

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ЛЬДУ И МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

УДК 544.3 + 550.46

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА
НА ПРОТЕКАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

В.А. Абрамова¹, А.В. Паршин^{2,3}, А.Е. Будяк²

¹ Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672014, Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия; vera_abramova79@mail.ru

² Институт геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия; budyak@igc.irk.ru

³ Иркутский государственный технический университет,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия; sarhin@gej.istu.edu

С помощью аппарата термодинамического моделирования исследовано влияние соединений азота на протекание геохимических процессов в криолитозоне. Анализ результатов лабораторных экспериментов и физико-химического моделирования показал, что содержащиеся в атмосфере кислотообразующие компоненты (оксиды азота и серы) оказывают заметное влияние на химическое преобразование приповерхностных частей криолитозоны и являются существенным фактором повышения подвижности химических элементов в коре выветривания. Это влияние необходимо учитывать при оценке геоэкологических последствий складирования отвалов горно-рудной промышленности в приповерхностных условиях, как это происходит на ряде месторождений Северного Забайкалья.

Криогенез, соединения азота, физико-химическое моделирование, геохимия, геоэкология

PHYSICAL AND CHEMICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF NITROGEN COMPOUNDS
ON THE COURSE OF GEOCHEMICAL PROCESSES IN THE CRYOLITHOZONE

V.A. Abramova¹, A.V. Parshin^{2,3}, A.E. Budyak²

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS,
672014, Chita, Nedorezova str., 16a, Russia; vera_abramova79@mail.ru

² Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, 664033, Irkutsk, Favorsky str., 1a, Russia; budyak@igc.irk.ru

³ Irkutsk State Technical University, 664033, Irkutsk, Lermontov str., 83, Russia; sarhin@gej.istu.edu

The influence of nitrogen compounds on the course of geochemical processes in the permafrost zone has been evaluated using the apparatus of thermodynamical modeling. The results of experiments and physical-chemical modeling have demonstrated that the atmospheric acid-forming components (oxides of nitrogen and sulfur) have a significant impact on the chemical transformation of near-surface permafrost and are a significant factor of increasing of the mobility of chemical elements in the weathering crust. This effect must be considered when assessing the geo-environmental effects of storage of piles of ore deposits near the surface (as it occurs in the number of fields in the North Transbaikalia).

Cryogenesis, nitrogen compounds, physico-chemical modeling, geochemistry, geocology

ВВЕДЕНИЕ

На территории Северного Забайкалья разрабатываются месторождения благородных, радиоактивных, редких и цветных металлов. Ввиду этого подавляющее количество исследований в данном регионе посвящено вопросам рудогенеза и методам поиска рудных объектов [Блинов и др., 2014]. Однако вплоть до нового тысячелетия освоение месторождений сдерживается целым рядом факторов, а именно, отсутствием транспортных условий, большим объемом необходимых капиталовложений и низкой конъюнктурой на рынке

металлов. Особенно усложняют индустриальное освоение Северного Забайкалья суровые и экстремальные природно-климатические условия (сложный рельеф, многолетняя мерзлота, высокая сейсмичность). В последнее время в связи с реиндустриализацией зоны Байкало-Амурской магистрали [Фалыхов, 2013] интерес к рассматриваемой территории возрастает, что дает основания предполагать активизацию промышленной деятельности. При этом уже на предпроектной стадии освоения месторождений необходимо уделять зна-

чительное внимание сохранению окружающей природной среды и преодолению негативных экологических последствий.

