

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ РЕКУЛЬТИВИРОВАННОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА УРУПСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Е.С. Храпай¹, А.А. Кузина¹, С.И. Колесников¹, Т.В. Минникова¹, К.Ш. Казеев¹

¹ Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: katerinap1996@mail.ru

Аннотация: Горнодобывающие предприятия оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в частности, вызывая загрязнение тяжелыми металлами. На территории Кавказа расположен Урупский горно-обогатительный комбинат (ГОК), добывающий около 46% запасов медной руды на Юге России. Отходы, хранящиеся в хвостохранилищах, содержат высокие концентрации меди (Cu), цинка (Zn), свинца (Pb) и других тяжелых металлов. Данное исследование посвящено оценке содержания тяжелых металлов в почвах рекультивированного хвостохранилища Урупского ГОК. Валовое содержание тяжелых металлов в почве определяли рентгенофлуоресцентным методом. Оценку загрязнения проводили с помощью единого индекса загрязнения, индекса нагрузки загрязнения, интегрального индекса загрязнения Немерова, потенциального экологического риска и суммарного показателя загрязнения. Результаты исследования показали, что валовое содержание тяжелых металлов в почвах рекультивированного хвостохранилища Урупского ГОК в большинстве образцов не превышает фоновые значения и ориентировочно допустимые концентрации. Согласно большинству рассчитанных индексов, почвы рекультивированного хвостохранилища относятся к незагрязненным. Сравнение использованных показателей и индексов загрязнения свидетельствует о разной степени их природоохранной жесткости.

Ключевые слова: загрязнение, тяжелые металлы, рекультивация, хвостохранилище, единый индекс загрязнения, индекс нагрузки загрязнения, интегральный индекс загрязнения Немерова, потенциальный экологический риск, суммарный показатель загрязнения.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/> в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Храпай Е. С., Кузина А. А., Колесников С. И., Минникова Т. В., Казеев К. Ш. Оценка содержания тяжелых металлов в почве рекультивированного хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 4. – С. 56–68. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_56.

Heavy metal content of soils at tailings pond after reclamation at Urup Mining and Processing Plant

E.S. Khrapai¹, A.A. Kuzina¹, S.I. Kolesnikov¹, T.V. Minnikova¹, K.Sh. Kazeev¹

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology,
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: katerinap1996@mail.ru

Abstract: Mines have an adverse environmental impact, in particular, they pollute the environment with heavy metals. Urup Mining and Processing Plant (GOK) in the Caucasus produces round 46 % of copper ore reserves in the south of Russia. Local tailings feature high concentrations of copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb) and other heavy metals. This study focuses on the assessment of heavy metal content of soils at a tailings pond after reclamation at Urup GOK. Gross heavy metals were assessed using the X-ray fluoroscopy. Pollution was evaluated with the help of the unified contamination index, pollution load index, the Nemerow integrated pollution index, the potential ecological risk and the overall contamination index. The research findings show that gross heavy metals in soils at the test reclaimed tailings pond at Urup GOK are never higher than the background values and the reference allowable concentrations in most test samples. According to the most of calculated indexes, the soil of the reclaimed tailings pond is uncontaminated (clean). The comparison of the test indexes of pollution is reflective of different degree of their environmental flexibility.

Key words: pollution, heavy metals, reclamation, tailings pond, unified contamination index, pollution load index, the Nemerow integrated pollution index, potential ecological risk, overall contamination index.

Acknowledgements: The study was carried out at the Southern Federal University and was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/>.

For citation: Khrapai E. S., Kuzina A. A., Kolesnikov S. I., Minnikova T. V., Kazeev K. Sh. Heavy metal content of soils at tailings pond after reclamation at Urup Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(4):56-68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_4_0_56.

Введение

Негативное воздействие на окружающую среду в значительной степени оказывают горнодобывающие предприятия, в частности, химическое загрязнение прилегающих территорий, приводящее к деградации почв и экосистем. В процессе обогащения руд производится огромное количество отходов [1]. Обычно предприятия хранят их в специализированных местах — хвостохранилищах. Данные сооружения, несмотря на все предусмотренные охранные мероприятия, являются источниками загрязнения всей окружающей территории. Опасность представляют отходы, хранящиеся в хвостохранилищах и содержащие высокие концентрации тяжелых металлов — меди (Cu), цинка (Zn), свинца (Pb) и др. Данные вещества отрицательно

воздействуют на экосистемные функции почвы [2 — 4].

Хвостохранилище Урупского ГОК функционировало с начала его работы (1968), в 1997 г. эксплуатация была прекращена. Рекультивацию производили с 2019 по 2021 гг. в рамках реализации федерального проекта «Чистая страна» и национального проекта «Экология» [24].

