почвах естественных ландшафтов. Вестник Санкт-Петербургского университета. 2013. Серия 3. Вып. 1. С. 94–101.

Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 259 с.

Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность // Почвоведение. 2013. № 7. С. 872–881.

Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. Москва: Высш. шк., 1988. 327 с.

Горький А.В. Химическое загрязнение почво-грунтов Санкт-Петербурга // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в 2006 году. СПб.: Сезам-Принт, 2007. 349 с.

ГОСТ 17.4.3.01–2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб». Москва, Станандартинформ, 2018. 8 с.

ГОСТ 26213–2021 «Почвы. Методы определения органического вещества». Москва, Российский институт станандартизации, 2021. 11 с.

ГОСТ 26483–85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО». Москва: Изд-во стандартов, 1985. 4 с.

ГОСТ Р 58596–2019 «Почвы. Методы определения общего азота». Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2019. 11 с.

Гришина Л.А., Орлов Д.С. Система показателей гумусного состояния почв. М.: Наука, 1978. С. 42–47.

Добровольский Г.В. Биосферные циклы тяжёлых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. 1997. Т. 7. С. 431–441.

Елсукова Е.Ю., Недбаев 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.

Ермаков В.В., Ковальский Ю.В. Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии (в двух томах). 2015. Т. 1. С. 8–12.

Жукова А.Д. Оценка экологического состояния почв на территории импактного влияния производства фосфорсодержащих минеральных удобрений (на примере ОАО «Воскресенские минеральные удобрения»): Дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2017. 169 с.

Зырин Н.Г., Садовникова Л.К. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. Москва: Изд-во МГУ, 1985. 206 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.

Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.

Ковда В.А., Розанов Б.Г. Почвоведение. Ч. 2. Типы почв, их география и использование. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.

Матинян Я.Н., Рейманн К., Бахматова К.А., Русаков А.В. Фоновое содержание тяжелых металлов и мышьяка в пахотных почвах Северо-Запада России (по материалам международного геохимического атласа) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2007. № 3. С. 123–134.

Национальный Атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель. 2011. 632 с.

Нечаева Е.Г. Геохимические закономерности торфообразования на Западно-Сибирской равнине // География и природные ресурсы. 1992. № 3. С. 21–29.

Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение. Москва: Пролетар. светоч, 1997. 290 с.

Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Лисенков С.А., Власов С.В., Сомов В.В. Загрязнение почв севера Западной Сибири нефтяными и полициклическими ароматическими углеводородами: распределение и оценка экологического риска // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1442–1460. doi: 10.31857/S0032180X22110107

Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. Москва: Высшая школа, 2005. 558 с.

Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Сидорова Е.В., Корнеев Ю.Н. Тяжёлые металлы и мышьяк в пищевой продукции района размещения промышленных предприятий и атомной электростанции // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102, № 1. С. 70–76. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-70-76

ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой». Москва, Центр Исследования и Контроля Воды, 2005. 31 с.

Побилат А.Е., Волошин Е.И. Кадмий в почвах и растениях Средней Сибири // Микроэлементы в медицине. 2017а. Т. 18, № 3. С. 36–41. doi: 10.19112/2413-6174-2017-18-3-36-41

Побилат А.Е., Волошин Е.И. Особенности содержания свинца в почвах и

растениях Средней Сибири // Микроэлементы в медицине. 2017б. Т. 18, № 4. С. 36–41. doi: 10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40

Побилат А.Е., Волошин Е.И. Мониторинг микроэлементов в почвах (обзор) // Микроэлементы в медицине. 2021. Т. 22, № 4. С. 14–26. doi: 10.19112/2413-6174-2021-22-4-14-26

Побилат А.Е., Волошин Е.И. Экологическая оценка содержания ртути в агроценозах Средней Сибири // Микроэлементы в медицине. 2019. Т. 20, № 4. С. 57–62. doi: 10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62

Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: ВГУ, 2003. 368 с.

СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Москва, 2021. 988 с.

Сапрыкин Ф.Я. Геохимия почв и охрана природы. Л.: Недра, 1984. 231 с.

