

ВЛИЯНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ УНАЛЬСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

З.Э. Маковозова¹, А.А. Соколов², В.А. Фоменко², М.Т. Сарбаева³

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
Владикавказ, РСО-Алания, Россия

² Филиал Южного федерального университета
в г. Геленджике, Геленджик, Россия

³ Международный казахско-турецкий университет
имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Республика Казахстан,
e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz

Аннотация: Преобразование природно-техногенных систем (ПТС) имеет многостадийный характер, на определенном этапе возможно образование техногенных ореолов, представляющих промышленную ценность. С одной стороны, это объясняет вторичное загрязнение речных вод донными отложениями, а с другой стороны, ставит вопрос о разработке актуальной системы мониторинга ПТС. Приведены данные о состоянии и преобразовании экосистемы Унальского хвостохранилища за последние десятилетия. Для оценки рисков сложных природно-техногенных систем рекомендуется применять комплексный многофакторный анализ с последующими управленческими выводами. На основе проведенных исследований определена значимая роль сложной разветвленной речной системы Унальской котловины в рассеянии тяжелых металлов и загрязнении ими всей экосистемы, даны рекомендации для повышения представительности мониторинга таких ПТС, создания необходимой информативной базы инструментальных исследований, с помощью которой станет возможным определять наиболее поражаемые техногенные и природные участки. Подтверждена необходимость регулярного мониторинга для детального изучения и определения стадий эволюции сложных природно-техногенных систем на примере Унальской ПТС.

Ключевые слова: техногенез, хвостохранилище, речная система, природно-техногенная система, поллютанты, миграция, окружающая среда, гидрогеология.

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

Для цитирования: Маковозова З. Э., Соколов А. А., Фоменко В. А., Сарбаева М. Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 126–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.

Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals

Z.E. Makovozova¹, A.A. Sokolov², V.A. Fomenko², M.T. Sarbaeva³

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), Vladikavkaz, Russia

² Branch of Southern Federal University in Gelendzhik, Gelendzhik, Russia

³ Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Turkestan, Republic of Kazakhstan, e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz

Abstract: Transformation of a nature-and-technology system (NTS) is a multi-stage process, and it is possible that a manmade envelope of a commercial value appears at a certain time. On the one hand, this explains the secondary contamination of rivers with bottom sediments, and, on the other hand, it raises a question on the relevance of proper monitoring of NTS. The article describes the behavior and transformation of the ecosystem at Unal tailings pond for the recent ten years. The risk assessment at the complex nature-and-technology systems should use an integrated multi-factor analysis with subsequent managerial inferences. The implemented research points at the significant part taken by the complex and branched river system in the Unal hollow in spreading of heavy metals and in pollution of the local ecosystem with them. It is recommended on improvement of monitoring representativeness at such NTS, and on creation of the required data base of instrumental measurements, which can enable detection of the most affected technology and nature sites. The need for the systematic monitoring for the comprehensive exploration and evolution staging of a complex nature-and-technology system is proved as a case-study of Unal NTS.

Key words: techno genesis, tailings pond, river system, nature-and-technology system, pollutants, migration, environment, hydrogeology.

Acknowledgements: The research was carried out at the Southern Federal University at the expense of the Russian Science Foundation (Project No. RNF/23-37-GL, No. 23-77-00015).

For citation: Makovozova Z. E., Sokolov A. A., Fomenko V. A., Sarbaeva M. T. Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(6):126-138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_126.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем устойчивого функционирования геологической среды, представляющей собой сложную диссипативную систему с разнообразными природно-техническими компонентами, является разработка актуального алгоритма мониторинга. Пристальное внимание следует уделить экологическим аспектам изменения условий взаимодействия всех уровней геосреды, в частности поверхностных и под-

земных вод, испытывавших техногенное воздействия горной промышленности [1, 2]. При этом наиболее экологически опасными являются отходы, в которых содержатся сульфиды, так как это одна из самых подвижных минеральных рудных форм [3–5]. Первичные руды многих полиметаллических месторождений представлены сульфидами, которые под воздействием ряда факторов природного и техногенного происхождения легко переходят в новую окисляемую форму,

не теряя при этом химической активности, что обуславливает их новые химические преобразования.

Цель исследований:

- изучение гидрогеологических особенностей котловинных хвостохранилищ на примере Унальского;
- выявление роли природно-техногенной системы (ПТС) в балансе всей экосистемы района;
- оценка эффективности критериев Единой системы экологического мониторинга (ЕСЭМ) РСО-Алания по состоянию поверхностных водных объектов;
- определение стадии преобразования Унальской ПТС.

Вопрос взаимосвязи и взаимовоздействия разных подуровней экосистемы с техногенной деятельностью необходимо рассматривать комплексно, с учетом особенностей каждого подуровня [6, 7].

