КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ДЛЯ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ УДОКАНА)

Рыженко Б.Н., Лиманцева О.А.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия, E-mail: wri-lab@geokhi.ru

АННОТАЦИЯ: Метод термодинамического (равновесного) моделирования системы «вода-порода-газ» предлагается использовать для определения состава дренажного водного раствора, образующегося на рудных месторождениях, в частности на медном месторождении Удокан. Показано изменение составов дренажных вод в зависимости от характера водообмена.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Геохимическая оценка экологического состояния территории, планируемой под разработку рудного месторождения, заключается в оценке формирования и состава дренажных вод не только при разработке, но и после окончания добычных работ на срок в десятки лет. Для этих целей Лаборатория моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов ГЕОХИ РАН предлагает использовать методы термодинамического (равновесного) [3] и кинетико-термодинамического компьютерного моделирования [8].

1. ВВЕДЕНИЕ

Термин «кислотный дренаж» описывает кислые водные растворы, образующиеся при окислении сульфидных минералов рудных и угольных месторождений. Такие *металлоносные* растворы содержат компоненты и микроэлементы рудных и околожильных минералов *горной* породы.

Традиционно процесс окисления пирита (основного сульфида руд и пород) описывается суммарным уравнением [20]

согласно которому продуктами окисления являются осадок гидроокиси железа и серная кислота. О сложном механизме реакции (1) свидетельствуют исследования кинетики и участия в нем нескольких видов бактерий. При 25°C формальная константа скорости реакции окисления пирита зависит от концентрации растворенного кислорода и pH раствора $r = 10^{8.6} \text{ } \mu\text{M O}_2(\text{aq}) \text{ } \mu\text{M}^{-1} \text{ } \text{H}^+$.

Горная порода нейтрализует водный раствор и в настоящее время для измерения потенциала нейтрализации используются лабораторные методы, которые трудоемки и требуют времени. Эти процедуры заключаются в обработке про-

бы породы соляной кислотой и титровании избытка кислоты щелочью. Описание наиболее интересных и доступных для воспроизводства методов можно найти в [7]. Ниже приведены некоторые из них:

1. EPA (SOBEC) METHOD. Проба породы массой 2 г обрабатывается избытком соляной кислоты с обратным титрованием щелочью до pH 7. Нейтрализующий потенциал **NP** рассчитывают по соотношению масс веществ, участвующих в реакции: потребление x молей HCl соответствует нейтрализации $0,5x$ молей условного CaCO_3 . Содержание условного CaCO_3 пересчитывается в концентрацию (ppt). Кислотный потенциал определяется по формуле $\text{AP}(\text{ppt}) = S_{\text{сульфидная}} (\text{масс}\%) \times 31,25$. Множитель 31,25 вытекает из баланса масс реакции нейтрализации кислоты, образующейся при окислении пирита. Если результирующий потенциал равен разности $\text{AP} - \text{NP} > 0$, то кислота генерируется, если $\text{AP} - \text{NP} < 0$, то кислота не генерируется. Влияние других минералов (сульфидов, сидерита и др.) и бактериологических процессов учитывается уточняющими процедурами, описанными в ниже представленных методиках.

2. BC RESEARCH INC. INITIAL TEST PROCEDURE. Порция породы раздробленной (до минус 60 меш) и воздушно-сухой породы массой 10 г смешивается с 100 мл дистиллированной воды и взбалтывается приблизительно 15 минут до достижения нейтральной pH. Далее материал титруется 1 N серной кислотой до pH 3,5 до тех пор, пока для сохранения pH в течение 4 часов будет необходимо добавить менее 0,1 мл кислоты, так как выше pH 3,5 бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* неактивны.

3. BC RESEARCH INC. CONFORMATION TEST PROCEDURE. Рекомендовано увеличение продолжительности обработки пробы до 3-4 недель, применение серной кислоты нормальности 2-12 N, нагрев до 35°C, использование питательной среды.

4. COASTECH RESEARCH MODIFIED BIOLOGICAL OXIDATION TEST PROCEDURE. Методика аналогичная Research Inc. Conformation Test Procedure улучшена добавкой питательной среды в количестве, зависящем от содержания серы (от <4 до >15 %) и веса пробы.

