

## ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОДЫ РЕКИ МОДОНКУЛЬ В УСЛОВИЯХ ДРЕНАЖНОГО РУДНИЧНОГО СТОКА

З.И. Хажеева<sup>1</sup>, С.С. Санжанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геологический Институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия, e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru

**Аннотация:** Джидинское рудное поле, расположенное в Закаменском районе Бурятии, характеризуется высокой концентрацией оруденения на небольшой территории. Руды Джидинских месторождений комплексные. Рудное поле включает в себя коренные промышленные месторождения: Первомайское штоковерковое молибденовое, Холтосонское вольфрамное жильное, Инкурское штоковерковое вольфрамное. Водосборный бассейн р. Модонкуль находится на территории Джидинского рудного поля. Реальную угрозу г. Закаменску создает наличие массивов техногенных песков — насыпных (лежалые хвосты) и гидроотвала хвостохранилища. В настоящее время концентрированный поток природно-техногенного песка выходит на низкую террасу и в пойму р. Модонкуль в виде конуса выноса. Изучено влияние дренажного рудничного стока и притока Инкур на формирование химического состава р. Модонкуль. Отбор 80 проб воды проводился с поверхности 0—0,5 м на пяти створах. На месте отбора проб воды проводились измерения физико-химических показателей, в лаборатории — анализ химического состава. В фоновых условиях катионы и анионы химического состава воды р. Модонкуль в порядке убывания концентраций выстраиваются в следующие ряды  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$  и  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ . В зоне смешения техногенных и речных вод происходит изменение химического состава: с гидрокарбонатного на сульфатный (анионный), с кальций-магниевого на натрий-кальциевый (катионный). При движении вниз по течению природный химический состав изменяется на гидрокарбонатно-сульфатный с преобладанием долевого содержания кальция в катионном составе. Содержание железа в воде реки уменьшается в 3—4 раза после впадения рудничных стоков, а содержания Mn, Zn, Co, Cd возрастают, затем снижаются при движении вниз по течению.

**Ключевые слова:** кислый рудничный сток, изменение химического состава воды, щелочной барьер, осаждение гидроксидов, сорбция тяжелых металлов.

**Благодарность:** Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту IX.137.1.4. Взаимодействия в системе вода-порода-органическое вещество в природных и техногенных обстановках Байкальского региона. № гос. рег. АААА-А17-117021310076-3.

**Для цитирования:** Хажеева З.И., Санжанова С.С. Формирование химического состава воды реки Модонкуль в условиях дренажного рудничного стока // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6. — С. 56–66. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-56-66.

### Formation of water chemistry in the Modonkul river under the action of mine drainage effluent

Z.I. Khazheeva<sup>1</sup>, S.S. Sanzhanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia, e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru

---

**Abstract:** The Dzhida ore field in the Zakamensk district of Buryatia features high concentration of mineralization within a small area. The Dzhida deposit is composed of complex ore. The ore field contains commercial-value primary deposits: Pervomai stockwork of molybdenum, Kholtoson tungsten lode and Inkur stockwork of tungsten. The Modonkul river catchment basin lies inside the Dzhida ore field. A real threat to the town of Zakamensk is created by man-made sand—bulk (old) tailings and slurry dump. By now, the concentrated flow of natural and man-made sand enters the low terrace and floodplain of the Modonkul river in the form of a talus train. This study is focused on the influence of the mine drainage effluent and the Inkur tributary on the water chemistry in the Modonkul river. 80 water samples were taken from the surface layer 0–0.5 m thick at five stations. Physicochemical indices of water were measured at the water sampling points, and the water chemistry was analyzed in a laboratory. In the background conditions, cations and anions in the Modonkul water chemistry range in decreasing order as follows:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$  и  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ . In the zone of mixture of natural and mine process water, the chemistry changes: from hydrocarbonate to sulfate (anion), from calcium–magnesium to sodium–calcium (cation). Downstream the natural chemistry changes to the hydrocarbonate–sulfate composition, with prevailing content of calcium in cations. Iron content of water lowers 3–4 times after influx of mine effluents, while the contents of Mn, Zn, Co and Cd grow and then decrease downstream.

**Key words:** acid mine effluent, water chemistry change, alkaline barrier, sedimentation of hydroxides, heavy metal sorption.

**Acknowledgements:** The study was accomplished under the state contract with the Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Project IX.137.1.4: Interactions in the water–rock–organic matter system in the natural and man-made conditions in the Baikal Region. State Registration Number AAAA-A17-117021310076-3.

**For citation:** Khazheeva Z. I., Sanzhanova S. S. Formation of water chemistry in the Modonkul river under the action of mine drainage effluent. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):56–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-56-66.

