

Токсичные элементы в поверхностных и подрусловых водах рек Джидинской природно-техногенной системы

А. М. Плюснин✉, Е. Р. Гарипова, А. В. Украинцев, В. В. Дабаева

Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Российская Федерация
(670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а)

Аннотация. Цель – установление основных процессов, обуславливающих особенности миграции токсичных элементов в поверхностных и подземных водах Джидинской природно-техногенной системы.

Материалы и методы. Полевые исследования, анализ воды и донных отложений методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, рентгено-структурный анализ.

Результаты и обсуждение. Приведены экспериментальные исследования содержания токсичных элементов в реке Модонкуль и реке Мыргэншено. В составе поверхностных и подрусловых вод установлены высокие содержания таких элементов, как цинк, свинец, бериллий, ртуть, алюминий, железо, медь. Эти элементы поступают в реки в результате разгрузки штольневых вод и загрязненных родников техногенного происхождения. Под воздействием отходов добычи и переработки руд в реках образуется взвесь трудно растворимых соединений, которые осаждаются на берегах рек, переносятся ветром и длительно негативно воздействуют на окружающую среду. Под воздействием жидких и твердых отходов горнорудного производства на данной территории сформировался обширный ореол загрязнения подземных вод. В местах разгрузки грунтовых вод образуются гипергенные минералы, содержащие продукты выветривания рудной минерализации.

Выводы. Токсичные элементы поступают в поверхностные воды с жидкими отходами производства, изливающимися из штольни, а также за счет разгрузки загрязненных грунтовых вод, которые поступают в подрусловые воды рек в местах хранения отходов добычи и переработки руд.

Ключевые слова: поверхностные воды, загрязнение, отходы добычи, токсичные элементы, взвешенные вещества, лантаноиды.

Источник финансирования: Проект РНФ-Бурятия № 24-27-20077.

Для цитирования: Плюснин А. М., Гарипова Е. Р., Украинцев А. В., Дабаева В. В. Токсичные элементы в поверхностных и подрусловых водах рек Джидинской природно-техногенной системы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 1, с. 150-160. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/150-160>

ВВЕДЕНИЕ

При разработке месторождений активизируется миграция многих токсичных элементов в поверхностных и подземных водах [1].

Джидинская природно-техногенная система сформировалась при разведке и отработке россыпей золота, вольфрама и коренных вольфрамовых месторождений Холтосон, Инкур и Первомайского молибденового месторождения. Разработка велась Джидинским вольфрамомолибденовым комбинатом с 1934 по 1997 годы вначале с использованием штолен, а затем с помощью двух карьеров. Природно-техногенная система располагается в междуречье рек Модонкуль и Мыргэншено, которые впадают в реку Джиду. После закрытия комбината остались некультивированными отходы добычи, которые складированы в приводораздельной части водосбора рек Мыргэншено, Модонкуль и ручья Инкур; отходы переработки руд, складированные в пади Барун-Нарын; разведочные штольни, из которых изливаются руднич-

ные воды расположены в долине реки Модонкуль и ручья Инкур. Наряду с постоянным негативным воздействием, реки периодически подвергаются загрязнению, связанным с залповым выбросом растворенных в воде и находящихся во взвешенном состоянии токсичных веществ. Так, в 2019 году р. Модонкуль подверглась катастрофическому загрязнению при прорыве перемычки в штольне. На протяжении нескольких суток вода была окрашена взвешенным материалом в оранжевый цвет. Химический анализ взвешенного материала показал, что он в основном состоит из оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 43,3 \%$, $\text{FeO} = 0,44 \%$). Во взвеси также обнаружены оксиды кремния, алюминия, флюорита с массовыми концентрациями: 18,2; 10,6; 1,63 % соответственно. В 2022 году р. Мыргэншено окрасилась переносимой взвесью в белый цвет. Взвешенный материал стал формироваться в реке при впадении в нее ручья Гуджирка. Химический анализ взвеси показал, что она состоит в основном из оксидов кремния, алюминия, железа (II; III),

© Плюснин А. М., Гарипова Е. Р., Украинцев А. В., Дабаева В. В., 2025

✉ Плюснин Алексей Максимович, e-mail: plyusnin@ginst.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

магния, кальция и натрия с массовыми концентрациями: 48,4; 16,8; 6,97; 4,12; 2,02; 3,09 %.

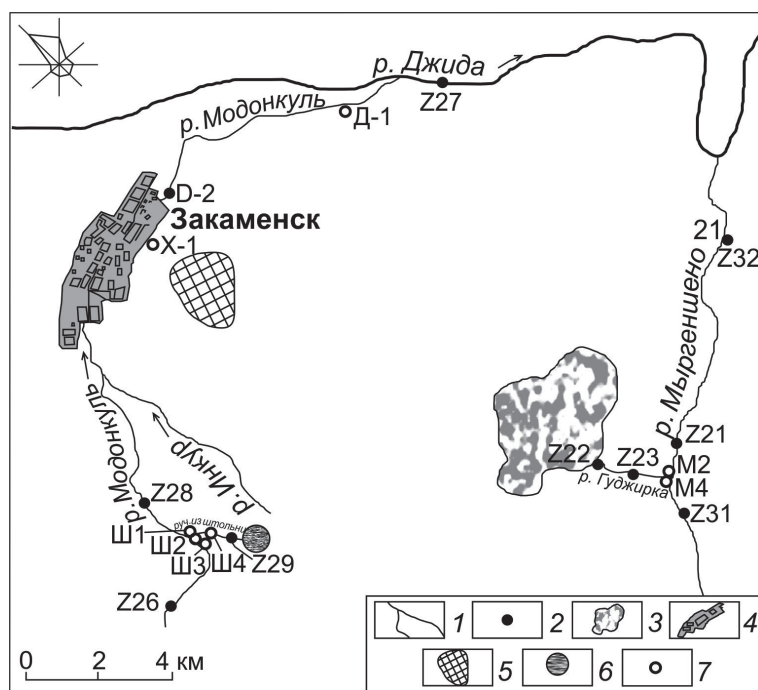
Переносимый реками взвешенный материал частично отложился на берегах рек и рассеивается ветром на окружающую территорию. В зимний период под воздействием ветра тонкая взвесь попадает в снежный покров, талыми водами переносится в р. Джиду. Состояние района исследования близко к экологическому бедствию [3].