5. LAPAKKO PROCEDURE FOR DETERMINATION ON NEUTRALIZING POTENTIAL OF METAL MINE WASTE является модификацией BC RESEARCH INC. INITIAL TEST PROCEDURE, заключающейся в дроблении пробы до 325 меш и титровании кислотой до pH 6,0 вместо 3,5.

6. STATIC NET ACID GENERATION (NAG) PROCEDURE. Навеска 2,5 г пробы породы, раздробленной до 200 меш, реагирует с 250 мл 15% H₂O₂ в 500 мл конической колбе, покрытой часовым стеклом, в хорошо проветриваемом помещении. Проба аккуратно нагревается (без кипения) в течение 2 часов, охлаждается и измеряется pH (NAG pH). Затем долить колбу дистиллированной водой до 250 мл и титровать до pH 4,5 раствором NaOH.

7. THE MODIFIED ACID BASE ACCOUNTING PROCEDURE FOR NEUTRALIZATION POTENCIAL (LAWRENCE). Несколько капель соляной 25% кислоты приливают к превращенной в пудру пробе массой 1-2 г. Далее проба переносится в 250 мл коническую колбу, в которую добавляют 90 мл дистиллированной воды. После добавления 1-2 мл 1N соляной кислоты оценивается интенсивность шипения (нет, слабое, среднее, сильное). В зависимости от результатов предварительного теста добавляется кислота. Через 24 часа проводится обратное титрование 0.5-1.0 N NaOH до pH 8.3. Нейтрализующий потенциал рассчитывается как содержание условного CaCO₃ в пробе.

8. PEROXIDE SIDERITE CORRECTION FOR SOBEK METHOD. Если в пробе содержится FeCO₃ (сидерит), то нейтрализующий потенциал завышается при использовании метода EPA (SOBEK) (например, при исследовании вскрышных пород угольных месторождений). Чтобы избежать ошибки перед процедурой обратного титрования кислоты щелочью предлагается добавить к исследуемой пробе небольшое количество 30% H₂O₂ для окисления Fe²⁺ до Fe³⁺. Добавление перекиси после титрования приведет к осаждению гидроокиси железа (щелочная среда).

9. PASTE pH METHOD. Смешивается 20 г воздушно сухой пробы и 20 мл дистиллирован-

ной воды и 5 секунд. Ввести электрод в контейнер на 10 минут и записать показания, после их стабилизации.

10. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ PH ВОДНОЙ ВЫТЯЖКИ СУСПЕНЗИИ ПРОБЫ ПОРОДЫ, помещенной в проточный реактор на срок в 20 недель.

Термин кислотный сток и выщелачивание металлов описывает генерацию кислотных сульфат- и металл-содержащих вод в результате окисления сульфидных минералов (главным образом пирита FeS₂). Данный процесс может происходить естественным путем в сульфидсодержащих толщах пород, но горнодобывающая деятельность ускоряет их ход, поскольку повышает вероятность обнажения и попадания сульфидных минералов под прямое воздействие воздуха и воды, активно ускоряющих естественные процессы.

В породе может быть несколько сульфидов, тогда уравнение их окисления в общем виде можно записать как

сульфид металла + воздух + вода → мобилизованный металл + соли + кислотность

Поскольку пирит не является распространенным жильным минералом (минералом вмещающих руды пород) на Удоканском месторождении, кислотообразующий потенциал отвальных пород Удокана низок. Однако, присутствие в месторождении сульфидов меди все же свидетельствует о наличии потенциала выщелачивания металлов как в ходе горных работ, так и после их прекращения. Последнее очень важно ввиду планируемой продолжительности (50 лет) и масштабов горных работ.

2. МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ ОЦЕНКИ КИСЛОТНОГО ДРЕНАЖА

Термодинамическое компьютерное моделирование минерализации дренажных вод опирается на выводы фундаментальной гидрогеохимии [4]. Формирование химического состава природных вод в земной коре определяется гидрогеологическими ситуациями, в которых проявляются сложившиеся физико-химические характеристики изучаемого объекта: (а) количественные отношения между массами взаимодействующих пород и вод (R/W), (б) химический (особенно по летучим элементам Cl, F, S, C) и минеральный состав пород, с которыми кон-

тактирует и взаимодействует вода, (в) термодинамическая открытость (закрытость) гидрогеохимической системы по CO_2 и O_2 , другим газам, (г) температура-давление существования рассматриваемой системы «вода-порода-газы». Петрохимический тип породы влияет на состав водной фазы [2] через скорость растворения минералов породы, особенно минералов-носителей летучих. В реальных гидрогеохимических системах R/W отношения являются функцией пористости пород, скорости движения подземных вод и, в целом, интенсивности и времени водообмена.