Загрязнение окружающей среды происходит в связи с тем, что сбрасываемые отходы (пульпа хвостов) содержат в себе сопутствующие породы и тяжелые металлы [5]. В случаях, когда хвостохранилище переполнено, и дальнейшее его использование невозможно, производят рекультивацию сооружения [6]. Рекультивация подразумевает под собой определенные инженерно-технические и биологические мероприятия с целью изо-

ляции загрязняющего воздействия [7]. Рекультивационные работы проходят в несколько этапов, включающих и биологическое восстановление нарушенных земель [8, 9].

Для усовершенствования процесса рекультивации необходимо рассматривать новые методики изоляции загрязняющего вещества [10]. В Китае, например, рекультивированные хвостохранилища применяют под сельскохозяйственные угодья, предварительно максимально адсорбируя загрязняющие поллютанты [11], используют глинистые материалы [12].

На территории, прилегающей к рекультивированному хвостохранилищу Урупского ГОК, залегают горно-луговые черноземовидные почвы, которые характеризуются низкой устойчивостью к загрязнению медью [13]. Важно оценить, является ли рекультивированное хвостохранилище источником загрязнения прилегающих почв тяжелыми металлами, так как основная масса загрязняющих веществ аккумулируется в почве.

Цель исследования — оценить содержание тяжелых металлов в почве рекультивированного хвостохранилища Урупского ГОК.

Материалы и методы исследования

Отбор почвенных образцов проводили на рекультивированном хвостохранилище Урупского ГОК в Урупском районе Карачаево-Черкесской Республики. Образцы почвы отбирали в восьми точках на разной глубине (от 0–10 см до 90 см), согласно общепринятым методикам [14].

В качестве контроля использовали фоновые для данной территории горно-луговые черноземовидные почвы. Отбор образцов фоновой почвы проводили на расстоянии более 1 км от рекультивированного хвостохранилища, на глубине до 60 см.

Определение валового содержания тяжелых металлов (Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, V) в порошковых пробах почв исследовали рентгенофлуоресцентным методом. Для исследования использовали рентгеновский флуоресцентный спектрометр «Спектроскан МАКС-GV».

Расчеты показателей загрязнения проводились по следующим методикам:

- Значимость опасности каждого отдельного тяжелого металла почвенных образцов оценивали по единому индексу загрязнения (Single Pollution Index, PI) [15]:

$$PI = \frac{C_i}{GB}, \quad (1)$$

где C_i — содержание металла в почве района исследования; GB — фоновое содержание металла. Выделяют следующие классы: $PI < 1$ — загрязнение почв отсутствует; $1 < PI < 2$ — слабая степень загрязнения; $2 < PI < 3$ — средняя степень загрязнения; $3 < PI < 5$ — сильная степень загрязнения; $PI > 5$ — очень сильная степень загрязнения.

- Индекс нагрузки загрязнения (Pollution Load Index, PLI) [16] (дает возможность оценить комплексное загрязнение) вычисляли по формуле:

$$PLI = \sqrt[n]{PL_1 + PL_2 + \dots + PL_n}, \quad (2)$$

при значении $PLI < 1$ почва относится к категории «незагрязненных», при $PLI = 1$ степень загрязнения незначительная, $PLI > 1$ — почва загрязнена.

- Для оценки загрязнения и качества почвы использовался интегрированный индекс загрязнения Немецова (Nemerow Pollution Index, NPI) [17], который рассчитывался по формуле:

$$NPI = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI\right)^2 + PI_{\max}^2}{n}}, \quad (3)$$

где n — количество исследованных металлов, PI_{\max} — максимальное значение PI . Существуют пять классов загрязне-

ния: $NPI \leq 0,7$ — загрязнение отсутствует; $0,7 < NPI \leq 1$ — незначительное загрязнение; $1 < NPI \leq 2$ — слабое загрязнение; $2 < NPI \leq 3$ — умеренное загрязнение; $3 < NPI$ — сильное загрязнение.

• Потенциальный экологический риск (Potential ecological risk, *PERI*) [18] рассчитывался по формуле:

$$PERI = \sum_{i=1}^n E_r^i, \quad (4)$$

где E_r^i — потенциальный экологический риск отдельных элементов. Его определяли по формуле:

$$E_r^i = T_r^i \cdot PI, \quad (5)$$

где T_r^i — фактор токсической реакции отдельных элементов для живых организмов, имеющий следующие значения для исследованных металлов: Cr = 2, Ni = 5, Zn = 1, Cu = 5, Pb = 5 [19]. Показатель *PERI* ранжируется на классы: $PERI < 90$ — слабая степень риска, $90 \leq PERI < 180$ — умеренная степень риска, $180 \leq PERI < 360$ — сильная степень риска, $360 \leq PERI < 720$ — очень сильная степень риска, $PERI \geq 720$ — чрезвычайно высокая степень риска.