Целью настоящей работы является установление основных процессов, обуславливающих миграцию токсичных элементов в поверхностных и подземных водах в водной среде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые исследования включали в себя опробование вод рек Модонкуль, Мыргэншено, Джиды, ручьев Инкур, Гуджирка, рудничных вод, изливающихся из штольни, подотвальных вод в местах хранения отходов добычи и переработки руд. Для исследования загрязнения подрусловых вод были пробурены скважины в долине реки Модонкуль, ручьев Инкур, Гуджирка.

Для определения химического состава рек Мыргэншено, Модонкуль, Джиды, ручья Гуджирка и рудничного ручья штольни произведен отбор проб воды в девяти точках наблюдения. Схема опробования поверхностных и подземных вод представлена на рисунке 1.



Условные обозначения: 1 – гидросеть, 2 – место отбора проб поверхностных вод, 3 – место размещения отвалов отходов добычи, 4 – г. Закаменск; 5 – хвостохранилище обогащательной фабрики, 6 – отвалы пород штольни «Западная», 7 – место опробования подрусловых вод

Рис. 1. Схема мест отбора проб поверхностных и подземных вод
[Fig. 1. Scheme of surface and groundwater sampling sites]

Для определения макроэлементного состава поверхностных и подземных вод отбор проб осуществлялся в соответствии с ГОСТ [5]. Пробы поверхностных и подземных вод для определения микроэлементов отбирали одноразовыми медицинскими шприцами объемом 2 мл, фильтровали через одноразовые полистирольные шприц-насадки. Фильтрат помещали в предварительно взвешенную полипропиленовую пробирку, содержащую 40 мкл 70 % HNO_3 .

Анализ макрокомпонентного состава поверхностных и подземных вод выполнен в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) с использованием стандартных методик. Микроэлементный состав анализировался методом индуктивно-связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се в Лимнологическом институте СО РАН согласно методике, описанной в [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Река Модонкуль является правым притоком р. Джиды. По данным государственного доклада, качество вод в р. Модонкуль оценивается как «очень грязная», воды в р. Джиды в рассматриваемом районе оценивались в 2022 году как «загрязненная» [6]. Не вызывает сомнения, что загрязнение рек происходит под воздействием отходов горнодобывающего производства.

В таблице 1 приведены значения макрокомпонентного состава рек Модонкуль и Джиды на чистой и загрязненной отходами территории. Анализ выполнен методом атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы с использованием стандартных методик.

Таблица 1

Макрокомпонентный состав воды р. Модонкуль, р. Джиды и штольневых вод, мг/л
[Table 1. Macrocomponent composition of water of the Modonkul River, the Dzhida River and adit waters, mg/l]

Точки отбора проб / Sampling points	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Формула Курлова / Kurlov's formula
Z26 (выше штольни)	2,54	0,21	10,94	14,03	12,17	14,18	62,85	$M_{197} \frac{HCO_3 61 Cl 24 SO_4 15}{Mg 53 Ca 41} pH_{7,44}$
Z29 (ручей из штольни)	27,06	1,78	304,0	160,32	1182,15	329,04	0,0	$M_{2107} \frac{SO_4 73 Cl 27}{Mg 73 Ca 23} pH_{3,15}$
Z28 (после слияния со штольней 100 м)	4,31	0,38	43,78	54,11	228,0	17,73	72,61	$M_{435} \frac{SO_4 74 HCO_3 19}{Mg 56 Ca 41} pH_{5,71}$
Z27 (р. Джиды после впадения Модонкуль)	4,23	0,57	13,38	50,10	70,72	39,0	63,46	$M_{304} \frac{SO_4 41 Cl 30 HCO_3 29}{Ca 66 Mg 29} pH_{7,00}$

Установлено, что вода р. Модонкуль до впадения рудничного ручья сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатная кальциево-магниевая. Минерализация составляет 197 мг/л. Вода имеет слабощелочную реакцию. В рудничных водах штольни минерализация достигает 2107 мг/л, вода имеет кислую реакцию. В анионном составе преобладает сульфат-ион, в катионном – магний. После слияния рудничных вод, изливающихся из штольни с р. Модонкуль, в реке возрастает минерализация до 435 мг/л, устанавливается кислая среда, изменяется химический тип воды с сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного на гидрокарбонатно-сульфатный. В реке Джиды после впадения в нее р. Модонкуль в анионном составе преобладает сульфат-ион, в кати-

онном – кальций. Минерализация составляет 304 мг/л, устанавливается нейтральная реакция среды.

В таблице 2 представлены значения концентраций токсичных элементов, содержащихся в водах р. Модонкуль, р. Джиды и штольневой воде, в сравнении с концентрацией в Байкале и предельно допустимой концентрацией, установленной для вод рыбохозяйственного назначения (далее ПДК_{вр}).

