

УДК 551.491(571.55)
 DOI: 10.21209/2074-9155-2018-12-2-41-47

ГЕОХИМИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДАРАСУНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

GEOCHEMISTRY OF DRAINAGE WATER OF GOLD-ORE DEPOSITS OF DARASUN ORE FIELD

Показано, что дренажные воды горнорудных объектов Дарасунского рудного поля различаются по физико-химическим характеристикам, формам миграции элементов и минеральным равновесиям. Отмечено, что определяющим показателем этих различий служит pH, величина которого зависит не только от кислотного потенциала руд, но и от нейтрализующего действия вмещающих пород

It is shown that the drainage waters of mining objects of the Darasun ore field differ in their physicochemical characteristics, forms of elements' migration, and mineral equilibrium. The defining indicator of these differences is the pH, the value of which depends not only on the acidic potential of ores, but also on the neutralizing effect of host rocks

Ключевые слова: золоторудные месторождения; дренажный сток; формы миграции; минеральные равновесия

Key words: gold deposits; drainage flow; forms of migration; mineral equilibria



Л. В. Замана



Л. В. Таскина

ских остановок служат разрабатывавшиеся ранее, расположенные в пределах одного рудного поля, Балейское и Тасеевское месторождения [3]. Другим примером являются золоторудные месторождения Дарасунского рудного поля, данные по которым рассмотрены в настоящей статье.

Цель работы – изучение влияния разработки рудных месторождений, локализованных в разных вмещающих породах и имеющих различный минералогический состав, на химический состав природных вод.

Дарасунское рудное поле расположено в границах Дарасуно-Могочинской структурно-формационной зоны золотомolibденового пояса Забайкалья, выделенного С. С. Смирновым (1961). Рудное поле занимает площадь около 60 км² и включает Дарасунское и Талатуйское золоторудные, Теремкинское золотосеребряное и Усть-Теремкинское серебряное месторождения и ряд рудопроявлений. Сложено рудное поле маг-

Введение. Традиционная для горной промышленности Восточного Забайкалья разработка золоторудных месторождений сопровождается формированием различных по кислотно-основным свойствам и, как следствие, концентрациям макро- и микрокомпонентов дренажных вод образующихся геотехногенных объектов (карьеров, отвалов, хвостохранилищ и др.). Примером контрастных гидрохимиче-

матическими породами. Древний субстрат представлен нижнепалеозойскими габброидами, которые прорваны и метаморфизованы среднепалеозойскими/раннемезозойскими гранодиоритами, диоритами, гранитами, граносиенитами и сиенитами, гранитоидами аманского комплекса.

Дарасунское месторождение относится к жильному типу золото-кварцево-сульфидной формации. Жилы локализованы в гранодиоритах, граносиенитах и габбро-амфиболитах и связаны с амуджиканским субвулканическим комплексом, представленным трещинными интрузиями и штоками пластиогранит- и гранодиорит-порфиров, дайками кварцевых диорит-порфиритов, фельзитов и др. Рудные жилы относительно просты по форме, выдержаны по простиранию. Главные рудные минералы представлены пиритом, арсеноциртом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом, ширротином, буронитом, блеклыми рудами [7].

Теремкинское месторождение приурочено к зоне Теремкинского разлома и характеризуется развитием эксплозивных брекчий с обломками габбро, гранитов, гранофира и кварцевых жил с сульфидами. Главные рудные минералы – халькопирит, пирит, галенит, сфалерит, минералы висмута (самородный висмут, висмутин, айкинит, козалит, тетрадимит), золото, сульфоантимониты свинца [Там же].

