

УДК 504.75

DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Оригинальная статья

Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината

И.Д. Алборов[✉], О.Г. Бурдзиева[✉], А.С. Кануков[✉], И.Г. Архиреева[✉],
Э.В. Дадтеева[✉]

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002,
г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 15.01.2026, доработана: 20.03.2026, принята к публикации: 24.03.2026

Резюме: Актуальность исследования обусловлена необходимостью экологического нормирования антропогенного воздействия на агроландшафты, так как превышение предельно допустимых концентраций подвижных форм тяжелых металлов в почвах приводит к деградации земель, снижению продуктивности агроценозов и накоплению токсикантов в сельскохозяйственной продукции, создавая угрозу экологической и продовольственной безопасности. **Цель исследований.** Систематизация данных о факторах, определяющих подвижность тяжелых металлов в почвах, методах ее оценки и региональных особенностях проявления в почвах Садонского свинцово-цинкового комбината. **Методы.** Рассмотрены методологические подходы к экологическому нормированию — антропоцентрический и биоцентрический, а также система критериев оценки состояния почв (химические, физические показатели, превышение ПДК, потери гумуса). Приведена классификация ТМ по степени опасности и основные источники их поступления: природные (выветривание пород) и техногенные (промышленность, автотранспорт, сельское хозяйство). Особое внимание уделено факторам, определяющим подвижность металлов: формам нахождения (валовые и подвижные), содержанию гумуса, гранулометрическому составу, реакции среды (рН), окислительно-восстановительным условиям и влажности почвы. **Результаты работ.** Показано, что увеличение влажности с 55–60 % до 80–90 % может повышать подвижность элементов в 1,5–2 раза. Проанализированы методы оценки подвижных форм с использованием различных экстрагентов. На примере Республики Северная Осетия–Алания (РСО–Алания) продемонстрированы региональные особенности накопления тяжелых металлов. По результатам полевых исследований в зоне влияния Садонского свинцово-цинкового комбината установлено, что пиковые концентрации свинца и цинка приурочены к верхним горизонтам почв, что подтверждает техногенную природу загрязнения. Основными источниками выступают хвостохранилища (Унальское – 6,1 га, Фиагдонское – 5,6 га), в отходах которых содержание свинца достигает 0,16 %, цинка – 0,15 %. В биопробах (фрукты, картофель) из населенных пунктов Алагирского ущелья выявлено превышение допустимых уровней: содержание свинца во фруктах оказалось почти вдвое выше фоновых значений, а в картофеле зафиксировано превышение ПДК по цинку в 1,2–1,6 раза. Обоснована необходимость перехода от оценки валового содержания ТМ к определению их подвижных форм.

Ключевые слова: тяжелые металлы, подвижность, экологическое нормирование, почва, ПДК, агроландшафт.

Для цитирования: Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Кануков А.С., Архиреева И.Г., Дадтеева Э.В. Подвижность тяжелых металлов в почвах агроландшафтов: факторы, оценка и экологические последствия на примере Садонского свинцово-цинкового комбината. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 168–179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Original paper

Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case study

I.D. Alborov , O.G. Burdzieva , A.S. Kanukov , I.G. Arkhireeva ,
E.V. Dadteeva 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: cgi_ras@mail.ru

Received: 15.01.2026, revised: 20.03.2026, accepted: 24.03.2026

Abstract: The relevance of the study is determined by the need for environmental regulation of anthropogenic impact on agricultural landscapes, since exceeding the maximum permissible concentrations of mobile forms of heavy metals in soils leads to land degradation, reduced productivity of agroecosystems, and accumulation of toxicants in agricultural products, posing a threat to environmental and food security. **Aim.** To systematize data on the factors determining the mobility of heavy metals in soils, methods for its assessment, and regional characteristics of its manifestation in the soils of the Sadon Lead-Zinc Plant. **Methods.** Methodological approaches to environmental regulation—anthropocentric and biocentric—as well as a system of criteria for assessing soil conditions (chemical and physical indicators, exceeding maximum permissible concentrations, humus loss) are considered. A classification of HMs by hazard level and the main sources of their input are provided: natural (rock weathering) and technogenic (industry, motor transport, agriculture). Particular attention is paid to factors determining metal mobility: forms of occurrence (total and mobile), humus content, particle size distribution, reaction of the medium (pH), redox conditions, and soil moisture. **Results.** It is shown that an increase in soil moisture from 55–60 % to 80–90 % can increase the mobility of elements by 1.5–2 times. Methods for assessing mobile forms using various extractants are analyzed. Regional features of heavy metal accumulation are demonstrated using the example of the Republic of North Ossetia–Alania (RNO–Alania). Based on field studies in the zone affected by the Sadon Lead-Zinc Plant, it was established that peak concentrations of lead and zinc are confined to the upper soil horizons, confirming the technogenic nature of the pollution. The main sources are tailings dumps (the Unal dump – 6.1 ha, the Fiagdon dump – 5.6 ha), whose waste contains lead reaching 0.16% and zinc 0.15 %. In biological samples (fruits, potatoes) from populated areas of the Alagir Gorge, exceedances of permissible levels were revealed: the lead content in fruits was almost twice as high as background values, while potatoes showed exceedances of the maximum permissible concentration for zinc by a factor of 1.2–1.6. The necessity of shifting from assessing the total HM content to determining their mobile forms is substantiated.