В пробе Z29, отобранной из рудничного ручья, содержание всех химических элементов в несколько сотен и тысяч раз превышает ПДК_{вр}, а также концентрацию в р. Модонкуль до впадения рудничного ручья. Эта точка наблюдения принята нами за местный фон. После слияния рудничных вод с р. Модонкуль концен-

Таблица 2

Содержание токсичных элементов в водах р. Модонкуль и р. Джиды, мкг/л
[Table 2. Content of toxic elements in waters of the Modonkul River and the Dzhida River, µg/l]

	Be	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Tl	Pb
Предел обнаружения / Detection limit	0,001	0,4	0,02	1,00	0,001	0,3	0,03	0,1	0,0007	0,02	0,0003	0,002
Байкал	0,0014	4,6	0,118	4,7	0,05	0,9	1,32	16,7	0,003	0,06	0,001	0,078
ПДК _{вр} ¹	0,3	40	10	100	10	10	1,0	10	5	0,01	-	6
Z26 (выше штольни)	0,19	159	20	22	0,31	1,33	3,8	13,9	0,27	0,25	0,0016	0,86
Z29 (ручей из штольни)	440	300000	37000	55000	860	440	14500	28000	720	0,4	0,048	510
Z28 (после слияния с ручьем из штольни)	35	21000	3100	370	73	46	890	2400	63	0,42	0,55	3,3
D-2 (возле моста)	5,2	4560	349	1264	5,4	6,1	76	221	5,8	<0,02	0,038	13
Z27 (р. Джиды после впадения Модонкуль)	2,7	390	490	21	9,6	8,7	19	230	9,1	0,18	0,016	0,93

Примечание: ПО – предел обнаружения методики анализа. Байкал – содержание элементов в стандарте Байкальской воды по данным Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск

[Note: PO is the detection limit of the analysis technique. Baikal – the content of elements in the Baikal water standard according to the data of the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk].

¹ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 № 552 (в ред. от 13.06.2024).

трация токсичных веществ значительно возрастает в сравнение с фоновыми значениями.

В пробе Z27, отобранной в реке Джиды, наблюдается заметное снижение концентрации токсичных элементов, но установленные значение превышают ПДК_{вр} практически для всех токсичных элементов (см. табл. 2).

Таким образом, рудничные воды, изливающиеся из штольни, оказывают негативное воздействие на формирование химического состава рек. В воде рассмотренных рек наблюдается интенсивная миграция таких токсичных химических элементов, как бериллий, марганец, медь и ртуть.

Были определены содержания лантаноидов в пробах рудничного ручья, вытекающего из штольни, реках

Модонкуль и Джиды. В ручье, вытекающем из штольни, суммарное содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) составляет 1028,1 мкг/л, из них 813,6 мкг/л составляют легкие редкоземельные элементы. Наиболее высокая концентрация характерна для церия. На рисунке 2 представлена гистограмма распределения суммарного содержания РЗЭ в рудничном ручье, вытекающем из штольни (а), и в реке Модонкуль. В водах р. Модонкуль до впадения рудничного ручья суммарное содержание РЗЭ составляет 0,534 мкг/л, после слияния с рудничным ручьем из штольни наблюдается значительное увеличение содержания РЗЭ (20,446 мкг/л). В воде р. Джиды суммарное содержание РЗЭ составляет 0,52 мкг/л.

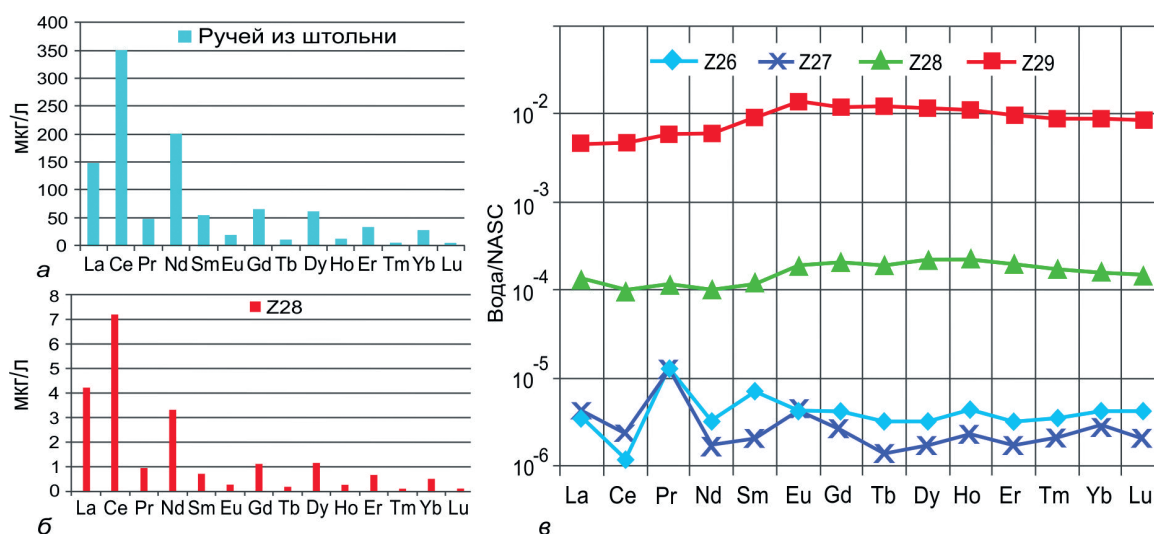


Рис. 2. Содержание РЗЭ в пробах поверхностных вод (а, б) и нормированные относительно NASC (North American Shale Composite) [7] (в)

[Fig. 2. REE content in surface water samples (a, b) and normalized relative to NASC (v)]

На графике (рис. 2в) представлено распределение нормированных значений РЗЭ. Видно, что в штольневых водах и в р. Модонкуль (Z28) наблюдается однотипный характер распределения лантаноидов, что свидетельствует о значительном воздействии разгрузки рудничных вод на химический состав воды в реке Модонкуль. В воде на фоновой территории и в реке Джиды наблюдается однотипный характер распределения РЗЭ. Относительное содержание легких РЗЭ больше, чем тяжелых, имеется хорошо выраженный празеодимовый максимум в фоновых водах р. Модонкуль и в р.

Джиды, что, вероятно, является особенностью распределения этих элементов в породах этого района.