В настоящее время территория Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны находится в условиях техногенного воздействия в результате разведки и добычи различных видов полезных ископаемых. Накопленные в течение длительного времени отходы горно-рудной промышленности становятся активными источниками загрязнения окружающей среды и представляют серьезную экологическую опасность, поскольку часто хранятся без соблюдения соответствующих норм и подвержены постоянному воздействию агентов выветривания. Наиболее интенсивно процессы химического преобразования рудных и нерудных минералов в техногенных ландшафтах могут протекать под действием кислотных выпадений, образование которых связано со значительным увеличением техногенной эмиссии серы и азота [Чантурия и др., 1999]. Экспериментальные исследования последних лет свидетельствуют о том, что содержащиеся в кислотных дождях оксиды азота и продукты их взаимодействия с водой, в частности азотистая кислота HNO_2 , оказывают значительное влияние на процессы окисления и выщелачивания сульфидных минералов [Маркович, Птицын, 1998], что особенно сильно проявляется в области отрицательных температур [Павлюкова, Маркович, 2006]. Криогеохимические процессы с участием соединений азота в зоне гипергенеза практически не изучены, и их вклад в ускорение реакций окисления при выветривании минералов пока во внимание не принимается. Между тем появляются работы, показывающие некоторую динамику поступления и техногенной миграции соединений азота в мерзлотных ландшафтах [Макаров, 2012]. Приведенные выше сведения позволяют предположить заметное влияние соединений азота на химическое преобразование приповерхностных частей криолитозоны и обосновать возможность реализации окислительных условий в зоне криогенеза для активного выщелачивания сульфидов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве модельного полигона для изучения криогеохимических процессов рассмотрено Удоканское месторождение (Забайкальский край) – одно из крупнейших месторождений меди в мире. На территории месторождения зона многолетней мерзлоты имеет практически сплошное распространение с мощностью от 65 м под водотоками до 950 м под водоразделами. Температура мерзлых пород составляет от -7 до -8 °С, мощность активного слоя около 1 м, зона годовых колебаний температуры 20–30 м [Удокан..., 2003].

В рудах и рудовмещающих породах Удокана обнаружено более 100 минеральных видов. Первичные руды месторождения – сульфидные. Основными рудными минералами являются борнит Cu_5FeS_4 и халькозин Cu_2S ; халькопирит CuFeS_2 имеет второстепенное значение. Гипергенные минералы меди представлены сульфатами и карбонатами. На месторождении обнаружены специфические криогенные минералы, такие как гидроантлерит $\text{Cu}_6(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, гидроброшантит $\text{Cu}_5(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_2 \cdot 5,24\text{H}_2\text{O}$, удоканит $\text{Cu}_8(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$, фиброферрит $\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и другие, характеризующиеся наличием кристаллизационной воды [Удокан..., 2003].

В 2010 г. на Удоканском месторождении начаты работы по заверочному бурению и сгущению разведочной сети опробования с целью оценки запасов по международной классификации в соответствии с Кодексом отчетности JORC. Разработка месторождения предполагается традиционным открытым способом с использованием типового оборудования [Отчет..., 2010]. Для разрыхления горной массы будут проводиться буровзрывные работы. К 2020 г. планируется строительство горно-металлургического комбината для получения 474 000 т меди в год с попутным извлечением 277 т серебра в год и дополнительной переработкой забалансовой руды методом кучного выщелачивания [Правительство..., 2014]. Необходимо отметить, что площадки для строительства производственной и социально-бытовой инфраструктуры придется размещать в межгорных долинах и котловинах, которые обычно характеризуются неблагоприятными условиями для рассеивания вредных примесей промышленного происхождения. Несмотря на то что сейчас в районе месторождения промышленные предприятия и крупные источники загрязнения воздуха отсутствуют, данные многолетнего мониторинга за состоянием атмосферного воздуха, ведущегося в пос. Новая Чара, показывают увеличение содержания загрязняющих веществ (диоксида азота и пыли) и, как следствие, наивысший потенциал загрязнения атмосферы в России [Государственный доклад..., 2008]. В результате дальнейшего промышленного освоения территории котловины загрязнение ее воздушного бассейна, в частности, соединениями азота увеличится [Недешев и др., 2001].

