ГИДРОГЕОХИМИЯ ЗОНЫ ТЕХНОГЕНЕЗА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Замана Л.В., Чечель Л.П., Абрамова В.А.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия, e-mail: l.v.zamana@mail.ru, l.p.chechel@mail.ru, vera_abramova79@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Выделено три типа техногенных гидрогеохимических систем в зависимости от величины pH дренажных вод (кислых с $\text{pH} < 4.0$ (5.0), слабокислых и нейтральных с pH от > 4.0 (5.0) до 7.5 и слабощелочных $7.5 < \text{pH} < 9.0$, характеризующихся разными уровнями концентраций рудных, сопутствующих и петрогенных химических элементов, рассмотрены формы нахождения элементов в водах и термодинамические равновесия этих систем.

1. ВВЕДЕНИЕ

Восточное Забайкалье – один из старейших горнорудных регионов России, освоение рудных месторождений начато в нем с разработки серебряно-свинцовых руд во второй половине 17 века. Здесь впервые в России добыты свинец, цинк, серебро, олово, флюорит, молибден, вольфрам [1]. В последней четверти XX века в мире началось активное изучение водной миграции поллютантов в районах горной добычи. В ИПРЭК СО РАН (ранее ЧИПР) такие работы проводятся со середины 1980-х годов [2, 6, 11] как в рамках бюджетных научных исследований, так и по хоздоговорам.

Металлогеническая особенность территории – широкий спектр минерального сырья, включающий вольфрамовые, золоторудные, медные, молибденовые, мышьяковые, полиметаллические, редкометалльные (Sn, Ta-Nb, Be-Li), урановые, флюоритовые и другие промышленные типы месторождений. Вместе с ландшафтно-климатическим разнообразием мест их локализации это позволяет получать информацию о химическом составе техногенных гидрогеохимических аномалий и водной миграции рудных и петрогенных элементов в нарушенных разведочными работами или разработкой месторождений условиях по всему доступному современным аналитическим методам кругу химических элементов. Из различных аспектов воздействия горнопромышленного производства на окружающую среду [3] здесь по наиболее показательным компонентам кратко рассмотрены физико-химические характеристики дренажных вод в зонах его влияния, формы водной миграции химических компонентов, основные процессы и факторы, их определяющие.

2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами гидрогеохимических исследований были карьерные озера, пруды-отстойники

хвостохранилищ, дренажный сток штолен, горных отвалов и хвостохранилищ, шахтные воды, водные потоки рассеяния в зонах техногенеза месторождений.

Водные пробы на общий химический состав и ряд микроэлементов анализировались по нормативным методикам в лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН, аттестованной на выполнение химических анализов воды. Щелочноземельные элементы и металлы определяли атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR 6M в аргон-ацетиленовом пламени или с электротермической атомизацией в зависимости от их содержания, Na и K – в эмиссионном режиме. Данные по углекислотным компонентам получены титриметрическим методом. Фтор и хлор находили потенциометрически с ионоселективными электродами с использованием для определения фтора в кислых водах буферных растворов, сульфат-ион – турбидиметрически после осаждения с BaCl_2 . На NO_3^- пробы анализировались с натрием салициловокислым или потенциометрически (при содержании > 1.0 мг/л), на NH_4^+ – с реактивом Несслера. В последние 5-6 лет водные пробы дополнительно исследуются методом ICP MS, в основном в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск), что существенно расширило число определяемых элементов. Формы нахождения компонентов в водах и равновесные минеральные фазы рассчитаны с использованием программного комплекса HydroGeo М.Б. Букаты, основанного на константах уравнений реакций. Для оценки термодинамических равновесий использованы также диаграммы, построенные по предложенным Р.М. Гаррелсом, Ч.М. Крайстом, Г.К. Хелгесоном и другими авторами методикам.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего за период исследований гидрогеохимическим опробованием охвачено около 40 месторождений, подавляющее большинство которых выведено из эксплуатации, но их горнорудные объекты продолжают оставаться источниками поступления аномальных концентраций химических элементов в гидросферу и

ее загрязнения [7, 8, 15 и др.]. Наиболее полные гидрогеохимические данные, включая определения методом ICP MS, получены по вольфрамовым, молибденовым, золоторудным и свинцово-цинковым месторождениям [4, 9, 10, 13 и др.]. Часть их по единичным пробам по отдельным месторождениям приведена в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Физико-химические характеристики кислых дренажных вод (pH <4.0 (5.0)) зоны техногенеза рудных месторождений Восточного Забайкалья

Показатель	Объекты опробования								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	3,30	2,59	3,65	3,04	3,45	3,42	3,18	3,44	3,50
Eh, mV	528	526	491	-	497	567	436	574	575
ПО*	0,74	<0,25	1,9	0,00	0,92	< 0,25	< 0,25	< 0,25	2,56
HCO ₃ ⁻ , мг/л	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₄ ²⁻	234,7	671,6	463,5	2100	1639	2820	5470	2322	2832
Cl ⁻	1,04	4,60	2,86	2,80	1,98	5,80	3,48	19,4	1,32
F ⁻	19,0	50,0	30,1	262,0	0,85	15,1	7,92	2,23	218,1
NO ₃ ⁻	0,63	0,31	1,46	–	1,92	0,88	1,92	1,77	2,20
Ca ²⁺	44,8	167,9	129,0	821	345,0	634,0	146,6	368,3	142,4
Mg ²⁺	20,7	61,2	25,2	11,4	189,1	201,9	223,7	360,5	161,6
Na ⁺	12,7	10,3	55,2	13,1	6,77	35,6	3,54	115,6	15,0
K ⁺	1,88	0,89	10,0	3,59	5,02	5,03	0,70	4,65	0,57
NH ₄ ⁺	0,22	1,44	0,39	0,14	–	0,48	0,51	0,23	4,75
Σ ионов	316	916	716	3214	2188	3717	5856	4010	3378
Si	12,8	28,7	17,7	12,7	33,6	26,6	33,7	14,1	44,0
Li, мкг/л	63,0	207,0	144,0	1062	718,0	1933	511,0	329,0	3740
Be	17,0	12,6	19,0	80,0	47,0	499,0	187,0	17,0	150,0
Al	14911	36076	21443	239627	402990	284620	222056	23246	534829
Mn	1258	2786	1163	52541	859615	289568	81557	27592	110245
Fe	5029	99064	1017	100312	8969	23583	379673	18823	35382
Co	20,0	74,0	24,0	384,0	1086	9243	2141	626,0	699,0
Ni	29,0	150,0	217,0	310,0	340,0	6833	3098	1892	98,0
Cu	1642	5618	2098	1802	54927	12241	6919	157,0	293,0
Zn	5596	16375	13433	151028	292966	4640455	1379899	1788	9484
As	5,40	1,74	2,28	0,25	0,58	16,0	79,0	3,92	0,84
Sr	312,0	426,0	1328	2315	762,0	448,0	321,0	7158	675,0
Mo	1,51	1,82	0,92	1,30	27,7	7,60	2,41	0,53	2,80
Cd	104,0	176,0	180,0	2034	2758	79,0	47189	16,0	31,0
Σ РЗЭ	21,0	284,0	78,6	3588	9390	1247	4274	348,7	3783
W	0,65	0,26	0,35	4,09	2,45	4,32	5,40	0,11	0,99
Pb	9,20	28,0	672,0	19,0	30,0	1747	172,0	7,70	1,13
Th	5,90	34,0	3,84	943,0	190,0	27,0	211,0	4,64	21,0
U	58,0	55,0	10,2	321,0	968,0	3917	1706	18,0	65,0

Примечания. Объекты опробования по номерам – месторождение (минеральный тип), объект и дата опробования, номер пробы: 1 – *Антоновогорское* (W), дренаж штольни, 07.08.2015, Аг-15-1; 2 – *Букуинское* (W), карьер, 08.08.2015, Бк-15-8; 3 – *Букуинское* (W), выход в хвостохранилище, 08.08.2015, Бк-15-4; 4 – *Бом-Горхонское* (W), выход под дамбой хвостохранилища, 13.07.2013, БГ-13-6; 5 – *Бугдаинское* (W-Mo, Au-Pb-Zn), дренаж отвалов, 11.07.2014, Бд-14-1; 6 – *Шерловогорское* (Sn-Pb), карьер, 30.08.2016, ШГ-16-1-1; 7 – *Шерловогорское*, скважина, 30.08.2016, ШГ-16-4; 8 – *Тасеевское* (Au), карьер, 25.03.15, Тс-15-02; 9 – *Орловское* (Ta-Nb), дренаж отвалов, 2017, ОР-17-4. Жирным выделены максимальные концентрации компонентов в представленной выборке и название месторождений; ПО* – перманганатная окисляемость (мгО₂/л).

Таблица 2. Физико-химические характеристики слабокислых и нейтральных дренажных вод (рН от >4.0 (5.0) до 7.5) и слабощелочных (7.5<рН<9.0) зоны техногенеза некоторых типов рудных месторождений Восточного Забайкалья

Показатель	Объекты опробования									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
рН	4,15	6,70	6,65	7,75	7,08	7,27	4,50	8,26	7,25	7,8
Eh, mV	382	235	221	226	144	160	292	293	-92	262
ПО*	2,22	0,99	14,9	6,24	3,57	4,10	1,45	5,35	1,48	2,42
CO ₂ , мг/л	–	23,3	15,6	–	10,34	5,06	28,6	0,9	189,6	4,4
HCO ₃ ⁻	–	65,3	54,9	163,2	137,3	65,9	0,61	204	10,3	73,2
SO ₄ ²⁻	82	341,0	617	307	632,8	1138	1200	111,3	478,2	1150
Cl ⁻	0,74	1,38	4,80	2,00	45,2	4,71	22,1	2,2	1,6	3,7
F ⁻	4,35	11,2	3,97	0,48	0,47	0,34	0,13	0,21	0,49	0,72
NO ₃ ⁻	0,98	0,31	382,3	13,3	11,8	592	3,91	0,53	1,49	<0,62
Ca ²⁺	15	135,3	236,3	103,4	161,3	353,2	365,5	69,3	155,1	300,2
Mg ²⁺	0,16	5,19	125,1	13,6	71,3	98,7	77,8	26,2	67,4	112,5
Na ⁺	7,62	15,5	13,7	59,4	59,6	19,3	34,2	4,67	12,8	16,2
K ⁺	1,16	1,30	13,3	1,58	4,42	6,51	2,78	1,05	4,49	5,73
NH ₄ ⁺	0,21	0,41	24,3	0,36	0,27	–	–	0,2	0,28	0,13
Σ ионов	106,7	565	1069	665	1112	4687	1703	419,8	983	1662
Si	10,9	8,89	6,38	4,40	1,16	<0,50	13,4	4,69	10,3	1,10
Li, мкг/л	18,0	136	125	14,3	91	19	39	7,30	11,9	29
Be	5,10	26,0	2,7	0,036	0,015	0,015	0,56	0,009	0,016	0,003
Al	3211	2920	146	48,4	18	13,3	2311	575,2	28,1	313,8
Mn	217	2257	3298	1767	213	738	5082	67,4	2130	161,4
Fe	623	82	20	133	36	55	2126	1014	2290	1067
Co	3,30	14,4	14,9	11,1	4,57	22	82	1,77	<0,32	7,83
Ni	7,40	100	53	12,9	13,6	30	89	11,4	0,48	20,3
Cu	265	72	7,5	278	5,1	16	2388	24,2	8,10	73,3
Zn	972	5488	255	346	559	38	3083	5,29	–	1548
As	2,18	2,05	50,0	8,00	7,6	0,59	21	<0,52	56,9	<0,52
Sr	118	2231	1559	425	2179	2130	3228	<0,02	1,22	1,14
Mo	0,72	65	76	1361	1,14	9,17	1,44	6,10	5,90	2,21
Cd	17,0	53	10,5	15,0	17	0,97	14,7	4,23	–	8,78
Σ РЗЭ	3,60	4,31	0,3617	4,84	0,0943	1,96	60,36	0,19	0,35	0,08
W	1,96	0,49	475	0,22	0,046	0,090	0,076	0,10	0,21	0,01
Pb	2,82	1,07	0,18	4,60	0,28	0,26	16	98,4	11,0	2,71
Th	0,50	0,023	0,0077	0,01	0,0021	0,018	0,023	0,005	0,011	0,008
U	7,20	20,0	1863	18,0	11,4	14,5	1,77	0,77	1,01	0,45