В грунтовых водах установлена минерализация более 1000 мг/л. В большинстве скважин обнаружены содержания нитрат- и сульфат-ионов, превышающие санитарные нормы. В районе штольни «Западная» и в восточной части г. Закаменск в подземных водах, вскрытых скважинами, выявлены концентрации ионов фтора и железа, превышающие ПДК_в для вод питьевого назначения.

Наиболее высокие содержания токсичных микроэлементов обнаружены в скважинах, расположенных

Таблица 3

Микрокомпонентный состав подземных вод в районе штольни «Западная» и г. Закаменск, мкг/л
[Table 3. Microcomponent composition of groundwater in the area of Zapadnaya adit and Zakamensk city, mkg/l]

Номер пробы / Sample number	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd
Штольня «Западная»							
Ш1	7460	947	44,7	54,4	21,6	1067	21,3
Ш2	6990	3980	17,4	20,2	14,0	239	2,0
Ш3	6080	1020	37,2	65,2	10,1	1950	22,9
Ш4	10910	17,7	58,0	-	11,6	402	13,7

г. Закаменск							
C13	27420	4,7	144	83,7	12,1	164	32,0
C14	15270	11,6	7,3	7,4	6,1	7,2	1,1
C15	5430	7,6	<5	6,0	3,9	-	<1
C16	20320	18,5	17,7	14,1	3,8	9,8	<1
C17	10020	7790	101	69,9	9,2	88,0	3,9
C18a	5100	7190	50,2	49,4	20,3	163,0	12,0
C19	14420	254	7,9	12,4	5,1	77,4	<1
C20	6775	21,7	<5	<5	<2	8,2	<1
C21	2620	14,2	<5	<5	<2	-	<1
C22	1422	45,9	<5	<5	3,3	56,0	<1
C23	1720	13,6	<5	<5	<2	<5	<1
C24	850	8,4	<5	7	<2	<5	<1
C25	318	2,7	<5	10,2	<2	<5	<1
C26	4670	12,2	<5	<5	<2	<5	<1

Примечание: прочерк – не определялось

[Note: dash was not determined]

в долине ручья Инкур в районе влияния подруслового стока ручья Барун-Нарын (табл. 3). В средней части долины этого ручья размещены отходы переработки вольфрамо-молибденовых руд, куда они перемещались по пульпопроводу с обогатительной фабрики. Хвостохранилище изолировано от долины ручья Инкур дамбой, поверхностного стока нет, но, вероятно, происходит миграция токсичных элементов с грунтовым потоком под дамбой.

В подземных водах, расположенных в районе штольни, обнаружены высокие содержания многих микроэлементов, которые превышают ПДК_{вр}. Среди них аномальными концентрациями выделяются марганец, железо, цинк. Загрязнение этих вод происходит при взаимодействии атмосферных осадков с горными породами,

складированными при проходке штольни возле ее устья. Очаг загрязнения подземных вод частично дренируется поверхностными водами ручья, также тяжелые металлы поступают в подрусловые воды реки Модонкуль и далее мигрируют в подрусловые воды реки Джиды.

Еще один очаг загрязнения подземных вод связан с насыпным хвостохранилищем, который располагался возле обогатительной фабрики. При длительном хранении отходов переработки руд сформировался ореол загрязнения грунтовых вод. Из этого очага загрязнения токсичные элементы попадают в подрусловые воды ручья Инкур. Наиболее протяженный ореол загрязнения характерен для марганца и железа. Установлены также высокие содержания цинка и кадмия, которые в отдельных пробах превышают ПДК_{вр}. Поток подрусло-

Таблица 4

Макрокомпонентный состав поверхностных вод р. Мыргэншено и ручья Гуджирка, мг/л
[Table 4. Macrocomponent composition of surface waters of the Myrgensheno River and Gudzhirka stream, mg /l]

Номер и место отбора проб / Number and place of sampling	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Формула Курлова / Kurlov's formula
Z31 (фон р. Мыргэншено)	3,0	0,3	18,2	50,1	50,2	35,5	126,3	$M_{288} \frac{HCO_3 55 SO_4 26 Cl 24}{Ca 60 Mg 37} pH_{7,87}$
Z22 (верховье руч. Гуджирка)	20,8	4,4	668,8	334,6	3207,2	195,0	18,3	$M_{4527} \frac{SO_4 92 Cl 7,6}{Mg 76 Ca 23} pH_{4,13}$
Z23 (среднее течение руч. Гуджирка)	21,5	2,4	291,8	220,4	1469,9	184,0	0,01	$M_{2275} \frac{SO_4 86 Cl 15}{Mg 67 Ca 30} pH_{3,38}$
Z21 (р. Мыргэншено после впадения руч. Гуджирка)	11,1	1,6	206,7	111,2	995,1	63,8	30,5	$M_{144} \frac{SO_4 90 Cl 18}{Mg 73 Ca 25} pH_{4,84}$
Z32 (1,5 км до впадения р. Мыргэншено в р. Джиды)	14,1	1,3	36,5	65,7	247,0	35,4	48,8	$M_{460} \frac{SO_4 74 Cl 14 HCO_3 12}{Ca 47 Mg 43} pH_{6,3}$

вых вод движется в сторону долины р. Модонкуль, где он частично дренируется рекой. Периодически в реке обнаруживаются высокие содержания ионов фтора, марганца, железа. Непостоянство химического состава воды в реке связано с изменением условий разгрузки грунтовых вод при различной ее водности. Основная масса загрязненных подземных вод перемещается подрусловым потоком в долину р. Джиды.

Река Мыргэншено является правым притоком р. Джиды, а ручей Гуджирка – один из ее притоков.

Установлено, что фоновые воды р. Мыргэншено хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, минерализация составляет 288 мг/л (табл. 4). Вода имеет слабощелочную реакцию. Воды ручья Гуджирка сульфатные кальциево-магнелиевые.