Моделирование кислотного дренажа сводится к компьютерному расчету равновесного состояния смеси порций породы (R) известного химического состава и воды (W). Отметим, что отношение (R/W) масс прореагировавших породы и воды описывает связь между минерализацией водного раствора и характером водообмена. Сравнением состава модельного раствора и минерализации реальных вод (от горных ручьев до глубинных вод) удалось [13] составить ориентировочную шкалу связи между R/W , минерализацией воды и водообменом: $R/W=0.001-0.01$ (горные ручьи), $R/W=0.01-0.1$ (ручьи, реки), $R/W=0.1-1$ (реки, поверхностные воды), $R/W=1-10$ (подземные воды), $R/W>10$ (пассивный водообмен), $R/W=100$ (застойный водообмен). На рис. 1 показана зависимость между R/W и модулем стока. Надеемся в дальнейшем уточнить слабо охарактеризованные участки кривой.

Используя программный комплекс HCh, разработанный Ю.В. Шваровым (кафедра геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова) [18], стало возможным оценить равновесное состояние системы «вода-порода-газы-органическое вещество» (pH , Eh , концентрации и формы существования компонентов в водном растворе, минеральные ассоциации) при заданных температуре, давлении, балансе масс инертных и летучести (парциальном давлении) вполне подвижных компонентов. Такие оценки, не принимающие во внимание кинетику химических реакций, справедливы для систем, в которых параметры существования и баланс масс неизменны на момент рассмотрения.

Необходимость учета скорости природных гидрогеохимических процессов в системах «порода-вода-газ» обусловлена, прежде всего, различием в скорости растворения различных минералов, образующих породу.

Рис. 1. Зависимость отношения масс R/W взаимодействующих породы (R) и воды (W) от модуля стока [4]. Типы объектов указаны по И.К. Зайцеву.

Ориентировочная оценка влияния этого различия выполнялась нами [4] введением множителя (кси), учитывающего во сколько раз поток вещества растворяющегося минерала меньше, чем поток Cl от хлор-несущих минералов этой же породы.

На примере исследования золоторудного месторождения Аметистовое (Камчатка) показано [12], что в силикатных вмещающих породах, минералы которых имеют относительно низкую скорость растворения, наиболее благоприятными для развития кислотного дренажа являются участки мелкодробленой рудной породы, находящиеся в режиме смены пассивного и активного водообмена. Пассивный водообмен (высокие R/W) благоприятствует накоплению продуктов окисления сульфидной серы в межзерновом пространстве породы. Активный водообмен (атмосферные осадки, таяние снега) способствует вымыванию продуктов окисления из породы и активному проявлению кислотных стоков. Важно отметить, что при пассивном водообмене в водной фазе накапливаются нормируемые микроэлементы растворяющихся минералов породы, их концентрация тем значительнее, чем выше отношения R/W . Следовательно, реальную опасность кислотного загрязнения природных вод месторождения представляют участки мелкодробленой рудной породы, находящиеся в режиме смены пассивного и активного водообмена. Пассивный водообмен благоприятен накоплению продуктов окисления сульфидной серы. Активный водооб-

мен – вымыванию продуктов окисления из породы и генерации кислотных стоков.

Принципиальное отличие природных термодинамически открытых систем от термодинамически закрытых было показано Д.С. Коржинским. В работах [14, 15] это отличие продемонстрировано для систем «вода-порода-газ». Для термодинамически закрытых систем «вода-алюмосиликаты» характерно образование щелочного водного раствора с восстановительным Eh потенциалом [1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 14, 21].