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из методов, позволяющих получить более глубокое представление о протекании геохимических процессов в криолитозоне, является компьютерное физико-химическое моделирование, которое может не только стать средством по-

Таблица 1. Термодинамические свойства льда, гидратов меди и азота

Компонент	Формула	Энтропия, кал/моль	Свободная энергия Гиббса, кал/моль	Энтальпия, кал/моль
Пуатвенит	$\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	34.895	-219 460	-259 520
Бонаттит	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	52.892	-334 649	-402 560
Халькантит	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	71.797	-449 344	-544 849
Нитрат меди	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	-72 978.01*	-20 895.5**	26.051*
Нитрат меди тригидрат	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-291 085.086*	-200 017**	62.5**
Нитрат меди гексагидрат	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-504 326.003*	-374 259*	98.9*
Нитрат меди нонагидрат	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	-720 810.946**	-551 807**	135.51**
Лед	H_2O	10.700	-56 546	-69 968

* Значения взяты из [Рябин, 1977].

** Оценочные значения на основе аддитивности свойств кристаллизационной воды в гидратах [Mercury et al., 2001].

лучения новых научных результатов, но и позволит интерпретировать имеющиеся фактические данные на основе законов химической термодинамики. Использование этого вида моделирования для анализа криогеохимических систем сопряжено с рядом трудностей. Тем не менее в настоящее время известны новые методики расчета и согласования термодинамических свойств веществ, позволяющие рассчитывать равновесный состав гетерогенных многокомпонентных и многоагрегатных систем, а также исследовать преобразование веществ с помощью физико-химических моделей в условиях низких температур [Гуревич и др., 2001; Бычинский и др., 2008; Mercury et al., 2001]. С целью имитации процессов химического выветривания с участием соединений азота построена физико-химическая модель поведения системы “вода–порода–газ”, что дает возможность анализировать влияние кислотных (азотсодержащих) осадков на процесс окисления сульфидов и характер вторичного минералообразования в реальной обстановке зоны окисления Удоканского медного месторождения. Расчет равновесного состава системы “вода–порода–газ” выполнен с использованием программного комплекса (ПК) “Селектор”, основанного на минимизации свободной энергии Гиббса [Чудненко, 2010]. Исследуемая термодинамическая система являлась открытой по отношению к атмосферным условиям. Химический равновесный состав рассчитывался при положительной (+20 °C) и отрицательной (-20 °C) температурах и давлении 1 атм.

Принятая за основу исследуемая гетерофазная модельная система содержит 12 независимых компонентов: C–Cu–S–Fe–Si–Al–Ca–Ti–N–Zr–H–O. Список исходных веществ, появление которых возможно в условиях химического равновесия системы, включает 105 компонентов водного раствора, 9 газов и 266 твердых фаз. Общее число зависимых (вероятных) компонентов, включенных в модель – 380.

При формировании физико-химической модели использованы термодинамические базы дан-

ных: a_sprons98.DB (для водных компонентов) и g_sprons98.DB (для газовых компонентов) [Johnson et al., 1992], s_Yokokawa.DB (для твердых фаз) [Yokokawa, 1988]. В список твердых фаз входит также лед, термодинамические характеристики которого взяты из [Mercury et al., 2001]. Исходный массив термодинамических параметров был дополнен согласованными значениями свободной энергии Гиббса ($\Delta_f G$) некоторых возможных минералов зоны гипергенеза с кристаллизационной водой (табл. 1), их энтальпией ($\Delta_f H^\circ$) образования из элементов и энтропией (S°) в стандартном состоянии (298.15 K; 1 бар) [Рябин, 1977; Mercury et al., 2001].

Изучение процесса выщелачивания сульфидов на базе модельной системы проводилось при взаимодействии 1 кг воды, серной кислоты H_2SO_4 разной концентрации (0.5; 0.05; 0.005 и 0.0005 моль), твердой фазы в виде сульфидной руды (табл. 2) и 100 кг атмосферного воздуха.

Выбор концентраций серной кислоты от 0.5 до 0.0005 моль обусловлен широким диапазоном содержания H_2SO_4 (pH 1–0.46) в природных водах зон окисления сульфидных месторождений [Nordstrom, 1991]. В условиях криолитозоны за счет криогенного концентрирования вероятность существования таких агрессивных растворов значительно возрастает.