Примечания. Порядок описания объектов опробования по номерам аналогично табл. 1. Объекты: 1 – *Антоновгорское* (W), ручей в конце хвостохранилища; 07.08.2015, Аг-15-3; 2 – *Букуинское* (W), дренаж штольни, 08.08.2015, Бк-15-1; 3 – *Спокойнинское* (W), карьер, 05.08.2015, Ор-15-2; 4 – *Жирекенское* (Mo), дренаж отвалов, 13.07.2014, Жр-14-3; 5 – *Балейское* (Au), карьер, 25.03.2015, Бал-15-2; 6 – *Талатуйское* (Au), дренаж отвалов, 16.07.2013, Тл-14-2; 7 – *Дарасунское* (Au), сток с отвалов, 16.07.2013, ВД-14-1; 8 – *Благodatское* (Pb-Zn), ручей на выходе из хвостохранилища, 18.07.2013, Гз-13-3; 9 – *Акатуйское* (Pb-Zn), дренаж хвостохранилища, 09.08.2015, Ак-15-2; 10 – *Кадаинское* (Pb-Zn), хвостохранилище, 19.07.2013, СБ-13-10.

Формирующиеся в условиях горнопромышленного производства воды рудных месторождений отличаются широким диапазоном физико-химических характеристик, которые в первую очередь определяются кислотно-основными и окислительно-восстановительными свойствами водной среды. По соотношению рН-Eh и, как следствие, концентрациям и формам миграции

рудных компонентов выделяются три основных типа техногенно-трансформированных гидрогеохимических систем [14].

Воды первого типа кислые с рН <4.0 (5.0) с высокими значениями Eh (> 350 МВ), максимальными минерализацией и концентрациями большинства рудных и петрогенных элементов формируются на месторождениях с сопутству-

ющей сульфидной минерализацией при низком потенциале нейтрализации как руд, так и вмещающих пород образующейся за счет сульфидов кислотности. По анионному составу эти воды сульфатные, нередко с повышенным содержанием фтора. Ведущими катионами являются Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} . Основная форма нахождения металлов в этих условиях простая ионная, вторые по значимости сульфатные и гидросульфатные комплексы, реже фторидные, при этом фтор находится в основном в соединениях с алюминием [5, 9].

Воды второго типа, околонеитральные и слабокислые с повышенными значениями Eh (200-350 мВ), образуются в результате нейтрализации кислотности карбонатами рудных жил либо при разбавлении кислых рудничных дренажей нейтральными фоновыми водами. Это, как правило, сульфатно-гидрокарбонатные и гидрокарбонатные воды, главные катионы которых представлены кальцием, магнием и натрием. Миллиграммовых количеств достигают концентрации цинка, железа, марганца, стронция и алюминия. В слабокислых околонеитральных водах, формирующихся в районах вольфрамовых месторождений, зафиксированы максимальные концентрации молибдена и вольфрама (Букуинское, Белухинское), а также урана, цинка, молибдена, кадмия (карьер Спокойнинского месторождения). Понижение кислотности растворов способствует большему

разнообразию форм миграции компонентов. В слабокислых и особенно околонеитральных средах происходит снижение роли простых ионных и сульфатных комплексов, появляются гидрокарбонатные, карбонатные и гидроксидные формы.