• Негативное действие нескольких агентов оценивали суммарным показателем загрязнения (Z_c) [20] по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n PI - (n - 1), \quad (6)$$

где *PI* — коэффициенты концентраций элементов; *n* — число определяемых суммируемых элементов с $PI > 1$. В зависимости от полученного значения Z_c исследуемые почвы относят к определенной категории загрязнения: $Z_c < 16$ — низкий, допустимый уровень; $Z_c = 16 - 32$ — средний, умеренно опасный; $Z_c = 32 - 128$ — высокий, опасный; $Z_c > 128$ — максимальный, чрезвычайно опасный уровень загрязнения [21].

Статистическую обработку данных проводили с использованием програм-

мно обеспечения Statistica 12.0. С вычислением непараметрического U-критерия Манна-Уитни. Данный метод был предложен в 1945 г. Ф. Уилкоксоном (F. Wilcoxon); в 1947 г. его существенно переработали и расширили Х.Б. Манн (H.B. Mann) и Д.Р. Уитни (D.R. Whitney). Метод применяют для сравнения двух независимых выборок по уровню количественно измеренного признака [22]. Рассчитывался с помощью формулы:

$$U = n_k \cdot n_e + \frac{n(n+1)}{2} - T, \quad (7)$$

где n_k — объем контрольной выборки; n_e — объем исследуемой выборки; *n* — объем выборки, имеющей большую ранговую сумму; *T* — большая сумма рангов из фоновой и исследуемой выборок.

Ранговую сумму (*T*) определяли с помощью ранжированного ряда для каждой выборки. По таблице критических значений U-критерия Манна-Уитни для уровня значимости 0,05 ($p = 0,05$) устанавливали критическое значение ($U_{кр}$) при доверительной вероятности 95%. Сравнивали полученные результаты (*U*) с критическим значением. Достоверность различий между выборками тем выше, чем меньше значение полученного критерия. При $U > U_{кр}$ достоверность различий между уровнем признака в рассматриваемых выборках не является значимой. Если $U \leq U_{кр}$, то различия признака между выборками статистически достоверны.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты исследования валового содержания изучаемых тяжелых металлов представлены в табл. 1 и 2.

Пространственное распределение тяжелых металлов в почве на глубине 0–10 см, представляют особый интерес, так как в большинстве случаев аккумуляция тяжелых металлов происходит

именно в верхних горизонтах почвы [23]. В табл. 2 представлено профилное распределение Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Sr, V в точках 1, 2, 3.

В табл. 2 представлено распределение изучаемых тяжелых металлов по профилю почв рекультивированного хвостохранилища. Превышения значений ПДК не обнаружено.

Вертикальное распределение тяжелых металлов вниз по профилю в почве рекультивированного хвостохранилища не имеет какой-либо закономерности, что вполне естественно для рекультивированных почв.

Превышение ОДК зафиксировано только для меди (Cu) в 2-х из 23-х образцов. И следует учитывать, что данные ОДК и ПДК применимы только для почв населенных территорий и сельскохозяйственных угодий.

Высокие концентрации хрома (Cr) характерны для почв на юге России.

В табл. 3 представлены значения содержания изучаемых тяжелых металлов (ТМ) в фоновой горно-луговой черноземовидной почве.

Содержание тяжелых металлов в фоновой горно-луговой черноземовидной почве не превышает ПДК и ОДК.

Таблица 1

Валовое содержание тяжелых металлов в почвах рекультивированного хвостохранилища (глубина отбора почв 0—10 см, мг/кг)

The gross content of heavy metals in the soils of the reclaimed tailings pond (the depth of soil sampling is 0-10 cm, mg/kg)

Номер точки отбора и статистические характеристики	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	V
1	6,7	108,6	48,8	63,6	13,8	80,7	89,4	116,5
2	9,4	99,4	42,3	55,8	12,3	73,0	79,0	118,4
3	9,5	115,4	57,8	70,9	31,2	86,5	103,6	144,0
4	6,3	107,9	49,7	61,3	6,9	117,2	89,5	122,5
5	11,4	103,7	67,3	66,0	31,8	141,0	98,7	114,1
6	21,0	117,1	136,7	80,4	35,1	145,7	102,9	120,6
7	23,7	113,3	146,0	71,6	33,5	129,8	108,8	116,4
8	9,0	88,1	61,5	60,8	17,3	107,7	128,0	96,7
ОДК/ПДК*	—	—	132	80	130	220	250	150
Среднее значение	12,1	106,7	76,3	66,3	22,7	110,2	100,0	118,7
Максимальное значение	23,7	117,1	146,0	80,4	35,1	145,7	128,0	144,0
Минимальное значение	6,3	88,1	42,3	55,8	6,9	73,0	79,0	96,7
Дисперсия	37,5	80,1	1471,0	52,6	111,5	683,0	193,5	146,7
Среднеквадратическое отклонение	2,3	3,4	14,5	2,7	4,0	9,9	5,3	4,6
Стандартная ошибка	0,9	1,3	5,5	1,0	1,5	3,7	2,0	1,7
Коэффициент вариации	19,1	3,2	19,0	4,1	17,5	9,0	5,3	3,9
Критерий Манна-Уитни	11	4	6	10	12	8	12	9