Минерализация в верхней части ручья, который вытекает из под отвалов отходов добычи, составляет 4527 мг/л, в средней части ручья – 2275 мг/л. Вода имеет кислую среду, причем в верхней части ручья pH составляет 4,13, а в среднем течении pH составляет 3,38. После впадения ручья Гуджирка в реку Мыргэншено наблюдается изменение химического типа воды в реке с хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатного на хлоридно-сульфатный тип. Среди катионов начинает доминировать магний. Происходит увеличение минерализации (1440 мг/л) и снижение pH (4,84). В воде р. Мыргэншено, отобранной в ее приустьевой части, примерно в 1,5 км до впадения в р. Джиду, в анионном составе все еще преобладает сульфат-ион, в катионном начинает преобладать кальций.

Таблица 5

Содержание токсичных элементов в водах р. Мыргэншено и ручья Гуджирка, мкг/л
[Table 5. Content of toxic elements in the waters of the Myrgenshen River and the Gudzhirka stream, mkg/l]

№ пробы / Sample number	Be	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Tl	Pb
п.о.	0,001	0,4	0,02	1,00	0,001	0,3	0,03	0,1	0,0007	0,02	0,0003	0,002
Байкал	0,0014	4,6	0,118	4,7	0,05	0,9	1,32	16,7	0,003	0,06	0,001	0,078
ПДК[5]	0,3	40	10	100	10	10	1,0	10	5	0,01	-	6
Z 31	0,007	13,2	10,3	50	0,2	1,8	3	4,3	0,042	0,11	0,002	1,14
Z22	350	2000	42000	1230	2400	1010	48000	32000	740	0,4	0,82	39
Z23	300	2000	32000	22000	1850	880	33000	28000	600	0,4	0,74	30
Z21	129	230000	13000	1240	680	370	11100	10300	230	0,29	0,32	6,5
Z32	24	18600	2000	34	98	74	680	1620	38	0,14	0,047	1,41

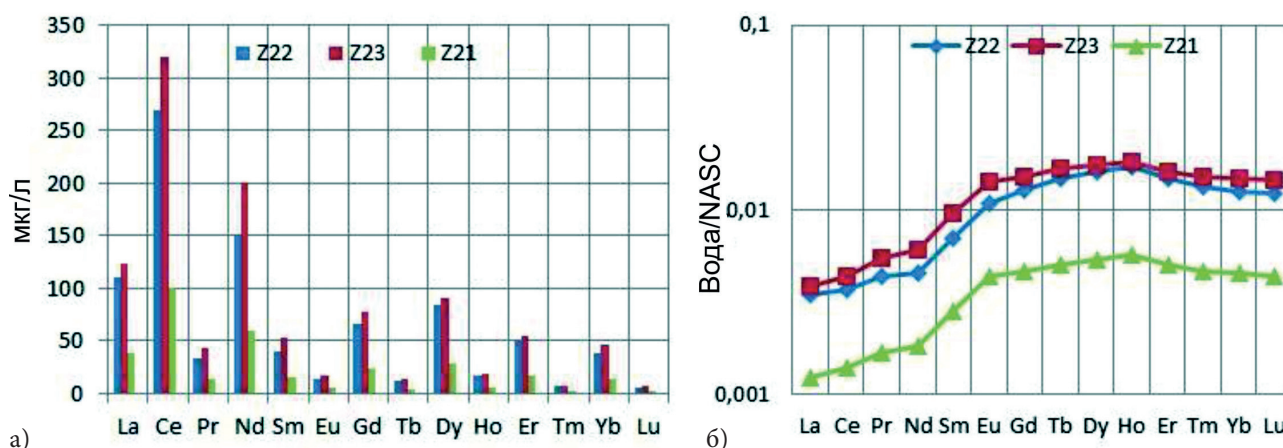
В воде р. Мыргэншено до впадения в нее ручья Гуджирка содержание токсичных элементов не превышает ПДК_{вр}, за исключением ртути и меди. Их относительно высокие концентрации обуславливаются тем, что в верховье река дренирует гидротермально измененные породы Холтосонского вольфрамового месторождения. Геохимическая обстановка в ручье Гуджирка резко отличается от верховьев рассматриваемой реки, так как он находится под влиянием отвалов вскрышных пород карьеров Инкурского и Первомайского месторождений. Здесь наблюдаются аномально высокие концентрации всех токсичных элементов, приведенных в таблице 5.

В отобранных пробах воды в реке Мыргэншено после слияния с ручьем Гуджирка и далее вниз по течению до ее впадения в р. Джиду выявлены высокие содержания токсичных элементов. В воде обнаружены микроэлементы, принадлежащие к группе рудных компонентов и элементов-примесей Джидинского месторождения. Это связано с тем, что поверхностные воды на этой территории подвержены воздействию техногенных процессов, протекающих в зоне хранения отходов добычи.

В пробе воды Z32, отобранной перед впадением р. Мыргэншено в р. Джиду, наблюдается снижение концентраций токсичных элементов за счет разбавления подземными водами. Тем не менее, их содержание превышает предельно допустимые нормы.

Установлено очень высокое суммарное содержание лантаноидов в пробах воды ручья Гуджирка и в среднем течении р. Мыргэншено: в пробе Z22 – 900,3 мкг/л, в пробе Z23 – 1075,3 мкг/л, в пробе Z21 – 332,3 мкг/л. В приустьевой части реки их содержание понижается, в пробе Z32 составляет всего 0,407 мкг/л. Вероятно, происходит удаление их из раствора при образовании труднорастворимых соединений при нейтрализации вод. На рисунке 3а представлены содержания лантаноидов в водах ручья Гуджирка и р. Мыргэншено.