Переход термодинамически открытой (к атмосферному кислороду) в термодинамически закрытую систему демонстрируют лабораторные опыты Т.П. Беловой [12] с породами золоторудного месторождения Аметистовое (Камчатка). В системе, содержащей алюмосиликатные минералы + пирит, и открытой к атмосфере, в начале опыта происходит повышение pH водной фазы и образование H_2S . Редокс-потенциал водного раствора, определенный по соотношению H_2S/SO_4^{2-} , равен минус 0.305-0.310V. Произошло изменение свойств водной фазы системы «порода-вода», свидетельствующее о термодинамическом закрытии изучаемой системы по кислороду и, возможно, возникновении иного механизма растворения пирита на этом этапе (растворение пирита с образованием сероводорода и окисление сероводорода растворенным кислородом?).

3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОТНОГО ДРЕНАЖА

Для использования метода компьютерного моделирования кислотного дренажа необходим силикатный анализ пород на макро и микрокомпоненты. Для оценки концентраций микрокомпонентов можно применить обработку породы смесью сильных кислот (кислотная вытяжка) и деионизированной водой (водная вытяжка). Сравнение концентраций Na, K, Ca, Mg с концентрациями других элементов, образующих алюмосиликатные минералы не подтверждают предположение, что концентрации алюмосиликатных элементов в кислотной вытяжке близки к полному их содержанию в породе. Поэтому макросостав основных литологических типов пород Удоканского месторождения, необходимый для компьютерного термодинамического моделирования

взаимодействия воды с породами, был заимствован из работы [17]. К сожалению, в приведенных анализах сумма окислов на 1-4% меньше 100%, что свидетельствует о недоопределении каких-то (рудных?) компонентов породы. Как содержания микроэлементов в горных породах Удокана мы использовали результаты рентгенофазового анализа 10 проб пород, опубликованные компанией [ТОМС] ($n \cdot 10^{-4}\%$): Ag 0.07, As 35, Ba 820, Cd 0.13, Cr 23, Co 11, Hg 0.083, Mn 0.16, Mo 10, Ni 30, Pb 14, Se 0.05, Sr 130, Zn 32 и средние содержания в земной коре по [19]. Эти микроэлементы вводились в состав породы в форме сульфидных и/или оксидных минералов согласно их преобладающим минеральным формам: сульфиды: Cu, Fe, As, Mo, Cd, Hg, Pb и оксиды: Mn, Cr, Sr, Ba. Содержания Cu, Fe и породообразующих элементов взяты из табл. 1.

Для моделирования были выбраны три литологических типа пород Удокана: окварцованные песчаники, карбонатизированные песчаники и ариллиты.

Моделирование образования дренажного водного раствора было выполнено с породами состава, указанного в табл. 1, и водой состава H_2O , а также состава дождевой воды Сибирского Округа (мг/л): SO_4^{2-} 13.4, Cl⁻ 2.6, HCO_3^- 7.1, CO_3^{2-} , Na^+ 1.7, K^+ 1.0, Ca^{2+} 2.6, Mg^{2+} 2.5, pH 6.1 [16].

Ввиду незначительности массы вещества, растворенного в дождевой воде, влияние одной порции воды существенно только при низких R/W (горные ручьи). Однако, при фильтрации водного раствора с поверхности вглубь блока горной породы, происходит возрастание его минерализации. Как следует из уравнения (2) главный фактор, определяющий возникновение и состав дренажных вод – содержание сульфидов в минеральном составе горной породы. Для выявления влияния главного фактора, при моделировании варьировалось содержание пирита (%): 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0. Для выявления влияния атмосферного кислорода летучесть кислорода изменялась с шагом 10 порядков: от $lgfO_2 = -70$ до $lgfO_2 = -10$, имитируя степень раздробленности породы, и следовательно, доступности кислорода.

Таблица 1. Химический состав основных литологических типов пород оруденения месторождения Удокан

Породы	Содержание, масс. %											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	CO ₂	Cu	S
Кварцитовидные песчаники	68.86	0.53	11.60	1.76	3.12	0.88	2.12	2.93	2.88	0.78	2.09	0.54
Известковистые песчаники	58.48	0.45	8.84	0.99	2.76	0.93	10.41	2.29	2.26	6.30	2.31	0.96
Аргиллиты, алевролиты, алевропесчаники	59.56	0.68	16.60	4.35	2.83	2.00	1.18	1.88	1.88	5.57	0.24	1.23

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет взаимодействия воды с породой проводился для каждого литологического типа пород при следующих параметрах: температура 5°C и R/W=0.0001-100. Изменение отношения R/W происходило согласно формуле $R/W=100 \times 1.2^{(i-75)}$, где i-шаг моделирования.