Воды третьего типа, околонеитральные, слабощелочные и щелочные ($\text{pH} > 7,5$) с низкими положительными и отрицательными значениями Eh (< 250 мВ), характерны для объектов, расположенных в пределах засушливых лесостепных и степных ландшафтов (Спокойнинское вольфрамовое месторождение) или в районах с широким развитием карбонатных пород, нейтрализующих кислотопродуцирующее действие сульфидов (полиметаллические Акатуйское, Кадаинское и др. месторождения). Этим водам свойственны наиболее низкие значения Eh, ведущий анион в водах, как правило, HCO_3^- , главные катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ . Максимальных значений достигают концентрации аниогенных компонентов – W, Mo, U и As, а также элементов, активно мигрирующих в околонеитральных и щелочных средах в виде карбонатных и гидроксильных комплексов.

В связи с низким содержанием органических веществ (по перманганатной окисляемости) органические формы миграции незначимы. Соотношение неорганических форм по некоторым пробам дано в табл. 3.

Таблица 3. Неорганические формы миграции металлов (мольные %) в водах молибденовых и полиметаллических месторождений

Формы миграции		Величина pH (номер пробы)							
		3,45 (Бд-14-1)	5,70 (Шх-14-6)	6,74 (Шх-14-2)	7,25 (Ак-15-2)	7,75 (Жр-14-3)	7,80 (Сб-13-10)	8,26 (Гз-13-03)	8,37 (Шх-14-5)
Sr	Sr^{2+}	93,3	97,5	97,5	91,4	94,1	93,2	95,2	97,4
	SrSO_4^0	6,60	2,30	0,30	3,43	3,60	6,07	1,62	1,40
	SrHCO_3^+	0,10	0,10	0,20	5,19	2,30	0,71	3,13	1,20
Al	AlF_3^0	7,60	12,4	–	0,006	–	–	–	–
	AlF_2^+	66,1	72,3	1,10	0,071	–	0,002		
	AlF^{2+}	26,3	13,5	1,10	0,038	–	–	–	–
	$\text{Al}(\text{OH})_3^0$	–	–	11,0	2,55	1,20	1,42	0,40	0,50
	$\text{Al}(\text{OH})_4^-$	–	–	1,80	1,52	2,30	3,12	2,29	3,40
	$\text{Al}(\text{OH})_2^+$	–	–	1,80	0,15	–	0,024	–	–
	$\text{AlO}(\text{OH})_2^-$	–	–	25,2	21,1	32,2	43,3	31,7	46,9
	$\text{Al}(\text{OH})_6\text{SiO}^-$	–	–	29,6	53,0	34,4	11,8	36,1	5,70
	AlO_2^-	–	–	23,4	19,6	29,8	40,2	29,4	43,5
	AlHPO_4^+	–	1,70	4,90	0,044	–	0,003	–	–
Mn	Mn^{2+}	72,0	88,5	88,3	66,7	61,6	67,1	33,6	50,0
	MnSO_4^0	27,9	11,5	11,4	13,6	13,0	23,8	3,11	3,90
	MnCO_3^0	–	–	–	19,7	25,5	9,11	63,3	46,1

