

Сибирское отделение Российской академии наук
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
Забайкальский государственный университет

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЫ С ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ

**Материалы третьей Всероссийской научной конференции
с международным участием**

20–25 августа 2018 г., г. Чита

Улан-Удэ
Издательство БНЦ СО РАН
2018

Siberian branch of the Russian Academy of Sciences
Institute of natural resources, ecology and Cryology SB RAS
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Transbaikal State University

THE GEOLOGICAL EVOLUTION OF THE WATER-ROCK INTERACTION

**Proceedings Of The
Third all-Russian Scientific Conference
With International Participation**

20–25 August 2018, Chita

Ulan-Ude
BSC SB RAS Publisher
2018

Редакционная коллегия:

ответственные редакторы: к. г.-м. н. Л. В. Замана, д. г.-м. н. С. Л. Шварцев
члены редколлегии: к. г.-м. н. В. А. Абрамова, д. г.-м. н. С. В. Алексеев, к. г.-м. н. С. В. Борзенко,
д. г.-м. н. С. Б. Бортникова, д. г.-м. н. А. М. Плюснин, д. х. н. Б. Н. Рыженко, Л. П. Чечель

Г 36 **Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами:** мат-лы третьей Всерос. конф. с междунар. участием 20–25 августа 2018 г., г. Чита [Электронный ресурс] / Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука, Забайкальский государственный университет; [отв. ред.: к. г.-м. н. Л. В. Замана, д. г.-м. н. С. Л. Шварцев]. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2018. – 484 с.

ISBN 978-57925-0536-0

В сборнике представлены доклады участников третьей Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», которая прошла в г. Чите 20–25 августа 2018 г. В докладах отражены результаты исследований по широкому кругу фундаментальных и прикладных проблем геологической и геохимической эволюции системы «вода – горная порода» как в естественных, так и в нарушенных человеческой деятельностью условиях. Значительное внимание уделено физико-химическому моделированию процессов формирования вод, изучению геохимии соленых вод и рассолов, термальных и минеральных вод, исследованиям изотопного состава и многим другим вопросам.

Для широкого круга специалистов в области геологии, гидрогеологии, гидрологии, гидрогеохимии, гидробиологии, а также преподавателей и студентов.

This proceeding contains reports presented by participants from all over Russia as well as international participants in a symposium "The Geological Evolution of the Water-Rock Interaction", held in Chita on August 20 – 25, 2018. The reports present research materials covering a wide range of issues relating to the fundamental and applied problems of geological and geochemical evolution of the system "water-rock", arising in both natural and disturbed by human conditions. