

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В РАСТЕНИЯХ И НА ПОВЕРХНОСТИ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА

А.А. Соколов<sup>1</sup>, Т.В. Пучкова<sup>1</sup>, В.А. Фоменко<sup>1</sup>, Д.А. Плахотин<sup>1</sup>, И.И. Шепелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике,  
Геленджик, Россия, e-mail: anso@sfnu.ru

<sup>2</sup> ООО «Экологический Инжиниринговый Центр», Ачинск, Россия

**Аннотация:** Приведены результаты исследований распределения токсичных веществ в растениях и на поверхности рекультивированного намывного техногенного массива – Унальского хвостохранилища. На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований экспедиционных работ прошлых лет авторами выдвинута и подтверждена гипотеза о возможной инфильтрации рассолов через рекультивационный слой, при которой химические вещества и элементы иссушенных слоев хвостохранилища при определенной степени увлажнения проникают на поверхность и через корневую систему аккумулируются в зеленой массе растений. Приведены формальные описания методов определения пространственной интерполяции содержания металлов в отобранных образцах проб на основе обычного кригинга, представлены тепловые карты и таблицы для визуализации результатов исследований. В процессе сопоставления нормированных значений и данных, полученных в результате анализа проб растений с рекультивированной поверхности, обнаружено, что содержание всех исследуемых металлов превышает установленные нормы предельно допустимых концентраций. Выполненные изыскания позволяют сформировать базы данных и визуализировать на геоинформационной основе участки с превышенными концентрациями уровней содержания тяжелых металлов в грунтах и растительности для принятия инженерно-экологических решений. Это позволит продолжить дальнейшие рекультивационные мероприятия для необходимого вклада в развитие теории и практики разработки новых экспресс-методов экологического мониторинга выведенных из эксплуатации объектов горно-перерабатывающего производства, с учетом теории подвижности химических элементов в почве. Результаты исследований распределения вредных веществ в растениях на поверхностном слое рекультивированного хвостохранилища показали существующую необходимость систематического мониторинга выведенных из эксплуатации объектов горно-перерабатывающего производства в режиме онлайн для обеспечения полноты и достаточности информации по потенциальным угрозам экологической безопасности, не только в отдельно взятом регионе, но и в целом по Российской Федерации.

**Ключевые слова:** экологический мониторинг, рекультивационный слой, пробы растений, кригинг, экологическая безопасность, пространственное распределение химических элементов, пространственная интерполяция.

**Благодарность:** Исследования выполнены в Южном федеральном университете за счет средств Российского научного фонда (проект № РНФ/23-37-ГЛ, № 23-77-00015).

*Для цитирования:* Соколов А. А., Пучкова Т. В., Фоменко В. А., Плахотин Д. А., Шепелев И. И. Результаты исследований распределения токсичных веществ в растениях и на поверхности рекультивированного хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 111–126. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_1\_0\_111.

---

## Research findings on spreading of toxic substances in plants on the surface of reclaimed tailings ponds

A.A. Sokolov<sup>1</sup>, T.V. Puchkova<sup>1</sup>, V.A. Fomenko<sup>1</sup>, D.A. Plakhotin<sup>1</sup>, I.I. Shepelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia, e-mail: anso@sfnu.ru

<sup>2</sup> Limited Liability Company «Environmental Engineering Center», Achinsk, Russia

---

**Abstract:** The article describes the research findings on the spread of toxic substances in plants on the surface of a manmade alluviation—the Unaly tailings pond. On the basis of the earlier theoretical and experimental field research analysis, the authors put forward and prove a hypothesis on possible infiltration of brines through the reclaimed layer, when chemical elements and components of dried layers of the tailings pond, given certain humidification, penetrate onto ground surface and, via root systems, into green material of plants, and accumulate there. The article offers formal description of methods to determine the spatial interpolation of metal content of the test samples using regular kriging, and presents the thermal maps and tables for the visualization of the research findings. The comparison of the rated values and the data from the analysis of plants sampled on the reclaimed surface discovers that the contents of all test metals exceeds the maximum allowable concentrations. The implemented research enables creation of data bases and geoinformation-based visualization of areas with the increased concentrations of heavy metals in soil and in plants for the ecological and engineering decision-making. This can promote further reclamation to provide the necessary contribution to theory and practice of development of novel rapid ecological monitoring techniques for the decommissioned mining and processing industry facilities with regard to the theory of mobility of chemical elements in soil. The research into spreading of toxic substances in plants on the surface of the reclaimed tailings pond points at the current necessity of regular monitoring of decommissioned facilities of the mining and processing industry on a real-life basis, to provide complete and sufficient information on potential ecological safety hazards not only in a separate region but over the whole area of Russia.

**Key words:** ecological monitoring, reclamation layer, vegetation samples, kriging, ecological safety, spatial spread of chemical elements, spatial interpolation.

**Acknowledgements:** The studies were carried out at the Southern Federal University and were supported by the Russian Science Foundation, Project Nos. RNF/23-37-GL and 23-77-00015.

**For citation:** Sokolov A. A., Puchkova T. V., Fomenko V. A., Plakhotin D. A., Shepelev I. I. Research findings on spreading of toxic substances in plants on the surface of reclaimed tailings ponds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(1):111-126. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_1\_0\_111.

---

### Введение

В качестве объекта исследований распределения вредных токсичных веществ в растениях на поверхностном

слое рекультивированного хвостохранилища было выбрано Унальское хвостохранилище, в прошлом представля-

ящее собой намывной техногенный массив, вмещающий большое количество переработанных материалов, расположенный на высоте около 1700 м над уровнем моря. Выведенные из эксплуатации объекты горного производства, в том числе прошедшие стадию рекультивации, по-прежнему представляют собой опасные природно-технические системы с угрозой техногенного воздействия на окружающую среду [1]. Уральское хвостохранилище в свое время аккумулировало в себе послойно значительное количество промышленных отходов Мизурской горно-обогатительной фабрики, которая выдавала ежегодно 6–7 тыс. м<sup>3</sup> хвостов, содержащих 1,5–2,0 тыс. т измельченных горных пород, с усредненной концентрацией цинка 0,15–0,25% и свинца 0,13–0,19%, которые транспортировались по пульпопроводу к месту хранения. С учетом того, что хвостохранилище является уникальным комплексным техногенным месторождением металлического сырья, в частности тяжелых металлов, и принимая во внимание программу глобального мониторинга, принятую в ООН в 1973 г., в первоначальный список которой входили три металла: свинец (Pb), кадмий (Cd) и ртуть (Hg), авторы провели исследования по содержанию тяжелых металлов в растительности на поверхности рекультивационного слоя хвостохранилища в рамках реализации проекта РНФ.

Предварительно на основании научно-практического задела [2–4] из экспедиционных исследований авторами была выдвинута гипотеза о возможной значительной степени инфильтрации через рекультивационный слой, при которой химические вещества и элементы иссушенных слоев хвостохранилища при определенной степени увлажнения в ходе сезонных осадков имеют возможность проникать на поверхность, обра-

зую высолы, и через корневую систему аккумулироваться в самих растениях. Для подтверждения выдвинутой гипотезы был осуществлен отбор проб растительности по периметру поверхности хвостохранилища установленным образом с целью обеспечения полноты и представительности комплексного анализа, позволяющего в дальнейшем дать оценку содержания вредных веществ в зависимости от элементного состава.

Анализ публикаций по исследуемой тематике показал актуальность и практическую востребованность результатов исследований по мониторингу содержания техногенных загрязнений предприятий горно-обогатительной отрасли в растительности окружающих экосистем [5, 6]. Современные исследования свидетельствуют о сохраняющейся экологической напряженности, связанной с накоплением тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Cr, Zn) в растениях, произрастающих на рекультивированных хвостохранилищах [7, 8]. Несмотря на проведение рекультивационных мероприятий, отмечается устойчивая миграция токсичных элементов в почвенно-растительные системы [9, 10], что создает риск их включения в пищевые цепи и потенциальную опасность для здоровья человека [11, 12]. Исследования показывают, что сельскохозяйственные культуры, такие как кукуруза, преимущественно накапливают свинец в корневой системе [11], тогда как бобовые демонстрируют относительно низкую аккумуляцию кадмия [13]. Особый интерес представляют травянистые растения, в частности *Cynodon dactylon*, которые благодаря высокой способности к накоплению хрома могут служить эффективными биоиндикаторами [14]. Пространственное распределение загрязняющих веществ в растениях связывается как с историей промышленного освоения территории, так и с особенностями

проведения рекультивационных работ [15]. В данном случае химическому анализу подвергались пробы мятлика лугового, произрастающего на момент исследований повсеместно на поверхности хвостохранилища.

Ключевой проблемой остается недостаточная изученность долговременной динамики токсичных элементов в рекультивированных экосистемах [12, 16]. Особого внимания заслуживают исследования трансформационных процессов в системе «хвосты – почва – растения», включая влияние почвенной микробиоты на биодоступность металлов [17]. При этом отмечается дефицит данных о процессах вторичного загрязнения, связанных с изменением физико-химических параметров среды [8, 18]. Исследования в угледобывающих регионах Китая демонстрируют четкую зависимость между историей промышленного освоения территории и современным уровнем загрязнения расти-

тельности [19]. При этом отмечается, что даже спустя десятилетия после прекращения добычи концентрации некоторых металлов остаются критически высокими [20], что связывается с изменением физико-химических условий в почве и процессами выветривания хвостов [10, 21].

Исследователи во время экспедиции 2024 г. в ходе выполнения плана реализации проекта РНФ приняли решение охватить в первый год исследований периметр хвостохранилища и в дальнейшем провести рассредоточенный отбор проб в зависимости от установления факта наличия загрязнений веществами различных классов опасности и определения их концентрации.

### Материалы и методы

В 2024 г. была организована экспедиция на Унальское хвостохранилище, в ходе которой по ранее разработанной методике, состоящей из трех этапов и учитывающей осуществление географической привязки точек отбора проб с применением GPS-методов геолокации были отобраны пробы растительности, в основном представленной мятликом луговым. Отбор проб по периметру хвостохранилища осуществлялся с соблюдением определенного интервала между точками пробоотбора, с соблюдением необходимой массы растительности в каждой пробе, без учета веса корневой системы. Далее исследователями была осуществлена пробоподготовка для последующего анализа растительности на предмет содержания веществ различных классов опасности в ФИЦ ХФ РАН, как показано на рис. 1.

Дальнейший анализ содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах представляет собой важнейший этап в экологическом мониторинге. Выбор метода подготовки образцов зависит от целей исследования, типа матрицы и



Рис. 1. Фото отбора проб растительности (из личного архива А.А. Соколова)

Fig. 1. Photo of vegetation sampling (from A.A. Sokolov's personal archive)

требуемой точности. Современные методы, такие как разложение в царской водке, микроволновое разложение и экстракция азотной кислотой, обеспечивают высокую чувствительность и воспроизводимость анализа. Развитие комбинированных подходов и внедрение зеленых технологий позволяет сделать анализ более экологически безопасным и эффективным, что имеет ключевое значение для охраны окружающей среды и здоровья человека.

Для выявления токсичных тяжелых металлов в растениях применяли методы масс-спектрального анализа ICP-MS/TOF-SIMS элементного содержания (цветных металлов и пр.) и низкомолекулярных соединений в пробах почв и грунтов. Также был выполнен сравни-

тельный хемометрический анализ разных проб и осуществлена спектроскопическая характеристика базового элементного состава проб грунтов и почв в рамках ЛИЭС и проведены измерения низкоинтенсивной излучательной характеристики проб в рамках сцинтилляционного детектирования совместно с измерениями химического состава проб материалов биологического происхождения в рамках линейных методик колебательной спектроскопии/микроспектроскопии (в том числе в условиях резонансного/предрезонансного возбуждения компонентов проб). Вышеперечисленные методы позволяют определить как общее содержание металлов, так и их распределение в различных частях растений.

**Результаты анализа проб растительности**  
**The results of the analysis of vegetation samples**

Координаты точек отбора проб		Содержание металлов в растительных образцах					
		Mn мг/кг	Pb мг/кг	Cd мг/кг	Ni мг/кг	Cu мг/кг	Zn мг/кг
42,869979	44,150958	53,81	4,95	0,14	0,96	3,29	62,69
42,869206	44,150876	88,71	10,01	0,21	0,96	4,20	145,06
42,868430	44,150071	59,13	3,74	0,18	0,98	2,86	155,04
42,867629	44,149504	171,00	26,65	0,62	2,54	6,74	79,42
42,867234	44,149329	134,28	20,15	0,61	0,99	5,06	180,93
42,866689	44,14921	32,01	17,42	0,28	0,95	4,60	156,02
42,866689	44,14921	51,99	13,27	0,59	1,03	5,03	92,53
42,866058	44,148912	144,25	20,35	0,25	0,99	6,68	131,41
42,865700	44,148757	101,17	12,82	0,40	0,98	5,28	134,32
42,866194	44,149532	182,07	21,43	0,55	3,08	6,09	126,65
42,866158	44,15006	59,37	14,85	0,58	0,98	3,51	100,03
42,866012	44,150517	102,56	7,86	0,25	0,97	4,13	209,42
42,866149	44,150964	188,34	5,77	0,22	1,08	3,87	112,31
42,866371	44,151517	114,17	13,11	0,20	0,92	4,03	265,33
42,866666	44,15193	112,07	62,18	1,02	1,22	8,35	280,20
42,866961	44,152354	32,95	5,61	0,14	0,99	4,44	46,99
42,867207	44,15271	118,14	16,60	0,35	2,11	5,93	106,06
42,867366	44,153121	62,52	4,74	0,40	0,96	3,95	80,40

42,867752	44,153442	168,43	10,91	0,59	1,82	4,57	68,32
42,868006	44,153759	74,56	6,08	0,25	2,41	4,65	156,17
42,868447	44,154061	83,21	14,27	0,75	1,09	4,97	298,72
42,868730	44,154338	53,46	6,80	0,18	0,99	4,38	165,24
42,869058	44,154521	54,11	17,31	0,49	0,94	5,21	220,66
42,869485	44,154789	207,27	23,73	0,21	1,60	6,21	222,57
42,869853	44,154983	90,56	4,73	0,40	0,97	2,91	180,44
42,870200	44,155159	75,58	12,20	0,15	1,28	3,66	200,89
42,870632	44,155279	110,14	18,36	0,28	1,12	4,67	195,65
42,870632	44,15527	74,31	12,50	0,47	1,34	5,76	146,89
42,871309	44,155142	46,98	7,93	0,30	1,03	3,65	145,33
42,871541	44,15475	126,79	13,58	0,71	3,11	5,80	80,45
42,871558	44,154261	99,88	14,61	0,65	1,03	4,25	116,48
42,871538	44,153779	108,22	21,22	4,50	0,93	5,69	106,37
42,871630	44,153203	67,33	11,83	0,36	0,96	3,95	198,10
42,871305	44,152739	218,64	26,19	0,36	3,94	7,72	210,11
42,870908	44,152326	69,93	24,21	0,73	1,93	5,86	76,57
42,878679	44,151981	268,52	24,18	0,87	0,98	6,43	170,66
42,870395	44,151603	183,99	60,94	1,03	1,10	14,21	279,06
42,870233	44,151377	176,60	26,27	1,75	1,26	7,28	212,12
42,868500	44,151823	169,2	80,73	0,4	2,6	7,6	108,8
42,869446	44,152116	285,3	52,01	0,6	2,4	12,0	149,9
42,869979	44,152561	40,4	5,14	0,2	1,0	4,8	161,7
42,870962	44,153072	76,7	18,45	0,9	1,3	5,2	192,5
42,868825	44,152613	34,6	4,11	0,1	1,0	4,1	110,3
42,869584	44,153653	42,7	4,51	0,5	1,0	4,7	111,8
42,870098	44,154610	86,4	12,16	0,2	0,9	5,9	166,4
42,867839	44,151022	229,7	45,15	0,3	2,8	7,9	165,0
42,867268	44,150260	69,4	17,59	0,3	1,8	6,2	92,7
42,867588	44,151598	37,8	4,01	0,4	1,0	3,8	224,5
42,866764	44,151176	100,1	20,20	0,4	1,2	7,8	266,6
42,867584	44,151599	106,5	19,82	0,3	1,1	7,4	288,8
42,869218	4,151560	141,8	24,88	0,4	2,3	8,0	108,6
42,869473	44,151409	75,6	20,25	0,3	1,0	5,0	98,4
42,868940	44,151658	210,6	30,45	0,6	3,1	6,8	156,8
42,868578	44,151679	155,6	11,33	0,5	1,0	4,3	265,3
42,868504	44,152221	160,5	15,47	0,1	0,9	5,0	124,3
42,868483	44,152612	196,2	58,96	1,8	5,3	11,7	339,8

По материалам, предоставленным ФИЦ ХФ РАН (таблица), авторами статьи была осуществлена систематизация данных и анализ, который позволил приступить к выбору математического аппарата для интерполяции данных на исследуемой площади поверхности с ранжированием в зависимости от концентрации обнаруженного элементного состава. При выборе математических моделей был учтен современный опыт исследований по данной тематике.

Традиционно при изучении пространственного распределения тяжелых металлов в почвах горнодобывающих районов используются данные о концентрации тяжелых металлов в почвах, полученные в полевых условиях. Для определения распределения по всей территории применяются методы пространственной интерполяции, такие как взвешивание по обратному расстоянию и обычный кригинг.

Этот подход позволяет количественно оценить пространственную автокорреляцию между точками выборки и использовать эту взаимосвязь для оптимальной интерполяции.

С ростом доступности геопро пространственных данных наибольшее распространение получает использование алгоритмов машинного обучения, таких как многомерная линейная регрессия, K-means, метод опорных векторов и случайные леса. Модели машинного обучения могут обрабатывать большие объемы нелинейных данных и выявлять внутренние взаимосвязи между характеристиками и сопутствующими факторами в процессе обучения для моделирования и прогнозирования пространственного распределения характеристик. Однако традиционным моделям машинного обучения сложно уловить пространственную корреляцию [21].

Получение точных пространственных прогнозов содержания в почве тя-

желых металлов является сложной задачей, когда количество пунктов отбора проб почвы относительно ограничено [22]. Ввиду этого традиционный кригинг остается оптимальным методом анализа пространственных данных, представленных в ограниченном количестве. Кригинг — это геостатистический метод, используемый для пространственной интерполяции данных из известных точек в другие места. Метод основан на пространственной автокорреляции — свойстве, которое часто приписывают лесным переменным, поскольку они связаны с ландшафтом, климатом и экологическими процессами. Дисперсия прогнозирования оценивается по вариограмме, которая описывает степень корреляции между точками данных. Процесс кригинга включает в себя оценку экспериментальной вариограммы с использованием выборочных значений переменной отклика вместе с соответствующими пространственными координатами и датами. Затем экспериментальная вариограмма моделируется и определяется параметр теоретической вариограммы. В теоретической вариограмме полувариация обычно увеличивается по мере увеличения расстояния или времени между выборками, пока не достигнет максимального значения (пологая часть). Вершина представляет собой полувариацию, когда расстояние и время между выборками приближаются к 0 [23].

Так, по значениям концентраций тяжелых металлов в известных точках установлено содержание каждого из них по всей площади поверхности хвостохранилища. Методом кригинга проведена статистическая интерполяция и построены тепловые карты. Предварительно рассчитаны вариограммы, отражающие степень корреляции значений в пространстве и ее изменение с увеличением расстояния.

В общем случае, вариограмма  $\gamma(h)$  определяется как половина среднего квадрата разности значений концентраций  $Z$  в двух точках, разделенных расстоянием  $h$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{x=1}^{N_h} (Z_{(x+h)} - Z_x)^2, \quad (1)$$

где  $x$  — местоположение проб,  $Z_x$  — значение переменной в точке  $x$ ;  $Z_{x+h}$  — значение переменной в точке, удаленной на расстояние  $h$ ;  $N_h$  — количество пар  $(x, x+h)$ .

Для аппроксимации эмпирических вариограмм были изучены их допустимые математические модели:

- сферическая:

$$\gamma = b + C_0 \cdot \left( 1,5 \frac{h}{a} - 0,5 \frac{h^3}{a^3} \right), \quad (2)$$

где  $h$  определяет интервал разделяющих расстояний, для которого должна рассчитываться зависимая переменная;  $r$  — эффективная дальность;  $C_0$  — порог вариограммы, при котором она становится плоской;  $b$  — начальная точка вариограммы;  $a$  — расстояние, на котором вариограмма достигает плато  $b + C_0$ ;

- экспоненциальная:

$$\gamma = b + C_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right), \quad (3)$$

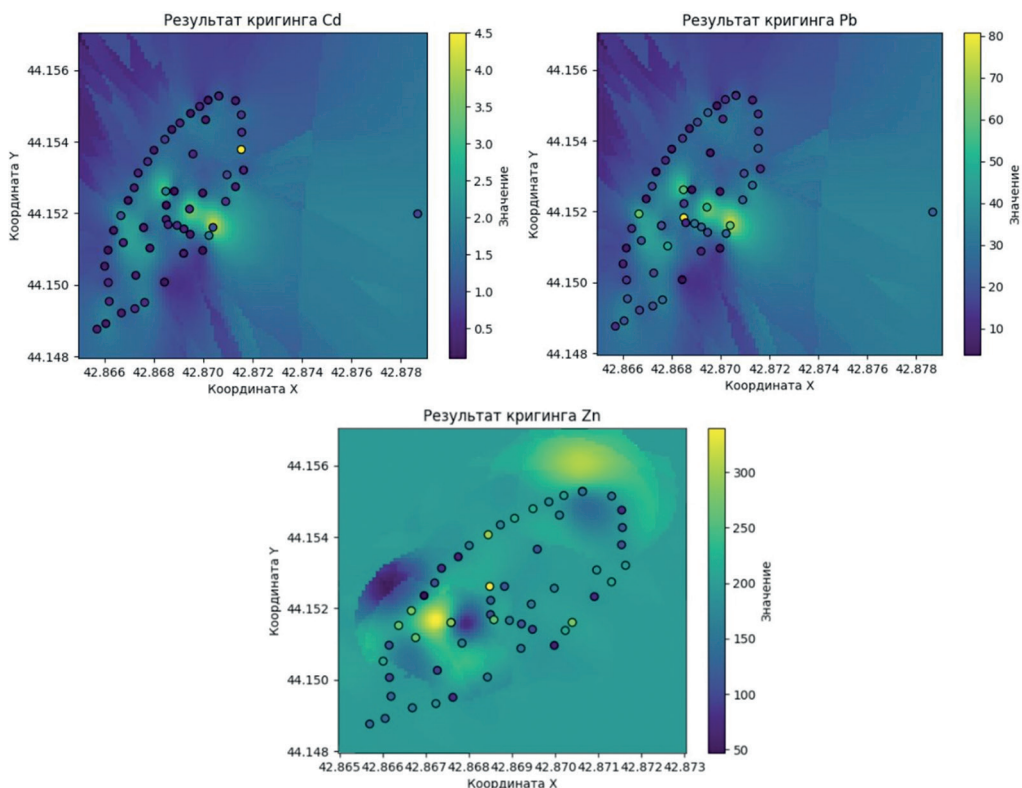


Рис. 2. Пространственное распределение химических элементов первого класса опасности в растительности (мг/кг) на рекультивированной поверхности

Fig. 2. Spatial distribution of chemical elements of the first hazard class in vegetation (mg/kg) on the reclaimed surface

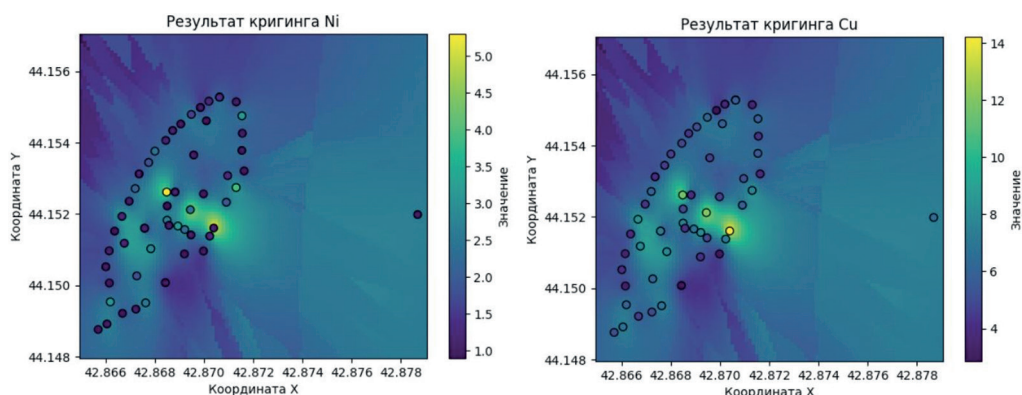


Рис. 3. Пространственное распределение химических элементов второго класса опасности в растительности (мг/кг) на рекультивированной поверхности

Fig. 3. Spatial distribution of chemical elements of the second hazard class in vegetation (mg/kg) on the reclaimed surface

- гауссовская:

$$\gamma = b + C_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right), \quad (4)$$

- кубическая:

$$\gamma = b + C_0 \cdot \left[ 7 \frac{h^2}{a^2} - \frac{35}{4} \frac{h^3}{a^3} + \frac{7}{2} \frac{h^5}{a^5} - \frac{3}{4} \frac{h^7}{a^7} \right] \quad (5)$$

- стабильная модель (Stable):

$$\gamma = b + C_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{h^s}{a}} \right), \quad (6)$$

- модель Матерона:

$$\gamma(h) = b + C_0 \cdot \left( 1 - \frac{1}{2^{(v-1)} \Gamma(v)} \left( \frac{h}{a} \right)^v K_v \left( \frac{h}{a} \right) \right) \quad (7)$$

В качестве критериев близости рассмотрены следующие показатели: полувариация Матерона, полувариация Кресси-Хокинса, полуразность Дауда, устойчивая оценка полуразности Дженсона, оценка энтропии Шеннона, оценка минимума-максимума, процентильная оценка. В результате при построении

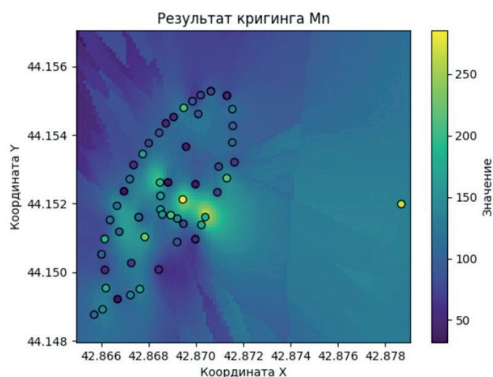


Рис. 4. Пространственное распределение химических элементов третьего класса опасности в растительности (мг/кг) на рекультивированной поверхности

Fig. 4. Spatial distribution of chemical elements of the third hazard class in vegetation (mg/kg) on the reclaimed surface

тепловых диаграмм были использованы следующие модели:

- для марганца — сферическая модель на основе оптимальной полувариации Матерона;
- для свинца, меди и кадмия — сферическая модель на основе оптимальной полуразности Дауда;
- для никеля — сферическая модель на основе оптимума оценки энтропии Шеннона;

- для цинка наилучшей явилась стабильная модель по устойчивой оценке полуразности Джентона.

Данные диаграммы приведены на рис. 2–4 и проранжированы в зависимости от обнаруженных веществ по классам опасности.

### Обсуждение результатов

Полученные данные анализа проб были оценены путем сравнения с результатами отечественных исследований по данной тематике [24], а также с данными актуальных ГОСТ Р 70575-2022 и СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». В процессе сопоставления нормированных значений и данных, полученных в результате анализа проб растений, про-

израстающих на рекультивированной поверхности, установлено, что содержание всех исследуемых в настоящей статье металлов превышает существующие нормы. Следует отметить, что, согласно данным таблицы, превышение Ni обнаружено в 12 (21%) точках отбора проб, превышение Cd – в 47 (84%) точках отбора проб (рис. 5), Cu – в 10 (18%) точках отбора проб, Mn – в 39 (70%) точках отбора проб (рис. 6) и Pb и Zn – во всех 56 точках отбора проб, причем в некоторых значения Zn превышают нормы ПДК более чем в 5 раз, значения содержания Pb – более чем в 20 раз, а содержание в растениях таких элементов, как свинец и цинк, в несколько раз превышает предельно допустимые концентрации в грунтах (рис. 7).

Кроме того, результаты геостатистического моделирования и анализ пост-

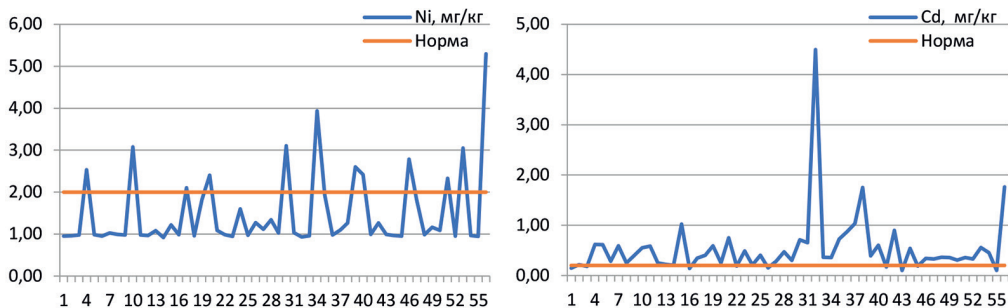


Рис. 5. Сопоставление результатов проб по Ni и Cd с нормативными значениями

Fig. 5. Comparison of Ni and Cd sample results with standard values

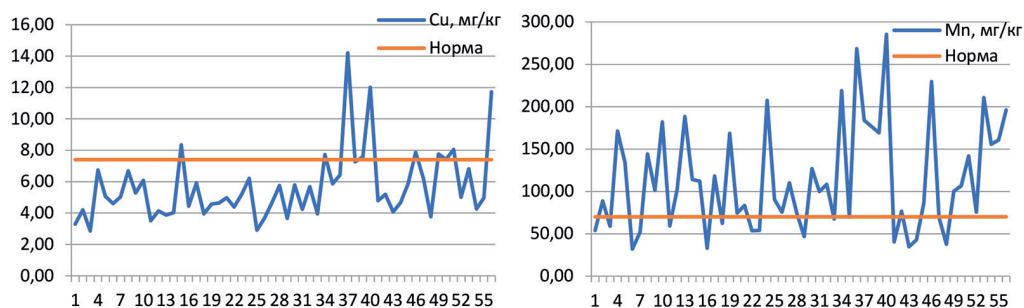


Рис. 6. Сопоставление результатов проб по Cu и Mn с нормативными значениями

Fig. 6. Comparison of Cu and Mn sample results with standard values

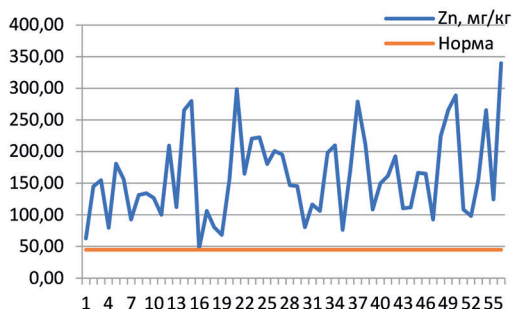
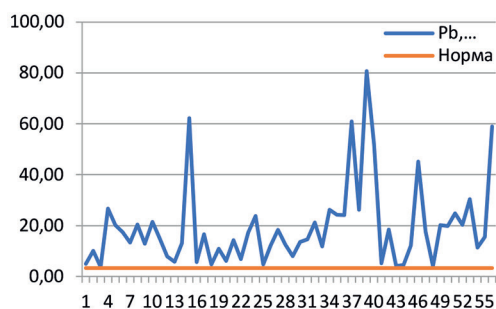


Рис. 7. Сопоставление результатов проб по Pb и Zn с нормативными значениями  
 Fig. 7. Comparison of Pb and Zn sample results with standard values

роенных тепловых карт пространственного распределения тяжелых металлов на территории хвостохранилища свидетельствуют о повсеместном превышении предельно допустимых концентраций исследуемых элементов.

Полученные результаты позволяют выдвинуть предположение о том, что содержание указанных элементов в прикорневой зоне растений верхнего слоя рекультивированной поверхности имеет гораздо более высокие концентрации перечисленных элементов. Для подтверждения выдвинутого предположения необходимо провести дополнительные полевые работы по отбору грунта в точках, соответствующих отбору проб растительности, и осуществить корреляцию полученных результатов. Также для формирования объективной оценки результатов необходимо в последующих экспедиционных исследованиях добавить для повышения информативности анализа данные по контрольным образцам растений, собранных вне зоны влияния выведенных из эксплуатации объектов горного производства, но находящихся на близлежащих горных территориях. Данные исследования позволят в дальнейшем сформировать базы данных для правовой охраны результатов полевых исследований и визуализировать на геоинформационной системе участки с превышенными по сравнению

с ПДК уровнями содержания тяжелых металлов в грунтах и растительности для принятия инженерных решений по дальнейшей рекультивации, что внесет определенный вклад в развитие теории и практики разработки новых методов экологического мониторинга выведенных из эксплуатации объектов горного производства.

### Выводы

В ходе проведенного геомеханического мониторинга не было установлено факта переноса на рекультивированную поверхность хвостохранилища техногенных выбросов, поэтому загрязнения растительности могут быть объяснены следующими объективными причинами:

- перенос техногенных фракций (пылевидных) горно-долинными ветрами;
- выпадение техногенных осадков на площадь поверхности хвостохранилища (сток с горных массивов в исследуемом случае исключен ввиду наличия дренажного канала и отсутствия высолов на наклонной поверхности от прилегающей автодороги);
- основной причиной является предположительно инфильтрация загрязнений через рекультивированный слой из осадочных слоев хвостов массива хвостохранилища.

Для окончательного подтверждения данного вывода необходимо отобрать

пробы грунта всего рекультивированного слоя для сравнения роста/уменьшения содержания элементов тяжелых металлов в направлении от слоев осадочных пород через рекультивированный слой к его поверхности, где сосредоточена корневая система растений (в исследуемом случае 5 – 50 см).

С учетом того, что исследуемые в работе тяжелые металлы, такие как кадмий, цинк и свинец, относятся к I классу опасности, никель и медь – ко II классу, а марганец – к III классу опасности, данные полевые работы являются актуальными с точки зрения дальнейшей оценки угрозы экологической безопасности региона, набирающего рекреационную популярность.

Результаты исследований распределения вредных токсичных веществ в растениях на поверхностном слое рекультивированного хвостохранилища

показали острую необходимость мониторинга выведенных из эксплуатации объектов горно-перерабатывающего производства в режиме онлайн для обеспечения полноты и достаточности информации по потенциальным угрозам экологической безопасности не только в отдельно взятом регионе, но и в целом по Российской Федерации.

Данное направление будет реализовано в ходе продолжения выполнения проекта РНФ с обязательным обустройством полигона на территории хвостохранилища, который будет оборудован специальными приборами для мониторинга влияющих на состояние окружающей среды параметров, включая сейсмические, радиационные и химические, позволяющие экологическим службам оперативно реагировать на сохранение экологической устойчивости горных территорий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205 – 216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
2. Айбуш А. В., Фоменко В. А., Соколов А. А., Васин А. А. Результаты анализа содержания химических элементов в тонких прослойках хвостовых отложений экспресс-методами // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 4. – С. 1491 – 1500. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1491-1500.
3. Шабанов М. В., Маричев М. С., Минкина Т. М., Соколов А. А. Окисление техногенных минеральных образований кислыми стоками сульфидных отвалов (на примере Карабашской агломерации) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 69 – 85. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_4\_0\_69.
4. Фоменко В. А., Лолаев А. Б., Соколов А. А., Кузь О. В., Плахотин Д. А. Отдельные результаты геоэкологического мониторинга рельефа поверхности Унальского хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 38 – 50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_38.
5. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 2. – С. 580 – 588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
6. Didmanidze O. N., Karelina M. Yu., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Serdechnyy D. V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2025, vol. 2, no. 470, pp. 84 – 96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.
7. Camêlo D. L., Silva Filho L. A., Arruda D. L., Cyrino L. M., Barroso G. F., Corrêa M. M., Barbeira P. J. S., Mendes D. B., Pasa V. M. D., Profeti D. Mineralogical fingerprint and human health risk

- from potentially toxic elements of Fe mining tailings from the Fundão dam // *Science of the Total Environment*. 2024, vol. 912, article 169328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169328.
8. Davila R. B., Fontes M. P. F., Pacheco A. A., Ferreira M. S. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil // *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 709, article 136151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136151.
9. Castilla-Gómez J., Herrera-Herbert J. Environmental analysis of mining operations: dynamic tools for impact assessment // *Minerals Engineering*. 2015, vol. 76, pp. 87 – 96.
10. Armour J. D., Hateley L. R., Pitt G. L. Catchment modelling of sediment, nitrogen and phosphorus nutrient loads with SedNet/ANNEX in the Tully – Murray basin // *Marine and Freshwater Research*. 2009, vol. 60, pp. 1091 – 1096.
11. Armienta M. A., Beltrán M., Martínez S., Labastida I. Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2361 – 2375. DOI: 10.1007/s10653-019-00424-1.
12. Queiroz H. M., Nóbrega G. N., Ferreira T. O., Almeida L. S., Romero T. B., Santaella S. T., Bernardino A. F., Otero X. L. The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? // *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 637 – 638, pp. 498 – 506. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.370.
13. Almeida H. A., Silva J. G., Custódio I. G., Karam D., Garcia Q. S. Productivity and food safety of grain crops and forage species grown in iron ore tailings // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022, vol. 105, article 104198. DOI: 10.1016/j.jfca.2021.104198.
14. Yuan X., Wang Y., Tang D., Zhang X., Zhang L., Zhang H. Distribution and phytoavailability of potentially toxic metals in different Fe/Mg mine tailings // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, vol. 15, no. 11, article 2475. DOI: 10.3390/ijerph15112475.
15. Haolong Hu, Wei Zhou, Xiaoyang Liu, Guanlin Guo, Yin Hai He, Leming Zhu, Dandan Chen, Ruixue Miao Machine learning combined with geodetector to predict the spatial distribution of soil heavy metals in mining areas // *Science of the Total Environment*. 2025, vol. 959, article 178281. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178281.
16. Wang Z., Lechner A. M., Yang Y., Baumgartl T., Wu J. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services // *The Science of the Total Environment*. 2020, vol. 717, article 137214. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137214.
17. Borges P. H. C., Silva A. O., Benevenuto P. A. N., Santos J. V., Batista E. R., Carvalho A. M. X., Carneiro M. A. C., Siqueira J. O. Pelletization and fertilization improve the root environment in soil affected by iron mining tailings // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2023, vol. 234, article 538. DOI: 10.1007/s11270-023-06563-7.
18. Cai Z., Lei S., Zhao Y., Gong C., Wang W., Du C. Spatial distribution and migration characteristics of heavy metals in grassland open-pit coal mine dump soil interface // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, article 4441. DOI: 10.3390/ijerph19084441.
19. Jie Liang, Chunting Feng, Guangming Zeng, Xiang Gao, Minzhou Zhong, Xiaodong Li, Xin Li, Xinyue He, Yilong Fang Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China // *Environmental Pollution*. 2017, vol. 225, pp. 681 – 690. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.057.
20. Xiangyang Bi, Xinbin Feng, Yuangen Yang, Guangle Qiu, Guanghui Li, Feili Li, Taoze Liu, Zhiyou Fu, Zhisheng Jin Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China // *Environment International*. 2006, vol. 32, no. 7, pp. 883 – 890. DOI: 10.1016/j.envint.2006.05.010.
21. Tao Chen, Xingmei Liu, Xia Li, Keli Zhao, Jiabao Zhang, Jianming Xu, Jiachun Shi, Randy A. Dahlgren Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China // *Environmental Pollution*. 2009, vol. 157, no. 3, pp. 1003 – 1010. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.10.011.
22. Yongqiao Sun, Shaogang Lei, Yibo Zhao, Cheng Wei, Xingchen Yang, Xiaotong Han, Yuanyuan Li, Jianan Xia, Zhen Cai Spatial distribution prediction of soil heavy metals based on sparse sampling and multi-source environmental data // *Journal of Hazardous Materials*. 2024, vol. 465, article 133114. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133114.
23. Viñuales A., Montes F., Guijarro M., Gómez C., de la Calle I., Madrigal J. Real-time assessment of live forest fuel moisture content and flammability by using space-time universal kriging // *Ecological Modelling*. 2024, vol. 498, article 110867. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2024.110867.

24. Моторыкина Т. Н. Оценка содержания тяжелых металлов в растениях зоны разработки Малмыжского месторождения медно-порфировых руд в окрестностях поселков Малмыж и Верхний Нерген (Хабаровский край) // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Биология и экология». — 2022. — № 3 (67). — С. 170–178. DOI: 10.26456/vtbio274. **MIAB**

## REFERENCES

1. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geocological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
2. Aybush A. V., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Vasin A. A. Results of chemical elements content analysis in interlayers of tailing deposits using rapid methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 4, pp. 1491–1500. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1491-1500.
3. Shabanov M. V., Marichev M. S., Minkina T. M., Sokolov A. A. Oxidation of man-made mineral formations with acid waste water at sulphide-containing waste dumps: A case-study of Karabash agglomeration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 4, pp. 69–85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_4\_0\_69.
4. Fomenko V. A., Lolaev A. B., Sokolov A. A., Kuz O. V., Plakhotin D. A. Selected results of geocological monitoring of Unal tailings dump topography. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 8, pp. 38–50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_38.
5. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geocological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580–588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.
6. Didmanidze O. N., Karelina M. Yu., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Serdechnyy D. V. Application of artificial intelligence and modern technologies in geomonitoring to improve the efficiency of the mining industry utilising the Earth's resources. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2025, vol. 2, no. 470, pp. 84–96. DOI: 10.32014/2025.2518-170X.492.
7. Camêlo D. L., Silva Filho L. A., Arruda D. L., Cyrino L. M., Barroso G. F., Corrêa M. M., Barbeira P. J. S., Mendes D. B., Pasa V. M. D., Profeti D. Mineralogical fingerprint and human health risk from potentially toxic elements of Fe mining tailings from the Fundão dam. *Science of the Total Environment*. 2024, vol. 912, article 169328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169328.
8. Davila R. B., Fontes M. P. F., Pacheco A. A., Ferreira M. S. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 709, article 136151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136151.
9. Castilla-Gómez J., Herrera-Herbert J. Environmental analysis of mining operations: dynamic tools for impact assessment. *Minerals Engineering*. 2015, vol. 76, pp. 87–96.
10. Armour J. D., Hateley L. R., Pitt G. L. Catchment modelling of sediment, nitrogen and phosphorus nutrient loads with SedNet/ANNEX in the Tully – Murray basin. *Marine and Freshwater Research*. 2009, vol. 60, pp. 1091–1096.
11. Armienta M. A., Beltrán M., Martínez S., Labastida I. Heavy metal assimilation in maize (*Zea mays* L.) plants growing near mine tailings. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 8, pp. 2361–2375. DOI: 10.1007/s10653-019-00424-1.
12. Queiroz H. M., Nóbrega G. N., Ferreira T. O., Almeida L. S., Romero T. B., Santaella S. T., Bernardino A. F., Otero X. L. The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 637–638, pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.370.
13. Almeida H. A., Silva J. G., Custódio I. G., Karam D., Garcia Q. S. Productivity and food safety of grain crops and forage species grown in iron ore tailings. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022, vol. 105, article 104198. DOI: 10.1016/j.jfca.2021.104198.
14. Yuan X., Wang Y., Tang D., Zhang X., Zhang L., Zhang H. Distribution and phytoavailability of potentially toxic metals in different Fe/Mg mine tailings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, vol. 15, no. 11, article 2475. DOI: 10.3390/ijerph15112475.
15. Haolong Hu, Wei Zhou, Xiaoyang Liu, Guanlin Guo, Yin Hai He, Leming Zhu, Dandan Chen, Ruixue Miao Machine learning combined with geodetector to predict the spatial distribution of soil

heavy metals in mining areas. *Science of the Total Environment*. 2025, vol. 959, article 178281. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178281.

16. Wang Z., Lechner A. M., Yang Y., Baumgartl T., Wu J. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services. *The Science of the Total Environment*. 2020, vol. 717, article 137214. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137214.

17. Borges P. H. C., Silva A. O., Benevenuto P. A. N., Santos J. V., Batista E. R., Carvalho A. M. X., Carneiro M. A. C., Siqueira J. O. Pelletization and fertilization improve the root environment in soil affected by iron mining tailings. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2023, vol. 234, article 538. DOI: 10.1007/s11270-023-06563-7.

18. Cai Z., Lei S., Zhao Y., Gong C., Wang W., Du C. Spatial distribution and migration characteristics of heavy metals in grassland open-pit coal mine dump soil interface. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, article 4441. DOI: 10.3390/ijerph19084441.

19. Jie Liang, Chunting Feng, Guangming Zeng, Xiang Gao, Minzhou Zhong, Xiaodong Li, Xin Li, Xinyue He, Yilong Fang Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China. *Environmental Pollution*. 2017, vol. 225, pp. 681 – 690. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.057.

20. Xiangyang Bi, Xinbin Feng, Yuangen Yang, Guangle Qiu, Guanghui Li, Feili Li, Taoze Liu, Zhiyou Fu, Zhisheng Jin Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China. *Environment International*. 2006, vol. 32, no. 7, pp. 883 – 890. DOI: 10.1016/j.envint.2006.05.010.

21. Tao Chen, Xingmei Liu, Xia Li, Keli Zhao, Jiabao Zhang, Jianming Xu, Jiachun Shi, Randy A. Dahlgren Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China. *Environmental Pollution*. 2009, vol. 157, no. 3, pp. 1003 – 1010. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.10.011.

22. Yongqiao Sun, Shaogang Lei, Yibo Zhao, Cheng Wei, Xingchen Yang, Xiaotong Han, Yuanyuan Li, Jianan Xia, Zhen Cai Spatial distribution prediction of soil heavy metals based on sparse sampling and multi-source environmental data. *Journal of Hazardous Materials*. 2024, vol. 465, article 133114. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.133114.

23. Viñuales A., Montes F., Guijarro M., Gómez C., de la Calle I., Madrigal J. Real-time assessment of live forest fuel moisture content and flammability by using space-time universal kriging. *Ecological Modelling*. 2024, vol. 498, article 110867. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2024.110867.

24. Motorykina T. N. Assessment of the content of heavy metals in plants of the development zone of the Malmyzh deposit of copper-porphyry ores in the vicinity of the villages of Malmyzh and Verkhny Nergen (Khabarovsk Krai). *Bulletin of Tver State University. Series Biology and Ecology*. 2022, no. 3 (67), pp. 170 – 178. [In Russ]. DOI: 10.26456/vtbio274.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Андрей Андреевич<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, зав. кафедрой, e-mail: anso@sfnedu.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,

Пучкова Татьяна Васильевна<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: tpuchkova@sfnedu.ru,  
ORCID ID: 0009-0003-0200-1250,

Фоменко Владимир Александрович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: vafomenko@sfnedu.ru,  
ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

Плахотин Дмитрий Андреевич<sup>1</sup> – ассистент,  
e-mail: plakhotin@sfnedu.ru, ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,

Шепелев Игорь Иннокентьевич – д-р техн. наук,  
директор, ООО «Экологический Инжиниринговый Центр»,  
e-mail: ekoing@mail.ru, Scopus Author ID: 56919135100,  
ORCID: 0000-0002-1127-9612,

<sup>1</sup> Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.

Для контактов: Соколов А.А., e-mail: anso@sfnedu.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Sokolov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Head of Chair, e-mail: anso@sfedu.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-1127-9612,  
T.V. Puchkova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),  
Assistant Professor, e-mail: tpuchkova@sfedu.ru,  
ORCID ID: 0009-0003-0200-1250,  
V.A. Fomenko<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: vafomenko@sfedu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,  
D.A. Plakhotin<sup>1</sup>, Assistant, e-mail: plakhotin@sfedu.ru,  
ORCID ID: 0009-0005-5329-6903,  
I.I. Shepelev, Dr. Sci. (Eng.), Director,  
Limited Liability Company «Environmental Engineering Center»,  
662150, Achinsk, Russia, e-mail: ekoing@mail.ru,  
Scopus Author ID: 56919135100, ORCID: 0000-0002-1127-9612,  
<sup>1</sup> Branch of Southern Federal University in Gelendzhik,  
353461, Gelendzhik, Russia.  
**Corresponding author:** A.A. Sokolov, e-mail: anso@sfedu.ru.

Получена редакцией 28.07.2025; получена после рецензии 14.10.2025; принята к печати 10.12.2025.  
Received by the editors 28.07.2025; received after the review 14.10.2025; accepted for printing 10.12.2025.



---

### ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

---

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН НА СКОРОСТЬ РАСТВОРЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ (2025, № 10, СБ 20, 16 с.)

*Винников Владимир Александрович*<sup>1</sup> — д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com;  
*Старостин Руслан Андреевич*<sup>2</sup> — аспирант, e-mail: starostin130190@mail.ru; <sup>1</sup> НИТУ МИСИС.

Предложен новый метод измерения скорости растворения соляных пород в лабораторных условиях, реализующий схему растворения образцов только по их боковой поверхности. Предложена схема лабораторного стенда и описано применяемое в эксперименте оборудование. Приведены расчетные формулы, основанные на рекомендациях СТО Газпром 2-2.1-718-2013. Проведены эксперименты на двух группах образцов — гигантозернистой каменной соли и среднезернистой каменной соли с собирательной перекристаллизацией с ослабленными связями. Экспериментально установлена взаимосвязь между скоростью растворения соляных пород и размером зерен, из которых они состоят. Результаты проведенных исследований показали, что скорость растворения гигантозернистой каменной соли оказалась существенно (примерно на 30%) ниже скорости растворения среднезернистой каменной соли с собирательной перекристаллизацией с ослабленными связями.

Ключевые слова: каменная соль, скорость растворения, подземное хранилище газа, гигантокристаллическая соль, среднезернистая каменная соль с собирательной перекристаллизацией с ослабленными связями.

#### LABORATORY STUDY OF THE EFFECT OF GRAIN SIZE ON DISSOLUTION RATE OF SALT ROCKS

*V.A. Vinnikov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Head of Chair, e-mail: evgeny.vinnikov@gmail.com,  
*R.A. Starostin*<sup>2</sup>, Graduate Student, e-mail: starostin130190@mail.ru; <sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

A new method for measuring the dissolution rate of salt rocks under laboratory conditions is proposed. It implements a scheme of sample dissolution only along their lateral surface. A diagram of a laboratory setup is proposed and the equipment used in the experiment is described. Calculation formulas based on the recommendations of STO Gazprom 2-2.1-718-2013 are presented. Experiments were conducted on two groups of samples: gigantic-grained rock salt and medium-grained rock salt with collective recrystallization with weakened bonds. A relationship between the dissolution rate of salt rocks and the size of the grains of which they are composed was experimentally established. The results of the conducted studies showed that the dissolution rate of gigantic-grained rock salt was significantly (approximately 30%) lower than the dissolution rate of medium-grained rock salt with collective recrystallization with weakened bonds.

Key words: rock salt, dissolution rate, underground gas storage, gigantocrystalline salt, medium-grained with collective recrystallization with weakened bonds of rock salt.