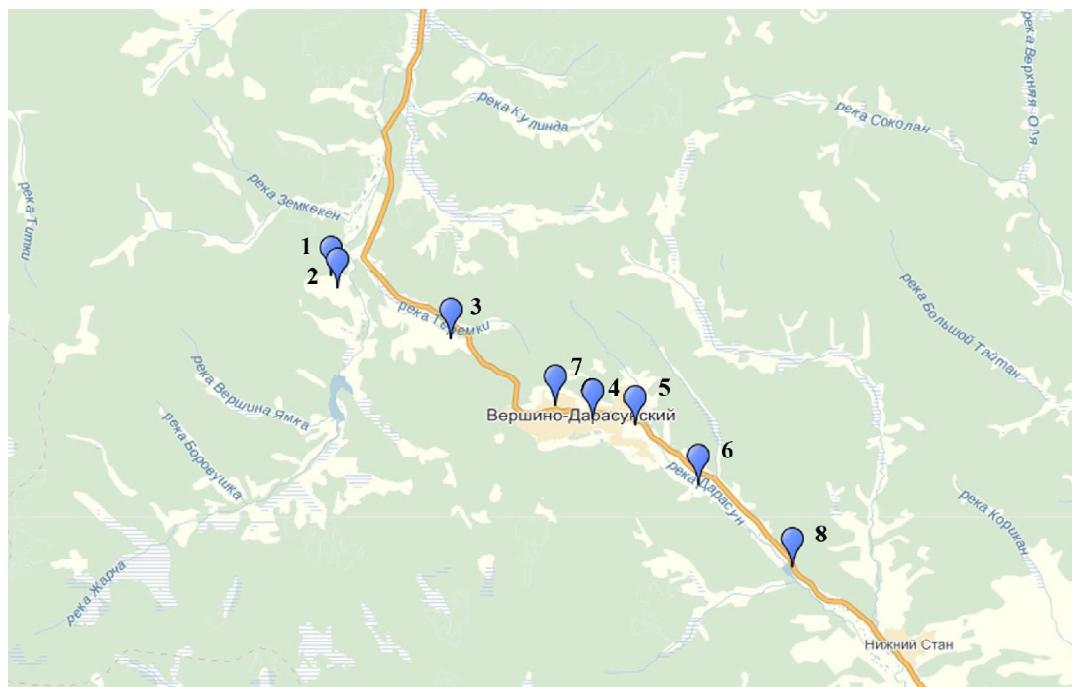
Талатуйское месторождение расположено в северной части Дарасунского рудного поля, на левобережье р. Жарча в среднем её течении, в 10 км к северо-западу от пос. Вершино-Дарасунский. Оруденение находится в гидротермально-измененных магматических породах кручининского интрузивного комплекса (палеозой) основного и среднего состава (габбро, габбро-диоритах и диоритах). Главными минералами руд являются магнетит, полевые шпаты, кварц, пирит, халькопирит, эпидот, хлорит, турмалин, флогопит [5].

Гидрогеохимическое опробование рудного поля выполнено авторами в июле 2014 г.

В статье использованы также данные опробования за 2010 г. по Дарасунскому месторождению [2]. На Теремкинском и Талатуйском месторождениях отобраны пробы дренажного стока отвалов, на Дарасунском месторождении – пробы вод руч. Дарасун (точки 4, 5 и 8), шахтного водоотлива (т. 7) и отстойника хвостохранилища (т. 6), что представлено на рисунке. Анализ водных проб выполнен в лаборатории геэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН с использованием стандартных методов. Металлы находили атомно-адсорбционным методом с электротермической атомизацией.

Минерализация воды по пробам изменилась в пределах 706...1887 мг/л (табл. 1). Дренажные воды Дарасунского месторождения кислые, щелочная реакция отмечена только в воде отстойника и в ручье на значительном удалении от месторождения (около 8 км). Для дренажного стока отвалов Теремкинского и Талатуйского месторождений характерны нейтральные и слабощелочные воды. Такое различие можно объяснить тем, что эти месторождения локализованы в габбро и габбро-диоритах, имеющих более высокий потенциал нейтрализации кислотности по сравнению с более кислыми породами Дарасунского месторождения. В составе руд этих месторождений преобладает халькопирит, кислотообразующий потенциал которого ниже по сравнению с преобладающим на Дарасунском месторождении пиритом.

По анионному составу кроме сульфатного типа (ВД-10-1, ВД-14-1, ВД-14-2, ТЛ-14-3) отмечены также гидрокарбонатно-сульфатные (ВД-10-2, ТЛ-14-1) и нитратно-сульфатные воды (ВД-14-3, ТЛ-14-2). Нитратный тип вод формируется только при их загрязнении. В данном случае его появление связано с применением взрывчатых веществ для добычи руды и цианидов при извлечении золота (проба ВД-14-3). По содержанию катионов воды кальциевые (ВД-14-3, ТЛ-14-1, ТЛ-14-3) и магниево-кальциевые (остальные). Химический состав вод представлен в табл. 2.