Перед расчетами к газовой фазе и воде предварительно был добавлен диоксид азота в количестве 0.005 358 моль, что обусловлено присутствием данного соединения NO_2 в атмосферном воздухе исследуемой территории в количестве, превышающем в 2.9 раз максимальное значение ПДК (0.085 мг/м³) [Государственный доклад..., 2008].

Анализ результатов физико-химического взаимодействия в системе “вода–порода–газ” показал, что добавление NO_2 в газовой фазе на 100 кг атмосферы формирует осадки со значением pH 4.5, тогда как незагрязненные атмосферные осадки в присутствии углекислого газа и отсутствии различных примесей имеют pH 5.6. Как видно из

Таблица 2. Минеральный состав и количественное содержание сульфидной руды, используемой для физико-химического моделирования в ПК “Селектор”

Минеральный состав руды	Химическая формула	Содержание в пробе, %	Молекулярная масса	Количество, моль
Анортит	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	38.84	278.207	0.139 608
Борнит	Cu_5FeS_4	0.10	501.841	0.000 199
Брошантит	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	0.06	452.292	0.000 133
Ильменит	FeTiO_3	0.04	151.225	0.000 265
Кварц	SiO_2	40.0	60.084	0.665 735
Лимонит	$\text{FeOOH} \cdot (\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O})$	0.43	88.854	0.004 839
Магнетит	Fe_3O_4	6.60	231.539	0.028 505
Халькозин	Cu_2S	13.87	159.158	0.087 146
Халькопирит	CuFeS_2	0.02	183.525	0.000 218
Циркон	ZrSiO_4	0.10	147.395	0.000 680

Таблица 3. Модельный состав атмосферных осадков с примесью NO_2

Фаза	Зависимые компоненты
Дождевая вода	H_2O , NO_3^- , N_3^- , N_2^- , NH_3^0 , NH_4^+ , NH_4N_3^0 , HNO_2^0 , NH_4NO_3^0 , NH_4OH^0 , NH_4NO_2^0 , HNO_3 , H_2CO_3^0 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CH_4^0 , O_2 , H_2 , N_2^0 , Ar^0 , He^0 , Kr^0 , Ne^0 , OH^- , H^+
Атмосферный воздух	N_2 , NO_2 , NH_3 , CO , CO_2 , CH_4 , O_2 , H_2 , Ar , He , Kr , Ne

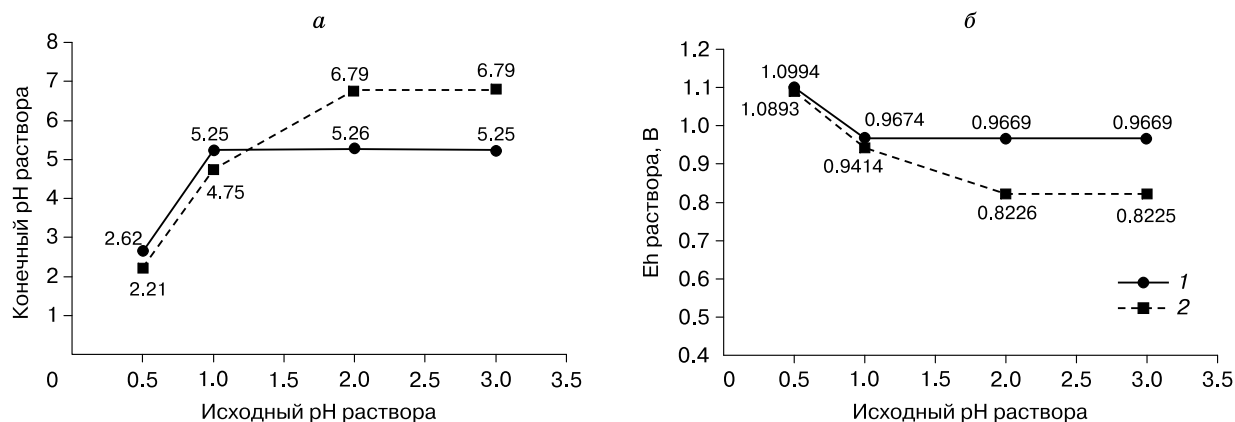
табл. 3, в жидкой фазе (дождевой воде) моделируемой системы возможно образование различных азотсодержащих соединений (NO_3^- , N_3^- , N_2^- , NH_3^0 , NH_4^+ , NH_4N_3^0 , HNO_2^0 , NH_4NO_3^0 , NH_4OH^0 , NH_4NO_2^0 , HNO_3). Следовательно, судя по высоким содержаниям соединений азота (NO_2) в атмосфере, и в настоящее время, и в будущем при проведении буровзрывных работ формирование кислотных атмосферных осадков на территории Удоканского месторождения вполне возможно.