Keywords: heavy metals, mobility, environmental regulation, soil, maximum permissible concentration (MPC), agricultural landscape.

For citation: Alborov I.D., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Dadteeva E.V. Mobility of heavy metals in agricultural landscape soils: factors, assessment, and environmental consequences using the Sadon lead-zinc plant as a case stud. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2026. 16(1): 168-179. DOI: 10.46698/VNC.2026.24.11.001

Введение

Проблема загрязнения агроландшафтов тяжелыми металлами является одной из приоритетных в современной экологии. В отличие от органических загрязнителей, тяжелые металлы (ТМ) не подвергаются биодеградации, а лишь перераспределяются между компонентами экосистем, накапливаясь в почвах и включаясь в трофические цепи [Wang et al., 2019]. Валовое содержание металлов в почве часто не является исчерпывающим показателем экологической опасности. Ключевое значение имеет их подвижность – способность переходить в почвенный раствор и мигрировать в грунтовые воды и атмосферу или поглощаться растениями.

Цель данной работы – систематизировать данные о факторах, определяющих подвижность тяжелых металлов в почвах, методах ее оценки и региональных особенностях проявления в почвах Садонского свинцово-цинкового комбината.

Методы и методологические подходы к нормированию и оценке загрязнения почв

Экологическое нормирование антропогенного воздействия на почвы до сих пор остается сложной научной задачей. Анализ литературы [Снакин и др., 1993; Van der Ploeg, Vlijm, 1978] показывает существование двух основных подходов: антропоцентрического (сохранение среды для нужд человека) и биоцентрического (сохранение естественного течения сукцессий). Наиболее перспективным для долгосрочного устойчивого развития признается подход, основанный на сохранении биогеоценоза в целом и безусловном праве всех организмов на существование.

Для оценки состояния почв используется система параметров, включающая химические (состав обменных катионов, содержание гумуса, соотношение C : N, окислительно-восстановительный потенциал) и физические показатели (водопроницаемость, плотность, структура).

В России и странах СНГ разработаны критерии экологической оценки почв, дифференцированные для селитебных и сельскохозяйственных территорий (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Обобщенные критерии оценки состояния почв (по данным «Зеленый мир», 1994) / Generalized criteria for assessing soil condition (according to “Green World”, 1994)

Показатель / Indicator	Экологическое бедствие / Ecological disaster	Чрезвычайная ситуация / Emergency situation	Относительно удовлетворительная / Relatively Satisfactory
Потери гумуса за 10 лет, % / Humus loss over 10 years, %	>25	10–25	<1
Увеличение плотности (кратность) / Increase in density (fold)	>1.4	1.3–1.4	≤1.1
Превышение ПДК хим. веществ (1 класс) / Exceeding the MPC of chemical substances (hazard class 1)	>3	2–3	≤1

Эти критерии базируются на таких показателях, как мощность экспозиционной дозы, содержание радионуклидов, суммарный показатель химического загрязнения (Z_c), а также специфические для агроценозов показатели – потери гумуса, увеличение плотности, фитотоксичность.

Классификация и источники поступления тяжелых металлов

Согласно ГОСТ Р70281-2022, химические вещества по степени опасности делятся на три класса. К I классу (высокоопасные) относятся As, Cd, Hg, Pb, Se, Zn, Tl; ко II (умеренно опасные) – Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr; к III (малоопасные) – Ba, V, W, Mn, Sr.