Местоположение точек отбора проб. Номера проб по точкам отбора: Талатуйское месторождение: 1 – ТЛ-14-1; 2 – ТЛ-14-2; Теремкинское месторождение: 3 – ТЛ-14-3; Дарасунское месторождение: 4 – ВД-14-1; 5 – ВД-14-2; 6 – ВД-14-3; 7 – ВД-10-1; 8 – ВД-10-2 / Location of sampling points. Sample numbers at sampling points: Talatuy deposit: 1 – TL-14-1; 2 – TL-14-2; Teremkinskoye field: 3 – TL-14-3; Darasun field: 4 – VD-14-1; 5 – VD-14-2; 6 – VD-14-3; 7 – VD-10-1; 8 – VD-10-2

Таблица 1. Макрокомпоненты и фосфор в дренажных водах горнорудных объектов Дарасунского рудного поля, мг/л / Table 1. Macrocomponents and phosphorus in the drainage waters of mining objects of the Darasun ore field, mg/l

Показатель / Indicator	Пробы / Samples							
	ВД-10-1	ВД-10-2	ВД-14-1	ВД-14-2	ВД-14-3	ТЛ-14-1	ТЛ-14-2	ТЛ-14-3
T, °C	8,2	22,4	16,5	22,4	25,3	11,5	15,9	13,1
pH	4,90	8,41	4,50	4,69	7,60	7,30	7,27	7,36
Eh, мв	383	275	292	218	188	186	160	150
ПО*	1,2	3,2	1,45	4,96	13,4	6,7	4,1	5,16
CO ₂	92,4	-	28,6	22,4	4,84	7,92	5,06	4,18
HCO ₃ ⁻	6,1	152,5	0,61	1,83	47,3	158	65,9	75,6
SO ₄ ²⁻	770	369	1200	1296	1175	359	1138	464
Cl ⁻	35,5	20,4	22,1	23,7	40,6	1,16	4,71	0,97
F ⁻	1,00	0,65	0,13	0,29	0,78	0,25	0,34	0,33
NO ₃ ⁻	1,96	0,62	3,91	5,83	516	4,60	592	1,56
Ca ²⁺	212,4	116,2	365,5	375,3	362	145,9	353,2	170,3
Mg ²⁺	51,4	42,8	77,8	83,2	61,3	21,2	98,7	19,8
Na ⁺	23,2	28,4	34,2	33,7	64,9	18,3	19,3	8,29
K ⁺	1,35	2,68	2,78	3,11	24,7	2,42	6,51	2,60
M [*]	1101	737	1703	1817	1776	706	1887	742
Si	8,58	3,53	13,4	3,0	0,8	3,2	<0,5	1,33
P	0,085	0,12	0,046	0,068	0,046	0,035	0,040	0,046

Таблица 2. Химический состав вод Дарасунского рудного поля (%-экв.) /
Table 2. Chemical composition of waters of the Darasun ore field (% -eq.)

Номера проб / Sample numbers	NO_3^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
ВД 10-1	0,18	0,58	93,41	5,82	66,74	26,92	6,34	0,01
ВД 10-2	0,09	23,21	71,36	5,33	54,74	33,61	11,63	0,02
ВД-14-1	0,25	0,04	97,29	2,42	69,63	24,70	5,66	0,01
ВД-14-2	0,34	0,11	97,15	2,40	69,08	25,52	5,39	0,01
ВД-14-3	23,97	2,23	70,50	3,29	69,49	19,61	10,83	0,06
ТЛ-14-1	0,73	25,45	73,50	0,32	73,99	17,92	8,07	0,02
ТЛ-14-2	27,70	3,13	68,78	0,38	66,07	30,77	3,14	0,02
ТЛ-14-3	0,23	11,30	88,22	0,25	80,89	15,67	3,42	0,02

Данные по содержанию нитратов, нитритов и аммония в водах на рассматриваемых и других эксплуатируемых месторождениях Восточного Забайкалья (Апрелковское золоторудное, Спокойнинское вольфрамовое и др.), а также имеющиеся в публикациях по горнопромышленным объектам других регионов (молибден-вольфрамовое месторождение Тырныауз на Кавказе [5], Костомукшский ГОК в Карелии [4], месторождение Дъявик в Канаде [8], рудники в Финляндии [9] и др.) позволяют выделить особый горнопромышленный тип загрязнения природных вод соединениями азота.

