

Структура и функционирование региональных геосистем Structure and Functioning of Regional Geosystems

УДК 631.416.9+574.2
DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1
EDN CJEZOP

Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и растениях степной и лесостепной зон Челябинской области

Белов М.А., Беккер М.Р., Синдирева А.В., Шигабаева Г.Н.

Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень ул. Володарского, 6
m.blvv@yandex.ru, bekrer125@mail.ru, sindireva72@mail.ru, g.n.shigabaeva@utmn.ru

Аннотация. Исследование почв на содержание свинца, меди, хрома, кадмия, цинка и марганца степной и лесостепной зон Челябинской области выявило умеренную антропогенную нагрузку и локальные риски загрязнения поллютантами. В большинстве проб почв превышения предельно допустимых концентраций кислоторастворимых и подвижных форм тяжелых металлов не обнаружено, что свидетельствует об отсутствии критической угрозы накопления их токсических концентраций в агроэкосистемах. Напротив, во всех почвах выявлен дефицит подвижных форм цинка, меди и марганца, что указывает на нарушение баланса питательных веществ и необходимость в корректировке агрохимических мероприятий. В растениях агроценозов Увельского, Еткульского и Троицкого районов, установлены значительные превышения ПДК по хрому. В статье приведены коэффициенты биологического поглощения и накопления, согласно которым содержание элементов в растениях зависит не только от концентрации элементов в конкретном типе почв, но и от физиологических особенностей определенного вида растения.

Ключевые слова: чернозем, пшеница, подсолнечник, тяжелые металлы, хром, свинец, медь, марганец, цинк, Челябинская область

Для цитирования: Белов М.А., Беккер М.Р., Синдирева А.В., Шигабаева Г.Н. 2025. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и растениях степной и лесостепной зон Челябинской области. Региональные геосистемы, 49(4): 651–668. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1 EDN: CJEZOP

Assessment of Heavy Metal Content in Soils and Plants Using the Example of Steppe and Forest-Steppe Zones of the Chelyabinsk Region

Maxim A. Belov, Maria R. Becker, Anna V. Sindireva, Gulnara N. Shigabayeva

Tyumen State University,
6 Volodarsky St., Tyumen, 625003, Russia
m.blvv@yandex.ru, bekrer125@mail.ru, sindireva72@mail.ru, g.n.shigabaeva@utmn.ru

Abstract. A study of soils for lead, copper, chromium, cadmium, zinc, and manganese in the steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk Region revealed moderate anthropogenic stress and local risks of pollutant contamination. In most of the soil samples, acid-soluble and labile forms of heavy metals did not exceed the maximum permissible concentrations, which shows that there is no critical threat of accumulation of their toxic concentrations in agroecosystems. On the contrary, the labile forms of zinc, copper and manganese proved to be deficient in all the soils, indicating a violation of the nutrient balance and the need for corrective agrochemical measures. In the agrocenoses of Uvelsky, Etkulsky, and Troitsky districts, plants exhibit significant exceedance of the maximum permissible chromium

© Белов М.А., Беккер М.Р., Синдирева А.В., Шигабаева Г.Н., 2025

concentration. The article presents the coefficients of biological absorption and accumulation coefficients, according to which the content of elements in plants depends not only on the content of elements in a particular type of soil, but also on the physiological characteristics of a particular type of plant.

Keywords: chernozem, wheat, sunflower, heavy metals, chromium, lead, copper, manganese, zinc, Chelyabinsk region

For citation: Belov M.A., Becker M.R., Sindireva A.V., Shigabayeva G.N. 2025. Assessment of Heavy Metal Content in Soils and Plants Using the Example of Steppe and Forest-Steppe Zones of the Chelyabinsk Region. *Regional Geosystems*, 49(4): 651–668 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1 EDN: CJEZOP

Введение

Почвенный покров Челябинской области характеризуется чрезвычайной пестротой. Он представлен сложными сочетаниями различных типов, подтипов, видов и разновидностей почв, преимущественно черноземов [Национальный атлас почв..., 2011]. Они составляют 64 % в структуре пашни, серые лесные – 9,8 %, солонцовые комплексы – 13,7 %, остальную площадь занимают другие типы почв [Зыбалов, Попкова, 2018]. Среди выращиваемых культур одними из наиболее распространенных являются зерновые и зернобобовые культуры. Согласно данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Челябинской области, урожайность в 2023 г. зерновых и зернобобовых культур составила 15, 9 ц/га, а валовый сбор культур 21 млн. ц. [Посевные площади ..., 2025].

При значительных объемах производства сельскохозяйственной продукции наблюдается существенный вынос питательных веществ, что в долгосрочной перспективе может негативно сказаться на агроэкоценозах. Одними из наиболее очевидных последствий этого процесса являются снижение плодородия почв, их деградация, дефицит микроэлементов и накопление соединений тяжелых металлов. Кроме того, необходимо учитывать влияние промышленных предприятий и автодорог, которые дополнительно усугубляют состояние почв [Яхияев и др., 2011; Семенов и др., 2015; Побилат, Волошин, 2017; Nishito, Kambe, 2018].

Южный Урал является крупнейшим промышленным центром России с исторически сложившейся индустриальной базой. В течение очень длительного времени в этом регионе производится добыча и переработка полезных ископаемых, что приводит к трансформации природных ландшафтов [Пахомов, Душин, 2008; Калашников, 2014; Наумов, Красных, 2019]. В процессе добычи полезных ископаемых рудное сырье извлекается из земных недр. Химические элементы, которые ранее находились в устойчивых термодинамических равновесных состояниях, оказываются на поверхности Земли, где подвергаются окислению. В результате образуются их подвижные формы, которые начинают активно мигрировать по ландшафтам, вызывая латеральную дифференциацию. Переработка рудного сырья на металлургических предприятиях приводит к рассеиванию тяжелых металлов в виде аэрозольных выбросов, которые могут распространяться на значительные расстояния в различных химических соединениях [Водяницкий, 2009; Kim et al., 2015; Байкалова и др., 2017; Moynier et al., 2017; Васин, 2021]. Происходит накопление тяжелых металлов в почве, которые переходят по пищевым цепям «почва – растение – человек», «почва – растение – сельскохозяйственные животные – человек», загрязняют и снижают качество сельскохозяйственной продукции, оказывают отрицательное влияние на поступление в растения элементов питания [Leduc et al., 1994; Ермохин и др., 2002; Лукин, 2011; Mao et al., 2019; Иванищев, 2022].

Целью данной работы является оценка содержания тяжелых металлов в почвах и растениях на территории северной степи и южной лесостепи Челябинской области.

Объекты и методы исследования

Пробы отобраны в пределах Челябинской области в период созревания растениеводческой продукции, а именно в августе и сентябре 2023–2024 гг.

На территории Чесменского (Ч-Ch), Троицкого (Т), Пластовского (П-Р), Увельского (У-U), Еманжелинского (ЕМ-Em) и Еткульского (Е) районов с 48 площадок отобрано 96 проб почв и растений, среди которых злаковые (пшеница), гречишные (гречиха) и масличные (подсолнечник). Почвы представлены черноземами обыкновенными и черноземами выщелоченными [Казанцев, Матвеева, 2016]. Точки отбора проб изображены на рис. 1.