Fe	Fe ²⁺	86,9	95,2	95,1	—	91,1	—	—	96,3
	FeSO ₄ ⁰	13,0	4,80	4,70	—	7,40	—	—	2,90
	FeHCO ₃ ⁺	—	—	0,10	—	1,50	—	—	0,80
	Fe ³⁺	6,70	—	—	—	—	—	—	—
	FeSO ₄ ⁺	41,1	0,10	—	—	—	—	—	—
	FeF ²⁺	52,2	0,80	—	—	—	—	—	—
Cu	Fe(OH) ₃ ⁰	—	99,0	100	100	100	100	100	100
	Cu ²⁺	78,1	90,3	72,0	4,43	3,20	8,93	0,74	1,50
	CuSO ₄ ⁰	21,8	8,40	6,70	0,65	0,50	2,28	0,05	0,10
	CuCO ₃ ⁰	—	0,80	17,9	92,7	94,9	85,8	98,1	95,7
Zn	CuOH ⁺	—	0,30	3,0	0,44	1,20	2,80	0,94	2,70
	Zn ²⁺	86,7	94,9	90,8	59,7	48,2	59,9	19,8	23,4
	ZnSO ₄ ⁰	12,5	4,60	4,40	4,54	3,40	7,91	0,68	0,70
	ZnHCO ₃ ⁺	0,10	0,10	0,30	5,20	1,80	0,70	0,99	0,40
	ZnCO ₃ ⁰	—	—	0,40	24,1	27,3	11,1	51,2	29,6
Pb	ZnOH ⁺	—	0,40	4,10	6,39	18,9	20,2	27,3	45,8
	Pb ²⁺	57,9	64,9	23,6	5,44	2,80	3,87	0,78	0,70
	PbSO ₄ ⁰	38,8	14,6	5,30	1,92	1,00	2,37	0,13	0,10
	PbHCO ₃ ⁺	3	3,50	3,50	23,0	5,00	2,21	1,91	0,60
	PbCO ₃ ⁰	—	0,20	1,70	33,7	24,1	11,0	30,9	13,6
Co	PbOH ⁺	—	16,6	65,8	35,9	67,1	80,4	66,1	84,7
	Co ²⁺	85,6	94,3	92,5	41,2	44,6	65,7	18,2	31,4
	CoSO ₄ ⁰	13,6	5,00	4,9	3,45	3,8	9,56	0,69	1,00
	CoHCO ₃ ⁺	0,60	0,70	1,70	22,4	10,2	4,81	5,72	3,60
	Co(HCO ₃) ₂ ⁰	—	—	—	6,65	1,20	0,21	0,84	0,20
	CoCO ₃ ⁰	—	—	0,70	26,3	39,8	19,3	74,1	62,5
Ni	CoOH ⁺	—	—	0,10	0,09	0,40	0,46	0,51	1,30
	Ni ²⁺	81,5	92,9	91,9	45,8	38,3	58,9	12,6	22,9
	NiSO ₄ ⁰	18,5	7,10	6,90	5,48	4,70	12,2	0,69	1,00
Cd	NiCO ₃ ⁰	—	—	1,20	48,7	56,9	28,8	86,5	76,0
	Cd ²⁺	76,6	90,3	85,8	23,4	17,7	34,7	4,68	8,50
	CdSO ₄ ⁰	23,2	9,20	8,70	3,74	2,90	9,64	0,34	0,50
	CdCO ₃ ⁰	—	0,10	3,10	71,5	75,7	48,8	91,4	81,3
	CdOH ⁺	—	0,20	2,00	1,27	3,50	5,94	3,26	8,40
	Cd(OH) ₂ ⁰	—	—	—	0,011	—	0,17	0,31	1,10

Примечание: Бд – Бугдаинское, Шх – Шахтаминское, Жр – Жирекенское молибденовые и Ак – Акатуйское, СБ – Кадаинское, Гз – Благодатское полиметаллические месторождения; «—» – значение < 10⁻³.

Наглядно представлено изменение форм миграции в зависимости от кислотности среды по вольфрамовым месторождениям на рис. 1.

Расчет термодинамических равновесий показал (табл. 4), что в составе минеральных новообразований присутствуют различные глинистые минералы, карбонаты (преимущественно кальцит), из сульфатов преобладает алунит, гипс представлен в основном в водах полиметаллических месторождений. По фторидам существует насыщение по флюориту в водах зоны техногенеза вольфрамовых месторождений, в рудах или вмещающих грейзенах которых он присутствует. Широко представлены различ-

ные гидроксиды железа, практически постоянно воды равновесны с кварцем.