Сергеев А.П., Липатникова Т.Я., Волошин Е.И. Тяжелые металлы в почвах Минусинской лесостепной зоны Красноярского края // Плодородие. 2017. № 3. С. 28–31.

Симонова Ю.В., Кивович Д.П., Русаков А.В., Гостинцева Е.В. Фоновое содержание тяжелых металлов и металлоидов для оценки загрязнения почв при проведении инженерноэкологических изысканий и мониторинга (на примере альфегумусовых почв Лужского района Ленинградской области) // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2025. Т. 70, № 3. С. 493–520. doi: 10.21638/spbu07.2025.303

Сорокин Н.Д., Королева Е.Б., Лосева Е.В., Осинцева Н.В. Пособие по вопросам изучения загрязненных земель и их санации. СПб.: ООО «Ай-Пи», 2012. 119 с.

Стахурлова Л.Д., Бахтин А.М. Микроэлементный состав дерново-подзолистых почв под различными биоценозами // Экологический вестник Северного Кавказа. 2020. Т. 16, № 4. С. 49–53.

Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 227 с.

Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В., Ахметова Г.В., Новиков С.Г., Ткаченко Ю.Н., Солодовников А.Н. Тяжелые металлы в почвах Карелии: монография. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.

Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies // Soil. 2015. Vol. 1, no. 1. P. 35–46. doi: 10.5194/soil-1-35-2015

Hu B.F., Jia X.L., Hu J., Xu D.Y., Xia F., Li Y. Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. Vol. 14. P. 1042. doi: 10.3390/ijerph14091042

Liu Y.R., Yu H.M., Sun Y., Chen J. Novel assessment method of heavy metal pollution in

surface water: A case study of Yangping River in Lingbao City, China // *Environ Eng Res.* 2017. Vol. 22. Iss. 1. P. 31–39. doi: 10.4491/eer.2016.015

Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // *Geojournal.* 1969. Vol. 2. P. 108–118.

Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – A systematic review // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020. Vol. 17, no. 3099. P. 1–22. doi: 10.3390/ijerph17093099

Tyopine A.A., Jayeoye T.J., Okoye Ch. O.B. Geoaccumulation assessment of heavy metal pollution in Ikwo soils, eastern Nigeria // *Environmental Monitoring Assess.* 2018. Vol. 190. Article number 58. doi: 10.1007/s10661-017-6423-3

References

Avdoshchenko V.G., Klimova A.V. Ocenka zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv goroda Petropavlovsk-Kamchatskogo, Kamchatskiy kraj [Assessment of heavy metal pollution of the soils of Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka krai] // *Vestnik KamchaTGTU [Bulletin of KamchaTSTU]*. 2022. №61. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-zagryazneniya-tyazhelymi-metallami-pochv-goroda-petropavlovsk-kamchatskogo-kamchatskiy-kray> (accessed: 02.03.2026).

Alekseev Yu.V. Tyazhelye metally v agrolandshafte [Heavy metals in the agricultural landscape]. SPb: PIYAF RAN, 2008. 216 p. (in Russian).

Alekseenko V.A., Dobrovol'skiy V.V., Yanshin A.L. Cink i kadmij v okruzhayushchej srede [Zinc and Cadmium in the Environment]. Moskva: Nauka, 1992. 197 p. (in Russian).

Allayarova G.R., Larionova T.K., Daukaev R.A., Afonkina S.R., Aukhadiyeva E.A., Kurilov M.V., Musabirov D.E., Zelenkovskaya E.E., Fazlyyeva A.S. Akkumulyatsiya tyazhyolykh metallov v sisteme «pochva – rastenie» na territorii s razvitoj gornorudnoj promyshlennost'yu [Accumulation of heavy metals in the soil-plant system in an area with a developed mining industry] // *Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]*. 2021. Vol. 100, no. 11. P. 1203–1208. (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-11-1203-1208