Рассмотрение результатов моделирования, позволяет сделать следующие выводы:

1. Состав дренажного водного раствора слабо зависит от литологического типа породы (рис. 2, 3, 4), но существенно от содержания пирита в породе.

Рис. 2. Гидрохимический тип дренажных вод окварцованных песчаников с содержанием пирита 0,5 %.

Рис. 3. Гидрохимический тип дренажных вод карбонатизированных песчаников с содержанием пирита 0,5 %.

Рис. 4. Гидрохимический тип дренажных вод аргиллитов с содержанием пирита 0,5 %.

2. Высокое содержание сульфидной серы в составе породы (рис. 5) способствует образованию более кислого дренажного раствора с более высокой концентрацией SO₄, ионной силы (минерализацией). Последнее характерно для пород, обогащенных рудными сульфидами.

Рис. 5. Зависимость pH дренажного раствора от процентного содержания пирита в породе (на примере аргиллитов) на фоне R/W при lg f CO₂=-10.

3. Зависимость pH от величины R/W повторяется для всех литологических типов породы: pH увеличивается, оставаясь слабо щелочной, проходит через максимум и снижается до уме-

ренно кислой; чем больше содержание пирита в породе, тем резче проявляется максимум.

4. Величина pH и содержание сульфатной серы в составе дренажного раствора зависит от степени открытости породы к атмосфере, выражаемой в парциальной летучести O_2 , принятой при моделировании; эффект проявляется существенно при $lgfO_2 > -20$.

Таблица 2. Ионная сила (I), pH, Eh и содержание SO_4^{2-} в дренажном растворе при разных $lgPO_2$

R/W	0.17			
$lgPO_2$	I	pH	Eh (V)	SO_4^{2-} , мг/л
-70	0.008	7.089	-0.111	201.2
-60	0.008	7.084	0.027	201.8
-50	0.008	7.083	0.165	201.8
-40	0.008	7.083	0.303	201.8
-30	0.008	7.083	0.441	201.8
-20	0.008	6.52	0.61	202.2
-10	0.008	4.168	0.878	201.1
R/W	1.05			
-70	0.035	6.792	-0.095	909.4
-60	0.035	6.787	0.043	916.25
-50	0.035	6.786	0.182	916.1
-40	0.035	6.787	0.319	915.9
-30	0.035	6.787	0.457	915.9
-20	0.035	6.203	0.628	916.3
-10	0.035	3.838	0.896	905.52
R/W	6.49			
-70	0.186	6.489	-0.078	4701.86
-60	0.187	6.485	0.06	4745.02
-50	0.188	6.484	0.198	4743.38
-40	0.188	6.484	0.336	4742.25
-30	0.188	6.484	0.474	4742.31
-20	0.186	5.927	0.643	4776.99
-10	0.181	3.567	0.911	4666.88

5. Увеличение R/W, т.е. снижение водообмена (вследствие уменьшения раздробленности пород) с одной стороны, способствуют снижению кислотности дренажного раствора, но с другой стороны, по мере увеличения pH процесс нейтрализации кислоты минеральным веществом затухает. В результате наблюдается максимум pH и рост минерализации дренажного раствора.

6. При концентрации сульфидной серы менее 0.5% влияние ее концентрации почти полностью нивелируется (рис. 5) другими факторами, одним из которых может быть изменение состава равновесной минеральной ассоциации

(повелит, мусковит, клинохлор, церуссит, стильбит, тенорит, витерит).