Рост влияния хранения и складирования отходов горнорудной промышленности на окружающую среду и людей воспринимается как прогрессирующая угроза, что подтверждается результатами исследований, проводимых в границах геологических объектов [8–10]. По данным 2019 г. наиболее высокий показатель образования отходов производства и потребления показала сфера экономики «добыча полезных ископаемых», и согласно статистике, этот показатель неуклонно растет. В итоге от ухудшающегося состояния окружающей природной среды любая ПТС дойдет до уровня трансформации (полной или частичной) или деградации, и тогда актуальным станет вопрос о способах и путях реабилитации природной среды [11, 12].

Гидротехнические сооружения хвостохранилищ имеют характерные особенности, обусловленные тем, что возводятся в более сложных условиях и оказывают доминирующее влияние на состояние окружающей природной среды [13].

Гидроотвалы хвостохранилищ, возникающие в процессе складирования отходов обогащения, — это подвижная система, чему способствуют несколько факторов:

- первично химически активная среда;
- высокая концентрация рудных сульфидных минералов по сравнению с концентрацией таковых в исследуемых рудных телах;
- достаточная удельная поверхность зерен [14].

В результате длительной эксплуатации хвостохранилища, а также и неправильной консервации отработанных карт хвостохранилища, в нем происходят процессы застаивания воды, которые в итоге приводят к преобразованию гидроотвалов. Это связано с тем, что тяжелые металлы из нерастворенного состояния переходят в растворенное, приводя к формированию техногенного озера, а впоследствии происходит миграция тяжелых металлов, создающая экологическую опасность, зависящую от целого ряда факторов. Такие агрессивные воды способны воздействовать на гидротехнические сооружения и способствовать их разрушению, а как итог — попадание загрязняющих веществ в окружающую среду. В связи с этими изменениями необходимо предусматривать постоянный мониторинг и возможность фильтрации техногенных вод [15, 16].

Термин «техногенное озеро», введенный некоторое время назад для характеристики особых видов ПТС четко описывает и совмещает в себе первичную техногенную и вторичную натуральную природу объекта. Говоря о рекультивации и экологическом мониторинге хвостохранилищ, заметим, что хвостохранилище, являясь искусственно созданным сооружением, становится в ходе эксплуатации существенной частью всей экосистемы.

С точки зрения ряда исследователей, хвостохранилища, как и водохранилища, имеют отрицательную степень воздействия на все элементы ПТС [17]. Исследования подтверждают, что функционирующие или подвергшиеся рекультивации хвостохранилища сформировали новый вид природно-техногенных озер, к критериям оценивания опасности которых следует добавить гидрогеологические факторы, как первичные, так и техногенно образованные.

Объект исследований

Унальское хвостохранилище относится к типу хвостохранилищ, эффективность дамбирования которых оценивалась в зависимости от природных характеристик котловины.

Район Унальского хвостохранилища расположен в долине между Боковым и Скалистым хребтами (Садоно-Унальская котловина), в бассейне р. Ардон и ее притоков (рр. Уналдон, Майрамдон). Садоно-Унальская котловина образована регрессивной эрозией рек, в области распространения подверженных денудации песчано-сланцевых толщ среднеюрских отложений.

Рельеф широкой (до 0,8–1 км) речной поймы расчленен многочисленными рукавами. В геологическом строении территории принимают участие верхнечетвертичные аллювиальные отложения, слагающие полого-наклонную третью террасу бассейна р. Терек. Общая мощность этих отложений достигает 7–10 м.

Литологически аллювиальные отложения представлены галечниковыми и валунно-галечниковыми отложениями. Заполнитель (фракция более 2 мм) составлен крупным песком. Общее количество заполнителя не превышает 12% от массы породы.

Водные объекты района ледникового происхождения, маломинерализованные, нейтральные (6,5–7,4) имеют гид-

рокарбонатно-кальциевый химический состав (рис. 1).

Методы исследований

В ходе исследований были проанализированы гидрогеологические особенности района хвостохранилища и прилегающей к нему части котловины, проведен сравнительный анализ результатов государственного мониторинга бассейна р. Ардон с притоками в районе Унальского хвостохранилища и результатов проведенных авторами исследований в летний период 2021 г.

На начальном этапе исследований был проведен отбор проб поверхностных вод исследуемой территории по следующей схеме (с юга на север по направлению движения исследуемых рек), указанной на рис. 1: проба 1 — по штольневому ручью 43, проба 2 — ниже по течению р. Уналдон, проба 3 — в месте слияния рр. Уналдон и Ардон, проба 4 — в месте сброса вод Унальского хвостохранилища, проба 5 — ниже места сброса на 100 м по течению р. Ардон, проба 6 — в р. Майрамдон. Задачей при определении схемы отбора проб было выявление путей миграции тяжелых металлов и подтверждение источников первичного (шахтные воды и воды техногенного озера) и вторичного (донные отложения рек) их рассеяния.

Отбор проб воды производился в пластиковые бутылки по 0,33 л, пробы подкислялись 1 мл 10%-ной азотной кислоты и герметично закупоривались.

Для проведения сравнительного анализа были также использованы имеющиеся аналитические данные государственного мониторинга поверхностных вод данного района республики (табл. 1, 2).