Из рудных элементов аномальные содержания в дренажных водах Дарасунского

рудного поля чаще имеют медь, никель, кобальт и кадмий. В пробах 2010 г. по Дарасунскому месторождению отмечался в повышенных концентрациях цинк (табл. 3). В пробе из-под отвалов Теремкинского Au-Ag месторождения масс-спектрометрическим анализом установлена максимальная концентрация серебра – 4,46 мкг/л, тогда как по другим пробам она не превышала 0,88 мкг/л. Концентрации металлов в дренажных водах горнорудных объектов рассматриваемых месторождений по сравнению с другими золоторудными месторождениями Забайкалья ниже, что в основном определяется более высокими значениями pH исследованных вод.

Таблица 3. Металлы в водах Дарасунского рудного поля по результатам атомно-абсорбционного анализа / Table 3. Metals in waters of the Darasun ore field according to the results of atomic absorption analysis

Компонент / Component	Пробы / Samples							
	ВД-10-1	ВД-10-2	ВД-14-1	ВД-14-2	ВД-14-3	ТЛ-14-1	ТЛ-14-2	ТЛ-14-3
Sr, мг/л	-	-	0,61	0,63	0,61	0,29	0,46	0,33
Fe	<0,15	<0,15	0,54	0,54	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Mn	0,13	<0,02	2,64	2,23	<0,02	<0,02	0,19	<0,02
Zn, мкг/л	144,4	57,3	0,92	0,88	2,17	2,14	1,93	2,63
Cu	24,3	9,5	23,4	23,3	23,1	17,8	23,7	11,7
Pb	0,07	-	0,79	0,29	<0,18	<0,18	<0,18	<0,18
Cd	8,46	4,81	8,28	0,63	1,37	1,78	0,90	8,17
Ni	25,6	2,76	60,2	58,7	34,6	5,80	38,3	6,98
Co	20,4	4,78	38,3	19,9	1,99	27,7	<0,32	38,8
As	4,22	25,9	1,64	0,89	<0,52	<0,52	<0,52	1,61
Cr	0,58	0,35	0,34	0,26	0,14	0,21	0,16	0,13
Al	49,5	25,9	73,8	71,9	33,7	35,4	28,2	22,2

Расчет по программе HydroGeo [1] показал, что в кислых водах изученные металлы мигрируют в форме простых ионов (табл. 4). При нейтральных и слабощелочных значениях pH только медь находится исключительно в форме Cu^+ , практически полностью ионной формой представлены стронций и Fe^{2+} . По другим металлам заметными становятся комплексные ионы, при этом для марганца

монометалльная форма незначима (менее 0,2 %), а для алюминия она ничтожна. Основным аддендом в большинстве случаев является карбонат-ион, только алюминий находится в форме оксо- и оксогидроксидного комплексов. Выделяется кадмий, который единственный частично представлен нитратным комплексом.

Таблица 4. Формы нахождения рудных и петрогенных элементов в дренажных водах Дарасунского рудного поля / Table 4. Forms of ore and petrogenic elements location in the drainage waters of the Darasun ore field