Насыщение по некоторым минералам иллюстрирует рис. 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований установлено широкое разнообразие формирующихся в процессе разработки рудных месторождений различного минерального состава техногенных гидрогеохимических систем, выявлен уровень концентраций в них многих химических компонентов, включая токсиканты, в ландшафтно-климатических условия региона, получены представления о формах миграции

химических элементов и термодинамических равновесиях этих систем.

Подготовлено при финансировании по проекту бюджетных исследований № IX.137.1.2 (тема № 0386-2015-0006).

Рис. 1. Изменение форм водной миграции химических элементов в водах вольфрамовых месторождений в зависимости от величины pH [12].

Таблица 4. Равновесные и близкие к равновесным значения параметра насыщенности ($L > -5$) по минералам для дренажных вод вольфрамовых месторождений (расчет по программе HydroGeo32)

Минерал (формула)	Бк-09-8 (pH 2,87)	Аг-09-4 (pH 2,65)	Бл-09-4 (pH 7,07)	Сп-05-1 (pH 7,83)	Сп-05-5 (pH 8,75)
Каолинит ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)	—	—	31,0	30,0	26,6
Монтмориллонит ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	-4	—	34,0	34,0	29,2
Са-монтмориллонит ($\text{Ca}_{0.15}\text{Al}_{1.09}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	-4,90	—	34,0	34,0	39,3
Мg-монтмориллонит ($\text{MgAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})_2$)	—	—	2,00	31,0	35,7
Са-бейделлит ($\text{Ca}_{0.17}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.7}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	—	—	36,0	36,0	—
Мg-бейделлит ($\text{Mg}_{0.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	—	—	36,0	36,0	45,9

Иллит ($K_{0.72}Na_{0.06}Ca_{0.01}Fe_{0.09}Mg_{0.08}Al_{2.59}Si_{3.25}O_{10}(OH)_2$)	—	—	42,0	44,0	58,6
Mg-иллит ($Mg_{2.75}Al_{1.5}Si_3O_{10}(OH)_2$)	—	—	-4,30	9,50	—
Нонтронит ($Fe_2Si_4O_{10}(OH)_2$)	6,90	—	35,0	30,0	14,8
Кальцит ($CaCO_3$)	—	—	—	-2,00	-3,5
Доломит ($CaMg(CO_3)_2$)	—	—	—	-0,70	0,00
Родохрозит ($MnCO_3$)	—	—	—	0,30	-0,80
Малахит ($Cu_2CO_3(OH)_2$)	—	—	-0,50	—	—
Церуссит ($PbCO_3$)	—	—	-4	-2,00	—
Гипс ($CaSO_4(H_2O)_2$)	-0,70	0,20	0,00	0,30	—
Ангидрит ($CaSO_4$)	-2,30	—	—	—	—
Англезит ($PbSO_4$)	—	—	—	—	—
Целестин ($SrSO_4$)	0,20	—	—	—	—
Мелантерит ($FeSO_4(H_2O)_7$)	0,30	0,30	—	—	—
Алунит ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$)	-3,00	—	23,0	23,0	—
Флюорит (CaF_2)	1,90	—	0,10	0,20	-1,0
Селлаит (MgF_2)	—	—	—	—	—
Гётит ($FeO(OH)$)	-2,10	—	12,0	9,30	6,90
Лепидокрокит ($FeO(OH)$)	—	—	6,60	4,30	1,80
Гематит (Fe_2O_3)	—	—	16,0	11,0	6,60
Кварц (SiO_2)	0,70	1,20	0,70	0,70	-1,80

Примечание: Бк – Букуинское, Аг – Антоновогорское, Бл – Белухинское, Сп – Спокойнинское месторождения.