* ОДК — ориентировочно допустимые концентрации, ПДК — предельно допустимые концентрации, приведенные ОДК и ПДК — для почв населенных территорий и сельскохозяйственных угодий.

Таблица 2

Валовое содержание тяжелых металлов в почвах рекультивированного хвостохранилища по почвенному профилю, мг/кг
The gross content of heavy metals in the soils of the reclaimed tailings pond soil sampling depth, mg/kg

Глубина отбора, см	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	V
Точка № 1								
0–10	6,7	108,6	48,8	63,6	13,8	80,7	89,4	116,5
10–20	8,7	140,2	53,7	69,2	25,1	80,5	101,0	127,0
20–30	3,3	130,9	56,9	70,2	30,7	82,8	100,6	118,3
30–40	10,7	111,1	59,3	77,9	23,5	81,6	87,5	121,2
40–50	12,4	156,2	55,3	73,1	27,5	80,5	96,3	115,1
50–60	11,8	115,9	55,4	72,6	28,4	90,1	100,8	132,0
60–70	20,1	123,0	49,4	63,7	20,8	77,0	142,7	109,7
70–80	14,7	101,3	52,4	67,3	22,6	76,8	145,8	114,7
80–90	5,0	122,9	41,9	57,3	11,5	82,8	163,3	143,4
Точка № 2								
0–10	9,4	99,4	42,3	55,8	79,0	73,0	11,1	118,4
20–30	15,1	115,7	61,3	79,4	88,9	81,2	13,7	84,4
40–50	15,1	114,4	58,6	75,5	88,6	84,2	13,7	119,5
50–60	10,8	113,5	52,2	69,0	101,6	84,3	12,1	151,5
60–70	25,2	143,4	62,3	71,8	114,6	95,2	12,9	130,3
80–90	7,8	125,2	48,9	65,3	112,1	86,7	15,6	146,8
Точка № 3								
0–10	9,54	115,4	57,8	70,9	31,2	86,5	103,6	144,0
10–20	12,44	134,1	57,2	70,2	39,4	87,8	105,6	117,6
20–30	9,81	128,7	56,0	69,4	17,8	92,3	89,8	119,7

Также установлена зависимость снижения концентрации тяжелых металлов от глубины.

Статистические критерии Манна-Уитни оценивались с помощью критического значения при уровне значимости 5% ($U_{кр} = 2$). Например, критерий Манна-Уитни между содержанием меди (Cu) в фоновой почве глубиной отбора 0–10 см и в почве рекультивированного хвостохранилища глубиной отбора 0–10 см составляет 6 ($U = 6$), а критическое значение составляет 2 ($U_{кр} = 2$).

Полученный результат больше критического значения ($U > U_{кр}$). Из этого следует, что статистически достоверные различия по содержанию меди (Cu) между почвой рекультивированного хвостохранилища и фоновой горно-луговой черноземовидной почвой отсутствуют. Сравнение всех полученных критериев (U) с критическим показывает, что все полученные результаты больше критического ($U > U_{кр}$). Следовательно, содержание исследованных металлов в почве рекультивированного хвостохранилища

Таблица 3

Валовое содержание тяжелых металлов в фоновых горно-луговых черноземовидных почвах, мг/кг
Gross content of heavy metals in background mountain meadow chernozem soils soil sampling depth, mg/kg

Глубина отбора, см	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	V
Контроль (фон) 1								
0–10	13,8	116,3	58,8	77,6	29,2	89,6	96,6	113,4
10–20	12,0	115,7	56,3	71,8	28,9	72,0	90,0	110,7
20–30	8,1	112,6	45,2	56,5	21,7	69,5	89,2	108,4
35–45	6,6	98,2	42,5	55,4	16,1	65,8	83,1	106,3
50–60	7,2	99,8	39,2	51,9	15,8	65,8	77,5	98,8
Контроль (фон) 2								
0–10	6,0	118,9	48,5	62,8	25,2	86,1	105,7	130,7
10–20	4,2	110,4	48,4	62,6	24,6	82,9	103,1	118,8
20–30	2,7	105,4	43,7	57,7	10,5	75,4	90,6	116,2
40–50	2,3	89,5	39,9	54,7	9,5	67,8	87,1	104,6
Контроль (фон) 3								
0–10	11,1	111,9	47,1	64,2	23,5	86,6	94,8	123,1
10–20	7,5	96,1	45,7	58,8	12,8	80,9	93,6	122,3
20–30	1,3	90,1	44,9	57,9	10,1	79,8	91,3	108,7

и горно-луговой черноземовидной почве статистически не имеет достоверных различий.