Baboshkina S.V., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A., Troshkova I.A. Ecological assessment of the contamination level of soils and substrates in the mining landscapes of Northwestern Altai with key heavy metals // *Contemporary Problems of Ecology.* 2025. Vol. 18, no. 6. P. 921–929. doi: 10.15372/SEJ20250612

Baenguev B.A., Belogolova G.A., Chuparina E.V., Prosekin S.N., Dolgikh P.G., Pastukhov M.V. Raspredelenie soderzhaniya svinca i formy ego soedinenij v tekhnogennoj pochve g. Svirska (Yuzhnoe Pribajkal'e) [istribution of lead content and forms of its compounds in the technogenic soil of Svirsk (Southern Baikal Region)] // *Izvestiya Tomskogo politekhnichesk-*

ogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of Tomsk Polytechnic University]. 2022. Vol. 333, no. 8. P. 205–214. (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2022/8/3670

Bajdina N.L. Soderzhanie i formy rtuti v pochvakh yuzhnoj chasti zapadnoj Sibiri [Mercury content and forms in the soils of southern Western Siberia] // Agrokimiya [Agric. Chem. J.]. 2001. № 11. P. 59–63. (in Russian).

Beznosikov V.A., Ladynin E.D., Nizovcev A.N. Prostranstvennoe i profil'noe raspredelenie rtuti v pochvakh estestvennykh landshaftov [Spatial and profile distribution of mercury in soils of natural landscapes] // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta [Sankt-Peterburgskogo University Bull.]. 2013. Vol. 3, no. 1. P. 94–101. (in Russian).

Vinogradov A.P. Geokhimiya redkih i rasseyannykh himicheskikh ehlementov v pochvakh [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1957. 259 p. (in Russian).

Vodyanickij Yu.N. Zagryaznenie pochv tyazhelymi metallami i metalloidami i ikh ehkologicheskaya opasnost' [Soil contamination by heavy metals and metalloids and their environmental hazards] // Pochvovedenie [Eur. Soil Sci. J.]. 2013. No. 7. P. 872–881. (in Russian).

Glazovskaya M.A. Geokhimiya prirodnykh i tehnogennykh landshaftov SSSR [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1988. 327 p. (in Russian).

Gorky A.V. Himicheskoe zagryaznenie pochvo-gruntov Sankt-Peterburga [Chemical contamination of the soil and subsoil in St. Petersburg] // Ohrana okruzhayushchej sredy, prirodopol'zovanie i obespechenie ehkologicheskoy bezopasnosti v 2006 godu [Environmental Protection, Natural Resources Management, and Ensuring Environmental Safety in 2006]. St. Petersburg: Sezam-Print, 2007. 349 p. (in Russian).

GOST 17.4.3.01–2017 Ohrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Nature Protection. Soils. General Requirements for Sampling]. Moscow, Standartinform, 2018. 8 p. (in Russian).

GOST 26213–2021 «Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva» [Soils. Methods for determination of organic matter]. Moscow, Russian Institute of Standardization, 2021. 11 p. (in Russian).

GOST 26483–85 «Pochvy. Prigotovlenie solevoj vytyazhki i opredelenie ee pH po metodu CINAО» [Soils. Preparations of salt extract and determination of its pH by CINAО method]. Moscow: Publishing House of Standards, 1985. 4 p. (in Russian).

GOST R 58596–2019 «Pochvy. Metody opredeleniya obshchego azota» [Soils. Methods for determination of total nitrogen]. Moscow: FSUE «Standartinform», 2019. 11 p. (in Russian).

Grishina L.A., Orlov D.S. Sistema pokazatelej gumusnogo sostoyaniya pochv [The system of indicators of the humus state of soils]. M.: Nauka, 1978. P. 42–47. (in Russian).

Dobrovolsky G.V. Biosfernye cikly tyazhyolykh metallov i regul'yatornaya rol' pochvy [Biosphere cycles of heavy metals and the regulatory role of soil] // Pochvovedenie [Soil Science]. 1997. Vol. 7. P. 431–441. (in Russian).