---

## Введение

Джидинское рудное поле, расположенное в Закаменском районе Бурятии, характеризуется высокой концентрацией оруденения на небольшой территории. Оно включает в себя коренные промышленные месторождения: Первомайское штокверковое молибденовое, Холтосонское вольфрамовое жильное, Инкурское штокверковое вольфрамовое. Рудная минерализация связана с юрской полифазной гуджирской интрузией, представленной на поверхности многочисленными дайками кислого состава и первомайским штоком гранит-порфиоров [1–3].

Джидинский вольфрамо-молибденовый комбинат был создан в 1934 г.

В 1939 г. начал действовать подземный вольфрамовый рудник Холтосон и обогатительная фабрика. В 1941 г. начали работать Первомайский молибденовый карьер и фабрика по обогащению молибденовой руды. С 1973 г. функционируют Инкурский вольфрамовый карьер и обогатительная фабрика. В 1997 г. Джидинский комбинат прекратил выпуск вольфрамового концентрата в связи с нерентабельностью в новых экономических условиях. В настоящее время Инкурский и Холтосонский вольфрамовые рудники, обогатительные фабрики

не работают. В 2002 г. отходы обогащения Джидинского комбината приобрело в собственность ООО «Закаменск». В 2008 г. начаты опытные работы по вторичной переработке хвостов, построена мини-фабрика [4].

Сформированная природно-техногенная система располагается в бассейне р. Модонкуль. В нее входят отвалы вскрышных пород, хвосты переработки руд, общая масса которых составляет более 40 млн т, территория обогатительной фабрики, разведочные штольни из которых изливаются рудничные воды, территория занятая аварийными сбросами с фабрики и хвостохранилища [4]. Техногенные преобразования окружающей среды могут быть химической и биологической основой механизмов формирования токсичных веществ по отношению к живым организмам путем образования металл-органических соединений. Десятилетиями хранящиеся в открытом виде в огромных количествах отходы горнодобывающей и перерабатывающей промышленности являются основными источниками токсичных тяжелых металлов, выносимых различными путями [5–11].

Цель настоящей работы — установить влияние рудничного стока штоль-

ни Западная и притока Инкур на формирование химического состава воды р. Модонкуль.

### Материалы и методы

Отбор проб воды, взвешенного вещества проводился в летний период в 2009–2012 гг. Непосредственно на месте проводилось измерение температуры ( $T_{\text{в}}$ ), pH, Eh и TDS воды. Створы отбора проб воды представлены на рис. 1, их перечень и места расположения сведены в табл. 1.

Химический анализ проб воды выполнен общепринятыми в гидрохимии пресных вод методами [12, 13]. Концентрации растворенных микроэлементов определены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ELEMENT XR. Пробы воды фильтровали через мембранные фильтры (0,45 мкм) не позднее 8 ч после отбора проб. Фильтраты хранились в холодильнике до выполнения анализов. Для элементного анализа пробы фиксировались дважды перегнанным 70%-ным раствором  $\text{HNO}_3$ .

Определение микроэлементов в растворах проводилось стандартными методами атомно-абсорбционного анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии с



Рис. 1. Схема расположения створов отбора проб воды. Месторождения: 1 – Первомайское, 2 – Инкурское, 3 – Холтосонское

Fig. 1. Layout of water sampling station. Deposits: 1 – Pervomai; 2 – Inkur; 3 – Kholtoson

Таблица 1

**Створы отбора проб и место их расположения**  
**Locations of water sampling stations**

Створ	Место расположения
M1	р. Модонкуль, с. Холтосон, верховье
M2	р. Модонкуль, ниже впадения рч. штольни Западная
M3	р. Модонкуль, до г. Закаменск
M4	р. Модонкуль, ниже впадения р. Инкур
M5	р. Модонкуль, г. Закаменск
ПМ1	рч. штольни Западная
ПМ2	устье р. Инкур

индуктивно-связанной плазмой ИСП-АЭ на оборудовании ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» ГИН СО РАН.

**Результаты и обсуждение**

Результаты исследований сведены в табл. 2 с нанесением данных на диаграмму Ферре (рис. 2). На треугольной диаграмме точки катионов располагаются в области, вытянутой в направлении увеличения долевого содержания натрия и снижения содержаний щелочноземельных элементов. Точки анионов

располагаются в узкой области, ограниченной небольшим долевым содержанием хлорид-ионов и вытянутой в направлении возрастания содержаний сульфат-ионов при уменьшении содержаний гидрокарбонат-ионов (рис. 2).