Содержание тяжелых металлов в почве рекультивированного хвостохранилища оценивалось с помощью единого индекса загрязнения. Результаты представлены в табл. 4.

Исходя из оценки загрязнения каждого металла можно сделать вывод, что большинство (64%) исследованных проб почв рекультивированного хвостохранилища имеют слабую степень загрязнения, и около трети (32%) не загрязнены. Среднее загрязнение имеют только 1,5% от всех взятых проб почвы.

Индекс нагрузки загрязнения показал, что основное загрязнение приходится на несколько точек в определенных слоях: на глубине 40–60 см (точка 1) и 50–60 см (точка 2), также установлены незначительные загрязнения для точки 1

на глубине 30–40 см. Незначительное загрязнение характерно и для верхних слоев в точках 6 и 7. Значения индекса загрязнения Немерова показывают, что все отобранные почвенные образцы являются незагрязненными.

Также в табл. 5 представлены значения потенциального экологического риска (*PERI*). Полученные данные *PERI* свидетельствуют об отсутствии каких-либо потенциальных экологических рисков со стороны почв рекультивированного хвостохранилища, так как все пробы почв показали слабую степень загрязнения по этому показателю. В табл. 5 отображены результаты оценки суммарного показателя загрязнения (Z_c). Все отобранные почвенные образцы отнесены к допустимой (низкой) категории опасности.

Сравнение использованных показателей и индексов загрязнения свидетельствует о разной степени их природоох-

Таблица 4

**Единый индекс загрязнения (Single Pollution Index, PI)
Pollution Index (Single Pollution Index, PI)**

Глубина, см	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	V
Точка 1								
0–10	0,5	0,9	0,8	0,8	0,5	0,9	0,9	1,1
10–20	0,7	1,2	1,0	1,0	0,9	1,1	1,1	1,1
20–30	0,4	1,2	1,3	1,2	1,4	1,2	1,1	1,2
30–40	1,6	1,1	1,4	1,4	1,5	1,2	1,1	1,1
40–50	1,9	1,6	1,3	1,3	1,7	1,2	1,2	1,1
50–60	1,6	1,2	1,4	1,4	1,8	1,4	1,3	1,2
Точка 2								
0–10	0,7	0,9	0,7	0,7	0,4	0,8	0,8	1,1
20–30	1,3	1,0	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0	0,7
40–50	1,3	1,2	1,4	1,4	1,1	1,3	1,1	1,1
50–60	1,5	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,4
Точка 3								
0–10	0,7	1,0	1,0	0,9	1,1	1,0	1,1	1,3
10–20	1,0	1,2	1,0	1,0	1,4	1,2	1,2	1,0
20–30	1,2	1,1	1,2	1,2	0,8	1,3	1,0	1,2
Точка 4								
0–10	0,5	0,9	0,8	0,8	0,2	1,3	0,9	1,1
Точка 5								
0–10	0,8	0,9	1,1	0,9	1,1	1,6	1,0	1,1
Точка 6								
0–10	1,5	1,0	2,3	1,0	1,2	1,6	1,1	1,1
Точка 7								
0–10	1,7	1,0	2,5	0,9	1,1	1,4	1,1	1,1
Точка 8								
0–10	0,7	0,8	1,0	0,8	0,6	1,2	1,3	0,9
Примечание: Зеленым цветом выделены пробы почв, в которых отсутствуют загрязнения по данному металлу, желтым — слабая степень загрязнения почв, оранжевым — средняя степень загрязнения.								

ранной жесткости. Так, методики вычисления единого индекса загрязнения (PI) и индекса нагрузки загрязнения (PLI) оказались более «жесткими» в оценках методиками определения загрязненных участков, а методики определения индекса загрязнения Немерова (PI_{Nemerow}), потенциального экологического риска ($PERI$) и суммарного показателя загрязнения (Z) — более «мягкими»: согласно

этим методикам, все изучаемые пробы почв отнесены к категории незагрязненных. Методика расчета единого индекса загрязнения предполагает, что последствием малейшего превышения фонового содержания химического элемента становится отнесение почвы к категории слабой степени загрязнения. Надо быть осторожным при использовании данного индекса, поскольку даже при-

Таблица 5

Расчетные индексы для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами
Calculated indices for the assessment of soil pollution by heavy metals