В российской практике государственного мониторинга состояния окружающей среды, в том числе ЕСЭМ по РСО-Алания, при исследовании качества воды применяют индекс загрязненности

воды – ИЗВ, удельный комбинаторный индекс загрязнения воды – УКИЗВ или метод оценки качества воды по ассоциативным показателям – АП [18, 19]. Зарубежные исследователи проводят оценку качества воды на основе вертикальных профилей и продольных съемок [20].

Для расчета ИЗВ и УКИЗВ всегда используют шесть «лимитируемых» показателей, в число которых входят концентрация растворенного кислорода и БПК 5 (показатель окисления за 5 сут). Четыре оставшихся показателя признаны наиболее неблагоприятными для исследуемых объектов.

Для объектов горно-рудной промышленности такими являются тяжелые металлы – для объекта исследования это свинец, кадмий, цинк и медь.

$$ИЗВ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация компонента; n – число показателей.

На данной территории с 1994 по 2005 гг. основными результатами оценки качества воды стали следующие:

- на уровне II класса («чистая» вода) в пунктах наблюдения пос. Мизур и пос. Унал;

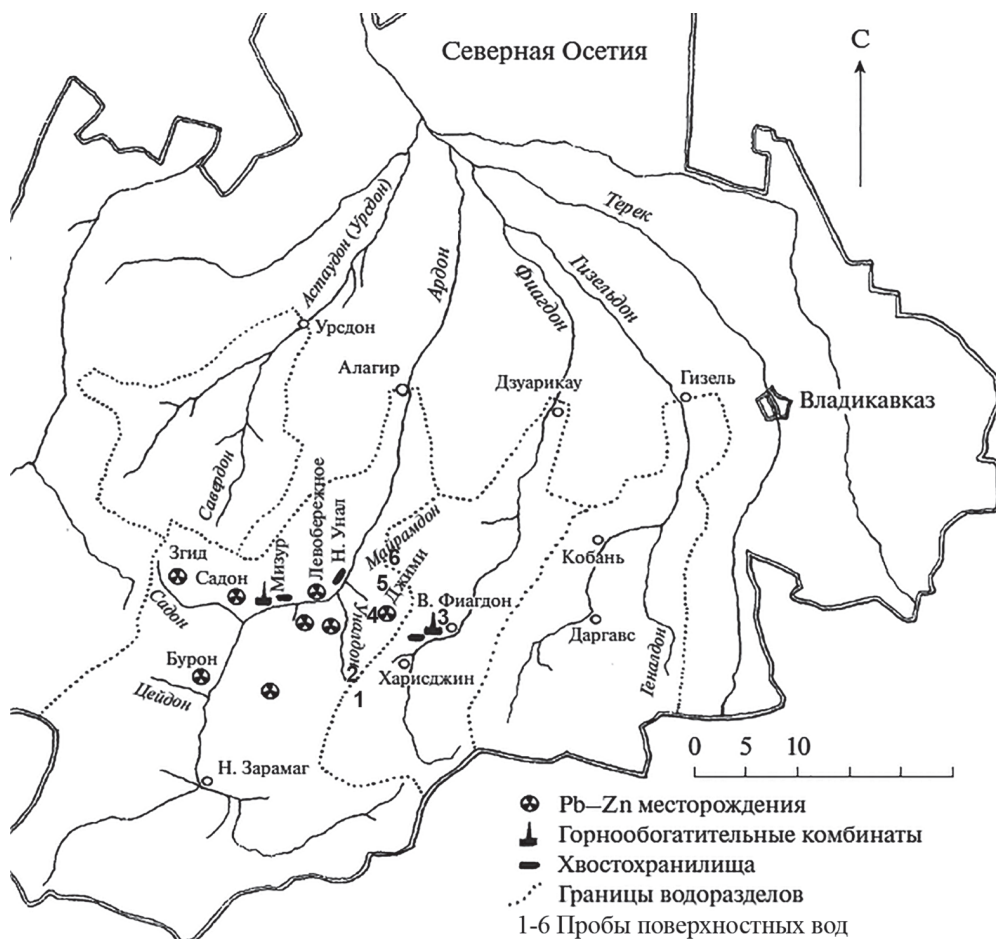


Рис. 1. Схема отбора проб объекта исследования
Fig. 1. Scheme of sampling the object of study

Таблица 1

Динамика изменения ИЗВ р. Ардон за 1994–2005 гг. (по данным Северо-Осетинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды)
Dynamics of changes in the Pollutant Index of Ardon River for 1994–2005 (according to North Ossetian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring)

Годы	р. Ардон			
	пос. Унал		г. Алагир	
	выше	ниже	выше	ниже
1994	1,04	2,85	1,91	1,57
1995	1,22	1,13	1,30	1,31
1996	1,03	1,13	1,31	1,29
1997	1,79	1,64	2,11	2,48
1998	2,3	1,37	2,12	2,16
1999	1,50	1,30	1,80	2,51
2000	1,30	1,40	1,20	1,63
2001	1,61	1,03	1,31	1,74
2002	1,29	1,53	1,49	1,54
2003	1,10	1,14	2,00	2,16
2004	0,81	0,78	1,45	2,07
2005	0,66	0,65	0,58	0,39

• на уровне III класса («умеренно загрязненная») в пункте р. Ардон, ниже г. Алагир.