При анализе формирования и преобразования химического состава воды р. Модонкуль створ М1 выделен как фоновый, так как он не подвержен техногенному воздействию и находится в природных условиях в верховье реки вблизи с. Холтосон. В верховье у с. Холтосон (створ М1) природная вода пресная, гид-

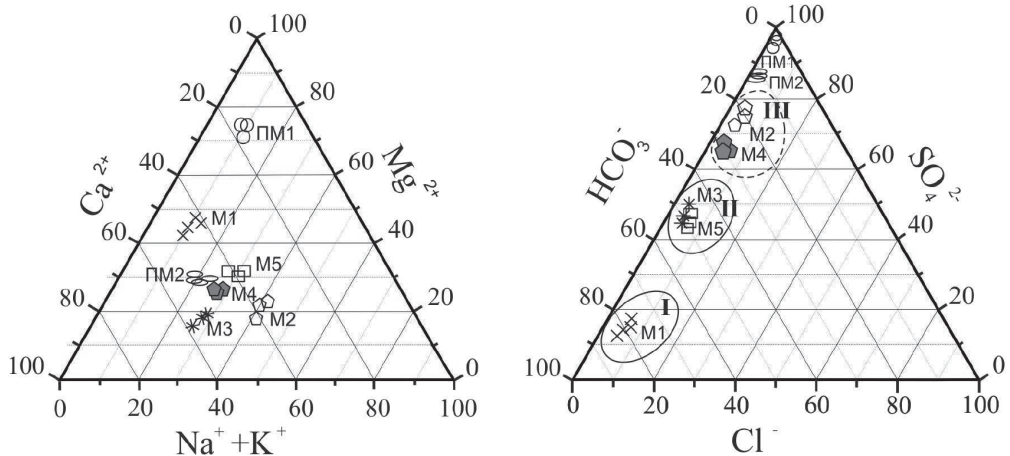


Рис. 2. Диаграмма Ферре с данными состава р. Модонкуль (M1-M5), рудничной воды (ПМ1) и р. Инкур (ПМ2): I – гидрокарбонатный кальций-магний, II – сульфатно-гидрокарбонатный кальций-натриевый, III – сульфатный кальций-магний

Fig. 2. Ferrer's diagram and data on water chemistry in the Modonkul river (M–M5), mine water (PM1) and Inkur river (PM2): I – hydrocarbonate-calcium-magnesium; II – sulfate-hydrocarbonate-calcium-sodium; III – sulfate-calcium-magnesium

Таблица 2

**Средний химический состав воды р. Модонкуль, ручья штольни Западная и р. Инкур**  
**Average chemistry of water in the Modonkul river, stream at Zapadnaya adit and Inkur river**

Компонент, мг/л	Створы наблюдения						
	M1	M2	M3	M4	M5	ПМ1	ПМ2
pH	7,48	6,32	7,12	7,48	7,53	4,53	7,46
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	105,3	80,1	82,8	77,1	102,8	12,46	138,6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14,2	228,4	61,7	129,3	75,2	1408,1	812,5
Cl <sup>-</sup>	5,9	7,9	3,8	6,5	7,8	6,9	9,4
Ca <sup>2+</sup>	19,8	73,1	34,8	46,8	31,1	109,7	218,3
Mg <sup>2+</sup>	14,3	25,8	8,1	15,2	15,3	298,2	87,4
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	7,15	91,7	21,5	32,4	28,3	65,7	120,1
F <sup>-</sup>	2,52	64,8	6,8	13,8	5,4	62,9	68,9
Минерал.	179,2	584,5	231,2	329,2	282,4	1972,8	1472,2
Si	3,2	4,8	3,6	4,2	3,9	7,2	5,2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,24	5,68	3,91	4,29	5,31	8,62	6,12
Cr	0,001	0,003	0,001	0,002	0,001	0,008	0,003
Fe	0,18	0,04	0,072	0,106	0,062	2,36	0,54
Mn	0,052	0,114	0,045	0,032	0,057	5,15	0,62
Co	0,001	0,005	0,001	0,003	0,004	0,68	0,008
Ni	0,004	0,012	0,006	0,005	0,008	0,35	0,011
Cu	0,009	0,028	0,015	0,021	0,014	6,8	0,014
Zn	0,024	0,082	0,053	0,061	0,048	26,7	0,52
Pb	0,006	0,019	0,008	0,012	0,009	0,108	0,021
Cd	0,001	0,008	0,006	0,009	0,004	0,32	0,012

рокарбонатного класса магниево-кальциевой группы с минерализацией 178,3–181,4 мг/л и имеет pH 7,24–7,48 (табл. 3). Содержание гидрокарбонат-иона HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> варьирует от 103,2 до 107,6 при долевом содержании 77–78,5 мг·экв%, сульфат-иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — от 16,2 до 18,7 (13,8–14,8 мг·экв%), хлор-иона Cl<sup>-</sup> — от 5,2 до 5,7 (6,8–7,1 мг·экв%) мг/л, а Ca<sup>2+</sup> — от 21,3 до 24,6 (39,6–40,5 мг·экв%), Mg<sup>2+</sup> — от 13,4 до 14,1 (46,6–47,7 мг·экв%), Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> — от 5,9 до 6,3 (10,6–11,5 мг·экв%) мг/л. Содержание фторид-ионов F<sup>-</sup> составляет 2,72 мг/л. Катионы и анионы в порядке убывания концентрации выстраиваются в следующие ряды: Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup>, что характерно для