Авторы признательны О.Л. Гаськовой (Институт минералогии им.В.С.Соболева СО РАН) и сотрудникам фирмы ШАНЭКО за привлечение нашего внимания к поставленной проблеме, помощь в поисках литературы и активное обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков Викт. Л., Рыженко Б.Н. Температурная эволюция поровых растворов, равновесных с породами разной основности // Геология рудных месторождений. – Т. 43. №3. 2001. – С. 208-226.
2. Борисов М.В., Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р. Влияние кислотно-основных свойств горных пород на состав равновесного водного раствора // Геохимия. № 5. 1984. – С. 705-713.
3. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. – М.: Изд-во МГУ. 1992. – 256 с.
4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука; 2-е издание. – М.: Центр-ЛитНефтеГаз. 2012. – 672 с.
5. Лаверов Н.П., Рыженко Б.Н., Барсуков Викт.Л. Редокси-потенциал гидротермальных систем в породах гранитоидного состава // Докл. РАН. Т. 349. № 2. 1996. – С. 243-248.
6. Лаверов Н.П., Рыженко Б.Н., Барсуков Викт. Л. Некоторые особенности буферных редокси-реакций в системах порода-вода // Докл. РАН, Т. 349. № 3. 1996. – С. 381-384.
7. Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В. Прогноз влияния кислотного дренажа на изменение гидрогеохимической обстановки в районах сульфидосодержащих месторождений // Геохимия. №10. 2015. – С. 945-960.
8. Мироненко М.В., Золотов М.Ю. Равновесно-кинетическая модель взаимодействий вода-порода // Геохимия, №1, 2012. – С. 3-9.
9. Рыженко Б.Н., Барсуков Викт.Л., Князева С.Н. Химические характеристики (состав, pH, Eh) систем вода-порода. 1. Система гранитоиды/вода // Геохимия. № 5. 1996. – С. 436-454.
10. Рыженко Б.Н., Барсуков Викт.Л., Князева С.Н. Химические характеристики (состав, pH, Eh) систем вода/порода. 2. Система основные породы/вода // Геохимия. № 12. 1997. – С. 1227-1254.
11. Рыженко Б.Н., Барсуков Викт.Л., Князева С.Н. Химические характеристики (состав, pH, Eh) систем вода-порода. 3. Система пироксенит/вода и дунит/вода // Геохимия. № 6. 2000. – С. 618-643.
12. Рыженко Б.Н., Белова Т.П., Рябенко А.Е., Черкасова Е.В. Оценка кислотного дренажа на рудных месторождениях // Геоэкология. №5. 2015. – С. 415-42.
13. Рыженко Б.Н., Крайнов С. Р. О влиянии соотношения реагирующих масс породы и воды на формирование химического состава природных водных растворов в системах открытых по CO_2 // Геохимия. № 9. 2000. – С. 803-815.
14. Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р., Барсуков Викт. Л., Шваров Ю.В. Флюиды земной коры. Химические свой-

ства (состав, pH, Eh) и определяющие их факторы // Петрология. – Т. 8. № 6. 2000. – С. 618-630.

15. Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В. Гидрогеохимические процессы в закрытых и открытых системах «вода-порода» // Петрология. – Т. 19. №1. 2011. – С. 75-82.

16. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков российского Заполярья // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – Т.328. №3. 2017. – С. 27-36.

17. Четкин В.С., Володин Р.Н., Наркелюн Л.Ф., Трубачев А.И., Быков Ю.В., Маркевич Г.Е. Месторождения Забайкалья. – М.: Геоинформмарк.1975. – Т.1. Кн.1. – С. 10-19.

18. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования динамических геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия. №8. 2008. – С. 890-897.

19. Ярошевский А.А. Распространенность химических элементов в земной коре // Геохимия. №1. 2006. – С. 54-62

20. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, Groundwater and Pollution. BALKEMA. 2005

21. Ryzhenko B.N., Barsukov Vict.L. Comparative Characteristics of Fluids in Equilibrium with Various Rocks at temperatures of 2-800°C and Pressures of 1-5000 bar // Geochem. Intern. 2000. (Suppl 2). – P. S143-S164.

THERMODYNAMIC SIMULATION OF WATER-ROCK-GAS SYSTEM FOR PREDICTION OF CHEMICAL COMPOSITION DRAINAGE SOLUTION OF UDOKAM COPPER ORE DEPOSIT

Ryzhenko B.N., Limantseva O.A.

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow,

ABSTRACT: Thermodynamic (equilibrium) technique of water-rock-gas system simulation is used for modeling the chemical composition of drainage solution formed on ore deposits. For Udokan copper deposit it is shown the dependence of the drainage water composition on the water exchange.