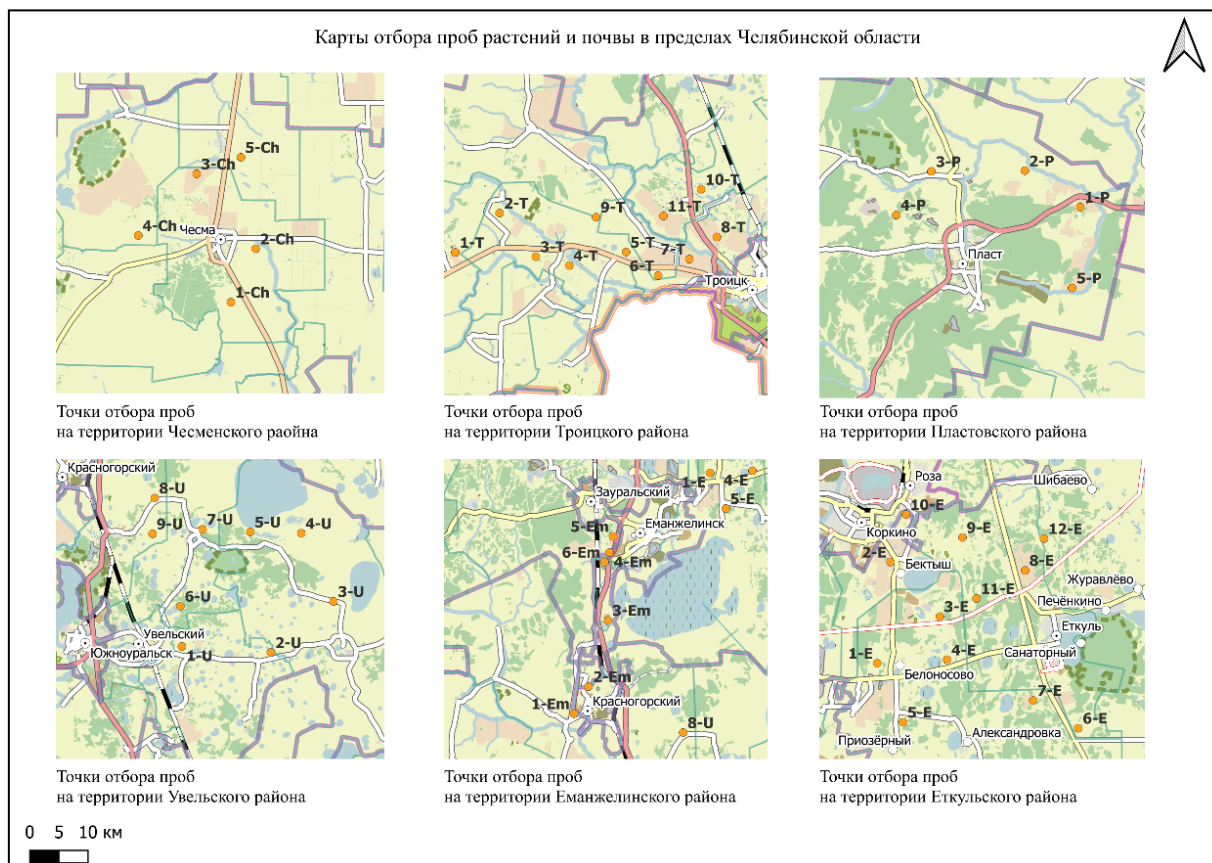


Рис. 1. Карта отбора проб растений в пределах Челябинской области

Fig. 1. Map of plant sampling within the Chelyabinsk region

Отбор проб растений проведен согласно ГОСТ Р 58588-2019 «Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа» [2019]. Объединенные пробы растений отобраны на тех же участках что и почвы. Почвы отбирались с пахотного горизонта сельскохозяйственных угодий с глубины 0–20 см в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83 «Охраны природы. Почвы. Общие требования к отбору проб» [1983]. Пробоподготовка почв и растений проведена согласно методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 «Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой» [1998].

Результаты были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» и Лаборатории экологических исследований Тюменского государственного университета.

Полученные данные обработаны с помощью стандартных статистических методов с использованием программного пакета *Microsoft Excel*. Также рассчитаны коэффициенты накопления и биопоглощения. Коэффициент накопления элементов в растениях расчи-

тывается как отношение концентрации элемента в растении к содержанию подвижных форм тяжелых металлов в почве, что позволяет оценить способность растения извлекать и накапливать определенные вещества из окружающей среды. Коэффициент биологического накопления, в свою очередь, определяется как отношение содержания элементов в растениях к содержанию кислоторастворимых форм тяжелых металлов, что помогает понять, насколько эффективно организм поглощает и удерживает тот или иной элемент [Минкина и др., 2011; Морозова, Лицуков, 2019].

Результаты и их обсуждение

Исследуемые районы Челябинской области различаются по уровню антропогенной нагрузки. Лидирующее место занимает Троицкий район. Основным источником поллютантов является «Троицкая ГРЭС», где используется экибастузский уголь, а также промышленные предприятия, такие как «Троицкий электромеханический завод», «Троицкий металлургический завод», «Троицкий тракторный завод» и др.

Следующее место занимает Пластовский район. Здесь техногенная нагрузка обусловлена золотодобычей (Пластовский рудник), добычей и обогащением каолина (ООО «Пласт-Рифей»), а также производством щебня и асфальта (ООО «Пластовское ДРСУ»).

Третье место занимает Увельский район. Основная нагрузка связана с добычей строительных материалов (карьеры щебня и песка), что вызывает пылевое загрязнение. Агропромышленный комплекс, включая перерабатывающие предприятия, добавляет умеренное воздействие.

На четвертом месте находится Еманжелинский район. После прекращения угледобычи основная нагрузка связана с историческим загрязнением: деградированные земли и отвалы пород. Также на территории района находятся такие промышленные предприятия, как ОАО «Агрофирма «Ариант», АО «Уральский агрегатно-механический завод», ООО «Завод противопожарного оборудования № 3» и ООО «Еткульский асфальтобетонный завод».

Пятое место занимает Еткульский район. Добыча известняка (пыль, шум) и агротехногенное воздействие (эрозия почв, стоки удобрений) формируют нагрузку ниже среднего. На его территории находится крупнейшее в России предприятие по добыче и переработке белого мрамора (АО «Коелгамрамор»), а также малые камнеобрабатывающие предприятия, такие как ООО ТК «ГП», ООО «Стандарт» и ООО «Челябгранит».

На последнем месте по уровню техногенной нагрузки находится Чесменский район. Для данной территории характерно доминирование агропромышленного сектора со средней интенсивностью (зерновые, животноводство) и отсутствие крупной промышленности вблизи населенных пунктов. Среди промышленных предприятий выделяются те, которые занимаются добычей медных руд (ООО «Восточный базис», входящее в состав Группы «Русская медная компания») и огнеупорной глины (ООО «Бускуль», часть Группы ПАО «ММК»).

Почвы степной зоны

Пробы отобраны в пределах двух муниципальных районов – Троицкий и Чесменский. На территории первого района отобрано 11 проб, почва представлена черноземом обыкновенным и выщелоченным. На территории второго района отобрано 5 проб чернозема обыкновенного. В пробах были проанализированы подвижные и кислоторастворимые формы Pb, Zn, Cu, Cr, Mn. Данные по содержанию подвижных форм представлены в табл. 1, по содержанию кислоторастворимых форм в табл. 2.

Таблица 1
Table 1

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах степной зоны Челябинской области
The content of labile forms of heavy metals in the soils of the steppe zone of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	pH	Содержание, мг/кг				
			Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Чесменский район	1	6,46	4,7±1,4	0,51±0,15	0,235±0,072	0,281±0,084	57±17
	2	6,73	4,3±1,3	0,54±0,16	0,312±0,093	0,185±0,057	66±20
	3	6,72	4,8±1,4	0,37±0,11	0,178±0,054	0,38±0,11	55±16
	4	6,72	5,0±1,5	0,37±0,11	0,150±0,045	0,57±0,17	62±19
	5	6,92	5,0±1,5	0,30±0,11	0,140±0,042	0,47±0,14	65±20
Троицкий район	1	6,93	5,2±1,6	1,03±0,31	0,217±0,066	1,14±0,34	42±13
	2	8,05	4,2±1,3	0,66±0,20	0,159±0,048	1,43±0,43	31,9±9,6
	3	7,58	3,3±1,0	0,68±0,20	0,121±0,036	1,09±0,33	36±11
	4	6,81	3,24±0,97	0,69±0,21	0,102±0,031	1,29±0,39	41±12
	5	8,27	2,75±0,83	0,60±0,18	0,064±0,018	1,52±0,46	36±11
	6	8,16	0,082±0,025	9,7±2,9	0,001	1,04±0,31	13,2±4,0
	7	8,05	0,001	7,4±2,2	0,001	0,86±0,26	25,9±7,8
	8	6,67	0,001	5,6±1,7	0,001	1,04±0,31	32,6±9,8
	9	6,91	0,001	3,3±1,0	0,001	1,13±0,34	35±10
	10	8,11	0,001	11,1±3,3	0,001	1,27±0,38	23,5±7,1
	11	7,90	0,001	3,17±0,95	0,001	1,27±0,38	42±13
ПДК*, мг/кг		—	6	23	3	6	140