природных речных вод. На треугольной диаграмме Ферре точки анионов располагаются в нижней области с максимальным долевым содержанием гидрокарбонатов. Величина отношения ионов (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>)/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 1,29. Геохимический фон региона характеризуется следующими соотношениями металлов Sr > Ba > Fe > Zn с содержаниями тяжелых металлов (мг/л): (0,03–0,042) Fe; (0,011–0,015) Zn; (0,007–0,006) Cu; (0,0001–0,0002) Cd; (0,001–0,0009) Pb.

Створ M2 находится ниже впадения ручья штольни Западная. На этом участке вода р. Модонкуль является результатом смешения разных по составу вод: гидрокарбонатной природной речной и сульфатной воды из штольни.

Вода реки на этом участке характеризуется слабо-кисло-нейтральной реакцией pH (6,9–7,2), минерализацией 576–591 мг/л. Минерализация воды увеличивается почти в 3 раза. Содержание гидрокарбонат-иона  $\text{HCO}_3^-$  варьирует от 78,2 до 79,6 при долевого содержании 19,3–20,5 мг·экв%, сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$  — от 228,7 до 230,8 (74,8–76,2 мг·экв%), хлор-иона  $\text{Cl}^-$  — от 7,8 до 8,2 (3,7–3,8 мг·экв%) мг/л, а  $\text{Ca}^{2+}$  — от 70,8,3 до 72,6 (34,6–36,7 мг·экв%),  $\text{Mg}^{2+}$  — от 25,4 до 26,3 (21,6–22,7 мг·экв%),  $\text{Na}^+$  — от 91,8 до 92,6 (39,6–41,5 мг·экв%) мг/л. Содержания фторид ионов  $\text{F}^-$  возрастают в 24,1 раза до 64,2–65,7 мг/л. Катионы и анионы в порядке убывания концентраций выстраиваются в следующие ряды  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$ , величина отношения ионов  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{HCO}_3^-$  равна 4,45.

На треугольной диаграмме точки катионы смещаются в направлении увеличения долевого содержания катиона  $\text{Na}^+$ , анионов — в направлении повышения содержания сульфат-иона, оставаясь в узкой области долевого содержания хлор-иона. В абсолютных количествах в анионном составе содержание

сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$  возрастает почти в 16 раз, гидрокарбонат-иона  $\text{HCO}_3^-$  — уменьшается в 1,3 раза, в катионном составе содержание щелочного катиона  $\text{Na}^+$  возрастает в 15 раз, а концентрации катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  уменьшаются в 1,8–3 раза. Согласно гидрохимической классификации О.А. Алекина [14] в этом створе вода сульфатного класса натрий-кальциевой группы второго типа (табл. 3).

Вниз по течению до г. Закаменска в створе М3 вода относится к гидрокарбонатно-сульфатному классу кальций-натриевой группы с минерализацией 228–232 мг/л, pH 7,06–7,15. Величина отношения ионов  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{HCO}_3^-$  снижается до 1,68. При сопоставлении с предыдущим створом минерализация воды уменьшается в 2,5 раза, содержание сульфат-ионов — в 3,6 раза, натрия — в 4,5 раза, кальция — в 2 раза, магния — в 3,5 раза, фторид-ионов — в 9 раз, и только гидрокарбонат-ионов — увеличивается в 1,1 раза.

После впадения р. Инкур в створе М4 вода меняется на сульфатно-гидрокарбонатный класс кальциево-натриевой группы с минерализацией 329–332 мг/л.

Таблица 3

**Обобщенные формулы химического состава воды р. Модонкуль**  
**Generalized chemistry formulas of water in the Modonkul river**

Створ	Обобщенная формула, %-экв	Индекс воды по О.А. Алекину [14]
М1	$M_{0,181} \frac{\text{HCO}_3^- 78 \text{SO}_4^{2-} 14,7 \text{Cl}^- 7,1}{\text{Ca}^{2+} 40,2 \text{Na}^+ 11 \text{Mg}^{2+} 47,2}$	$C_{II}^{\text{Ca}}$
М2	$M_{0,591} \frac{\text{HCO}_3^- 20,5 \text{SO}_4^{2-} 75,8 \text{Cl}^- 3,6}{\text{Ca}^{2+} 36,5 \text{Na}^+ 40,75 \text{Mg}^{2+} 22,1}$	$S_{II}^{\text{Na,Ca}}$
М3	$M_{0,232} \frac{\text{HCO}_3^- 49,7 \text{SO}_4^{2-} 46,1 \text{Cl}^- 4,2}{\text{Ca}^{2+} 53,4 \text{Na}^+ 26,8 \text{Mg}^{2+} 18,5}$	$C_{II}^{\text{Ca}}$ или $S_{II}^{\text{Ca}}$
М4	$M_{0,332} \frac{\text{HCO}_3^- 30,2 \text{SO}_4^{2-} 65,2 \text{Cl}^- 4,6}{\text{Ca}^{2+} 46,9 \text{Na}^+ 27,2 \text{Mg}^{2+} 25,2}$	$S_{II}^{\text{Ca}}$
М5	$M_{0,283} \frac{\text{HCO}_3^- 48,8 \text{SO}_4^{2-} 44,3 \text{Cl}^- 6,9}{\text{Ca}^{2+} 38,2 \text{Na}^+ 30 \text{Mg}^{2+} 30,9}$	$C_{II}^{\text{Ca, Mg}}$ или $S_{II}^{\text{Ca, Mg}}$