Ассоциаты / Associates	Пробы / Samples		
	ВД-14-1	ТЛ-14-2	ВД-14-3
	pH = 4,50	pH= 7,27	pH= 7,60
% мольные / % mole			
Mn^{3+}	100	0,98	0,178
Fe^{2+}	100	98,9	99,3
Fe^{3+}	-	8,01 E-7	1,01 E-6
Ni^{2+}	100	81,2	86,2
Co^{2+}	100	-	90,9
Cu^+	100	100	100
Zn^{2+}	100	91,7	94,1
Sr^{2+}	100	99,9	99,9
Cd^{2+}	98,3	58,2	66,4
Al^{3+}	99,9	5,03 E-6	6,37 E-6
$(\text{Al(OH})_4)^-$	2,38 E-5	3,61	3,61
$(\text{AlO}_2)^-$	0,00031	46,4	46,4
$(\text{AlO(OH})_3)^-$	0,00033	49,9	49,9
$\text{Al(OH)}_6\text{SiO}_4^-$	5,75 E-9	4,66 E-6	4,26 E-6
$\text{Mn}_2(\text{CO}_3)_3$	5,46 E-11	99,0	99,8
FeCO_3	1,54 E-7	1,01	0,70
$(\text{Fe(OH})_4)^-$	-	100	100
CoCO_3	2,10 E-6	-	9,02
$(\text{Co}(\text{PO}_4)_2)^{4-}$	5,34 E-16	-	-
NiCO_3	3,5 E-6	18,8	13,8
ZnCO_3	3,5 E-6	8,33	5,91
SrCO_3	4,28 E-9	0,030	0,021
CdCO_3	9,87 E-6	39,9	31,4
$(\text{CdNO}_3)^+$	0,014	1,16	1,26
$(\text{Cd}(\text{SO}_4)_2)^{2-}$	1,74	0,75	0,97

Разнятся в зависимости от pH и равновесные минеральные фазы (табл. 5), рассчитанные по той же программе. Неравновесность кислых вод по отношению к карбонатам, гиббситу и некоторым алюмосиликатам сме-

няется в щелочной среде неравновесностью с апатитами, но при этом по кальциту насыщение также не достигается. Зато доломит становится основной минеральной фазой, образование которой наиболее возможно.

Таблица 5. Равновесные минеральные фазы дренажных вод золоторудных месторождений, мг/л
/ Table 5. Equilibrium mineral phases of drainage waters of gold deposits, mg/l

Минералы / Minerals	Пробы / Samples		
	ВД-14-1	ТЛ-14-2	ВД-14-3
	pH = 4,50	pH= 7,27	pH= 7,60
Анальцим; $\text{NaAlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$	0	3 E-8	0,0008
Альбит (низ.); $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ н	0	2,6 E-6	2,4 E-6
Монтмориллонит (Na-Ca); $\text{Na}_{0,27}\text{Ca}_{0,1}\text{K}_{0,02}(\text{Fe}^{3+})_{0,19}\text{Mg}_{0,22}\text{Al}_{1,58}\text{Si}_{3,94}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0	0,002	0,0003
Хлорит (Mg); $\text{Mg}_{2,25}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{1,25}\text{O}_5(\text{OH})_4$	0	0,027	0,048
Гиббсит; $\text{Al}(\text{OH})_3$	0	0,017	0,011
Монтмориллонит; $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ м	0,18	0,035	0,041
Каолинит; $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ к	2,5 E-6	0,007	0,003
Глинистый минерал; $\text{K}_{0,8}\text{Al}_{2,4}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	3,6 E-6	0,013	0,008
Полевой шпат; KAISi_3O_8	0	0,0001	0,011
Иллит; $\text{K}_{0,8}\text{Al}_{2,56}\text{Si}_{3,38}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	3,8 E-6	0,003	0,005
Кальцит; CaCO_3 к	0	2,7 E-6	0
Хлорапатит; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	0,016	0,013	0
Фторапатит; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	0,031	0,028	0
Гидроксилапатит; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	0,035	0,030	0
Гипс; $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$	4,7 E2	3,3 E2	4,2 E2
Монтмориллонит (Ca); $\text{Ca}_{0,15}\text{Al}_{1,9}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,37	0,05	0,062
Доломит; $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0	6,5	1,9
Монтмориллонит (Fe^{2+} -Mg); $(\text{Fe}^{2+})_{0,2924}\text{Mg}_{0,29}\text{Al}_{1,6984}\text{Si}_{3,935}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0	0,013	0,027
Ярозит; $\text{K}(\text{Fe}^{3+})_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	0	0,002	0,0002

Заключение. Представленные результаты показывают, что вмещающие породы основного состава при невысоком кислотном потенциале руд могут обеспечивать нейтра-

лизацию дренажного стока до нейтральных и слабощелочных значений pH. Оценка нейтрализующего потенциала таких пород – задача дальнейших исследований.