Природные особенности (горно-котловинный рельеф, температурные инверсии, резко континентальный климат) территории Чарской котловины будут способствовать их выпадению и активному участию в процессах выщелачивания металлов, что подтверждено многочисленными экспериментальными исследованиями [Птицын, 2009]. Все это необходимо учитывать для прогнозной оценки выпадения кислотных дождей и их влияния на экологическую обстановку региона, особенно в районах складирования сульфидсодержащих отходов.

Моделирование процессов выщелачивания сульфидных удоканских руд с участием соединений азота при разных температурных режимах позволило определить условия и состав вторичных минералов. Пределы изменения основных физико-химических параметров (Eh, pH) представлены на рисунке. Анализ изменения величин pH растворов показывает, что для большинства случаев характерны слабощелочные значения pH (см. рисунок, а). Этот результат хорошо согласуется с данными полевых наблюдений на Удоканском

месторождении [Удокан..., 2003]. Согласно наблюдениям, величины pH надмерзлотных и поверхностных вод, а также рудных потоков рассеяния на рассматриваемой территории изменяются в пределах 5.67–7.64, что объясняется высокой карбонатностью среды и выщелачиванием преимущественно окисленных руд. Закисление среды в некоторых случаях (pH 2.21, 2.62) может быть обусловлено высокой первоначальной концентрацией кислотных растворов (в зоне окисления сульфидных месторождений), более активным протеканием процессов окисления сульфидов по сравнению с минералами вмещающих пород при частичном растворении газов в твердой фазе (во льду). Окислительный потенциал растворов (Eh) при выветривании сульфидов в открытых по отношению к атмосфере условиях значительно увеличивается, но величины Eh при разных температурах различаются незначительно (см. рисунок, б).

Согласно полученным результатам (табл. 4), в условиях положительных температур и доступа атмосферного воздуха в числе возможных гипергенных минералов Удоканского месторождения активно образуются кристаллогидратные формы сульфатов меди: пуатвенит $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, бонаттит $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и халькантит $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Равновесные твердые фазы также представлены кварцем SiO_2 , гематитом Fe_2O_3 , арагонитом CaCO_3 , малахитом $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2 \cdot \text{CO}_3]$, оксидом циркония ZrO_2 и рутилом TiO_2 . Все твердые фазы (вторичные минералы) различаются лишь количественно. Содержание тех и других варьирует в зависимости от условий химического выветривания.



Пределы изменения pH (а) и Eh (б) растворов при окислительном выщелачивании сульфидных руд при температурах $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (линия 1) и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (линия 2).