Такая оценка качества воды показывает только усредненную интегральную оценку, не давая полной картины загрязнения.

При длительном хранении все отходы претерпевают изменения, обусловленные физико-химическими превращениями под влиянием внешних условий и внутренних факторов. В результате этих превращений образуются значительные количества новообразованных соединений [21, 22], являющихся более токсичными и подвижными, чем исходные. Также за счет физико-химических превращений большинство этих соединений имеют гораздо более высокую

Таблица 2

Динамика изменения УКИЗВ РСО-Алания за 2006–2010 гг. (по данным Северо-Осетинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды)
Dynamics of changes in the Specific combinatorial index of water pollution in the rivers of North Ossetia-Alania for 2006–2015 (according to North Ossetian Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring)

Годы	р. Ардон			
	пос. Унал		г. Алагир	
	выше	ниже	выше	ниже
2006	1,84	2,37	3,19	4,08
2007	3,8	4,11	3,15	3,49
2008	1,39	2,81	1,01	1,27
2009	0,68	2,1	1,23	1,31
2010	1,19	2,64	2,33	3,03
2011	1,96	1,64	1,36	3,81
2012	1,84	2,15	1,31	2,25
2013	2,74	1,71	1,75	2,86
2014	1,33	1,50	1,85	2,33
2015	1,33	1,50	1,85	2,33

степень проницаемости, чем исходные образования [23–25]. В результате чего токсичные загрязнения попадают в водные объекты, хотя изначально концентрации их могут не превышать нормы ПДК, что и фиксируется при проведении государственного мониторинга. А так как водные объекты имеют нейтральную среду (рН от 6,5 до 7,4), когда происходит смешивание техногенных вод с речными, то при изменении рН среды подвижность токсичных соединений снижается. И впоследствии они аккумулируются в донных отложениях и оказывают вредное воздействие на биоту водных объектов, а особенно остро этот вопрос проявляется в периоды межени. Поэтому авторами были проведены исследования по выявлению особенностей

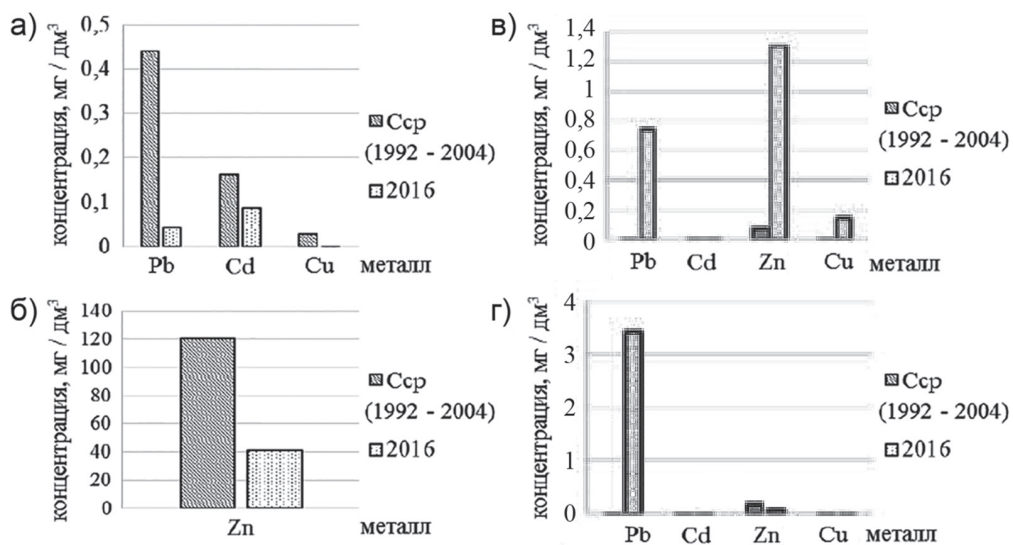


Рис. 2. Динамика содержания тяжелых металлов: штольневый ручей (а); месторождение Холст (б); сброс Унальского хвостохранилища (в); р. Ардон ниже сброса (г) за период с 1992 – 2004 [26, 27]
 Fig. 2. Dynamics of the content of heavy metals: adit stream (a); Kholst deposit (b); discharge of the Unal tailing dump (v); Ardon River below the discharge (g) for the period from 1992 – 2004 [26, 27]

химического состава воды рр. Ардон, Уналдон, Майрамдон и нескольких проб штольневых вод близрасположенных полиметаллических месторождений (см. рис. 2, табл. 3).