Глубина, см	<i>PLI</i>	<i>PI</i> _{Nemerow}	<i>PERI</i>	<i>Z_c</i>
Точка 1				
0–10	0,02	0,17	18,5	0,4
10–20	0,12	0,20	24,8	1,1
20–30	0,22	0,23	27,3	2,0
30–40	0,98	0,26	24,7	3,4
40–50	1,68	0,29	26,6	3,7
50–60	1,80	0,29	26,2	4,3
Точка 2				
0–10	0,01	0,17	16,4	0,1
20–30	0,73	0,28	29,9	3,3
40–50	0,56	0,23	21,9	3,7
50–60	1,26	0,25	23,2	3,7
Точка 3				
0–10	0,11	0,21	27,3	1,0
10–20	0,30	0,22	31,1	4,6
20–30	0,35	0,22	21,8	2,2
Точка 4				
0–10	0,01	0,19	15,8	0,6
Точка 5				
0–10	0,17	0,24	28,1	1,5
Точка 6				
0–10	1,07	0,34	36,8	3,9
Точка 7				
0–10	0,96	0,35	36,0	3,9
Точка 8				
0–10	0,04	0,20	20,5	0,3
Примечание. В столбце с индексом нагрузки загрязнения (<i>PLI</i>) зеленым цветом отмечена категория «незагрязненных» почв, желтым цветом – с незначительной степенью загрязнения, красным – загрязненная почва. В столбце с индексом загрязнения Немеорова (<i>PI</i> _{Nemerow}) зеленым цветом выделена категория незагрязненных почв. В столбце с данными о потенциальном экологическом риске (<i>PERI</i>) зеленым цветом выделена категория слабого загрязнения. В столбце с суммарным показателем загрязнения зеленым цветом отмечена допустимая категория опасности.				

родное варьирование показателя трактуется как загрязнение. Например, в фоновой точке № 1 на глубине отбора 0–10 см единый показатель загрязнения меди, никеля и свинца ($PI_{Cu} = 1,1$; $PI_{Ni} = 1,1$; $PI_{Pb} = 1,6$) соответствует слабой степени загрязнения, хотя в данном

образце даже нет превышения ОДК по этим металлам. То есть 50% даже фоновых проб, имеющих содержание элемента выше среднего значения, должны быть отнесены к загрязненным.

Подавляющее большинство исследованных проб почвы по большинству рас-

считанных экологических показателей относятся к незагрязненным. По индексу Немерова, потенциальному экологическому риску и суммарному показателю загрязнения все образцы почвы рекультивированного хвостохранилища относятся к незагрязненным. По индексу нагрузки загрязнения 17% изученных проб почвы имеют незначительную степень загрязнения и 17% проб — загрязненная почва. Согласно единому индексу загрязнения, 32% исследованных проб почв не загрязнены, 64% имеют слабую степень загрязнения, 1,5% имеют среднее загрязнение.

Заключение

Установлено, что валовое содержание тяжелых металлов в почвах рекульти-

рованного хвостохранилища в большинстве образцов не превышает фоновые значения и ориентировочно допустимые концентрации.

Согласно большинству рассчитанных индексов, на основе полученных данных почвы рекультивированного хвостохранилища Урупского ГОК не загрязнены, в отдельных случаях — умеренно загрязнены.

Рекультивационные мероприятия хвостохранилища Урупского ГОК произведены на должном уровне, и данное хвостохранилище не является источником загрязнения прилегающей территории.

Сравнение использованных показателей и индексов загрязнения свидетельствует о разной степени их природоохранной «жесткости».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басова И. А., Иоина М. А., Глухова Е. Н. Геоэкологическое состояние почвенного покрова в горнопромышленных регионах // Известия ТулГУ. Науки о земле. — 2010. — № 1. — С. 16—20.
2. Шабанов М. В., Маричев М. С., Манджиева С. С., Соколов А. А. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 727—740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.
3. Galhardi J. A., de Mello J. W. V., Wilkinson K. J. Environmental and health risk assessment of agricultural areas adjacent to uranium ore fields in Brazil // Environmental Geochemistry and Health. 2020, vol. 42, no. 11, pp. 3965—3981. DOI: 10.1007/s10653-020-00659-3.
4. Мощенко Д. И., Кузина А. А., Колесников С. И. Сравнительная оценка устойчивости черноземов Центрального Предкавказья и Кавказа к загрязнению свинцом, хромом, медью, никелем и нефтью // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 76—87. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-76-87.
5. Li S. L., Jiang W., Yu H., Wang X. The recent progress China has made in green mine construction, Part I: Mining groundwater pollution and sustainable mining // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022, vol. 19, no. 9, article 5673. DOI: 10.3390/ijerph19095673.
6. Петрова Т. А., Рудзиш Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 767—776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
7. Tang L., Liu X., Wang X., Liu S., Deng H. Statistical analysis of tailings ponds in China // Journal of Geochemical Exploration. 2020, vol. 216, article 106579. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106579.
8. Liu B., Wang S., Wang J., Zhang X., Shen Z., Shi L., Chen Y. The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* // Science of the Total Environment. 2020, vol. 719, article 137475. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137475.
9. Митракова Н. В., Хайрулина Е. А., Блинов С. М., Перевошикова А. А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 266—278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31.
10. Pencea I., Turcu R. N., Popescu-Argeş A. C., Timiş A. L., Priceputu A., Ungureanu C., Niculescu F. L. An improved balanced replicated sampling design for preliminary screening of the tailings ponds aiming at zero-waste valorization. A Romanian case study // Journal of Environmental Management. 2023, vol. 331, article 117260. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117260.