Таблица 4. Состав вторичных твердых фаз, полученных в результате процессов окислительного выщелачивания сульфидов с участием соединений азота при разных температурах (по расчетным данным)

Исходный pH раствора	Минеральная ассоциация	
	$T = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$
0.5	Пуатвенит ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), бонаттит ($\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), халькантит ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ангидрит (CaSO_4), бассанит ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), хлориты ($\text{FeAl}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_2$), гематит (Fe_2O_3), оксид циркония (ZrO_2), кварц (SiO_2), рутил (TiO_2)	Лед, бонаттит, халькантит, билинит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), галотрихит ($\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), ангидрит, бассанит, гипс, ростит ($\text{Al}[\text{SO}_4](\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), хлориты, гематит, оксид циркония, кварц
1	Бонаттит, халькантит, ангидрит, бассанит, гипс, антлерит ($\text{Cu}_3[(\text{OH})_4/\text{SO}_4]$), гематит, оксид циркония, кварц, рутил, хлориты	Лед, ангидрит, бассанит, гипс, антлерит, хлориты, гематит, оксид циркония, кварц
2	Ангидрит, бассанит, гипс, хлориты, гематит, оксид циркония, кварц, рутил, арагонит (CaCO_3), малахит ($\text{Cu}_2[(\text{OH})_2\text{CO}_3]$, нитрат кальция ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), нитрат меди гексагидрат ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)	Лед, ангидрит, бассанит, гипс, антлерит, хлориты, гематит, малахит, оксид циркония, кварц, рутил, нитрат кальция, нитрат меди гексагидрат
3		

При понижении температуры до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в твердой фазе происходит образование льда, а также минералов, представленных галотрихитом $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$, билинитом $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$, а также роститом $\text{Al}[\text{SO}_4](\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Однако разнообразие водных соединений Cu, Fe и Al характерно лишь для области сильноокислых исходных значений (pH 0.5). Сульфаты кальция (ангидрит CaSO_4 , бассанит $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ и гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) образуют устойчивые соединения во всех режимах моделирования.

Результаты термодинамического моделирования (см. табл. 4) показали, что поскольку модель содержит “атмосферный” азот и, как сказано выше, определенное количество диоксида азота NO_2 , в области исходных кислых значений (pH 2, 3) растворов возможно выпадение нитратов меди $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Из сравнения результатов расчетов с диаграммой фазового равновесия $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 - \text{H}_2\text{O}$ [Киргинцев, 1972] сле-

дует, что в данном диапазоне температур от 0 до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ образование данных минералов вполне возможно.

Результаты модельных расчетов показывают, что все изменения основных физико-химических параметров растворов согласуются с процессами растворения, выщелачивания первичных минералов и отложения вторичных минеральных фаз.

ВЫВОДЫ

1. Методом физико-химического моделирования определен состав наиболее вероятных химических форм существования криогенных минералов, а также равновесных с ними газов и растворов, полученных в результате окислительного выщелачивания сульфидных руд с участием соединений азота. Парагенезисы вторичных минералов в целом соответствуют минеральным ассоциациям, обнаруженным в зонах окисления Удоканского месторождения.

2. Результаты лабораторных экспериментов [Павлюкова, Маркович, 2006] и физико-химического моделирования свидетельствуют о значительном влиянии соединений азота на химическое преобразование приповерхностных частей криолитозоны, а также различных техногенных продуктов (отвалов руд и пород, хвостов обогащения), являющихся активными источниками загрязнения природных вод тяжелыми металлами (в частности, медью). Установлено, что в присутствии азотистых соединений (HNO_2) извлечение меди из сульфидной руды увеличивается в 10–30 раз.

3. Полученные результаты позволяют в дальнейшем произвести количественные реконструкции геохимических процессов, сформировать их фактические и прогнозные картографические представления. Для этого необходимо использовать доступную метеорологическую информацию, результаты геохимического анализа отвалов горно-рудной промышленности и расчета их массы, а также цифровые модели рельефа, учитывающие резкую морфологическую расчлененность рассматриваемой территории [Демина и др., 2013].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ (МК-3747.2015.5).