Предложенная схема исследования состава вод выбиралась таким образом, чтобы можно было определить объект

наибольшего «вклада» в загрязнение вод данного участка. При таком подходе анализ проб воды делается на различных участках водных объектов, которые входят в ПТС, а также с учетом расхода воды в водных объектах.

Особенно актуален мониторинг в периоды межени.

Таблица 3

Количественные показатели химического анализа проб воды, мг/дм³
Quantitative indicators of chemical analysis of water samples, mg/dm³

№	Место отбора	Свинец II класс эко- опасности	Кадмий II класс эко- опасности	Цинк III класс эко- опасности	Медь III класс эко- опасности
1	Штольневый ручей (шт. 43)	0,0354	0,071	0,001	0,001
2	р. Уналдон ниже шт. ручья по течению	0,001	0,001	0,002	0,10
3	Место слияния рр. Уналдон и Ардон	0,002	0,0003	0,004	0,003
4	Место сброса Унальского хвостохранилища	0,61	0,01	0,9	0,1
5	р. Ардон ниже сброса	2,3	0,006	0,007	0,01
6	р. Майрамдон	менее 0,001	0,001	0,007	0,0004

Результаты исследований

Полученные результаты и анализ ранее проводимых исследований и государственного мониторинга позволил выявить следующее.

Анализ проб воды из разных участков речной системы, вовлеченной в данную ПТС, показывает, что первичное загрязнение речной воды шахтными водами не столь значительно, даже с учетом неустойчивой минеральной формы, в которой содержатся элементы-токсиканты.

Миграция легкорастворимых соединений основных рудных элементов полиметаллических руд и отвалов хвостохранилища усиливается за счет вторичного загрязнения донных отложений. Именно это вторичное обогащение не выявляется при использовании критериев Единой системы экологического мониторинга по РСО-Алания.

Подтверждено влияние образованных техногенных литохимических ореолов р. Ардон в районе хвостохранилища, которые играют значительную роль в подпитке речных вод тяжелыми металлами. Это обнаружено при анализе результатов проб воды, в которых содержание тяжелых металлов повышается не в месте сброса хвостохранилища, а ниже по течению.

При этом важно учесть, что применение ИЗВ не дает полной картины водной миграции элементов-поллютантов, так как не учитывает обнаруженные особенности вторичного «обогащения» исследуемых вод.

Выбор и методология мониторинга природно-техногенных систем имеющих или рекультивированных хвостохранилищ должен быть комплексным, с учетом этапов преобразования всей системы, которая из объектов природы и человеческой деятельности видоизменилась в совершенно новое сложное образование, требующее де-

тального изучения и регулярного мониторинга.

Заключение

Оценивая природно-техногенную систему Унальского хвостохранилища, необходимо заметить следующее:

1. При проектировании и эксплуатации гидротехнических объектов типа хвостохранилищ необходимо учитывать особенности гидрографии района, непосредственно влияющей на природно-техногенную систему.

В случае с Унальской ПТС неучтенным важным фактором является сезонность характеристик р. Ардон и ее притоков, а также степень влияния временно образующихся летних водотоков, которые формируются в июне и августе во время обильных краткосрочных летних ливней.

2. Используемые методики мониторинга поверхностных и подземных вод ЕСЭМ РСО-Алания не актуальны и малоинформативны на сегодняшний день, что приводит к ухудшению экологической обстановки в районе. Необходимы дальнейшие исследования для выявления и оценки степени экологической опасности техногенных образований в донных отложениях и на прилегающих участках.

Схему комплексного мониторинга природно-техногенных систем районов хвостохранилищ необходимо создать с учетом всех особенностей района ПТС (гидрографии, климата, тектоники и т.д.).

Пункты отбора проб следует выбирать с учетом сезонного характера исследуемых речных потоков (постоянных и сезонных временных) и участков потенциальной разгрузки мигрирующих рудных элементов высокой и средней экологической опасности. Частота отбора проб для мониторинга — не менее двух раз в месяц, в летние периоды — один раз в неделю.

Из результатов опробования необходимо сформировать аналитическую базу, которая, во-первых, позволит выявить зоны разгрузки воды от элементов-поллютантов и выделить контуры формирования донных отложений техногенного происхождения, а во-вторых, даст возможность в короткий срок принять управленческие решения, позволяющие

минимизировать степень негативного влияния на ПТС в целом.

3. Подход к оценке результатов мониторинга необходимо проводить с учетом полистадийности развития ПТС. Унальсая ПТС за несколько десятилетий существенно видоизменилась, и преобразования продолжают, что существенно меняет экологическую ситуацию района.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Б. Н.* Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 136–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.

2. *Галачиева С. В., Соколов А. А., Соколова О. А., Махосева С. А.* Система оценки устойчивого развития региональных народохозяйственных комплексов горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 329–335. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.

3. *Гриневский С. О.* Гидродинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод: Монография. — М.: Инфра-М, 2012. — 152 с.

4. *Чечель Л. П., Замана Л. В.* Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 4. — С. 17–25. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189.