Примечание: *ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 [2021] «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 2
Table 2

Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах степной зоны Челябинской области
The content of acid-soluble forms of heavy metals in the soils of the steppe zone of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	Содержание, мг/кг				
		Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Чесменский район	1	15,9±4,8	40,04±12	15,9±4,8	15,3±4,6	391±117
	2	13,4±4,0	31,5±9,5	13,4±4,0	14,1±4,2	591±177
	3	12,9±3,9	36±11	12,9±3,9	15,6±4,7	1136±341
	4	13,6±4,1	36±11	13,6±4,1	12,2±3,6	621±186
	5	13,9±4,2	41±12	13,9±4,2	13,7±4,1	730±219
Троицкий район	1	16,4±4,9	25,9±7,8	16,4±4,9	15,2±4,6	523±157
	2	18,6±5,6	28,1±8,4	18,6±5,6	13,3±4,0	553±166
	3	13,1±3,9	26,9±8,1	13,1±3,9	18,4±5,5	474±142
	4	15,1±4,5	31,0±9,3	15,1±4,5	16,5±4,9	492±148
	5	18,2±5,5	38±11	18,2±5,5	14,5±4,3	511±153
	6	10,9±3,3	42±13	14,7±4,4	33±10	170±51
	7	10,9±3,3	44±13	16,6±5,0	34±10	247±74
	8	6,6±2,0	27,9±8,4	13,0±3,9	27,5±8,2	221±66
	9	7,9±2,4	39±12	18,5±5,5	30,0±9,0	243±73
	10	8,2±2,5	17,7±5,3	9,1±2,7	16,1±4,8	170±51
	11	7,4±2,2	24,7±7,4	11,4±3,4	21,2±6,4	222±67
ПДК*, мг/кг		130	220	132	100	1500

Примечание: * ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 [2021]. Примечание: жирным шрифтом выделено наибольшее содержание.

Превышение ПДК подвижных форм исследуемых тяжелых металлов в пробах не наблюдается. Подвижная форма является самой доступной для поглощения растениями, поэтому на данный момент можно говорить об отсутствии критического уровня загрязнения и угрозы для нормального функционирования биологических процессов [Рогачева и др., 2016].

Кислоторастворимые формы характеризуют техногенную составляющую в загрязнении почв. Превышение ПДК кислоторастворимых форм тяжелых металлов на исследуемой территории не наблюдается.

Согласно агрохимическим критериям «Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения» и гигиеническим нормативам СанПиН 1.2.3685-21 [2021] зафиксировано следующее: содержание подвижных форм меди в пределах нормы только в 3 пробах (18,75 % от общего числа); содержание подвижных форм цинка в норме в 2 образцах (12,5 %), выше нормы в 4 (25 %); содержание подвижного марганца в норме только в 1 пробе, во всех остальных содержание выше нормы.

Кислоторастворимые формы марганца, цинка и меди, согласно агрохимическим критериям, соответствуют агро- и биогеохимической норме. Исключение составили кислоторастворимые формы марганца в пробах с 6 по 11 Троицкого района – в них содержание элемента находится ниже нормы (200–300 мг/кг).

Почвы лесостепной зоны

Почвы лесостепной зоны представлены почвами Еманжелинского, Еткульского, Увельского и Пластовского муниципальных районов. В Еманжелинском районе отобрано 6 проб, в Еткульском – 12, в Увельском – 9 и в Пластовском – 5. Все почвы по типу – черноземы выщелоченные (средне и тяжелосуглинистые). В пробах также проанализированы подвижные и кислоторастворимые формы тяжелых металлов. Данные по содержанию подвижных форм представлены в табл. 3, по содержанию кислоторастворимых форм в табл. 4.

В результате проведенного исследования выявлено загрязнение почв Пластовского района подвижными формами свинца в пробах 2, 3 и 5, где концентрации приближаются к ПДК в 6 мг/кг. В пробах 1 и 4 отмечено превышение ПДК, при этом среднее содержание свинца составляет 6,50 и 7,01 мг/кг соответственно. Подвижные формы свинца обладают высокой миграционной способностью, что способствует их переходу в почвенный раствор и последующему распространению в растительные объекты, а также в подземные и грунтовые воды.

Согласно агрохимическим градациям и гигиеническим нормативам СанПиН 1.2.3685-21 [2021], в 21 % проб содержание подвижных форм меди находятся в пределах нормы (0,21–0,50 мг/кг), тогда как в остальных уровень микроэлемента ниже нормы. Подвижные формы цинка находятся в норме (2,1–5,0 мг/кг) в 29 % образцов, в остальных его содержание ниже нормы. Подвижные формы марганца соответствуют норме (10,1–20,0 мг/кг) только в одной пробе Еткульского района, в остальных содержание превышает норму. Подвижные формы свинца в целом соответствуют норме, за исключением двух образцов Пластовского района, где уровень микроэлемента превышает 6,0 мг/кг. Пробы № 3 ($5,9 \pm 1,8$ мг/кг) и № 5 ($5,9 \pm 1,8$ мг/кг) Пластовского района близки к предельно допустимым значениям.

Кислоторастворимые формы меди в лесостепной зоне также не превышают ПДК. В соответствии с агрохимическими градациями содержание кислоторастворимых форм марганца (< 200–300 мг/кг), меди (5–7 мг/кг) и цинка (10–15 мг/кг) находятся ниже нормы в пробах Увельского (6, 8, 9), Еманжелинского (3, 6) и Еткульского района (с 6 по 12).

Таблица 3
Table 3

Содержание подвижных форм тяжелых металлов
в почвах лесостепной зоны Челябинской области
The content of labile forms of heavy metals in the soils
of the forest-steppe zone of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	pH	Содержание, мг/кг				
			Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Пластовский район	1	7,72	6,5±2,0	0,320±0,096	0,036±0,012	0,76±0,23	46±14
	2	6,60	5,5±1,7	0,42±0,13	0,045±0,012	0,90±0,27	33±10
	3	7,02	5,9±1,8	0,77±0,23	0,0261±0,0078	0,86±0,26	31,1±9,3
	4	8,20	7,0±2,1	0,293±0,087	0,102±0,031	1,34±0,40	33,0±9,9
	5	7,25	5,9±1,8	0,280±0,084	0,0170±0,0051	1,14±0,34	35±10
Увельский район	1	7,01	5,4±1,6	1,03±0,31	0,159±0,048	0,76±0,23	53±16
	2	7,18	5,0±1,5	0,58±0,17	0,112±0,034	0,66±0,20	53±16
	3	6,53	5,2±1,6	1,12±0,34	0,121±0,036	0,76±0,23	63±19
	4	6,78	5,2±1,6	0,52±0,16	0,102±0,031	0,66±0,20	66±20
	5	7,03	4,9±1,5	0,71±0,21	0,140±0,042	0,85±0,26	43±13
	6	6,73	0,001	3,5±1,0	0,001	1,13±0,34	24,0±7,2
	7	6,61	0,001	3,05±0,92	0,001	1,09±0,33	31,7±9,5
	8	6,54	0,001	2,34±0,70	0,001	1,18±0,35	30,1±9,0
	9	6,81	0,001	1,55±0,47	0,001	1,50±0,45	23,6±7,1
Еманжелинский район	1	8,36	4,4±1,3	0,43±0,13	0,330±0,099	0,185±0,054	36±11
	2	6,95	4,4±1,3	0,44±0,13	0,254±0,075	0,001	32,5±9,7
	3	7,08	4,5±1,3	0,74±0,22	0,311±0,093	0,089±0,027	44±13
	4	7,05	4,6±1,4	0,50±0,15	0,235±0,072	0,233±0,069	43±13
	5	8,18	4,4±1,3	0,95±0,29	0,234±0,069	1,28±0,38	57±17
	6	6,80	0,001	2,12±0,64	0,001	1,23±0,37	28,9±8,7
Еткульский район	1	6,63	3,7±1,1	0,39±0,12	0,34±0,10	0,001	27,4±8,2
	2	6,43	4,1±1,2	0,79±0,24	0,35±0,11	0,001	54±16
	3	6,98	4,2±1,3	0,89±0,27	0,36±0,11	0,089±0,027	51±15
	4	7,85	4,7±1,4	0,83±0,25	0,34±0,10	0,001	51±15
	5	7,21	4,4±1,3	1,11±0,33	0,310±0,093	0,001	51±15
	6	7,81	0,001	2,41±0,72	0,001	1,64±0,50	27,0±8,1
	7	7,32	0,001	4,1±1,2	0,001	1,68±0,50	34±10
	8	7,95	0,001	6,3±1,9	0,001	1,96±0,59	68±21
	9	6,84	0,001	1,12±0,34	0,001	1,77±0,53	28,7±8,6
	10	7,71	0,001	2,74±0,82	0,001	1,68±0,50	34±10
	11	6,75	0,001	6,3±1,9	0,001	1,68±0,50	25,6±7,7
	12	6,53	0,001	2,14±0,64	0,001	2,14±0,64	19,7±5,9
ПДК, мг/кг		–	6	23	3	6	140

Примечание: жирным шрифтом выделено наибольшее содержание и превышения.