Elsukova E.Yu., Nedbaev I.S., Kuz'mina D.S. Zagryaznenie pochv v zone vozdeystviya proizvodstva fosfornykh udobrenij [Soil contamination in the area affected by the production of phosphorus fertilizers] // Vestnik SPBGU. Nauki o Zemle [SPBGU Bull. Earth Sciences]. 2022. Vol. 67, no. 4. P. 652–674. (in Russian).

Ermakov V.V., Koval'skij Yu.V. Tekhnogenez i biogeokhimicheskaya ehvolyuciya taksonov biosfery [Technogenesis and biogeochemical evolution of biosphere taxons] // Biogeokhimiya tekhnogeneza i sovremennye problemy geokhimicheskoy ehkologii (v dvukh tomakh) [Biogeochemistry of Technogenesis and Modern Problems of Geochemical Ecology] (in two volumes). 2015. Vol. 1. P. 8–12. (in Russian).

Zhukova A.D. Ocenka ehkologicheskogo sostoyaniya pochv na territorii impaktnogo vliyaniya proizvodstva fosforsoderzhashchikh mineral'nykh udobrenij (na primere OAO «Voskresenskie mineral'nye udobreniya») [Assessment of the environmental condition of soils in the impact zone of phosphor-containing mineral fertilizers (on the example of Voskresenskie mineral fertilizers OJSC)]: PhD (Cand. of Biol.). Moscow, 2017. 169 p. (in Russian).

Zyrin N.G., Sadovnikov L.K. Khimiya tyazhelykh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvakh [Chemistry of heavy metals, arsenic, and molybdenum in soils]. Moscow: MGU, 1985. 206 p. (in Russian).

Kabata-Pendias A., Pendias X. Mikroehlementy v pochvakh i rasteniyakh [Trace elements in soils and plants]: Transl. from English. Moscow: Mir, 1989. 439 p. (in Russian).

Kovda V.A. Biogeokhimiya pochvennogo pokrova [Biogeochemistry of the soil cover]. Moscow: Nauka, 1985. 263 p. (in Russian).

Kovda V.A., Rozanov B.G. Pochvovedenie [Soil Science] Ch. 2. Tipy pochv, ikh geografiya i ispol'zovanie [Types of soils, their geography and use]. Moscow: Vyssh. shk., 1988. 368 p. (in Russian).

Matinyan, N.N., Rejmann, K., Bahmatova, K.A., Rusakov, A.V. Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov i mysh'yaka v pahotnykh pochvakh Severo-Zapada Rossii [Background content of heavy metals and arsenic in arable soils of North-West Russia] (based on materials from the international geochemical atlas). Biological Communications. 2007. Vol. 3. P. 123–134. (in Russian).

Nacional'nyj Atlas pochv Rossijskoj Federacii [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. M.: Astrel'. 2011. 632 p. (in Russian).

Nechaeva E.G. Geokhimicheskie zakonomernosti torfoobrazovaniya na Zapadno-Sibirskoj ravnine [Geochemical patterns of peat formation in the West Siberian Plain] // Geografiya i prirodnye resursy [Geography and nature resources]. 1992. no. 3. P. 21–29. (in Russian).

Ovcharenko M. M. Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie-udobrenie [Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system]. Moscow: Proletar. svetoch, 1997. 290 p. (in Russian).

Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Lisenkov S.A., Vlasov S.V., Somov V.V. Zagryaznenie pochv severa Zapadnoj Sibiri neftyanymi i policiklicheskimi aromaticeskimi uglevodorodami: raspredelenie i ocenka ehkologicheskogo riska [Soil pollution in the north of Western Siberia by oil and polycyclic aromatic hydrocarbons: distribution and assessment of environmental risk] // Pochvovedenie [Eur. Soil Sci. J.]. 2022. No. 11. P. 1442–1460. (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22110107

Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I. Khimiya pochv [Soil chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher school], 2005. 558 p. (in Russian).

Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Sidorova E.V., Korneev Yu.N. Tyazhyolye metally i mysh'yak v pishchevoj produkcii rajona razmeshcheniya promyshlennykh predpriyatij i atomnoj ehlektrostantsii [Heavy metals and arsenic in food products in the area of industrial enterprises and a nuclear power plant] // Gigiena i sanitariya [Hyg. and sanit. J.]. 2023. Vol. 102, no. 1. P. 70–76. (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-70–76

PND F 16.1:2.3:3.11-98 «Kolichestvennyj khimicheskij analiz pochv. Metodika vypolneniya izmerenij sodержaniya metallov v tverdykh ob'ektakh metodom spektrometrii s indukativno-svyazannoj plazmoj» [Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring metal content in solid objects using inductively coupled plasma spectrometry]. Moscow, Water Research and Control Center, 2005. 31 p. (in Russian).

Pobilat A.E., Voloshin E.I. Kadmij v pochvakh i rasteniyakh Srednej Sibiri [Cadmium in the soils and plants of Central Siberia] // Mikroehlementy v medicine [Trace el. in med. J.]. 2017a. Vol. 18, no. 3. P. 36–41. (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2017-18-3-36-41

Pobilat A.E., Voloshin E.I. Osobennosti sodержaniya svinca v pochvakh i rasteniyakh Srednej Sibiri [Features of Lead Content in Soils and Plants in Central Siberia] // Mikroehlementy v medicine [Trace el. in med. J.]. 2017b. Vol. 18, no. 4. P. 36–41. (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40

Pobilat A.E., Voloshin E.I. Monitoring mikroehlementov v pochvah (obzor) [Monitoring of microelements in soils (overview)] // Mikroehlementy v medicine [Trace el. in med. J.]. 2021. Vol. 22, no. 4. P. 14–26. (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2021-22-4-14-26

Pobilat A.E., Voloshin E.I. Ehkologicheskaya ocenka sodержaniya rtuti v agrocenozakh Srednej Sibiri [Ecological Assessment of Mercury Content in Agroecosystems of Central Siberia] // Mikroehlementy v medicine [Trace el. in med. J.]. 2019. Vol. 20, no. 4. P. 57–62. (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2019-20-4-57-62

Protasova N.A., Shcherbakov A.P. Mikroehlementy v chernozemakh i serykh lesnykh pochvakh Central'nogo Chernozem'ya [Micronutrients in Chernozems and Gray Forest Soils of the Central Chernozem Region]. Voronezh: VGU, 2003. 368 p. (in Russian).

Sanitary Rules and Normatives 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans». Moscow, 2021. 988 p. (in Russian).

Saprykin F.Ya. Geokhimiya pochv i okhrana prirody [Soil geochemistry and nature conservation]. Leningad: Nedra, 1984. 231 p. (in Russian).

Sergeev A.P., Lipatnikova T.Ya., Voloshin E.I. Tyazhelye metally v pochvakh Minusinskoj lesostepnoj zony Krasnoyarskogo kraja [Heavy metals in the soils of the Minusinsk forest-steppe zone of Krasnoyarsk Krai] // Plodorodie [Fertility J.]. 2017. Vol. 3. P. 28–31. (in Russian).

Simonova Yu.V., Kivovich D.P., Rusakov A.V., Gostinceva E.V. Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov i metalloidov dlya ocenki zagryazneniya pochv pri provedenii inzhenernoekologicheskikh izyskanij i monitoringa (na primere al'fegumusovykh pochv Luzhskogo rajona Leningradskoj oblasti) [Background content of heavy metals and metalloids for assessing soil contamination during engineering and environmental surveys and monitoring (using the example of alfahumus soils in the Luga District of the Leningrad Region)] // Vestnik SPBGU. Nauki o Zemle [Bulletin of SPBGU. Earth Sciences]. 2025. Vol. 70, no. 3. P. 493–520. (in Russian). doi: 10.21638/spbu07.2025.303

Sorokin N.D., Koroleva E.B., Loseva E.V., Osinceva N.V. Posobie po voprosam izucheniya zagryaznennykh zemel' i ikh sanacii [Guidelines for studying and rehabilitating contaminated land]. SPb.: ООО «Аж-ПИ», 2012. 119 p. (in Russian).