Рис. 2. Диаграммы устойчивости минералов при 25°C и давлении 10^5 Па в системе $H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2$ с данными по вольфрамовым (а: 1 – Спокойнинское, 2 – Уронайское, 3 – Букуинское, 4 – Белухинское, 5 – Антоновогорское) и свинцово-цинковым (б: 1 – Благодатское, 2 – Акатуевское, 3 – Кадаинское) месторождениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья: История, современное состояние, проблемы, перспективы развития. К 300-летию основания Приказа рудокопных дел / Г.А. Юргенсон, В.С. Четкин, В.М. Асосков и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская форма РАН, 1999. – 574 с.
2. Замана Л.В. Гидрогеохимические аномалии фтора в Забайкалье // Геохимия, 1992. № 2. – С. 228-237.
3. Замана Л.В. Геоэкологические последствия разработки рудных месторождений в Восточном Забайкалье // Горный журнал, 2011. № 3. – С. 24-27.
4. Замана Л.В. Геохимия кислых дренажных вод золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Вода: химия и экология, 2013. № 8. – С. 93-97.
5. Замана Л.В., Букаты М.Б. Формы миграции фтора в кислых дренажных водах вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья // Докл. АН. 2004. – Т. 396. № 2. – С. 235-238.

6. Замана Л.В., Гладкая Н.М., Лесников Ю.В., Чечель Л.П. Техногенные гидрогеохимические аномалии горно-рудных районов Забайкалья // I Всесоюзное совещание "Геохимия техногенеза". – Иркутск, 1985. – Т. 3. – С. 143-146.

7. 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 Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. – Т. 34. № 1. – С. 105-111.

8. Замана Л.В., Чечель Л.П. Загрязнение природных вод тяжелыми металлами в районах разработки вольфрамовых месторождений Восточного Забайкалья // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов. Вып. 7 / Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23 марта 2005 г.). – М.: ГЕОС, 2005. – С. 119-123.

9. Замана Л.В., Чечель Л.П. Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения Бом-Горхон (Забайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития, 2014. – Т. 22. № 3. – С. 267-273.

10. Замана Л.В., Чечель Л.П. Гидрогеохимические особенности зоны техногенеза полиметаллических месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания, 2015. № 1-1. – С. 33-38.

11. Рудные элементы в водах зоны гипергенеза месторождений Забайкалья / Погребняк Ю.Ф., Кондратенко Л.А., Лапердина Т.Г. и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 203 с.

12. Чечель Л.П. Неорганические формы миграции Fe, Mn, Ni, Co, Cd и Al в водах зоны гипергенеза вольфрамовых месторождений (Юго-Восточное Забайкалье) // Вода: химия и экология, 2013. № 1. – С. 108-114.

13. Чечель Л.П. Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2017. – Т. 328. № 6. – С. 52-63.

14. Чечель Л.П., Замана Л.В. Основные геохимические типы дренажных вод вольфрамовых месторождений Юго-Восточного Забайкалья // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 12. – С. 271-277.

15. Zamana L.V., Chechel L.P. Technogenic hydrogeochemical anomalies of tungsten deposits in Kukulbey ore region // J. Geosci. Res. NE Asia. – V. 7. № 2. Apr., 2004. – P. 52-57.

HYDROGEOCHEMISTRY OF THE ZONE OF TECHNOGENESIS OF ORE DEPOSITS EASTERN TRANSBAIKALIA

Zamana L.V., Chechel L.P., Abramova V.A.

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia, e-mail: l.v.zamana@mail.ru, lpchechel@mail.ru, vera_abramova79@mail.ru

ABSTRACT: Three types of technogenic hydrogeochemical systems are distinguished depending on the pH of the drainage water (acidic with pH <4.0 (5.0), slightly acidic and neutral pH> 4.0 (5.0) to 7.5 and slightly alkaline pH> 7.5), characterized by different concentration levels of ore, associated and petrogenic chemical elements, the forms of finding elements in the water and thermodynamic equilibria of systems are considered.