Реакция воды нейтрально-слабощелочная: pH 7,38–7,72. Величина отношения ионов  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^-$  возрастает до 2,89. По сравнению с предыдущим створом минерализация воды возрастает в 1,4 раза, содержание основных ионов кальция, магния, натрия, сульфат, хлорид-ионов и фторидов увеличивается в 1,3–2 раза. В сопоставимых количествах остаются концентрации гидрокарбонат-ионов.

Вниз по течению в г. Закаменск в створе М5 вода относится к гидрокарбонатно-сульфатному классу кальций-магний-натриевой группы с минерализацией 281–283,5 мг/л. Реакция воды слабощелочная с pH 7,53–7,78. Величина отношения ионов  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^-$  снижается до 1,59. При сопоставлении с предыдущим створом содержание сульфатов, фторидов, кальция уменьшается в 1,5–2 раза, содержание гидрокарбонат-ионов возрастает в 1,3 раза.

Как известно, основным источником растворенных ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  являются горные коренные породы, а содержание  $HCO_3^-$  характеризует скорость поглощения  $CO_2$  из атмосферы, поэтому величина отношения  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^- \approx 1$  в природных речных водах [15–17]. В случае воды р. Модонкуль, которая находится под влиянием стоков впадающих рудничных вод и отходов горнообогатительного производства, изменения

этого отношения представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, изменения величины рассматриваемого отношения соответствуют преобразованиям химического состава воды. При превышении величины отношения  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^- > 2$  химический состав меняется от гидрокарбонатного на сульфатный.

В верхнем углу треугольной диаграммы Ферре анионного состава нанесены данные составов рудничной воды штольни Западная и р. Инкур (см. рис. 2). Рудничная вода характеризуется кислой реакцией pH 4,42–5,32 с минерализацией 1,9–2,3 г/л. Содержания гидрокарбонат-иона  $HCO_3^-$  варьируют от 1,2 до 21,6 мг/л при долевого содержании 1,2–2,4 мг·экв%, сульфат-иона  $SO_4^{2-}$  – от 1,4 до 2,3 г/л (99,1–99,7 мг·экв%), хлорид-иона  $Cl^-$  – от 6,8 до 7,2 мг/л (0,6–0,71 мг·экв%), а  $Ca^{2+}$  – от 115,3 до 300,6 (16,6–18,7 мг·экв%),  $Mg^{2+}$  – от 170 до 300 (73,6–74,7 мг·экв%),  $Na^+$  – от 83,8 до 328,6 мг/л (19,6–31,5 мг·экв%). Содержание фторид-ионов  $F^-$  составляет 12,8–62,7 мг/л.

Вода р. Инкур нейтрально-слабощелочная (pH 7,42–7,58 с минерализацией 1,42–1,51 г/л). Содержание гидрокарбонат-иона  $HCO_3^-$  варьирует от 136 до 140,1 мг/л при долевого содержании 10,6–11,8 мг·экв%, сульфат-иона  $SO_4^{2-}$  – от 790 до 810,8 (86,1–87 мг·экв%), хлорид-иона  $Cl^-$  – от 7,8 до 9,2 мг/л (1,2–

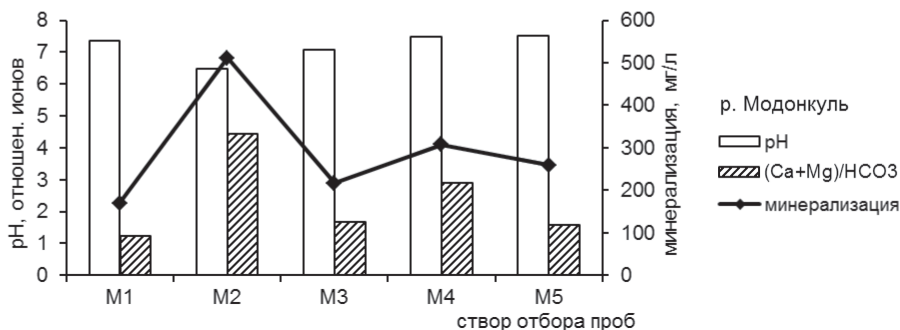


Рис. 3. Динамика изменения pH, минерализации и величины отношения  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^-$   
 Fig. 3. Time history of pH, mineralization and value of  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^-$