Таблица 4
Table 4

Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почвах лесостепной зоны
Челябинской области
The content of acid-soluble forms of heavy metals in the soils of the forest-steppe zone
of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	Содержание, мг/кг				
		Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Пластовский район	1	13,3±4,0	35±10	13,3±4,0	15,4±4,6	624±187
	2	13,6±4,1	32,3±9,7	13,6±4,1	13,6±4,1	444±133
	3	12,5±3,8	25,4±7,6	12,5±3,8	12,6±3,8	445±133
	4	17,0±5,1	37±11	17,0±5,1	13,2±4,0	491±147
	5	15,0±4,5	31,2±9,4	15,0±4,5	14,3±4,3	587±176
Увельский район	1	15,0±4,5	20,2±6,1	15,0±4,5	19,1±5,7	709±213
	2	13,2±4,0	21,5±6,5	13,2±4,0	14,5±4,3	626±188
	3	12,4±3,7	28,0±8,4	12,4±3,7	13,8±4,1	616±185
	4	14,5±4,4	36±11	14,5±4,4	16,4±4,9	449±135
	5	11,8±3,5	21,7±6,5	11,8±3,5	12,7±3,8	669±201
	6	5,5±1,6	17,9±5,4	10,5±3,1	25,4±7,6	142±43
	7	10,1±3,0	22,5±6,8	11,7±3,5	21,8±6,5	250±75
	8	15,3±4,6	11,4±3,4	6,6±2,0	18,1±5,4	139±42
	9	3,9±1,2	13,3±4,0	6,7±2,0	17,1±5,1	134±40
Еманжелинский район	1	13,8±4,1	32,3±9,7	13,8±4,1	15,4±4,6	730±219
	2	12,6±3,8	33±10	12,6±3,8	12,3±3,7	315±94
	3	15,0±4,5	40±12	15,0±4,5	9,7±2,9	270±81
	4	13,1±3,9	34±10	13,1±3,9	11,2±3,4	318±96
	5	17,3±5,2	33±10	17,3±5,2	12,3±3,7	465±140
	6	4,9±1,5	14,8±4,4	7,8±2,4	19,7±5,9	166±50
Еткульский район	1	9,3±2,8	28,4±8,5	9,3±2,8	13,7±4,1	356±107
	2	11,2±3,4	21,9±6,6	11,2±3,4	16,6±5,0	395±118
	3	9,7±2,9	31,5±9,5	9,7±2,9	10,8±3,3	426±128
	4	11,6±3,5	37±11	11,6±3,5	10,7±3,2	573±172
	5	7,9±2,4	28,8±8,6	19,1±5,7	30,0±9,0	199±60
	6	10,1±3,0	23,6±7,1	14,0±4,2	22,8±6,8	214±64
	7	4,9±1,5	19,9±6,0	13,4±4,0	18,7±5,6	223±67
	8	10,9±3,3	42±12	32,5±9,8	21,2±6,4	272±82
	9	7,4±2,2	20,8±6,3	11,9±3,6	24,9±7,5	381±114
	10	10,9±3,3	20,7±6,2	9,6±2,9	26,9±8,1	204±61
	11	7,7±2,3	24,1±7,2	8,8±2,6	15,3±4,6	167±50
	12	2,22±0,67	21,9±6,6	11,9±3,6	22,8±6,8	221±66
ПДК, мг/кг		32	100	55	100	1500

Отсутствие превышений ПДК не свидетельствует о том, что почвы находятся в оптимальном агроэкологическом состоянии. В большинстве проб выявлен дефицит необходимых элементов, что указывает на необходимость корректирующих мероприятий для восстановления баланса питательных веществ в почве.

Определено среднее содержание подвижных форм элементов в разных типах почв. Данные представлены в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Среднее содержание подвижных форм элементов в черноземах обыкновенных
и черноземах выщелоченных Челябинской области
Average content of labile forms of elements in ordinary and leached chernozems
of the Chelyabinsk region

Тип почвы	Содержание, мг/кг				
	Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Чернозем обыкновенный	<u>2,76</u> 12,66	<u>2,49</u> 34,92	<u>0,11</u> 14,32	<u>0,83</u> 19,68	<u>44,31</u> 483,83
Чернозем выщелоченный	<u>3,04</u> 11,24	<u>1,86</u> 26,99	<u>0,12</u> 13,31	<u>0,94</u> 17,16	<u>39,19</u> 380,72

Примечание: в числителе подвижные формы, в знаменателе – кислоторастворимые

Согласно полученным данным содержание подвижных форм элементов на обоих типах почв приблизительно равно. Это указывает на то, что процессы выщелачивания не оказывают значительного влияния на доступность микроэлементов в этих почвах. Оба типа черноземов имеют схожие свойства в отношении накопления и удержания подвижных форм элементов

С кислоторастворимыми формами наблюдается противоположная ситуация. Наибольшее содержание элементов находится в почвах чернозема обыкновенного. Это может быть связано с большим количеством коллоидов и органического вещества, которые усиливают сорбционные свойства почвы, фиксируя элементы и предотвращая их вымывание.

Растения степной и лесостепной зоны

Содержание тяжелых металлов в почвах напрямую влияет на их аккумуляцию в растительных организмах. Содержание элементов в пробах растений представлено в табл. 6.

Таблица 6
Table 6

Содержание тяжелых металлов в растениях степной зоны Челябинской области
Heavy metal content in the plants growing in the steppe zone of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	Вид растений	Содержание, мг/кг				
			Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Чесменский район	1	Пшеница	0,0001	12,9±2,6	1,39±0,28	0,0001	19,2±5,8
	2	Подсолнечник	0,0001	25,7±5,1	11,9±2,4	0,0001	9,7±2,9
	3	Подсолнечник	0,0001	29,4±5,9	10,9±2,2	0,0001	9,8±3,0
	4	Пшеница	0,0001	16,6±3,3	2,99±0,60	0,86±0,17	47±14
	5	Пшеница	0,0001	19,3±3,9	0,68±0,14	0,001	13±3,8
Троицкий район	1	Подсолнечник	0,0001	12,2±2,4	4,56±0,91	6,6±1,3	13,9±4,2
	2	Пшеница	0,0001	23,4±4,7	2,09±0,42	2,21±0,44	16,7±5,0
	3	Пшеница	0,0001	17,0±3,4	2,33±0,47	2,57±0,51	38±11
	4	Пшеница	0,0001	20,7±4,1	1,39±0,28	1,23±0,25	18,5±5,5
	5	Пшеница	0,0001	10,6±2,1	2,25±0,45	0,74±0,15	23,4±7,0
	6	Подсолнечник	0,0001	17,2±3,4	9,9±2,0	6,6±1,3	7,8±2,3
	7	Пшеница	0,0001	18,3±3,7	4,12±0,82	31,5±6,3	40±12
	8	Пшеница	0,0001	15,0±3,0	3,13±0,63	23,6±4,7	29,9±9,0
	9	Пшеница	0,0001	16,6±3,3	1,82±0,36	13,2±2,6	21,0±6,3
	10	Подсолнечник	0,0001	16,2±3,2	12,7±2,5	6,9±1,4	8,9±2,7
	11	Подсолнечник	0,0001	18,4±3,7	10,7±2,1	6,5±1,3	8,1±2,4
ПДК, мг/кг			0,5	150	15	1	300–500

Примечание: жирным шрифтом выделено наибольшее содержание и превышения ПДК для свинца, цинка и меди согласно СанПиН 42-123-4089-86 [1986]. ПДК для хрома из МДУ некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных.