Установлено преимущественное преобладание легких РЗЭ над тяжелыми, наиболее высокая концентрация характерна для церия. Высокие концентрации РЗЭ в пробах поверхностных вод обусловлены интенсивным разложением сульфидной минерализации в отходах добычи руд месторождений Инкур и Первомайское. Атмосферные и конденсационные воды, формирующиеся в крупно-глыбовом материале, дренируют отвалы добычи и поступают в поверхностные водотоки. Лантаноиды поступают в раствор при окислительном разложении сульфидной минерализации и при взаимодействии кислых вод с породообразующими минералами. На это указывает их распределение, нормированное относительно северо-американского сланца (рис. 3б). Такое распределение было установлено в хвостохранилище Джидинского ГОКа, где происходит активное взаимодействие кислых



Условные обозначения: Z22 – верхняя часть руч. Гуджирка; Z23 – в средней части руч. Гуджирка; Z21 – после слияния руч. Гуджирка с р. Мыргэншено; Z32 – на расстояние 1,5 км до впадения в р. Джиды

Рис. 3. Содержание РЗЭ в поверхностных водах ручья Гуджирка и р. Мыргэншено (а) и нормированные относительно NASC (б)

[Fig. 3. REE content in surface waters of the Gudzhirka stream and the Myrgensheno River (a) and normalised relative to NASC (b)]

вод с вмещающими породами [2]. Распределение лантаноидов имеет однотипный характер в ручье Гуджирка и р. Мыргэншено, хотя концентрации элементов сильно различаются, это может указывать на их поступление из одного источника, которым являются складированные вскрышные породы в верховье ручья Гуджирка.

Подрусловые воды ручья Гуджирка интенсивно загрязнены тяжелыми металлами (табл. 6). Наиболее высокие содержания характерны для марганца и железа. Вероятно, их активная миграция связана с тем, что они присутствуют в восстановленных формах, которые устойчивы в подрусловых водах.

Таблица 6

Содержание токсичных металлов в подрусловых водах ручья Гуджирка, мкг/л
[Table 6. Toxic metal content in the sub-channel waters of the Gudzhirka stream, mkg/l]

	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd
M2	20980	13235	243	212	7,6	829	20
M4	7676	6990	66,2	162	8,5	514	16,5

Рассматриваемая природно-техногенная система характеризуется активным взаимодействием подземных и поверхностных вод. В процессе миграции водных растворов меняются формы нахождения многих химических элементов, происходит образование труднорастворимых соединений. Из штольни «Западная» круглый год вытекают рудничные воды, дебит их меняется от 35 до 50 л/с. По мере движения воды вниз по склону быстро меняется pH растворов. На устье штольни pH воды составляет 5,47, в 100 м ниже pH равно 5,3, еще через 300 м pH становится равным 5,18. Такое резкое закисление воды связано с активно протекающим процессом окисления железа до степени окисления +2 до +3 и реакцией гидролиза последнего. На всем протяжении ручья происходит осаждение трудно растворимых соединений, представленных в основном гидроксидами железа. При смешивании воды штольневого ручья с водой р. Модонкуль pH возрастает до 6,16, происходит образование тонкой взвеси, представленной гидроксидами железа, марганца, гипса. В составе взвеси присутствуют токсичные элементы (табл. 7). Вода становится мутной и в таком состоянии находится до впадения в р. Джиды.

Еще одним загрязнителем р. Модонкуль являются источники грунтовых вод, которые разгружаются в реку в ее средней и приустьевой части (табл. 8).

Источник Х-1 связан с инфильтрацией вод через дамбу наливного хвостохранилища, расположенного в пади Барун-Нарын. В месте его разгрузки в аллювии ручья, на участке резкого изменения скорости потока воды на гальке обнаружены корки минеральных новообразований, диагностированные как водный ортосиликат-фторид кальция и алюминия (рис. 4 а).

Источник Д-1 образовался в приустьевой части р. Модонкуль. Его химический состав сформировался при взаимодействии грунтовых вод с дельтовой залежью песков, которые принесены потоком селя при аварийном сбросе воды из Барун-Нарынского хвостохранилища. В месте разгрузки источника на мелкой гальке обнаружены образования в виде корочек желтоватого цвета, на которые нарастают белые игольчатые кристаллы. В этом материале с помощью рентгено-структурного анализа диагностированы магнезиокопиапит $MgFe_4(OH)_2[SO_4]_6 \cdot 20H_2O$, минералы группы роценита и гипс (рис. 4 б).

Таблица 7

Химический состав донных отложений в ручье, вытекающем из штольни Западная
 [Table 7. Chemical composition of bottom sediments in the stream flowing out of the Zapadnaya adit]

Химический элемент / Chemical element	Пределы изменения / Limits of change	Среднее / Average
Fe, %	6,3 - 30,2	17,2
F, %	1,5-13,5	4,4
S, %	1,9-4,2	3,2
Ni г/т	14-37	22
Cu г/т	800-2850	1589
Zn г/т	163-540	364
Mo г/т	14-37	22
Pb г/т	427-1900	920
As г/т	1-24	8,2

Таблица 8

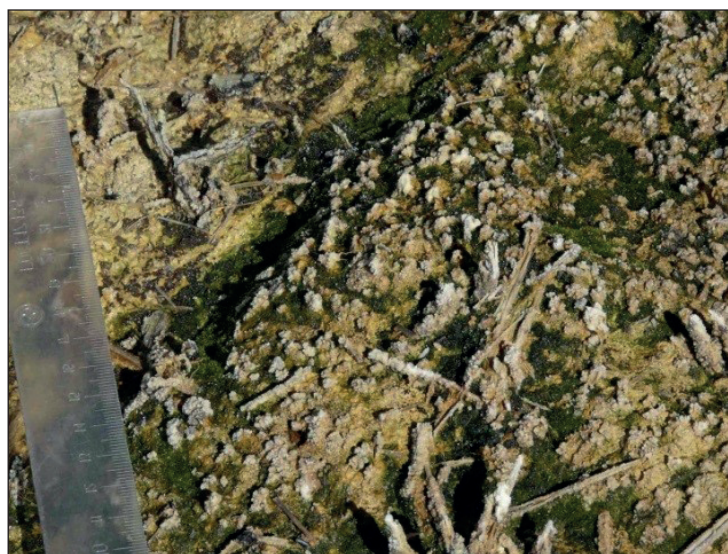
Содержание токсичных элементов в источниках,
 формирующих химический состав в пределах отходов переработки руд, мкг/л