Stakhurlova L.D., Bakhtin A.M. Mikroehlementnyj sostav dernovo-podzolistykh pochv pod razlichnymi biocenoзами [Microelement composition of sod-podzolic soils under various biotopes] // Ekhologicheskij vestnik Severnogo Kavkaza [Ecol. Bull. of the N. Caucasus]. 2020. Vol. 16, no. 4. P. 49–53. (in Russian).

Syso A.I. Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh ehlementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoj Sibiri [Patterns of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk: SO RAN, 2007. 227 p. (in Russian).

Fedorec N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V., Akhmetova G.V., Novikov S.G., Tkachenko Yu.N., Solodovnikov A.N. Tyazhelye metally v pochvakh Karelii [Heavy metals in Karelian soils]: monografiya. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2015. 222 p. (in Russian).

Brevik E.C., Sauer T.J. The past, present, and future of soils and human health studies // Soil. 2015. Vol. 1, no. 1. P. 35–46. doi: 10.5194/soil-1-35-2015

Hu B.F., Jia X.L., Hu J., Xu D.Y., Xia F., Li Y. Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze River Delta, China // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. Vol. 14. P. 1042. doi: 10.3390/ijerph14091042

Liu Y.R., Yu H.M., Sun Y., Chen J. Novel assessment method of heavy metal pollution in

surface water: A case study of Yangping River in Lingbao City, China // Environ Eng Res. 2017. Vol. 22. Iss. 1. P. 31–39. doi: 10.4491/eer.2016.015

Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // Geojournal. 1969. Vol. 2. P. 108–118.

Tong S., Li H., Wang L., Tudi M., Yang L. Concentration, spatial distribution, contamination degree and human health risk assessment of heavy metals in urban soils across China between 2003 and 2019 – A systematic review // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2020. Vol. 17, no. 3099. P. 1–22. doi: 10.3390/ijerph17093099

Tyopine A.A., Jayeoye T.J., Okoye Ch. O.B. Geoaccumulation assessment of heavy metal pollution in Ikwo soils, eastern Nigeria // Environmental Monitoring Assess. 2018. Vol. 190. Article number 58. doi: 10.1007/s10661-017-6423-3

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF HEAVY METALS CONTENT IN SURFACE LAYER OF TEXTURALLY DIFFERENTIATED AND ALPHEGUMUS SOILS OF LENINGRAD REGION

I.N. Likhodumova¹, I.Yu. Bagaychuk ¹, M.V. Panina², S.G. Levina², A.V. Malaev²,
N.V. Kutyasheva¹, A.A. Dorokhova¹

¹LLC Ural Integrated Laboratory of Industrial and Civil Engineering (LLC Uralstroylab), Chelyabinsk

²South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk

E-mail: lichodumov@mail.ru, info@uralstroylab.ru, panina80@mail.ru, malaevav@cspu.ru, levinasg@cspu.ru,
knatali1706@mail.ru, arina_chelyadinova@mail.ru

The article presents research result of the content of heavy metals (TM) in the surface layer of texturally differentiated (podzolic, sod-podzolic) and alphegumus (podzols) soils of the Leningrad Region. 23 sites with different biocenoses were studied, selected taking into account the distance from the sources of pollution. The analysis of soil agrochemical properties and total content of Hg, Pb, As, Cd, Zn, Ni, Co, Cu, Cr, Mn was carried out. Using the geoaccumulation indices (Igeo) and Nemerov (NCPI) indices, the pollution levels were established. It was revealed that, despite the absence of critical contamination with most heavy metals, an increased content of Cr, Hg, As and Ni is recorded in soils. The dominant pollutant is chromium, which accumulates in loamy varieties of soils. It has been shown that the accumulation of a number of metals is associated not only with anthropogenic impact, but also with natural biogeochemical processes.

Keywords: heavy metals; soil pollution; podzolic soils; Leningrad region; geoaccumulation index (Igeo).