Источники поступления ТМ в агроландшафты делятся на природные (выветривание пород) и техногенные. Основные техногенные источники:

- Выбросы предприятий черной и цветной металлургии.
- Автотранспорт (особенно соединения свинца и кадмия).
- Сельскохозяйственная деятельность (минеральные удобрения, пестициды, осадки сточных вод, навоз).
- Трансграничный перенос загрязненных воздушных масс.

Анализ данных по РСО–Алания [Заалишвили и др., 2021] показывает, что выбросы от автотранспорта составляют основную долю загрязнения (рис. 1), при этом значительную опасность представляют соединения свинца, цинка и оксиды азота.

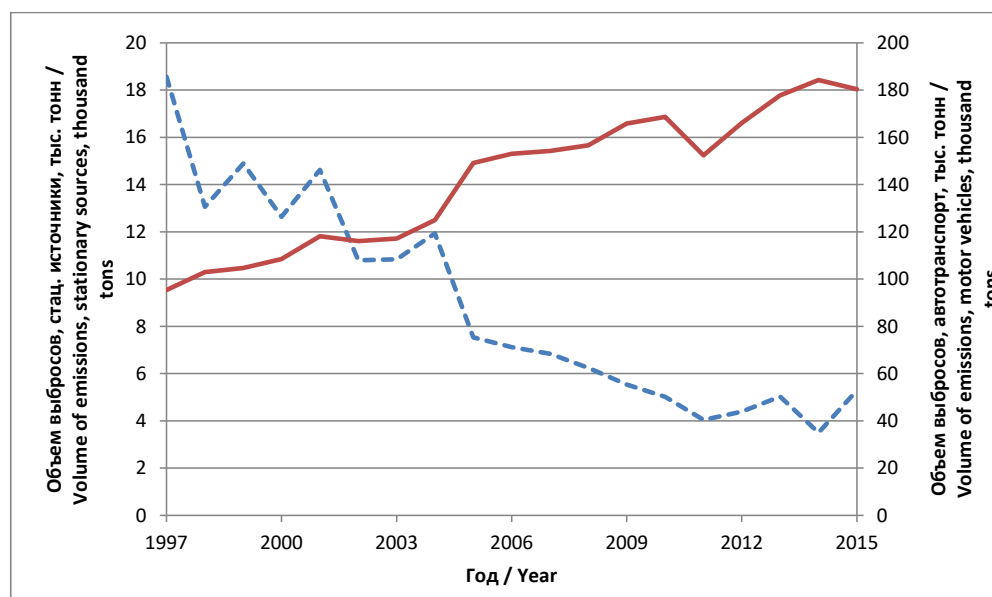


Рис. 1. Динамика объемов выбросов от стационарных источников и автотранспорта на территории РСО-А за 1997–2015 гг. (пунктирная линия – объемы выбросов от стационарных источников, непрерывная линия – объемы выбросов от автотранспорта) /

Fig. 1. Dynamics of emission volumes from stationary sources and motor vehicles in the territory of the Republic of North Ossetia–Alania for 1997–2015 (dotted line – emission volumes from stationary sources, solid line – emission volumes from motor vehicles)

Факторы, определяющие подвижность тяжелых металлов в почве

Подвижность ТМ – это способность их соединений переходить из твердой фазы почвы в почвенный раствор. Она является интегральным показателем, зависящим от комплекса факторов.

Первый фактор – формы нахождения металлов в почве. Тяжелые металлы присутствуют в почве в различных формах: в виде катионов (M^+), анионов (M^-),

амфотерных соединений (M^+) или нейтральных комплексов (M^0) [Алексеев, 1987]. С экологической точки зрения важно разделение на валовое содержание – общее количество элемента в почве и подвижные (доступные) формы – часть элемента, способная переходить в раствор и поглощаться растениями. Именно подвижные формы определяют токсическое воздействие [Thin et al., 2021].

Второй фактор обусловлен влиянием свойств почвы:

1. Содержание гумуса: Органическое вещество обладает высокой поглотительной способностью. Гумусовые кислоты образуют с металлами комплексные органо-минеральные соединения, снижая их подвижность. Поэтому черноземы, богатые гумусом, более устойчивы к загрязнению, чем дерново-подзолистые почвы [Обухов, Лепнёва, 1989]. Исследования в РСО-Алания подтверждают, что основное депонирование ТМ происходит в верхнем гумусовом горизонте.

2. Гранулометрический состав: глинистые и суглинистые почвы фиксируют металлы сильнее, чем песчаные и супесчаные.

3. Реакция среды (рН): в кислой среде (рН < 5.5) подвижность большинства катионогенных элементов (Cd, Zn, Pb, Ni) резко возрастает. В нейтральной и слабощелочной среде они образуют труднорастворимые гидроксиды и карбонаты, выпадая в осадок.

4. Окислительно-восстановительный потенциал: влияет на валентность и, следовательно, на токсичность элементов (например, Cr^{6+} более токсичен и подвижен, чем Cr^{3+}).

Третий фактор – влияние влажности и внешних условий. Установлено, что с увеличением влажности почвы подвижность ТМ возрастает. При повышении влажности с 55–60 % до 80–90 % суммарное содержание подвижных форм исследованных элементов увеличилось в 1.5–2 раза (табл. 2). Это связано с изменением ионной силы раствора и активизацией микробиологических процессов [Обухов, Лепнёва, 1989].

Таблица 2 / Table 2

Изменение подвижности микроэлементов в зависимости от влажности почвы (выщелоченный чернозем) / Changes in the mobility of trace elements depending on soil moisture (leached chernozem)

Влажность почвы / Soil moisture	Элемент, мг/кг Element, mg/kg									
	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb	Co	Cd	Fe	сумма / sum
55–60	4.5–8.2	129–178	2.0–3.1	1.7–2.8	10.4–13.5	1.7–2.2	4.7–7.2	0.50–0.71	76–132	3476–4054
80–90	114–141	2166–2394	39–59	26–43	73–84	17–43	93–98	249–270	141–181	3425–3956

Методы оценки подвижности и нормативы

Для оценки содержания подвижных форм используются различные экстрагенты. Наибольшее распространение получили:

- 1н HCl и 1н HNO₃ – для извлечения «кислоторастворимых» форм, характеризующих потенциальный резерв.

- Ацетатно-аммонийный буфер (рН 4.8) – для оценки актуальных запасов, доступных растениям [Попов, Соловьев, 1991].

- Вытяжки по Пейве-Ринькису – для дифференцированной оценки обеспеченности растений микроэлементами.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) металлов в почвах сильно варьируют в зависимости от почвенно-климатических условий. Для более точной оценки целесообразно использовать региональные шкалы. В таблице 3 представлены данные по содержанию подвижных форм ТМ в выщелоченных черноземах РСО–Алания в сравнении с ПДК.

Особую опасность представляет зона влияния промышленных предприятий г. Владикавказа. В почвах, прилегающих к заводам «Электроцинк» и «Победит», зафиксировано превышение ПДК по цинку, свинцу и меди в 2–12 раз, что классифицируется как чрезвычайная экологическая ситуация.

Биологические последствия высокой подвижности металлов

Повышенная подвижность ТМ напрямую влияет на живые организмы. У микроорганизмов угнетается активность почвенных ферментов, снижается интенсивность разложения органического вещества. Микроорганизмы могут служить индикаторами загрязнения [Наплекова, Булавко, 1983].

Таблица 3 / Table 3

Содержание подвижных форм ТМ в почвах РСО–Алания (мг/кг) /
Content of mobile forms of heavy metals in the soils of the Republic
of North Ossetia–Alania (mg/kg)

Элемент / Element	ПДК (подвижные формы) / МРС (mobile forms)	Фактическое содержание / Actual content	Отклонение, % / Deviation, %
Свинец (Pb)	0.3	1.2–2.2	+300...+600
Цинк (Zn)	23	10.4–54.2	до +135
Кадмий (Cd)	н/д	0.2–1.3	–
Медь (Cu)	3	1.7–9.5	до +200

Примечание: данные обобщены по материалам Джанаева [2008] /
Note: data summarized based on materials from Dzhanayev [2008].

В случае растений металлы (Zn, Cu, Cd, Pb) проникают через корневые системы. Наблюдается антагонизм и синергизм ионов (например, Ca подавляет поступление Cd, а Zn и Cu могут усиливать токсичность друг друга). У сои и зерновых культур зафиксировано накопление Zn, Ni и Cd выше допустимых остаточных количеств (ДОК), что делает продукцию опасной для здоровья человека и животных.

Поскольку подвижные формы легко включаются в биологический круговорот, концентрация токсинов в продукции растениеводства может в сотни раз превышать их содержание в почве, создавая угрозу для организма человека, находящегося на вершине пищевой цепи.

Кроме того, в последние годы появилось множество исследований посвященных изучению влияния микропластика (МП) на окружающую среду и его взаимодействия с тяжелыми металлами [Lu et al., 2020; Wakaf et al., 2020; Zhou et al., 2020; Кануков и др., 2025]. Микропластиковые частицы способны влиять на экологическое поведение и риски тяжелых металлов через прямые и косвенные механизмы. С одной стороны, они могут непосредственно модифицировать физико-химические свойства, включая процессы адсорбции и десорбции металлов, что сказывается на их биоаккумуляции и токсичности для живых организмов. С другой стороны, параметры среды, такие как pH и концентрация растворенного органического вещества, также воздействуют на взаимодействие МП с металлами, изменяя их спецификацию и биодоступность [Yu et al., 2020, 2021].

Результаты работы

В ходе совместных исследований почвенного покрова в зоне влияния Садонского свинцово-цинкового комбината (с участием геохимической партии ЦОМГЭ ИМГРЭ, с. Бираганг) было зафиксировано аномально высокое содержание тяжелых металлов [Алборов и др., 2011]. Для уточнения ситуации были проведены работы по оценке геохимического состояния почв на глубину распространения техногенных элементов. С этой целью в районе добычи геоматериалов были отрыты шурфы, а пробы отбирались послойно до глубины 1 м (интервал 0,2 м). Полученные данные мониторинга сведены в таблицу 4.

Таблица 4 / Table 4

Содержание свинца и цинка по вертикальному разрезу почвенного профиля в с. Нижний Унал / Lead and zinc content along the vertical section of the soil profile in the village of Nizhny Unal

Место отбора проб почвы / Soil sampling location	№ шурфа / Pit No.	Элемент / Element	Уровень почвенного горизонта, м / Soil horizon depth, m					
			0,05	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
Нижняя терраса р. Ардон / Lower terrace of the Ardon River	1	Pb	20	0,8	0,6	0,6	0,8	1,0
		Zn	20	3	5	5	6	5
	2	Pb	20	2,0	1	1	1	1
		Zn	50	10	10	5	20	3
	3	Pb	10	5	5	4	3	4
		Zn	30	20	20	20	10	20
	4	Pb	20	20	15	8	3	3
		Zn	60	50	80	30	20	20
	5	Pb	80	50	30	20	10	4
		Zn	300	200	80	80	50	30
Верхняя терраса р. Ардон / Upper terrace of the Ardon River	6	Pb	10	8	3	3	6	4
		Zn	20	10	10	10	10	10
Район расчленения долины / Valley dissection area	7	Pb	10	8	4	2	1,5	1
		Zn	40	30	20	10	8	8
Пасека / Apiary	8	Pb	10	6	3	2	3	1
		Zn	100	20	10	8	10	8
База МГУ / MSU base	9	Pb	3	0,8	0,8	1	0,8	0,8
		Zn	20	3,0	6	10	10	10
Склон левобережья / Left-bank slope	10-13	Pb	8	1	2	0,6	1	0,3
		Zn	10	5	3	3	5	1

Анализ данных таблицы 4 показал, что пиковые концентрации свинца и цинка приходятся на верхний почвенный горизонт, что подтверждает техногенную природу загрязнения. Оценка степени загрязнения производилась путем сравнения с фоновыми концентрациями ($C_{п.ф}$) и нормативами ПДКп (мг/кг); результаты представлены в таблице 5.

Важнейшим индикатором природных процессов при техногенном воздействии является форма нахождения химических элементов в составе минералов (ионная, сорбированная), которая более информативно характеризует суть геохимических процессов, чем их валовое содержание. Миграция элементов, сопутствующих добыче руды, обусловлена деятельностью горно-перерабатывающего комплекса и его инфраструктуры. Основными источниками выступают:

- хвостохранилища (содержание свинца и цинка в шахтных водах превышает ПДК до 400 раз);
- отвалы вскрышных и коренных пород.

Таблица 5 / Table 5

**Результаты исследований почвы района с. Нижний Унал /
Results of soil studies in the area of the village of Nizhny Unal**

Химический элемент / Chemical element	Pb	Zn	Cu	Ag
Сп.ф / Cm.f	47,5	100	27	0,05
ПДКп / MPCm	200	400	100	2
Площадь загрязнения, % / Contamination area, %	45	50	точечное / point	точечное / point
Среднее на площади загрязнения / Average over the contaminated area	460	1200	100	2
Относительно ПДКп / Relative to MPCm	2,3	3	1	1
Спmax / Cmmax	1500	2000	100	2
Относительно, ПДКп / Relative to MPCm	7,5	5	1	1

Под воздействием ветров (с характерной для горно-долинной местности переменчивостью) и химических процессов на границе этих объектов происходит накопление микроэлементов в верхнем слое литосферы. Состав отходов обогащения приведен в таблице 6, где наибольшую долю занимают серебро, железо, кремний, магний и алюминий, тогда как на долю токсичных свинца и цинка приходится от 0,08 до 0,16 %.

Обсуждение результатов

Проблема защиты окружающей среды на территориях, подверженных техногенной миграции, связана с аккумуляцией металлов в почве и переходом подвижных элементов в растительность [Алборов и др., 2024]. Интенсивность накопления микроэлементов варьирует в зависимости от вида растения и его органов, а также от климатических условий. Изучение распределения элементов в ландшафте позволяет прогнозировать поведение техногенных веществ и дифференцировать их аномалии от фоновых ландшафтных концентраций.

В качестве фона для сравнения были отобраны пробы в населенных пунктах, находящихся на территории государственного заповедника (сс. Цамад, Дагом, Урсдон). В биопробах определялось валовое содержание свинца и цинка с учетом ПДК (для фруктов: 0,4 и 10 мг/кг соответственно; для картофеля: 0,5 и 10 мг/кг). Определение подвижных форм выполнялось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Коэффициент подвижности (КП) рассчитывался как частное от деления содержания подвижных форм (Пф) на валовое (С):

$$КП = Пф/С.$$

Данные исследований приведены в таблице 7.

Таблица 6 / Table 6

Химический состав депонированных хвостов обогащения рудников Садонского комбината / Chemical composition of deposited tailings from ore processing at the Sadon Combine

Химические элементы, процент / Chemical elements, percent	Наименование хвостохранилища / Tailings storage facility name	
	Фиагдонское / Fiagdon	Унальское / Unal
Свинец, Pb	0,13	0,16
Цинк, Zn	0,15	0,08
Золото, Au	0,008	0,01
Серебро, Ag	3,55	5,13
Висмут, Bi	0,002	0,002
Кадмий, Cd	0,003	0,001
Железо, Fe	3,78	4,52
Сера, S	-	2,09
Кремний, Si	57,9	64,0
Кальций, Ca	6,25	0,89
Магний, Mg	215	0,60
Алюминий, Al	10,24	5,36
Калий, K	-	2,49
Натрий, Na	-	0,80
Мышьяк, As	0,06	0,05
Марганец, Mn	-	0,16
Титан, Ti	-	0,15
Углерод, C	-	1,69

Таблица 7 / Table 7

Содержание свинца и цинка (мг/кг) в биопробах / Lead and zinc content (mg/kg) in biological samples

Населенный пункт, где отбирались пробы / Locality where samples were taken	Фрукты / Fruits				Картофель / Potatoes			
	Pb		Zn		Pb		Zn	
	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC	вал. / gross	КП / MC
Цамад, Дагом, Урсдон (экологически благополучные участки) / Tsamad, Dagom, Ursdon (ecologically safe areas)	0,23	0,6	8,1	0,8	0,4	0,8	-	-
Нижний Унал / Nizhny Unal	0,46	1,15	7,3	0,7	0,3	0,7	11,7	1,2
Верхний Унал / Verkhny Unal	-	-	8,7	0,87	0,52	1,04	16,4	1,6
Ст. Дзуарикау / St. Dzuarikau	0,51	1,2	7,3	0,73	0,12	0,2	12,3	1,2

Анализ таблицы 7 свидетельствует, что в плодах из садов Унала и Дзуарикау концентрация свинца почти вдвое выше, чем в аналогичных пробах с экологически благополучных территорий. Содержание цинка в фруктах находится на сопоставимом уровне и не превышает установленных нормативов. В отношении картофеля наблюдается иная картина: превышение ПДК по свинцу зафиксировано только в с. Унал, тогда как уровень цинка в 1,2–1,6 раза выше нормы. Таким образом, установлено, что для фруктов характерно преимущественное накопление свинца, тогда как для картофеля – цинка.

Экологическая обстановка в Алагирском ущелье формируется под воздействием предприятий Садонского свинцово-цинкового комбината, занятых в горнодобыче, и сопутствующей им инфраструктуры, расположенной на поверхности. Водная система представлена рекой Ардон и стекающими по радиальным ущельям водотоками, в которые аккумулируются шахтные воды, отличающиеся высоким содержанием токсичных тяжелых металлов. В пределах ограниченных речных террас размещены ключевые элементы инфраструктуры: бункерные хозяйства, транспортные артерии для перемещения руды, площадки для складирования пустых пород и некондиционного сырья, а также гидротехнические сооружения для хвостов обогащения. Эксплуатация этих объектов сопровождается эмиссией пылегазовых аэрозолей – продуктов минерализации руд, – которые распространяются далеко за пределы промплощадок. Это приводит к деградации горных фитоценозов, истощению ресурсной базы биоты, нарушению естественных окислительно-восстановительных процессов и сокращению биоразнообразия, что негативно отражается на качестве жизни и демографических процессах местного сообщества.

Как показывают наблюдения, наиболее существенное воздействие на состояние почв оказывают склады отходов обогащения. Ключевыми источниками загрязнения здесь выступают два хвостохранилища – Унальское (занимает 6,1 га, содержит 3,2 млн т отходов) и Фиагдонское (5,6 га, 2,3 млн т отходов). В составе этих накопленных отходов присутствуют цинк (0,15 %), свинец (до 0,16 %), сера (более 2 %), кремнезем (64 %), а также прочие химические элементы и их соединения.

Выводы

Подвижность тяжелых металлов является ключевым параметром, определяющим экологическое состояние почв агроландшафтов. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка только валового содержания ТМ недостаточна; необходимо определение их подвижных форм, коррелирующих с биодоступностью.
2. Основными факторами, контролирующими подвижность, являются содержание гумуса, реакция среды (рН), гранулометрический состав и влажность почвы.
3. Почвы РСО-Алания (особенно выщелоченные черноземы и дерново-подзолистые почвы в промышленных зонах) характеризуются повышенным содержанием подвижных форм Zn, Pb, Cu и Cd, что требует организации постоянного мониторинга и разработки детоксикационных мероприятий.

4. Экологическая обстановка в Алагирском ущелье формируется под воздействием предприятий Садонского свинцово-цинкового комбината, занятых в горнодобыче, и сопутствующей им инфраструктуры, расположенной на поверхности. Наиболее существенное воздействие на состояние почв оказывают склады отходов обогащения.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка прогностических моделей поведения ТМ в системе «почва–растение» и поиск эффективных способов иммобилизации загрязнителей.

Литература

1. Алборов И.Д., Бадтиев Ю.С., Бадтиева Ф.К., Тедеева Ф.Г. Оценка экологической обстановки в районе Унальского хвостохранилища. // Вестник МАНЭБ. – 2011. – Т. 16. № 2. – С. 9–17.
2. Алборов И.Д., Бурдзиева О.Г., Закс Т.В., Кануков А.С. Геоэкологический мониторинг и ремедиация территории Моздокского нефтепродуктового загрязнения. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 1. – С. 127–140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009.
3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Ленинград: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 140 с.
4. Джанаев З.Г. Изменение химического состава почв Северного Кавказа. // Агрехимический вестник. – 2008. – № 2. – С. 4–6.
5. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 4. – С. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
6. Кануков А.С., Бурдзиева О.Г., Корбесова К.В., Дадтеева Э.В. Влияние микропластика на загрязнение почв тяжелыми металлами. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 4. – С. 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m.
7. Наплекова Н.Н., Булавко Г.И. Ферментативная активность почв, загрязненных соединениями свинца. // Почвоведение. – 1983. – № 7. – С. 35–40.
8. Обухов А.И., Лепнёва О.М. Биогеохимия тяжелых металлов в городской среде. // Почвоведение. – 1989. – № 5. – С. 65–73.
9. Попов В.В., Соловьев Г.А. Контроль загрязнения почв тяжелыми металлами. // Химизация сельского хозяйства. – 1991. – № 11. – С. 80–82.
10. Снакин В.В., Кречетов П.П., Мельченко В.Е., Алябина И.О., Кузовникова Т.А., Степичев А.В. Оценка состояния почв и ландшафтов для целей экологического нормирования. / Биогеохимические основы экологического нормирования. М.: Наука, 1993. – С. 126–142.
11. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 709. – Art. No. 136276.
12. Thinh N.V., Osanai Y., Do V.H., Nguyen T.A., Phuong N.M., Kien N.T. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid. // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – Art. No. 127912. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127912.
13. Van Der Ploeg, Vlijm L. Ecological evolution, nature conservation and land use planning with particular reference to methods in Netherland. // Biologocal Conservation. – 1978. – Vol. 14. – pp. 197–221.
14. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. // Environmental Pollution. – 2020. – Vol. 266. – Art. No. 115263.
15. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. // Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 695. – Art. No. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
16. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Vol. 395. – Art. No. 122690.
17. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 752. – Art. No. 141956.
18. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – Vol. 392. – Art. No. 122273.