Так как содержание марганца не нормируется, нами принята токсичная концентрация – 300–500 мг/кг [Sabata-Pendias, 2010].

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что в большинстве образцов, взятых в Троицком районе, уровень содержания элементов выше, чем в пробах Чесменского района. Это может быть связано с более благоприятным микроклиматом, способствующим росту растений в агроценозах за счет более равномерного распределения осадков. Кроме того, в Троицком районе большее количество промышленных предприятий, таких как «Троицкая ГРЭС», «Троицкий электромеханический завод», «Троицкий металлургический завод», «Троицкий тракторный завод», что может говорить о дополнительном антропогенном влиянии на уровень металлов посредством аэрогенных примесей. На территории Чесменского района также находятся промышленные предприятия, например, ООО «Восточный базис» и ООО «Бускуль», но находятся они вдали от населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий.

Нужно учитывать, что почвы представлены тяжелыми и средними суглинками, которые за счет содержания глинистых минералов и органического вещества могут адсорбировать металлы, делая их менее доступными для корневых систем растений.

Содержание элементов в растениях лесостепной зоны Челябинской области представлено в табл. 7.

Таблица 7
Table 7

Содержание тяжелых металлов в растениях, произрастающих на территории
лесостепной зоны Челябинской области
Heavy metal content in the plants growing in the forest-steppe zone of the Chelyabinsk region

Район исследования	Номер пробы	Вид растений	Содержание, мг/кг				
			Pb	Zn	Cu	Cr	Mn
Пластовский район	1	Пшеница	0,0001	22,8±4,6	1,93±0,39	0,0001	10,9±3,3
	2	Пшеница	0,0001	20,7±4,1	1,66±0,33	0,0001	8,7±2,6
	3	Подсолнух	0,0001	27,3±5,5	9,5±1,9	0,0001	11,8±3,5
	4	Пшеница	0,0001	24,5±4,9	0,99±0,20	0,0001	9,5±2,9
	5	Подсолнух	0,0001	19,2±4,0	6,4±1,3	0,0001	6,2±1,8
Увельский район	1	Пшеница	0,0001	25,2±5,0	2,72±0,54	2,94±0,59	12,7±3,8
	2	Пшеница	0,0001	18,5±3,7	2,21±0,44	1,96±0,39	25,4±7,6
	3	Пшеница	0,0001	17,2±3,4	2,56±0,51	6,9±1,4	31,0±9,3
	4	Пшеница	0,0001	14,8±3,0	2,40±0,48	3,31±0,66	27,2±8,2
	5	Гречиха	0,0001	8,1±1,6	3,19±0,64	0,0001	15,3±4,6
	6	Пшеница	0,0001	16,9±3,4	1,99±0,40	13,2±2,6	22,0±6,6
	7	Подсолнух	0,0001	16,4±3,3	8,6±1,7	7,9±1,6	7,4±2,2
	8	Пшеница	0,0001	17,3±3,5	3,64±0,73	25,9±5,2	45±14
	9	Подсолнух	0,0001	17,0±3,4	11,3±2,3	11,2±2,2	14,0±4,2
Еманжелинский район	1	Пшеница	0,0001	23,9±4,8	1,70±0,34	0,74±0,15	49±15
	2	Пшеница	0,0001	19,6±3,9	1,07±0,21	0,0001	15,5±4,6
	3	Пшеница	2,27±0,57	20,4±4,1	1,58±0,32	0,0001	12,9±3,9
	4	Гречиха	1,11±0,28	14,7±2,9	4,44±0,89	0,0001	23,8±7,1
	5	Пшеница	0,0001	13,8±2,8	1,07±0,21	0,0001	12,0±3,6
	6	Подсолнух	0,0001	15,4±3,1	8,7±1,7	9,3±1,9	10,7±3,2

Окончание таблицы
End of the table

Еткульский район	1	Гречиха	0,0001	12,2±2,4	3,74±0,75	0,0001	33±10
	2	Подсолнух	0,0001	14,9±3,0	4,52±0,90	0,0001	40±12
	3	Пшеница	0,0001	14,6±2,9	2,05±0,41	0,0001	23,8±7,1
	4	Пшеница	0,0001	21,5±4,3	1,35±0,27	0,0001	10,5±3,1
	5	Подсолнух	0,0001	20,2±4,0	5,8±1,2	0,0001	5,8±1,7
	6	Пшеница	0,0001	20,5±4,1	4,09±0,82	27,4±5,5	38±11
	7	Пшеница	0,0001	17,7±3,5	3,01±0,60	17,2±3,4	30,5±9,1
	8	Подсолнух	0,0001	19,5±3,9	7,6±1,5	12,9±2,6	10,5±3,2
	9	Пшеница	0,0001	17,8±3,6	4,72±0,94	29,6±5,9	66±20
	10	Пшеница	0,0001	0,0001	2,78±0,56	19,7±3,9	60±18
	11	Подсолнух	0,0001	21,1±4,3	8,9±1,8	9,6±1,9	10,2±3,0
	12	Подсолнух	0,0001	18,7±3,7	10,0±2,0	13,2±2,6	17,6±5,3
ПДК, мг/кг			0,5	50	10	0,5	300–500

Примечание: жирным шрифтом выделено наибольшее содержание и превышения ПДК для свинца, цинка и меди согласно СанПиН 42-123-4089-86 [1986]. ПДК для хрома из МДУ некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных.

В исследуемых пробах растений свинец практически отсутствует, однако, в пробах Еманжелинского района, в которых он был выявлен наблюдается превышение ПДК в 4,5 и 2 раза, для проб 3 и 4 соответственно.

Содержание хрома превышает значение ПДК практически в каждой пробе, в которой его удалось определить, что составляет 54 % от общего числа. Превышение ПДК в образцах Троицкого, Увельского, Еманжелинского и Еткульского районов колеблется от 2 до 20 раз. По полученным данным можно заметить, что сельскохозяйственные растения, выращиваемые в Увельском, Еткульском и Троицком районах больше подвержены загрязнению хромом. В результате выявления высоких концентраций в исследуемых образцах можно предположить, что растения данных районов обладают свойствами биоаккумуляторов. Это означает, что они способны накапливать данный элемент в своих тканях в концентрациях, превышающих его содержание в окружающей среде. Такие растения могут использоваться в фиторемедиации для очистки загрязненных почв, однако их употребление в пищу или использование в сельском хозяйстве требует особого внимания из-за риска накопления токсичных металлов в пищевой цепи.

В пробах наблюдается превышение ПДК марганца в среднем в 1,2–1,6 раз. В растениях через корни проникают ионы марганца из следующих растворимых форм: $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $MnSO_4 \cdot (NH_4)_2 \cdot 6H_2O$, $MnCl_2$. Около 35 ферментов активируются марганцем, в большинстве они являются катализаторами реакций окисления-восстановления, декарбоксилирования, гидролиза [Прохоров, Матвеев, 1996].

Для анализа данных приведены средние значения содержания элементов в пробах почв и растений. Данные представлены в табл. 8.

Анализ данных показывает, что основными индикаторами антропогенного воздействия являются свинец и хром, биодоступность которых в растительных организмах служит маркером загрязнения окружающей среды. Наибольшее негативное влияние было зафиксировано в Еманжелинском районе, где концентрация свинца в биомассе гречихи достигает максимальных значений, а хром активно аккумулируется в подсолнечнике даже при сравнительно низких уровнях его содержания в почве.