Список литературы

- Букаты М. Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТГУ. 2002. Т. 305. С. 348–365.
- Замана Л. В. Геохимия кислых дренажных вод золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Вода: химия и экология. 2013. № 8. С. 92–97.
- Замана Л. В., Усманов М. Т. Эколого-гидрогеохимическая характеристика водных объектов золотопромышленных разработок Балейско-Тасеевского рудного поля (Восточное Забайкалье) //

Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. Т. 34, № 1. С. 105–111.

4. Лозовик П. А., Бородулина Г. С. Соединения азота в поверхностных и подземных водах Кarella // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 694–704.

5. Прокофьев В. Ю., Зорина Л. Д., Коваленкер В. А., Акинфиев Н. Н., Бакшеев И. А., Краснов А. Н., Юргенсон Г. А., Трубкин Н. В. Состав, условия формирования руд и генезис месторождения золота Талатуй (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49, № 1. С. 37–76.

6. Хаустов В. В. Формирование дренажного стока месторождения Тырныауз // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 3. С. 140–146.

7. Юрженсон Г. А., Юрженсон Т. Н. Дарапунское рудное поле // Месторождения Забайкалья / под ред. Н. П. Лаверова. М.: Геоинформмарк, 1995. Т. 1, кн. 2. С. 3–18.

8. Bailey B. L., Smith L. J. D., Blowes D. W., Ptacek C. J., Smith L., Sego D. C. The Diavik Waste Rock Project: persistence of contaminants from blasting agents in waste rock effluent // Applied Geochemistry. 2013. Vol. 36. P. 256–270.

9. Zaitsev G., Mettänen T., Langwaldt J. Removal of ammonium and nitrate from cold inorganic mine water by fixed-bed biofilm reactors // Minerals Engineering. 2008. Vol. 21. P. 10–15.

References

1. Bukaty M. B. *Izvestiya TPU* (News of TPU), 2002, issue. 305, pp. 348–365.
2. Zamana L. V. *Voda: himiya i ekologiya* (Water: chemistry and ecology), 2013, no. 8, pp. 92–97.
3. Zamana L. V., Usmanov M. T. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sektsii nauk o Zemle RAEV. Geologiya, poiski i razvedka rudnyh mestorozhdeniy* (News of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits), 2009, vol. 34, no. 1, pp. 105–111.
4. Lozovik P. A., Borodulina G. S. *Vodnye resursy* (Water resources). 2009, vol. 36, no. 6, pp. 694–704.
5. Prokofiev V. Yu., Zorina L. D., Kovalenker V. A., Akinfiev N. N., Baksheev I. A., Krasnov A. N., Yurgenson G. A., Trubkin N. V. *Geologiya rudnyh mestorozhdeniy* (Geology of ore deposits), 2007, vol. 49, no. 1, pp. 37–76.
6. Khaustov V. V. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* (News of South-West State University), 2012, no 3. pp. 140–146.
7. Yurgenson G. A., Yurgenson T. N. *Mestorozhdeniya Zabaykaliya* (Transbaikalia fields); by ed. N. P. Laverov. Moscow: Geoinformmark, 1995, issue. 1, vol. 2, pp. 3–18.
8. Bailey B. L., Smith L. J. D., Blowes D. W., Ptacek C. J., Smith L., Sego D. C. *Applied Geochemistry* (Applied Geochemistry), 2013, vol. 36, pp. 256–270.
9. Zaitsev G., Mettänen T., Langwaldt J. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2008, vol. 21, pp. 10–15.

Сведения об авторах

Замана Леонид Васильевич, канд. геол.-минер. наук, ведущий научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Научные интересы: геохимия природных вод, термальные и минеральные воды, гидрохимия техногенеза

Таскина Людмила Викторовна, аспирант, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия. Научные интересы: химия воды, дренажные воды золоторудных месторождений

Information about the authors

Leonid Zamana, candidate of geol.-mineralogical sciences, leading researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia. Scientific interests: geochemistry of natural waters, thermal and mineral waters, hydrogeochemistry of technogenesis

Ljudmila Taskina, postgraduate, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia. Scientific interests: water chemistry, drainage waters of gold ore deposits