5. *Lu J., Lu H., Lei K., Wang W., Guan Yu.* Contamination of soil and water resources with trace elements of metals caused by small-scale mining of metal ore: a case study at a sphalerite mine in Northern China // Environmental Science and Pollution Research. 2019, vol. 26, no. 24, pp. 24630–24644. DOI: 10.1007/s11356-019-05703-z.

6. *Корнилков С. В., Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А., Собенин А. В.* К вопросу об экологической реабилитации природной экосистемы, нарушенной при отработке Колыванского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 465–474. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-465-474.

7. *Соколов А. А., Мирошников А. С., Соколова Е. А.* Алгоритмы управления устойчивостью системы «предприятие горно-металлургического комплекса – внешняя среда» // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 83–86. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

8. *Крупская Л. Т., Зверева В. П., Склярова Г. Ф., Орлов А. М.* Техногенные поверхностные образования как источник загрязнения экосферы и обоснование возможности их освоения в Дальневосточном федеральном округе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 5–21. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-5-21.

9. *Бадалян Л. Х., Курдюков В. Н., Овчаренко А. М., Кучеренко С. В.* Метод определения предельно допустимой нагрузки на экосистему // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 430–439. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-430-439.

10. *Шестопалов В. Л., Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С.* Сравнительный анализ деформационных методов мониторинга сейсмической активности горных районов Черноморского побережья и Камчатки // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 535–543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

11. *Красавцева Е. А.* Геоэкологическая оценка влияния отходов обогащения редкометалльных руд на окружающую среду (на примере ООО «Ловозерский ГОК»). Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. — М., 2022. — 26 с.

12. Петров Ю. С., Соколов А. А., Раус Е. В. Математическая модель оценки техногенного ущерба от функционирования горных предприятий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 554–559. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.

13. Бутюгин В. В. Геоэкологические принципы эксплуатации хвостохранилища в криолитозоне // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2006. — № 1(12). — С. 140–147.

14. Айзман Р. И., Корнеева Т. В., Франовский С. Ю., Турбинский В. В., Бортникова С. Б., Никифорова Н. Г., Огудов А. С. Маркёры биогеохимического мониторинга в районе хвостохранилища сульфидных руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 3. — С. 145–158. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2557.

15. Куликова А. А., Сергеева Ю. А., Овчинникова Т. И., Хабарова Е. И. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 7. — С. 135–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

16. Куликова А. А., Хабарова Е. И., Сергеева Ю. А. Перспективы использования баромембранных технологий в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 22–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-22-32.

17. Liu C., Wang C., Li Y. Ecological security pattern and spatial variation in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section), China // Environ Dev Sustain. 2023, vol. 425, pp. 2368–2386. DOI: 10.1007/s10668-022-02147-3.

18. Гурбанов А. Г., Шаizzo Ю. К., Лексин А. Б., Газеев В. М., Докучаев А. Я., Цуканова Л. Е., Якушев Я. И., Семенова И. В., Исаков С. И. Промышленные отходы Мизурской горно-обогатительной фабрики Садонского свинцово-цинкового комбината (геохимические особенности, оценка их воздействия на экологическую обстановку прилегающих территорий (почвы и воду р. Ардон) Республика Северная Осетия-Алания) // Вестник Владикавказского НЦ РАН. — 2012. — Т. 12. — № 4. — С. 27–40.

19. Пряничникова Е. В. Эколого-геохимическая оценка горнорудного района (на примере Садоно-Унальской котловины, республика Северная Осетия-Алания). Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.г.-м.н. — М., 2005. — 28 с.

20. Al-Taani A. A., El-Radaiden N. M., Al Khateeb W. M. Status of water quality in King Talal Reservoir Dam, Jordan // Water Resources. 2018, vol. 45, no. 4, pp. 603–614. DOI: 10.1134/S0097807818040048.

21. Каманина И. З., Густова М. В., Фронтасьева М. В., Каплина С. П., Пухаева Н. Е., Чигоева Д. Н. Редкие металлы в составе отходов Унальского хвостохранилища // Вестник Владикавказского НЦ РАН. — 2018. — № 4. — С. 71–75. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.23794.

22. Гурбанов А. Г., Лолаев А. Б., Лексин А. Б., Дзебоев С. О., Газеев В. М., Докучаев А. Я., Цуканова Л. Е., Оганесян А. Х., Гурбанова О. А., Илаев В. Э. Основные источники загрязнения вод р. Ардон, его степень и масштабы проявления, оцененные по результатам геохимического изучения проб воды из контрольных пунктов (PCO-A) // Вестник Владикавказского НЦ РАН. — 2018. — Т. 18. — № 3. — С. 40–50. DOI: 10.23671/VNC.2018.3.23772.

23. Рыбникова Л. С. Процессы формирования подземных вод в горнодобывающих районах Среднего Урала на постэксплуатационном этапе. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геол.-минерал. наук. — М., 2014. — 43 с.

24. Kubalíková L., Balková M. Two-level assessment of threats to geodiversity and geoheritage. A case study from Hády quarries (Brno, Czech Republic) // Environmental Impact Assessment Review. 2023, vol. 99. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.107024.