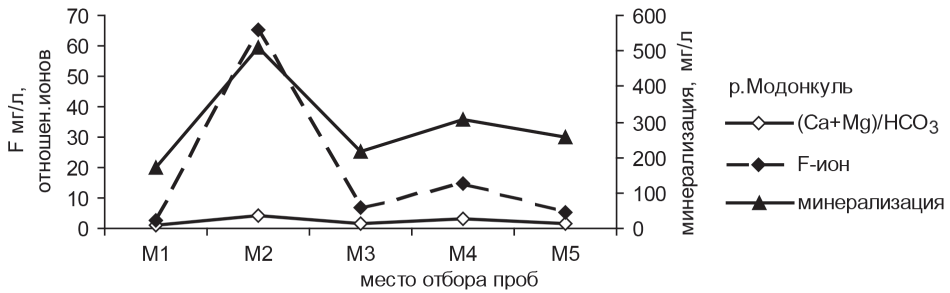


Рис. 4. Динамика изменения содержания минерализации, фторид-ионов и величины отношения ионов  
 Fig. 4. Time history of composition of mineralization, ion fluoride and value of ion ratio

1,41 мг·экв%), Ca<sup>2+</sup> — от 195,3 до 220,6 (46,6–47,4 мг·экв%), Mg<sup>2+</sup> — от 79 до 85,2 (29,6–30,7 мг·экв%), Na<sup>+</sup> — от 103,8 до 119,6 мг/л (20,6–22,5 мг·экв%). Содержание фторид-ионов F<sup>-</sup> составляет 67,8–69,7 мг/л.

Впадение высокоминерализованных притоков в р. Модонкуль приводит к локальному повышению минерализации, росту содержания сульфат-ионов, фторид-ионов, изменению химического состава воды. Как показано на рис. 4, отмечается прямо пропорциональная зависимость между минерализацией, содержанием фторид-ионов и величиной отношения (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> при изменении анионного состава в направлении от гидрокарбонатного к сульфатному, катионного — от кальций-магниевого к натрий-кальциевому.

Смена физико-химических условий (рН-Eh), обусловленное смешением кис-

лых рудничных вод и притока р. Инкур с природной водой реки, повышение щелочности водной среды приводит к изменению поведения тяжелых металлов. Растворенное двухвалентное железо при повышении щелочности и растворенного кислорода окисляется и осаждается в виде гидроксидов. Об этом свидетельствует снижение концентрации растворенного железа в 4,5 раза в створе М2 после впадения рч. шт. Западная. Вместе с тем, растворенные концентрации Mn, Ni, Cu, Zn, Pb возрастают в 2,2–3,5 раза, Co — в 5 раз, Cd — в 8 раз. Однако при движении вниз по течению в створе М3 их концентрации практически сопоставимы с таковыми в верховье реки — створ М1. После впадения р. Инкур концентрации тяжелых металлов возрастают в 1,2–1,5 раза, отличие составляют Mn и Ni, содержания которых, наоборот, снижаются в 1,2–1,4 раза. Следует от-

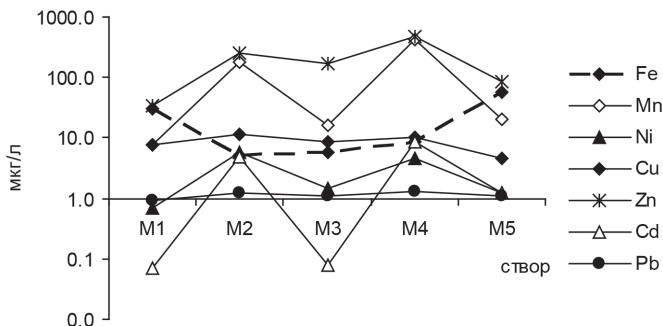


Рис. 5. Динамика изменения содержания рудных элементов в воде р. Модонкуль  
 Fig. 5. Time history of content of ore elements in water of the Modonkul river



метить, что поведение Fe отличается от характерного для Mn, Ni и других катионов металлов, его содержания остаются стабильно низкими, вероятно, вследствие высокой склонности к гидролизу и осаждению гидроксидов в зоне смешения кислых вод с природной щелочной водой реки (рис. 5).

Таким образом, уменьшение концентрации анионов  $SO_4^{2-}$  в воде реки ограничивают возможности комплексообразования элементов окисляющихся сульфидов Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Ni и соответственно миграционные их формы в растворенном виде. Отличие поведения Fe и Mn связано с высокой склонностью к гидролизу и осаждению гидроксидов. С другой стороны, осаждение гидроксидов и сорбция элементов-комплексообразователей снижает их концентрацию в воде реки.