References

1. Alborov I.D., Badtiyev Yu.S., Badtiyeva F.K., Tedeeva F.G. Assessment of the ecological situation in the area of the Unal tailings storage facility. *Vestnik of IAELPS*. 2011. Vol. 16. No. 2. pp. 9–17.
2. Alborov I.D., Burdzieva O.G., Zaks T.V., Kanukov A.S. Geo-ecological monitoring and remediation of the Mozdok area polluted by oil products. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 1. pp. 127–140. DOI: 10.46698/VNC.2024.10.67.009.
3. Alexeev Yu.V. Heavy metals in soils and plants. Leningrad. Agropromizdat. 1987. 140 p.
4. Dzhanayev Z.G. Changes in the chemical composition of soils in the North Caucasus. *Agrochemistry Bulletin*. 2008. No. 2. pp. 4–6.
5. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V. Assessment of the Impact of Road Traffic on the Pollution of Urbanized Territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 4. pp. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
6. Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Korbesova K.V., Dadteyeva E.V. The impact of microplastics on soil contamination by heavy metals. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15, No. 4. pp. 197–210. DOI: 10.46698/a8396-0899-8665-m. (In Russ.)
7. Naplekova N.N., Bulavko G.I. Enzymatic activity of soils contaminated with lead compounds. *Soil Science*. 1983. No. 7. pp. 35–40.
8. Obukhov A.I., Lepneva O.M. Biogeochemistry of heavy metals in the urban environment. *Soil Science*. 1989. No. 5. pp. 65–73.
9. Popov V.V., Solovyov G.A. Control of soil contamination with heavy metals. *Chemization of Agriculture*. 1991. No. 11. pp. 80–82.
10. Snakin V.V., Krechetov P.P., Melchenko V.E., Alyabina I.O., Kuzovnikova T.A., Stepichev A.V. Assessment of the state of soils and landscapes for environmental regulation purposes. *Biogeochemical foundations of environmental regulation*. Moscow. Nauka. 1993. pp. 126–142.
11. Lu X.M., Lu P.Z., Liu X.P. Fate and abundance of antibiotic resistance genes on microplastics in facility vegetable soil. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 709. Art. No. 136276.
12. Thinh N.V., Osanai Y., Do V.H., Nguyen T.A., Phuong N.M., Kien N.T. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid. *Chemosphere*. 2021. Vol. 263. Art. No. 127912. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127912.
13. Van Der Ploeg, Vlijm L. Ecological evolution, nature conservation and land use planning with particular reference to methods in Netherland. *Biological Conservation*. 1978. Vol. 14. pp. 197–221.
14. Wakkaf T., Allouche M., Harrath A.H., Mansour L., Alwasel S., Mohamed Thameemul Ansari K.G., Beyrem H., Sellami B., Boufahja F. The individual and combined effects of cadmium, polyvinyl chloride (PVC) microplastics and their polyalkylamines modified forms on meiobenthic features in a microcosm. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. Art. No. 115263.
15. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 695. Art. No. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
16. Yu H., Hou J.H., Dang Q.L., Cui D.Y., Xi B.D., Tan W.B. Decrease in bioavailability of soil heavy metals caused by the presence of microplastics varies across aggregate levels. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 395. Art. No. 122690.
17. Yu H., Zhang Z., Zhang Y., Fan P., Xi B.D., Tan W.B. Metal type and aggregate microenvironment govern the response sequence of speciation transformation of different heavy metals to microplastics in soil. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 752. Art. No. 141956.
18. Zhou Y.F., Liu X.N., Wang J. Ecotoxicological effects of microplastics and cadmium on the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 392. Art. No. 122273.