Received: March 5, 2026. Accepted: April 30, 2026

Сведения об авторах

Лиходумова Ирина Николаевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник ООО Уральской комплексной лаборатории промышленного и гражданского строительства. Россия, 454014, г. Челябинск, ул. Ворошилова, д. 2В. ORCID: 0000-0002-8652-6163. E-mail: lichodumov@mail.ru.

Багайчук Илья Юрьевич – директор ООО Уральской комплексной лаборатории промышленного и гражданского строительства. Россия, 454014, г. Челябинск, ул. Ворошилова, д. 2В. E-mail: info@uralstroylab.ru.

Панина Мария Викторовна – кандидат географических наук, доцент кафедры географии, биологии и химии Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. Россия, 454074, г. Челябинск, ул. Бажова, д. 48. ORCID: 0000-0001-5069-0175. E-mail: panina80@mail.ru.

Левина Серафима Георгиевна – доктор биологических наук, кандидат химических наук, профессор кафедры географии, биологии и химии Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. Россия, 454074, г. Челябинск, ул. Бажова, д. 48. ORCID: 0000-0002-3872-5707. E-mail: levinasg@cspu.ru.

Малаев Александр Владимирович – кандидат географических наук, доцент кафедры географии, биологии и химии Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета. Россия, 454074, г. Челябинск, ул. Бажова, д. 48. ORCID: 0000-0001-9192-2817. E-mail: malaevav@cspu.ru.

Кутяшева Наталья Владимировна – кандидат химических наук, научный сотрудник ООО Уральской комплексной лаборатории промышленного и гражданского строительства. Россия, 454014, г. Челябинск, ул. Ворошилова, д. 2В. ORCID: 0000-0001-7194-7785. E-mail: knatali1706@mail.ru.

Дорохова Арина Андреевна – химик химико-аналитического отдела ООО Уральской комплексной лаборатории промышленного и гражданского строительства. Россия, 454014, г. Челябинск, ул. Ворошилова, д. 2В. E-mail: arina_chelyadinova@mail.ru.

Information about the authors

Likhodumova Irina Nikolaevna – PhD in Biology, researcher of the Ural Complex Laboratory of Industrial and Civil Construction LLC. 2V, Voroshilova Str., 454014 Chelyabinsk, Russia. ORCID: 0000-0002-8652-6163. E-mail: lichodumov@mail.ru.

Bagaychuk Ilya Yurievich – Director of the Ural Complex Laboratory of Industrial and Civil Construction LLC. 2V, Voroshilova Str., 454014 Chelyabinsk, Russia. E-mail: info@uralstroylab.ru.

Panina Maria Viktorovna – PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Geography, Biology and Chemistry of the South Ural State Humanitarian Pedagogical University. 48, Bazhova Str., 454074 Chelyabinsk, Russia. ORCID: 0000-0001-5069-0175. E-mail: panina80@mail.ru.

Levina Serafima Georgievna – Dr Sc. in Biology, PhD in Chemistry, Professor at the Department of Geography, Biology and Chemistry of the South Ural State Humanitarian Pedagogical University. 48, Bazhova Str., 454074 Chelyabinsk, Russia. ORCID: 0000-0002-3872-5707. E-mail: levinasg@cspu.ru.

Malayev Alexander Vladimirovich – PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Geography, Biology and Chemistry of the South Ural State Humanitarian and Pedagogical University. 48, Bazhova Str., 454074 Chelyabinsk, Russia. ORCID: 0000-0001-9192-2817. E-mail: malaevav@cspu.ru.

Kutyasheva Natalia Vladimirovna – PhD in Chemistry, researcher of the Ural Complex Laboratory of Industrial and Civil Construction LLC. 2V, Voroshilova Str., 454014 Chelyabinsk, Russia. ORCID: 0000-0001-7194-7785. E-mail: knatali1706@mail.ru.

Dorokhova Arina Andreevna – Chemist of the chemical and analytical department of the Ural complex laboratory of industrial and civil construction LLC. 2V, Voroshilova Str., 454014 Chelyabinsk, Russia. E-mail: arina_chelyadinova@mail.ru.