[Table 8. Content of toxic elements in sources forming the chemical composition within the ore processing waste, mkg/l]

	Be	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Hg	Tl	Pb
X-1	77	68908	87345	136485	1026	741	1911	26938	93	0,07	1	45
Д-1	2	7669	2022	10473	23	22	11	224	1	0,07	0,002	5



а)



б)

Рис. 4. Отложения минералов в местах разгрузки техногенных источников грунтовых вод:

а – корка алюмофторидов на гальке из ручья, дренирующего пески гидроотвала,

б – гипс на поверхности песков в приустьевой части р. Модонкуль

[Fig. 4. Mineral deposits in places of discharge of technogenic groundwater sources:

а – crust of aluminum fluorides on pebbles from a stream draining the sands of a waste dump,

б – gypsum on the surface of sands in the estuary of the Modonkul River]

Наглядным индикатором воздействия подземных вод на химический состав р. Модонкуль являются РЗЭ (рис. 5).

В долине р. Мыргэншено ранее проводилась разработка россыпного золота. Аллювиальные отложения в значительной степени смещены в нижнюю часть долины. В месте слияния ручья Гуджирка и р. Мыргэншено породы, залегающие в русле, представлены в

основном коренными нижнекембрийскими метаморфическими породами, представленными песчаниками, песчанистыми известняками и сланцами. Кислые воды активно взаимодействуют с ними, в результате чего в раствор переходит кремний, алюминий, магний, натрий, кальций. Вода в реке постепенно нейтрализуется, и создаются условия для образования вторичных алюмосиликатов, образуется взвесь гидроксидов железа.

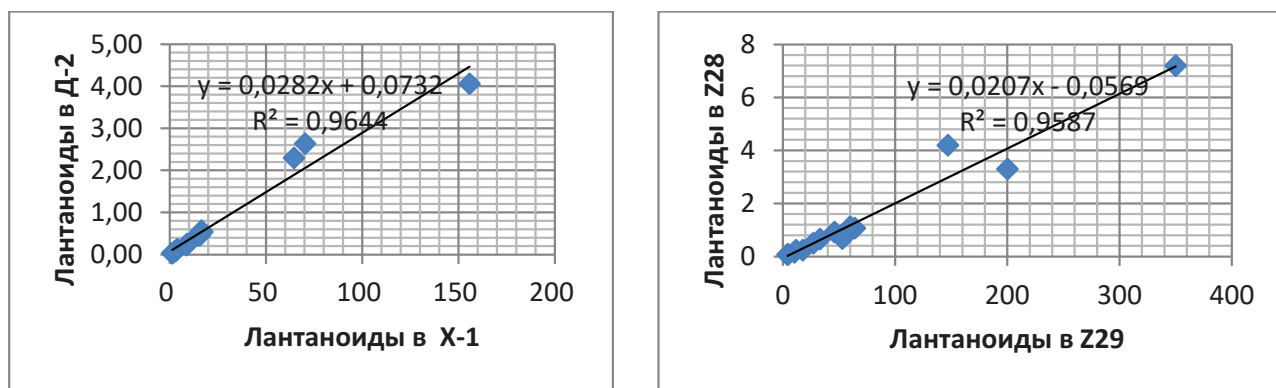


Рис. 5. Диаграмма рассеяния содержаний лантаноидов в р. Модонкуль и техногенных родниках
[Fig. 5. Scatter diagram of lanthanide contents in the Modonkul River and technogenic springs]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории размещения природно-техногенной системы, сформированной Джидинским ГОКом, происходит интенсивная миграция многих токсичных элементов в водных растворах. Поступление токсичных элементов в реки происходит в результате разгрузки рудничных вод и техногенных родников, дренирующих отвалы отходов добычи и переработки руд. Основной вклад в загрязнение поверхностных и подземных вод дают продукты окислительного разложения, сульфидной минерализации и взаимодействия кислых рудничных вод с вмещающими оруденение породами. Снижение содержания токсичных металлов в реках происходит на значительном удалении от впадения рудничных вод. На берегах рек формируется взвесь, содержащая в своем составе высокотоксичные химические элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) С.Б. Бортникова / Н.В. Юркевич, А.В. Еделев, О.П. Саева, С.П. Грахова, С.С. Волынкин, Ю.Г. Карин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2021, № 2, с. 26-35.

2. Редкие земли в поверхностных и подземных водах на территории размещения вольфрамдобывающего производства Забайкалья / А. М. Плюснин, В.В. Дабаева, Д.И. Жамбалова, Е.Г. Перязева, В.С. Ташлыкков // *Геохимия*, 2020, № 7, с. 711-728.

3. Смирнова О.К., Плюснин А.М. *Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды)*. Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 2013. 181 с.

4. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам / Е.П. Чебыкин, Л.М. Сороковинова, И.В. Томберг, Е.Н. Воднева, С.В. Рассказов, Т.В. Ходжер, М.А. Грачёв // *Химия в интересах устойчивого развития*, 2012, № 5, с. 613-631.

5. *ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб*. Москва: Российский институт стандартизации, 2022. 70 с.

6. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. 372 с.