Таблица 8
Table 8

Среднее содержание кислоторастворимых форм металлов в почвах
и среднее содержание элементов в растениях Челябинской области
Average content of acid-soluble forms of metals in soils and average content
of elements in the plants of the Chelyabinsk region

Район исследования	Элемент	Содержание в почве, мг/кг	Содержание в растении, мг/кг		
			Пшеница	Подсолнечник	Гречиха
Чесменский район	Pb	13,9	0,0001	0,0002	–
	Zn	36,9	16,3	27,5	–
	Cu	13,9	1,7	11,4	–
	Cr	14,18	0,3	0,001	–
	Mn	693,8	26,4	9,7	–
Троицкий район	Pb	12,1	0,0001	0,001	–
	Zn	31,4	17,4	16	–
	Cu	14,9	2,4	9,5	–
	Cr	21,8	10,7	6,6	–
	Mn	347,8	26,8	9,7	–
Пластовский район	Pb	14,3	0,001	0,0001	–
	Zn	32,2	21,8	23,25	–
	Cu	14,3	1,41	7,9	–
	Cr	13,8	0,001	0,0001	–
	Mn	518,2	8,83	9	–
Увельский район	Pb	11,3	0,0001	0,0001	0,0001
	Zn	21,4	18,3	16,7	8,1
	Cu	11,4	2,6	9,5	3,2
	Cr	17,6	9,1	9,5	0,0001
	Mn	414,9	27,2	10,77	15,3
Еманжелинский район	Pb	12,8	0,45	0,0001	1,1
	Zn	31,2	18,6	15,4	14,7
	Cu	13,3	1,3	8,7	4,4
	Cr	13,4	0,2	9,3	0,0001
	Mn	377,3	20	10,7	23,8
Еткульский район	Pb	8,6	0,0001	0,0001	0,0001
	Zn	26,7	15,3	19,8	13,5
	Cu	13,6	3	8,1	4,1
	Cr	19,5	15,6	8,9	0,0001
	Mn	302,6	38,1	11	36,5

Еткульский район характеризуется наиболее высокой концентрацией хрома в зерне пшеницы, что при умеренных показателях его содержания в почвенном слое указывает на техногенное происхождение данного загрязнения. В Троицком районе наблюдается наиболее высокий уровень содержания хрома в почвенном горизонте, однако его аккумуляция в растениях выражена в наименьшей степени.

Чесменский район требует дополнительного исследования в связи с повышенным содержанием марганца в почвенном субстрате, который может иметь как естественное, так и техногенное происхождение. Наименьшая степень антропогенной нагрузки была выявлена в Увельском и Пластовском районах, где уровни содержания анализируемых элементов находятся в пределах нормы.

Определены средние содержания элементов в растениях на различных типах почв (рис. 2).

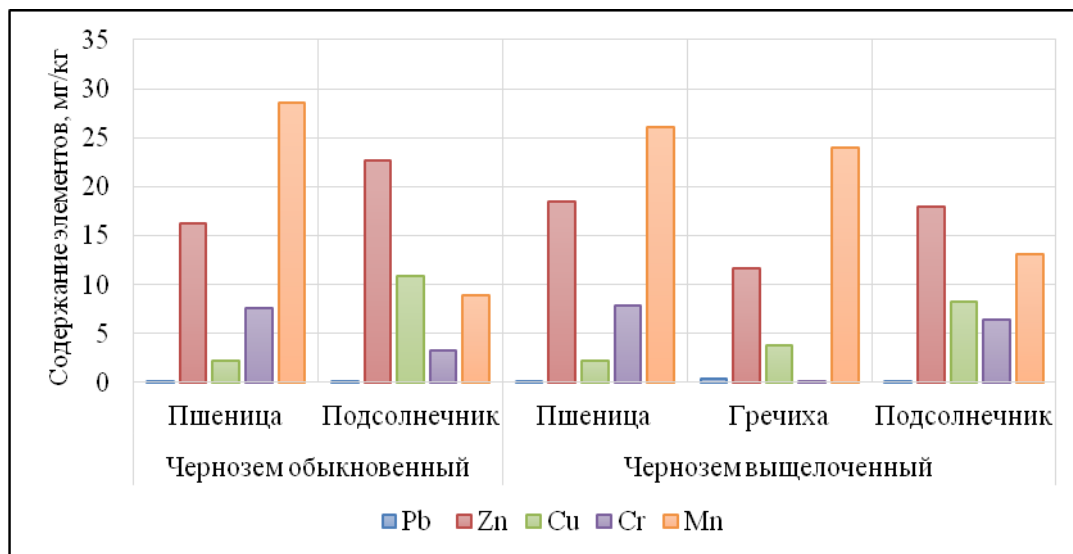


Рис. 2. Среднее содержание элементов в пробах растений, выращенных на черноземах обыкновенных и выщелоченных Челябинской области

Fig. 2. Average content of elements in samples of the plants grown on ordinary and leached chernozems of the Chelyabinsk region

В результате исследования установлено, что в растениях, произрастающих на черноземах обыкновенных, уровень содержания меди, марганца и цинка выше, чем на черноземах выщелоченных. Это может быть обусловлено высоким уровнем органических веществ в черноземах обыкновенных, которые способствуют удержанию и биодоступности этих элементов. Также отмечается тенденция накопления элементов пшеницей на обоих типах почв, ее можно отобразить в виде цепочки: марганец > цинк > хром > медь. Для подсолнечника цепочка выглядит следующим образом: цинк > медь/марганец > хром. Исходя из полученных данных на элементный состав влияет не только тип почвы, но и физиологические особенности (биохимические механизмы) определенного вида сельскохозяйственной культуры. Растения проявляют селективность в усвоении элементов, предпочитая одни элементы другим в зависимости от их биологических потребностей.

Рассчитан коэффициент накопления подвижных форм элементов растениями, выращенными на разных типах почв (табл. 9).

Таблица 9
Table 9

Коэффициент накопления элементов растениями, выращенными на черноземах обыкновенных и выщелоченных Челябинской области

The coefficient of accumulation of elements by the plants grown on ordinary and leached chernozems of the Chelyabinsk region

Тип почвы	Растение	КН				
		Zn	Cr	Mn	Pb	Cu
Чернозем обыкновенный	Пшеница	26,5	8,1	0,7	0,3	16,5
	Подсолнечник	33,7	2,9	0,3	0,3	49,7
Чернозем выщелоченный	Пшеница	27,2	6,2	0,8	0,4	15,9
	Подсолнечник	16,1	4,5	0,4	0,6	193,1
	Гречиха	24,0	0,3	0,7	0,1	17,5

По полученным данным видны особенности накопления у разных видов растений. Наибольший уровень накопления марганца и хрома содержится в пробах пшеницы, а меди в пробах подсолнечника. По сравнению с другими видами уровень накопления меди и хрома в растениях гречихи значительно ниже, но уровень накопления марганца является максимумом – 0,7 на черноземах выщелоченных.

Коэффициент накопления цинка варьирует в диапазоне от 16,1 до 33,7. Наибольшее значение (33,7) зафиксировано в пробах подсолнечника, произрастающего на черноземах обыкновенных. Среди растений, выращиваемых на черноземах выщелоченных, максимальный коэффициент накопления цинка наблюдается у пшеницы. Это свидетельствует о том, что подсолнечник и пшеница обладают наиболее выраженной способностью к аккумуляции цинка в зависимости от типа почвы.

Также рассчитан коэффициент биологического накопления для растений, произрастающих на разных типах почвы (рис. 3).