### Выводы

Рудничные воды штольни Западная и приток р. Инкур являются постоянными источниками рудных техногенных элементов, выносимых в окружающую среду водным стоком. Их агрессивные, сульфатные воды отличаются от природной воды р. Модонкуль кислотно-

стью, уровнем минерализации, лидирующими макрокомпонентами, высоким содержанием рудных элементов. В зоне смешения техногенных и природных вод происходит изменение химического состава: от гидрокарбонатного к сульфатному (анионный), от кальций-магниевого к натрий-кальциевому (катионный). При движении вниз по течению природный химический состав изменяется на гидрокарбонатно-сульфатный с преобладанием долевого содержания кальция в катионном составе.

Непосредственно в зоне смешения природной воды реки и впадающих притоков величины pH возрастают, создается щелочной барьер [18]. После впадения рудничных вод штольни Западная концентрация растворенного железа падает в 4,5 раза, содержание элементов окисляющихся сульфидов Fe, Cu, Zn, Pb, Cd возрастает в 2,2–3,5 раза в воде реки. При движении вниз по течению в пределах г. Закаменска их концентрации снижаются до фонового уровня в результате осаждения гидроксидов Fe и Mn и сорбции на них элементов-комплексообразователей, а также снижения возможности комплексообразования при уменьшении концентрации сульфат-ионов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананин В.А. Пути решения проблемы Джидинского вольфрамо-молибденового комбината / Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплексов Республики Бурятия. — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. — С. 134–138.
2. Gordienko I. V., Gorokhovskiy D. V., Smirnova O. K., Lantseva V. S., Badmatsyrenova R. A., Orsoev D. A. Dzhdida ore district: geology, structural and metallogenic regionalization, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast and outlook for development // *Geology of Ore Deposits*. 2018. Vol. 60. No 1. Pp. 3–37. DOI: 10.7868/S001677701801001X.
3. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Khubanov V. B., Huang X. W., Bryansky N. V., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia). *Minerals*. 2019. Vol. 9. No 10. Pp. 572–593. DOI: 10.3390/min9100572.
4. Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. — 181 с.
5. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. — Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. — 169 с.

6. Murray J., Kirschbaum A., Dold B., Guimaraes E. Jarosite versus soluble iron-sulfate formation and their role in acid mine drainage formation at the Pan de Azúcar Mine Tailings (Zn-Pb-Ag), NW Argentina // *Minerals*. 2014. Vol. 4. No 2. Pp. 477 – 502. DOI: 10.3390/min4020477.
7. Wei X., Rodak C.M., Zhang S., Han Y., Wolfe F.A. Mine drainage generation and control options // *Water Environment Research*. 2016. Vol. 88. No 10. Pp. 1409 – 1432.
8. Armienta M.A., Villaseñor G., Cruz O., Ceniceros N., Aguayo A., Morton O. Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zima-pán Central Mexico // *Applied Geochemistry*. 2012. Vol. 27. Pp. 2225 – 2237.
9. Kefeni K.K., Msagati T.A., Mamba B.B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 151. Pp. 475 – 493.
10. Хажеева З. И. Химический состав воды реки Модонкуль в современных условиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 6. – С. 183 – 187.
11. Wei X., Wolfe F.A., Han Y. Mine drainage: characterization, treatment, modeling and environmental aspect // *Water Environment Research*. 2014. Vol. 86, No 10. Pp. 1515 – 1534.
12. Алекин О. А., Семенов А. Д., Скопинцев Б. А. Руководство по химическому анализу вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 270 с.
13. Государственный контроль качества воды. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 776 с.
14. Алекин О. А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 440 с.
15. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 т. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза. – Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
16. Oliva P., Viers J., Dupre B. Chemical weathering in granitic environments // *Chemical Geology*. 2003. Vol. 202, No 23 – 24. Pp. 225 – 256.
17. Salmon S. U., Malmstrom M. E. Quantification of mineral dissolution rates and applicability of rate laws: Laboratory studies of mill tailings // *Applied Geochemistry*. 2006, Vol. 21. No 2. Pp. 269 – 288.
18. Yurkevich N. V., Saeva O. P., Palchik N.A. Arsenic mobility in two mine tailings drainage systems and its removal from solution by natural geochemical barriers // *Applied Geochemistry*. 2012. Vol 27. No 11. Pp. 2260 – 2270. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Ananin V.A. Ways of solving problems of Dzhida tungsten–molybdenum works. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evogo i gornodobyvayushchego kompleksov Respubliki Buryatiya* [Mineral reserves and mining industry in the Republic of Buryatia: Current conditions and development prospects], Ulan-Ude, Izd-vo BNTS SO RAN, 1999, pp. 134 – 138.
2. Gordienko I.V., Gorokhovskiy D.V., Smirnova O.K., Lantseva V.S., Badmatsyrenova R.A., Orsoev D.A. Dzhida ore district: geology, structural and metallogenic regionalization, genetic types of ore deposits, geodynamic conditions of their formation, forecast and outlook for development. *Geology of Ore Deposits*. 2018. Vol. 60. No 1. Pp. 3–37. DOI: 10.7868/S001677701801001X.
3. Damdinova L. B., Damdinov B. B., Khubanov V. B., Huang X. W., Bryansky N. V., Yudin D. S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia). *Minerals*. 2019. Vol. 9. No 10. Pp. 572 – 593. DOI: 10.3390/min9100572.
4. Smirnova O.K., Plyusnin A.M. *Dzhidinskiy rudnyy rayon (problemy sostoyaniya okruzhayushchey sredy)* [Dzhida ore province (environmental problems)], Ulan-Ude, Izd-vo BNTS SO RAN, 2013, 181 p.
5. Bortnikova S. B., Gas'kova O. L., Bessonova E. P. *Geokhimiya tekhnogennykh sistem* [Geochemistry of anthropogenic systems], Novosibirsk, Akademicheskoe izd-vo «GEO», 2006, 169 p.