Литература

- Блинов А.В., Паршин А.В., Костерев А.Н.** Особенности постановки геофизических методов поисков золотоурановых объектов в горных районах северного Забайкалья // Изв. СО РАН. Геология, поиски и разведка руд. месторождений, 2014, № 1, с. 55–60.
- Бычинский В.А., Костянецкая Ж.В., Чудненко К.В. и др.** Способы расчета и согласования низкотемпературных термодинамических свойств веществ // Геохимия, 2008, № 2, с. 210–214.
- Государственный доклад** “О состоянии и охране окружающей среды в Читинской области за 2006–2007 годы”. Чита, Экспресс-изд-во, 2008, 161 с.
- Гуревич В.М., Гавричев К.С., Горбунов В.Е. и др.** Низкотемпературная теплоемкость стронцианита SrCO_3 (к) // Геохимия, 2001, № 7, с. 744–751.
- Демина О.И., Паршин А.В., Федоров А.М., Шестаков С.А.** Методика создания корректной цифровой модели рельефа на основе открытых источников геоанных (на примере месторождения Бурал-Сарьдаг) // Георесурсы, 2013, т. 53, № 3, с. 36–40.
- Киргинцев А.Н.** Растворимость неорганических веществ в воде / А.Н. Киргинцев, Л.Н. Трушников, В.Г. Лаврентьева. Л., Химия, 1972, 248 с.
- Макаров В.Н.** Динамика техногенной миграции соединений азота в деятельном слое // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 65–69.
- Маркович Т.И., Птицын А.Б.** Неконтролируемое кислотное выщелачивание тяжелых металлов из сульфидных отходов // Химия в интересах устойчивого развития, 1998, № 5, с. 349–354.
- Недешев А.А., Фалейчик А.А., Фалейчик Л.М.** Математическое моделирование процессов загрязнения атмосферы в районе Удокана // География и природ. ресурсы, 2001, № 3, с. 114–120.
- Отчет** о предварительной экологической и социальной оценке проекта Удокан [Электронный ресурс], 2010. URL: <http://www.bgk-udokan.ru/Socialresponsibility> (дата обращения: 24.04.2014).
- Павлюкова В.А., Маркович Т.И.** Геохимические процессы в криогенных зонах окисления сульфидных месторождений с участием соединений азота // Химия в интересах устойчивого развития, 2006, т. 14, № 1, с. 89–93.
- Птицын А.Б.** Геохимия криогенных зон окисления / А.Б. Птицын, В.А. Абрамова, Т.И. Маркович, Е.С. Эпова. Новосибирск, Наука, 2009, 88 с.
- Правительство РФ** перенесло сроки разработки Удокана на 2022 год [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zabmedia.ru> (дата обращения: 16.04.2014).
- Рябин В.А.** Термодинамические свойства веществ. Справочник / В.А. Рябин, М.А. Остроумов, Т.Ф. Свит. Л., Химия, 1977, 392 с.
- Удокан:** геология, рудогенез, условия освоения / Отв. ред. А.Б. Птицын, Л.В. Замана, Г.А. Юргенсон и др. Новосибирск, Наука, 2003, 160 с.
- Фалыхов Р.** Больше БАМа // Газета.ру, 2013, 26 июля. URL: <http://www.gazeta.ru/business/2013/07/26/5511993.shtml> (дата обращения: 25.10.2013).
- Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В.** Инженерная экология: особенности гипергенных процессов в складированных горнопромышленных отходах // Инж. экология, 1999, № 4, с. 2–7.
- Чудненко К.В.** Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения / К.В. Чудненко. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2010, 287 с.
- Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C.** SUPCRT92: software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of mineral, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0 to 1000 °C // Computs. and Geosci., 1992, vol. 18, p. 899–947.
- Mercury L., Vieillard Ph., Tardy Y.** Thermodynamics of ice polymorphs and “ice-like” water in hydrates and hydroxides // Appl. Geochemistry, 2001, vol. 16, p. 161–181.
- Nordstrom D.K.** Chemical modeling of acid mine waters in the Western United States // Meeting Proc. USGS Water Res. Investig., 1991, Rep. No. 91–4034, p. 534–538.
- Yokokawa H.** Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // J. Nat. Chem. Lab. Indust., 1988, vol. 83, p. 27–121.

Поступила в редакцию
27 марта 2014 г.