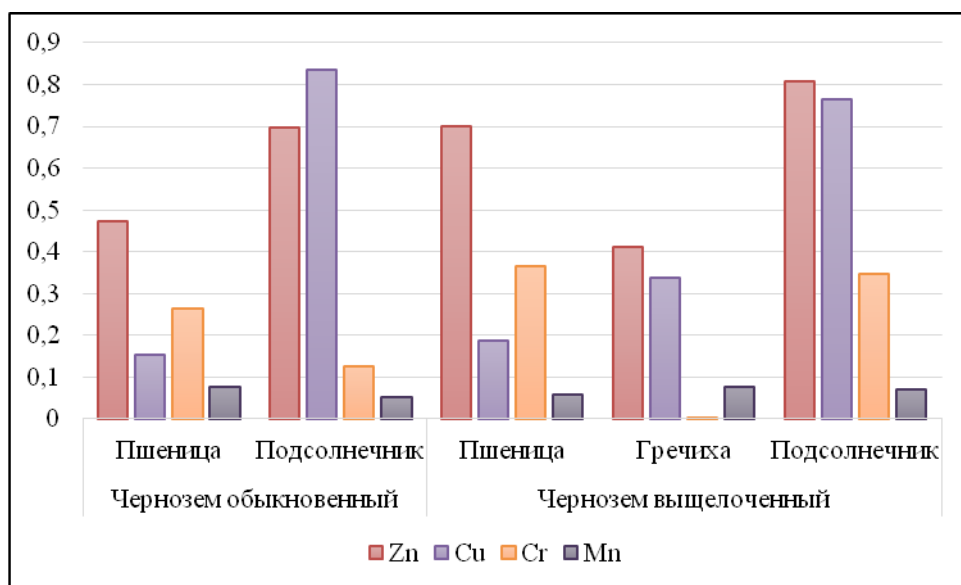


Рис. 3. Коэффициент биологического накопления элементов растениями, выращенными на черноземах обыкновенных и выщелоченных Челябинской области
Fig. 3. The coefficient of bioabsorption of elements by the plants grown on ordinary and leached chernozems of the Chelyabinsk region

В соответствии с полученными данными установлено, что на обоих типах почв коэффициент биологического накопления хрома наиболее высок в растениях пшеницы, тогда как цинка и меди – в подсолнечнике. Также отмечаются низкие значения накопления марганца для пшеницы и подсолнечника. У гречихи зафиксированы средние значения по цинку и меди, а также низкие коэффициенты для хрома и марганца.

Эти данные подтверждают селективность растений в процессе накопления элементов, что обусловлено их физиологическими особенностями и адаптацией к условиям среды.

Закключение

Проведенное исследование почв степной и лесостепной зон Челябинской области по определению содержания тяжелых металлов выявило комплексную геоэкологическую ситуацию, характеризующуюся как умеренной антропогенной нагрузкой, так и локальными рисками загрязнения поллютантами.

Превышение ПДК подвижных форм (наиболее доступных для растений) в большинстве проб не зафиксировано, что указывает на отсутствие критической угрозы

для агроценозов. Однако в Пластовском районе обнаружены превышения ПДК подвижного свинца (в среднем до 7,01 мг/кг), обладающего высокой миграционной способностью, что требует контроля за его распространением в грунтовые воды и растительные объекты. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов (маркер техногенного влияния) в целом соответствует норме. В большинстве проб выявлен дефицит подвижных форм цинка, меди и марганца, что свидетельствует о нарушении баланса питательных веществ. Это требует внедрения корректирующих агрохимических мероприятий (например, внесение микроудобрений) для восстановления плодородия почв с позиции обеспеченности микроэлементами.

Подвижность тяжелых металлов в исследуемых почвах ограничена их физико-химическими свойствами, а именно высоким содержанием глинистых минералов, связывающих металлы. Это снижает биодоступность элементов, но усиливает их аккумуляцию в почвенных горизонтах. Цинк и медь имеют сильную связь с органическим веществом, образуя устойчивые комплексы с гуминовыми кислотами, что ограничивает их миграцию.

Значительные превышения ПДК хрома (до 10 раз) зафиксированы в растительных пробах Увельского, Еткульского и Троицкого районов. Растения-биоаккумуляторы хрома представляют потенциал для фиторемедиации, но их использование в сельском хозяйстве требует осторожности из-за риска попадания токсикантов в пищевую цепь. Локальное накопление свинца и марганца в растениях (превышение ПДК в среднем до 4,5 раз) связано как с естественными геохимическими особенностями, так и с аэрогенным переносом загрязнителей от промышленных объектов.

Рекомендации: необходим регулярный мониторинг почв и растительности, особенно в районах с высокой антропогенной нагрузкой (Троицкий, Пластовский), для предотвращения формирования геохимических аномалий. Для районов с дефицитом микроэлементов рекомендована разработка программ по оптимизации агрохимического состояния почв.

Список источников

- ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Электронный ресурс. URL: https://rosghosts.ru/file/gost/13/080/gost_17.4.3.01-83.pdf (дата обращения 27.11.2025).
- ГОСТ Р 58588-2019. Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа. Электронный ресурс. URL: https://rosghosts.ru/file/gost/65/020/gost_r_58588-2019.pdf (дата обращения 27.11.2025).
- Национальный атлас почв Российской Федерации. 2011. М., Астрель: АСТ, 632 с.
- 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. Электронный ресурс. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf> (дата обращения 27.11.2025).
- Посевные площади и валовые сборы сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Челябинской области» (предварительные итоги за 2024 год). 2025. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Челябинской области. Электронный ресурс. URL: <https://74.rosstat.gov.ru/adriculture> (дата обращения: 13.01.2025).
- СанПиН 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах. Электронный ресурс. URL: <https://52.rosпотреbnadzor.ru/content/перечень-нормативных-правовых-актов-содержащих-обязательные-требования-оценка-соблюдения> (дата обращения: 16.06.2025).
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Электронный ресурс. URL: <https://55.rosпотреbnadzor.ru/Files/СанПин%203685.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).

Список литературы

- Байкалова Т.В., Байкалов П.С., Коротченко И.С. 2017. Содержание тяжёлых металлов в почвенном покрове, листьях березы под воздействием промышленности г. Красноярска. Вестник КрасГАУ, 5(128): 123–130.
- Васин Д.В. 2021. Современные подходы к нормированию содержания тяжёлых металлов в почве. Архивариус, 7(3(57)): 8–10.
- Водяницкий Ю.Н. 2009. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М., Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 182 с.
- Ермохин Ю.И., Синдирева А.В., Трубин Н.К. 2002. Агроэкологическая оценка действия кадмия, никеля, цинка в системе почва-растение-животное. Омск, ОмГАУ, 117 с.
- Зыбалов В.С., Попкова М.А. 2018. Влияние тяжелых металлов на агрохимические показатели почв Южного Урала. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия, 10(2): 33–40. <https://doi.org/10.14529/chem180204>.
- Иванищев В.В. 2022. Цинк в природе и его значение для растений. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, 2: 35–49. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-35-49>
- Казанцев И.В., Матвеева Т.Б. 2016. Содержание тяжёлых металлов в почвенном покрове в условиях техногенеза. Самарский научный вестник, 1(14): 34–37.
- Калашников Ю.А. 2014. Адаптация промышленности региона к тенденциям развития мирового хозяйства (на примере Челябинской области). Вестник Челябинского государственного университета, 5(334): 115–120.
- Лукин С.В. 2011. Мониторинг содержания хрома в сельскохозяйственных культурах и почвах. Достижения науки и техники АПК, 6: 54–55.
- Минкина Т.М., Бурачевская М.В., Чаплыгин В.А., Бакоев С.Ю., Антоненко Е.М., Белогорская С.С. 2011. Накопление тяжелых металлов в системе почва-растение в условиях загрязнения. Научный журнал Российского НИИ Проблем Мелиорации, 4(4): 1–17.
- Морозова Т.С., Лицуков С.Д. 2019. Оценка накопления кадмия озимой пшеницей. Инновации в АПК: проблемы и перспективы, 2(22): 173–181.
- Наумов И.В., Красных С.С. 2019. Исследование межрегиональных взаимосвязей в процессах развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 8: 108–124. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-8-108-124>.
- Пахомов В.П., Душин А.В. 2008. Оценка минерально-сырьевой безопасности Уральского Федерального округа. Экономика региона, 3(15): 129–143.
- Побилат А.Е., Волошин Е.И. 2017. Особенности содержания свинца в почвах и растениях средней Сибири. Микроэлементы в медицине, 18(4): 36–40. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40>
- Прохорова Н.В., Матвеев Н.М. 1996. Тяжелые металлы в почвах и растениях в условиях техногенеза. Вестник Самарского государственного университета, S: 125–147.
- Рогачева С.М., Каменец А.Ф., Шилова Н.А. 2016. Влияние растворимых соединений марганца на высшие растения и оценка фитоэкстракционной способности растений. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 18(5(3)): 484–488.
- Семенов А.И., Кокшаров А.В., Погодин Ю.И. 2015. Содержание тяжёлых металлов в почве г. Челябинска. Медицина труда и экология человека, 3: 177–184.
- Яхияев М.А., Рамазанов А.Ш., Аджиева А.И. 2011. Валовые и подвижные формы цинка в почвах южной экспозиции предгорного Дагестана. Вестник Дагестанского государственного университета, 6: 162–165.
- Cabata-Pendias A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants. 4th. Boca Raton, FL, CRC Press, 548 p.
- Kim R.Y., Yoon J.K., Kim T.S., Yang J.E., Owens G., Kim K.R. 2015. Bioavailability of Heavy Metals in Soils: Definitions and Practical Implementation – a Critical Review. Environmental geochemistry and health, 37: 1041–1061. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>
- Leduc A., Prairie Y., Bergeron Y. 1994. Fractal Dimension Estimates of a Fragmented Landscape: Source of Variability. Landscape Ecology, 9: 279–286. <https://doi.org/10.1007/BF00129239>.
- Mao C., Song Y., Chen L., Ji J., Li J., Yuan X., Yang Zh., Ayoko G., Frost R., Theiss F. 2019. Human Health Risks of Heavy Metals in Paddy Rice Based on Transfer Characteristics of Heavy Metals from Soil to Rice. Catena, 175: 339–348. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.12.029>