11. Yu H., Zahidi I., Fai C. M. Reclaiming abandoned mine tailings ponds for agricultural use: Opportunities and challenges // *Environmental Research*. 2023, vol. 232, article 116336. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116336.

12. Юрак В. В., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Лебзин М. С. Сорбент-ориентированный метод детоксикации почв от тяжелых металлов // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 135–150. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-135-150.

13. Мощенко Д. И., Колесников С. И., Кузина А. А., Меженков А. А., Литвинов Ю. А. Разработка прогнозных картосхем нарушения экосистемных функций почв Центрального Предкавказья и Кавказа при их загрязнении разными концентрациями меди // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2023. – № 5-1. – С. 104–116. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104.

14. Казеев К. Ш., Колесников С. И., Акименко Ю. В., Даденко Е. В. Методы биодиагностики наземных экосистем. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – 356 с.

15. Kowalska J. B., Mazurek R., Gąsiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018, vol. 40, pp. 2395–2420. DOI: 10.1007/s10653-018-0106-z.

16. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques // *Journal of Hazardous Materials*. 2011, vol. 195, pp. 355–364. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.051.

17. Qingjie Gong, Jun Deng, Xiang Yunchuan, Wang Qingfei, Liqiang Ya Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing // *Journal of China University of Geosciences*. 2008, vol. 19, pp. 230–241. DOI: 10.1016/S1002-0705(08)60042-4.

18. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic. Pollution control. A sedimentological approach // *Water Research*. 1980, vol. 14, pp. 975–1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.

19. Авдощенко В. Г., Климова А. В. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петропавловска-Камчатского, Камчатский край // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. – 2022. – № 61. – С. 65–81. DOI: 10.17217/2079-0333-2022-61-65-81.

20. Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.

21. Кузнецов А. М., Фесюн А. П., Самохвалов С. Г., Махонька Э. П. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. – М., 1992. – 57 с.

22. Самсонова В. П., Мешалкина Ю. Л. Часто встречающиеся неточности и ошибки применения статистических методов в почвоведении // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2020. – № 102. – С. 164–182. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-164-182.

23. Мощенко Д. И., Кузина А. А., Колесников С. И. Экологически безопасные концентрации никеля в почвах Центрального Предкавказья и Кавказа // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 401–409. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-401-409.

24. Национальный проект «Экология» https://www.mnr.gov.ru/activity/np_ecology/fp-chistaya-strana/. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Basova I. A., Ioina M. A., Glukhova E. N. Geocological state of soil cover in mining regions. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2010, no. 1, pp. 16–20. [In Russ].

2. Shabanov M. V., Marichev M. S., Mangiyeva S. S., Sokolov A. A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3, pp. 727–740. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

3. Galhardi J. A., de Mello J. W. V., Wilkinson K. J. Environmental and health risk assessment of agricultural areas adjacent to uranium ore fields in Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 11, pp. 3965–3981. DOI: 10.1007/s10653-020-00659-3.

4. Moshchenko D. I., Kuzina A. A., Kolesnikov S. I. Comparative assessment of the black soils sustainability in the central Caucasus and the caucasus to pollution with lead, chromium, copper, nickel and oil. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 76–87. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-1-76-87.