6. Murray J., Kirschbaum A., Dold B., Guimaraes E. Jarosite versus soluble iron-sulfate formation and their role in acid mine drainage formation at the Pan de Azúcar Mine Tailings (Zn-Pb-Ag), NW Argentina. *Minerals*. 2014. Vol. 4. No 2. Pp. 477 – 502. DOI: 10.3390/min4020477.
7. Wei X., Rodak C. M., Zhang S., Han Y., Wolfe F. A. Mine drainage generation and control options. *Water Environment Research*. 2016. Vol. 88. No 10. Pp. 1409 – 1432.
8. Armienta M. A., Villaseñor G., Cruz O., Cenicerros N., Aguayo A., Morton O. Geochemical processes and mobilization of toxic metals and metalloids in an As-rich base metal waste pile in Zima-pán Central Mexico. *Applied Geochemistry*. 2012. Vol. 27. Pp. 2225 – 2237.
9. Kefeni K. K., Msagati T. A., Mamba B. B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 151. Pp. 475 – 493.
10. Khazheeva Z. I. Current chemical composition of water in the Modonkul river. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 6, pp. 183–187. [In Russ].
11. Wei X., Wolfe F. A., Han Y. Mine drainage: characterization, treatment, modeling and environmental aspect. *Water Environment Research*. 2014. Vol. 86, No 10. Pp. 1515 – 1534.
12. Alekin O. A., Semenov A. D., Skopintsev B. A. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushy* [Manual on chemical analysis of land water], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973, 270 p.
13. *Gosudarstvennyy kontrol' kachestva vody* [Governmental control of water quality], Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 2003, 776 p.
14. Alekin O. A. *Osnovy gidrokhimii* [Elementaries of hydrochemistry], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 440 p.
15. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda* [Geological evolution and self-organization of water-rock system], in 5 vols. Vol. 2: Water-rock system in the conditions of hypergenesis zone. Izd-vo SO RAN, 2007, 389 p.
16. Oliva P., Viers J., Dupre B. Chemical weathering in granitic environments. *Chemical Geology*. 2003. Vol. 202, No 23 – 24. Pp. 225 – 256.
17. Salmon S. U., Malmstrom M. E. Quantification of mineral dissolution rates and applicability of rate laws: Laboratory studies of mill tailings. *Applied Geochemistry*. 2006, Vol. 21. No 2. Pp. 269 – 288.
18. Yurkevich N. V., Saeva O. P., Palchik N. A. Arsenic mobility in two mine tailings drainage systems and its removal from solution by natural geochemical barriers. *Applied Geochemistry*. 2012. Vol 27. No 11. Pp. 2260 – 2270.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хажеева Зинаида Ивановна<sup>1</sup> – канд. физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник, e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru,  
Санжанова Сэсэг Сергеевна<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
младший научный сотрудник,  
<sup>1</sup> Геологический институт Сибирского отделения РАН.  
**Для контактов:** Хажеева З.И., e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Z.I. Khazheeva<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),  
Senior Researcher, e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru  
S.S. Sanzhanova,<sup>1</sup> Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher,  
<sup>1</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences,  
670047, Ulan-Ude, Russia.  
**Corresponding author:** Z. I. Khazheeva, e-mail: zkhazh@geo.stbur.ru.

Получена редакцией 18.04.2019; получена после рецензии 29.07.2019; принята к печати 20.05.2020.  
Received by the editors 18.04.2019; received after the review 29.07.2019; accepted for printing 20.05.2020.