- Moynier F., Vance D., Fujii T., Savage P. 2017. The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1): 543–600. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.82.13>
- Nishito Y., Kambe T. 2018. Absorption Mechanisms of Iron, Copper, and Zinc: an Overview. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 64(1): 1–7. <https://doi.org/10.3177/jnsv.64.1>

References

- Baikalova T.V., Baikarov P.S., Korotchenko I.S. 2017. The Content of Heavy Metals in the Soil Cover, Birch Leaves Under the Influence of the Industry of Krasnoyarsk. *Bulletin of KrasGAU*, 5(128): 123–130 (in Russian).
- Vasin D.V. 2021. *Sovremennye podhody k normirovaniyu sodержaniya tyazhyolykh metallov v pochve* [Modern Approaches to Rationing the Content of Heavy Metals in the Soil]. *Arhivarius*, 7(3(57)): 8–10.
- Vodyanickiy Yu.N. 2009. *Tyazhelye i sverhtyazhelye metally i metalloidy v zagryaznennykh pochvakh* [Heavy and Superheavy Metals and Metalloids in Polluted Soils]. Moscow, Publ. Pochvennyy institut imeni V.V. Dokuchayeva, 182 p.
- Ermokhin Yu.I., Sindireva A.V., Trubin N.K. 2002. *Agroekologicheskaya ocenka dejstviya kadmiya, nikelya, cinka v sisteme pochva-rastenie-zhivotnoe* [Agroecological Assessment of the Effects of Cadmium, Nickel, Zinc in the Soil-Plant-Animal System]. Omsk, Publ. OmGAU, 117 p.
- Zybalov V.S., Popkova M.A. 2018. Influence of Heavy Metals on Agrochemical Indicators of the South Ural Soils. *Bulletin of the South Ural State University. Series Chemistry*, 10(2): 33–40 (in Russian). <https://doi.org/10.14529/chem1802042>.
- Ivanishchev V.V. 2022. Zinc in Nature and Its Significance for Plants. *Izvestiya Tula State University. Sciences of Earth*, 2: 35–49 (in Russian). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-2-1-35-49>
- Kazantsev I.V., Matveeva T.B. 2016. Contents of Heavy Metals in the Soil Cover in the Conditions of Technogenesis. *Samara Journal of Science*, 1(14): 34–37 (in Russian).
- Kalashnikova Yu.A. 2014. Region Industry Adaptation to the Development Trends of the World Economy (Chelyabinsk Region). *Bulletin of Chelyabinsk State University*, 5(334): 115–120 (in Russian).
- Lukin S.V. 2011. Monitoring of the Chromium Content in Crops and Lands. *Achievements of Science and Technology of AIC*, 6: 54–55 (in Russian).
- Minkina T.M., Burachevskaya M.V., Chaplygin V.A., Bakoev S.U., Antonenko E.M., Belogorskaia S.S. 2011. Heavy Metals Accumulation in Soil – Plant System in Polluted Environment. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, 4(4): 1–17 (in Russian).
- Morozova T.S., Litsukov S.D. 2019. Assessment Cadmium Accumulation of the Winter Wheat. *Innovations in agricultural complex: problems and perspectives*, 2(22): 173–181 (in Russian).
- Naumov I.V., Krasnykh S.S. 2019. The Research of Interregional Relationships in the Development of the Mineral Resource Complex of the Russian Federation. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 8: 108–124 (in Russian). <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-8-108-124>.
- Pahomov V.P., Dushin A.V. 2008. *Ocenka mineral'no-syr'evoy bezopasnosti Ural'skogo Federal'nogo okruga* [Assessment of the Mineral Resource Safety of the Ural Federal District]. *Ekonomika regiona*, 3(15): 129–143.
- Pobilat A.E., Voloshin E.I. 2017. Peculiarities of Lead Content in Soils and Plants of Central Siberia. *Trace Elements in Medicine*, 18(4): 36–40 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2017-18-4-36-40>
- Prokhorova N.V., Matveev N.M. 1996. Heavy Metals in Soils and Plants During Technogenic Conditions. *Vestnik of Samara State University*, 3: 125–147 (in Russian).
- Rogacheva S.M., Kamenetz A.F., Shilova N.A. 2016. The Effect of Soluble Manganese Compounds at Higher Plants and Assessment of Plants's Phytoextraction Ability. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 18(5(3)): 484–488 (in Russian).
- Semenov A.I., Koksharov A.V., Pogodin Yu.I. 2015. The Content of Heavy Metals in Chelyabinsk Soils. *Occupational medicine and human ecology*, 3: 177–184 (in Russian).
- Yakhiyaev M.A., Ramazanov A.Sh., Adzhieva A.I. 2011. *Valovye i podvizhnye formy cinka v pochvakh yuzhnoj ekspozicii predgornogo Dagestana* [Gross and Labile Forms of Zinc in the Soils of the Southern Exposure of Foothill Dagestan]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo uni-versitet*, 6: 162–165.
- Cabata-Pendias A. 2010. *Trace Elements in Soils and Plant*. 4th. Boca Raton. FL, Crs Press, 548 p.

- Kim R.Y., Yoon J.K., Kim T.S., Yang J.E., Owens G., Kim K.R. 2015. Bioavailability of Heavy Metals in Soils: Definitions and Practical Implementation – a Critical Review. *Environmental geochemistry and health*, 37: 1041–1061. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>
- Leduc A., Prairie Y., Bergeron Y. 1994. Fractal Dimension Estimates of a Fragmented Landscape: Source of Variability. *Landscape Ecological*, 9: 279–286. <https://doi.org/10.1007/BF00129239>.
- Mao C., Song Y., Chen L., Ji J., Li J., Yuan X., Yang Zh., Ayoko G., Frost R., Theiss F. 2019. Human Health Risks of Heavy Metals in Paddy Rice Based on Transfer Characteristics of Heavy Metals from Soil to Rice. *Catena*, 175: 339–348. . <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2018.12.029>
- Moynier F., Vance D., Fujii T., Savage P. 2017. The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1): 543-600. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.82.13>
- Nishito Y., Kambe T. 2018. Absorption Mechanisms of Iron, Copper, and Zinc: an Overview. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 64(1): 1–7. <https://doi.org/10.3177/jnsv.64.1>

*Поступила в редакцию 28.03.2025;
поступила после рецензирования 09.05.2025;
принята к публикации 19.06.2025*

*Received March 28, 2025;
Revised May 09, 2025;
Accepted June 19, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белов Максим Александрович, аспирант кафедры геоэкологии и природопользования, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Беккер Мария Романовна, магистр кафедры органической и экологической химии, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Синдирева Анна Владимировна, доктор биологических наук, заведующий кафедрой геоэкологии и природопользования, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

Шигабаева Гульнара Нургаллаевна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой органической и экологической химии, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim A. Belov, Postgraduate student of the Department of Geoecology and Nature Management, Tyumen State University, Tyumen, Russia

Maria R. Becker, Master's student of the Department of Organic and Environmental Chemistry, Tyumen State University, Tyumen, Russia

Anna V. Sindireva, Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Geoecology and Nature Management, Tyumen State University, Tyumen, Russia

Gulnara N. Shigabayeva, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Organic and Environmental Chemistry, Tyumen State University, Tyumen, Russia