5. Li S. L., Jiang W., Yu H., Wang X. The recent progress China has made in green mine construction, Part I: Mining groundwater pollution and sustainable mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, no. 9, article 5673. DOI: 10.3390/ijerph19095673.
6. Petrova T. A., Rudzisha E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 767 – 776. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16.
7. Tang L., Liu X., Wang X., Liu S., Deng H. Statistical analysis of tailings ponds in China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020, vol. 216, article 106579. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106579.
8. Liu B., Wang S., Wang J., Zhang X., Shen Z., Shi L., Chen Y. The great potential for phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 719, article 137475. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137475.
9. Mitrakova N. V., Khayrulina E. A., Blinov S. M., Perevoshchikova A. A. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 260, pp. 266 – 278. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.31.
10. Pencea I., Turcu R. N., Popescu-Argeş A. C., Timiş A. L., Priceputu A., Ungureanu C., Niculescu F. L. An improved balanced replicated sampling design for preliminary screening of the tailings ponds aiming at zero-waste valorization. A Romanian case study. *Journal of Environmental Management*. 2023, vol. 331, article 117260. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117260.
11. Yu H., Zahidi I., Fai C. M. Reclaiming abandoned mine tailings ponds for agricultural use: Opportunities and challenges. *Environmental Research*. 2023, vol. 232, article 116336. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116336.
12. Yurak V. V., Apakashev R. A., Valiev N. G., Lebzin M. S. Sorbent-based method of soils detoxification from heavy metals. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 135 – 150. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-135-150.
13. Moshchenko D. I., Kolesnikov S. I., Kuzina A. A., Mezhenkov A. A., Litvinov Yu. A. Prognostic map charts of ecosystem functioning violation in soil in the Central Ciscaucasia and the Caucasus in contamination with different copper concentrations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 104 – 116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104.
14. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Akimenko Yu. V., Dadenko E. V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems], Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU, 2016, 356 p.
15. Kowalska J. B., Mazurek R., Gaşiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018, vol. 40, pp. 2395 – 2420. DOI: 10.1007/s10653-018-0106-z.
16. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques. *Journal of Hazardous Materials*. 2011, vol. 195, pp. 355 – 364. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.051.
17. Qingjie Gong, Jun Deng, Xiang Yunchuan, Wang Qingfei, Liqiang Ya Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*. 2008, vol. 19, pp. 230 – 241. DOI: 10.1016/S1002-0705(08)60042-4.
18. Håkanson L. An ecological risk index for aquatic. Pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980, vol. 14, pp. 975 – 1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.
19. Avdoshchenko V. G., Klimova A. V. Assessment of heavy metal pollution in the soils of Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatka territory. *Bulletin of Kamchatka state technical university*. 2022, no. 61, pp. 65 – 81. [In Russ]. DOI: 10.17217/2079-0333-2022-61-65-81.
20. Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P., etc. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment], Moscow, Nedra, 1990, 335 p.
21. Kuznetsov A. M. Fesyun A. P., Samokhvalov S. G., Makhon'ka E. P. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodiy i produkcii rastenievodstva* [Methodological guidelines for the determination of heavy metals in soils of farmland and crop production], Moscow, 1992, 57 p.
22. Frequent inaccuracies and errors in the application of statistical methods in soil science. *Bulletin V.V. Dokuchaev soil science institute*. 2020, no. 102, pp. 164 – 182. [In Russ]. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-164-182.

23. Moshchenko D. I., Kuzina A. A., Kolesnikov S. I. Ecologically safe nickel concentrations in soils of the Central Ciscaucasia and the Caucasus. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 401 – 409. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-401-409.

24. *Natsional'nyy proekt «Ekologiya»* [National project «Ecology»], https://www.mnr.gov.ru/activ-ity/nr_ecology/frp-chistaya-strana/. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Храпай Екатерина Сергеевна*¹ – студент,
лаборант-исследователь, e-mail: katerinap1996@mail.ru,

*Кузина Анна Андреевна*¹ – канд. биол. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: ankuzin@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8816-5288,

*Колесников Сергей Ильич*¹ – д-р с.-х. наук, профессор,
зав. кафедрой, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,

*Минникова Татьяна Владимировна*¹ – канд. биол. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: loko261008@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,

*Казеев Камиль Шагидуллоевич*¹ – д-р геогр. наук,
профессор, директор Академии биологии
и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
e-mail: kazeev@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-6212,

¹ Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет.

Для контактов: Храпай Е.С., e-mail: katerinap1996@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.S. Khrapai*¹, Student, Laboratory Assistant,
e-mail: katerinap1996@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3133-7629,

*A.A. Kuzina*¹, Cand. Sci. (Biol.),

Senior Researcher, e-mail: ankuzin@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-8816-5288,

*S.I. Kolesnikov*¹, Dr. Sci. (Agr.), Professor,

Head of Chair, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,

*T.V. Minnikova*¹, Cand. Sci. (Biol.),

Leading Researcher, e-mail: loko261008@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,

*K.Sh. Kazeev*¹, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,

Director of D.I. Ivanovsky Academy of Biology

and Biotechnology, e-mail: kazeev@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-6212,

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology,

Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russia.

Corresponding author: E.S. Khrapai, e-mail: katerinap1996@mail.ru.

Получена редакцией 13.01.2024; получена после рецензии 19.02.2024; принята к печати 10.03.2024.

Received by the editors 13.01.2024; received after the review 19.02.2024; accepted for printing 10.03.2024.