25. Zvereva V. P., Frolov K. R., Lysenko A. I. Formation of mine drainage in the Far Eastern region and its impact on the ecosphere and public health // Mining Science and Technology (Russia). 2022, vol. 7, no. 3, pp. 203–215. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-3-203-215.

26. Каманина И. З., Густова М. В., Фронтасьева М. В., Каплина С. П., Пухаева Н. Е., Чигоева Д. Н. Редкие металлы в составе отходов Унальского хвостохранилища // Вестник Владикавказского НЦ РАН. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 71–75. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.23794.

27. Чигоева Д. Н., Каманина И. З., Каплина С. П. Содержание тяжелых металлов в водотоках в районе Унальского хвостохранилища и реки Ардон // Юг России: экология, развитие. – 2018. – № 2. – С. 113–122. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122. **МИАЭ**

REFERENCES

1. Abramov B. N. Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 136–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.

2. Galachieva S. G., Sokolov A. A., Makhosheva S. Al., Sokolova O. A. Estimation system of sustainable development of regional national-economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2018, vol. 10, no. 3, pp. 329–335. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-329-335.

3. Grinevskiy S. O. *Gidrodinamicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya podzemnykh i pov-
erkhnostnykh vod: Monografiya* [Hydrodynamic modeling of the interaction of underground and surface waters. Monograph], Moscow, Infra-M, 2012, 152 p.

4. Chechel L. P., Zamana L. V. Geochemical types of waters of lead-zinc deposits tailings in the Eastern Transbaikalia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2019, vol. 330, no. 4, pp. 17–25. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/189.

5. Lu J., Lu H., Lei K., Wang W., Guan Yu. Contamination of soil and water resources with trace elements of metals caused by small-scale mining of metal ore: a case study at a sphalerite mine in Northern China. *Environmental Science and Pollution Research.* 2019, vol. 26, no. 24, pp. 24630–24644. DOI: 10.1007/s11356-019-05703-z.

6. Kornilkov S. V., Antoninova N. Yu., Shubina L. A., Sobenin A. V. On the issue of ecological rehabilitation of the natural ecosystem disturbed during the development of the Kolyvan deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 465–474. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-465-474.

7. Sokolov A. A., Miroshnikov A. S., Sokolova E. A. Control algorithms for mining and metallurgical plant-ambient environment system stability. *Gornyi Zhurnal.* 2016, no. 12, pp. 83–86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.17.

8. Krupskaya L. T., Zvereva V. P., Sklyarova G. F., Orlov A. M. Aboveground mining waste storage as an ecosphere pollution source and waste exploitability in Russia's Far East. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 5–21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-5-21.

9. Badalyan L. Kh., Kurdyukov V. N., Ovcharenko A. M., Kucherenko S. V. Method for determining the maximum allowable load on the ecosystems. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2022, vol. 14, no. 3, pp. 430–439. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-430-439.

10. Shestopalov V. L., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S. Comparative analysis of deformation methods for seismic activity monitoring in mountainous areas of the Black sea coast and Kamchatka. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2021, vol. 13, no. 4, pp. 535–543. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

11. Krasavtseva E. A. *Geoekologicheskaya otsenka vliyaniya otkhodov obogashcheniya redkometall'nykh rud na okruzhayushchuyu sredu (na primere OOO «Lovozerkiy GOK»)* [Geological assessment of the impact of rare metal ores enrichment waste on the environment (on the example of Lovozersky GOK LLC)], Candidate's thesis, Moscow, 2022, 26 p.

12. Petrov Y. S., Sokolov A. A., Raus E. V. A mathematical model for estimating technogenic losses from the operation of mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain*