7. The «North American Shale Composite»: its compilation, major and trace element characteristics / L.P. Gromet, R.F. Dy-mek, L.A. Haskin, R.L. Korotev // *Geochimica et cosmochimica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469-2482.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 15.08.2024

Принята к публикации: 20.02.2025

Toxic Elements in Surface and Sub-Channel Waters of Rivers of the Dzhida Natural-Technogenic System

A. M. Plyusnin ✉, E. R. Garipova, A. V. Ukraintsev, V. V. Dabaeva

*Dobretsov Geological Institute SB RAS, Russian Federation
(6a, Sakhyanova Str., Ulan-Ude, 670047)*

Abstract. The purpose is to identify the main processes that determine the peculiarities of toxic elements migration in surface and ground waters of the Dzhida natural-technogenic system.

Materials and methods. Field studies, analysis of water and bottom sediments by inductively coupled plasma mass spectrometry, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, X-ray structural analysis.

Results and discussion. Experimental studies of the content of toxic elements in the Modonkul River and the Myrgenshe-no River are presented. High contents of such elements as zinc, lead, beryllium, mercury, aluminium, iron, copper have been revealed in the composition of surface and sub-channel waters. These elements enter the rivers as a result of discharge of adit waters and polluted springs of technogenic origin. Under the influence of waste from ore mining and processing, a suspension of hard-to-soluble compounds is formed in the rivers, which are deposited on the river banks, carried by the wind and have a long-term negative impact on the environment. Under the influence of liquid and solid mining wastes, an extensive halo of groundwater contamination has formed in the area. Hypergene minerals containing weathering products of ore mineralisation are formed in groundwater discharge areas.

Conclusion. Toxic elements enter surface waters with liquid industrial wastes flowing out of the adit and as well as due to the discharge of contaminated groundwater, which enters the subsurface waters of rivers in places where waste from mining and ore processing is stored.

Key words: surface waters, pollution, mining waste, toxic elements, suspended substances, lanthanides.

Funding: the RSF-Buryatia project No. 24-27-20077.

For citation: Plyusnin A. M., Garipova E. R., Ukraintsev A. V., Dabaeva V. V. Toxic Elements in Surface and Sub-Channel Waters of Rivers of the Dzhida Natural-Technogenic System. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, 2025, no. 1, pp. 150-160. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/150-160>

REFERENCES

1. Gidrokhimicheskie i gazovye anomalii na sul'fidnom khvostokhranilishche (Salair, Kemerovskaya oblast') S. B. Bortnikova [Hydrochemical and gas anomalies at the sulfide tailings reservoir (Salair, Kemerovo region) by S. B. Bortnikova] / N. V. Yurkevich, A. V. Edelev, O. P. Saeva, S. P. Grakhova, S. S. Volynkin, Yu. G. Karin. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, no. 2, pp. 26-35. (In Russ.)
 2. Redkie zemli v poverkhnostnykh i podzemnykh vodakh na territorii razmeshcheniya vol'framdobyvayushchego proizvodstva Zabaykal'ya [Rare earths in surface and groundwater in the territory of the location of the tungsten mining industry of Transbaikalia] / A. M. Plyusnin, V. V. Dabaeva, D. I. Zhambalova, E. G. Peryazeva, V. S. Tashlykov. *Geokhimiya*, 2020, no. 7, pp. 711-728. (In Russ.)
 3. Smirnova O. K., Plyusnin A. M. *Dzhidinskiy rudnyy rayon (problemy sostoyaniya okruzhayushchey sredy)* [Dzhida ore district (environmental problems)]. Ulan-Ude: Izdatel'stvo BNTs SO RAN, 2013. 181 p. (In Russ.)
 4. Sovremennoe sostoyanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym elementam [The current state of the waters of the Selenga River in Russia by main components and trace elements] / E. P. Chebykin, L. M. Sorokovikova, I. V. Tomberg, E. N. Vodneva, S. V. Rasskazov, T. V. Khodzher, M. A. Grachev. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2012, no. 5, pp. 613-631. (In Russ.)
 5. GOST R 59024-2020 *Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [GOST R 59024-2020 Water. General sampling requirements]. Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022. 70 p. (In Russ.)
 6. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii ozera Baykal i merakh po ego okhrane v 2022 godu»* [State report «On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2022»]. Irkutsk: FGBUN Institut geografii im. V. B. Sochavy SO RAN, 2023. 372 p. (In Russ.)
 7. The «North American Shale Composite»: its compilation, major and trace element characteristics / L. P. Gromet, R. F. Dymek, L. A. Haskin, R. L. Korotev. *Geochimica et cosmochemica Acta*, 1984, vol. 48, pp. 2469-2482.
- Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 15.08.2024

Accepted: 20.02.2025



Плюснин Алексей Максимович

Доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9380-7281, e-mail: plusnin@ginst.ru

Гарипова Елена Рафаиловна

Аспирант Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID: 0009-0002-7377-9783, e-mail: garipova1987@mail.ru

Украинцев Александр Викторович

Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-6919-0736, e-mail: ukraintsev87@bk.ru

Дабаева Виктория Валерьевна

Кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация, ORCID:0000-0003-0618-5280, e-mail: dv.viktoriya@mail.ru

Alexey M. Plyusnin

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, Geological Institute named after N.L. Dobretsov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9380-7281, e-mail: plusnin@ginst.ru

Elena R. Garipova

Postgraduate Student at the Geological Institute named after N.L. Dobretsov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID:0009-0002-7377-9783, e-mail: garipova1987@mail.ru

Alexander V. Ukraintsev

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Scientific Senior Researcher at the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, Geological Institute named after N.L. Dobretsov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID:0000-0001-6919-0736, e-mail:ukraintsev87@bk.ru

Victoria V. Dabaeva

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Scientific Researcher at the Laboratory of Hydrogeology and Geoecology, Geological Institute named after N.L. Dobretsov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0618-5280, e-mail: dv.viktoriya@mail.ru