- Territories*. 2019, vol. 11, no. 4, pp. 554–559. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.
13. Butyugin V. V. Geocological principles of tailings operation in permafrost. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2006, no. 1(12), pp. 140–147. [In Russ].
14. Aizman R. I., Korneeva T. V., Franovsky S. Yu., Turbinsky V. V., Bortnikova S. B., Niki-forova N. G., Ogudov A. S. Markers of biogeochemical monitoring in the sulphide ores tailings area. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020, vol. 331, no. 3, pp. 145–158. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2557.
15. Kulikova A. A., Sergeeva Yu. A., Ovchinnikova T. I., Khabarova E. I. Formation of mine water composition and analysis of treatment methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 7, pp. 135–145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.
16. Kulikova A. A., Khabarova E. I., Sergeeva Yu. A. Prospects for pressure-driven membrane technologies in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 22–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-22-32.
17. Liu C., Wang C., Li Y. Ecological security pattern and spatial variation in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section), China. *Environ Dev Sustain*. 2023, vol. 425, pp. 2368–2386. DOI: 10.1007/s10668-022-02147-3.
18. Gurbanov A. G., Shazzo Yu. K., Leksin A. B., Gazeev V. M., Dokuchaev A. Ya., Tsukanova L. E., Yakushev Ya. I., Semenova I. V., Isakov S. I. Industrial wastes of the Mizur mining and processing plant of the Sadonsky lead-zinc combine (geochemical features, assessment of their impact on the environmental situation of adjacent territories (soil and water of the Ardon River) Republic of North Ossetia-Alania). *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2012, vol. 12, no. 4, pp. 27–40. [In Russ].
19. Pryanichnikova E. V. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka gornorudnogo rayona (na primere Sadono-Unal'skoy kotloviny, respublika Severnaya Osetiya-Alaniya)* [Ecological and geochemical assessment of the mining area (on the example of the Sadono-Unal basin, Republic of North Ossetia-Alania)], Candidate's thesis, Moscow, 2005, 28 p.
20. Al-Taani A. A., El-Radaiden N. M., Al Khateeb W. M. Status of water quality in King Talal Reservoir Dam, Jordan. *Water Resouces*. 2018, vol. 45, no. 4, pp. 603–614. DOI: 10.1134/S0097807818040048.
21. Kamanina I. Z., Gustova M. V., Frontasyeva M. V., Kaplina S. P., Puhaeva N. E., Chigoeva D. N. Rare metals in the composition of waste from the Unalsky tailings dump. *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2018, no. 4, pp. 71–75. [In Russ]. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.23794.
22. Gurbanov A. G., Lolaev A. B., Leksin A. B., Dzeboev S. O., Gazeev V. M., Dokuchaev A. Ya., Tsukanova L. E., Oganessian A. Kh., Gurbanova O. A., Ilaev V. E. The main sources of water pollution by R. Ardon, its degree and scale of manifestation, estimated from the results of geochemical study of water samples from control points (RSO-A). *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2018, vol. 18, no. 3, pp. 40–50. [In Russ]. DOI: 10.23671/VNC.2018.3.23772.
23. Rybnikova L. S. *Protsessy formirovaniya podzemnykh vod v gornodobyvayushchikh rayonakh Srednego Urala na postekspluatatsionnom etape* [Processes of formation of groundwater in the mining areas of the Middle Urals at the post-operational stage], Doctor's thesis, Moscow, 2014, 43 p.
24. Kubalíková L., Balková M. Two-level assessment of threats to geodiversity and geohéritage. A case study from Hády quarries (Brno, Czech Republic). *Environmental Impact Assessment Review*. 2023, vol. 99. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.107024.
25. Zvereva V. P., Frolov K. R., Lysenko A. I. Formation of mine drainage in the Far Eastern region and its impact on the ecosphere and public health. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 3, pp. 203–215. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-3-203-215.
26. Kamanina I. Z., Gustova M. V., Frontasyeva M. V., Kaplina S. P., Pukhaeva N. E., Chigoeva D. N. Rare metals in the composition of Unal tailing waste. *Vestnik of Vladikavkaz Scientific Centre*. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 71–75. [In Russ]. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.23794.

27. Chigoeva D. N., Kamanina I. Z., Kaplina S. P. The content of heavy metals in water-courses in the area of the Unal tailing dump and the Ardon river. *South of Russia: ecology, development*. 2018, no. 2, pp. 113–122. [In Russ]. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-2-113-122.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маковозова Залина Элгуджаевна — канд. геол.-минерал. наук, доцент, зав. кафедрой, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

e-mail: geologistik@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0000-3555-4394,

*Соколов Андрей Андреевич*¹ — канд. техн. наук,

доцент, зав. кафедрой, e-mail: anso@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,

*Фоменко Владимир Александрович*¹ — научный сотрудник,

e-mail: vafomenko@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

Сарбаева Макпал Турсынбаевна — Ph доктор,

старший преподаватель, Международный

казахско-турецкий университет имени Ходжи

Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Республика Казахстан,

e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz,

ORCID ID: 0000-0003-3704-9046,

¹ Филиал Южного федерального университета в г. Геленджике.

Для контактов: Сарбаева М.Т., e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Z.E. Makovozova, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),

Assistant Professor, Head of Chair,

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy

(State Technological University),

362021, Vladikavkaz, Russia,

e-mail: geologistik@bk.ru,

ORCID ID: 0009-0000-3555-4394,

*A.A. Sokolov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

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

ORCID ID: 0000-0003-3022-0883,

*V.A. Fomenko*¹, Researcher,

e-mail: vafomenko@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4725-3673,

M.T. Sarbaeva, Ph.D., Senior Lecturer,

Khoja Akhmet Yassawi International

Kazakh-Turkish University, Turkestan, Republic of Kazakhstan,

e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz,

ORCID ID: 0000-0003-3704-9046,

¹ Branch of Southern Federal University in Gelendzhik,

Gelendzhik, Russia.

Corresponding author: M.T. Sarbaeva, e-mail: makpal.sarbayeva@ayu.edu.kz.

Получена редакцией 20.04.2023; получена после рецензии 02.05.2023; принята к печати 10.05.2023.

Received by the editors 20.04.2023; received after the review 02.05.2023; accepted for printing 10.05.2023.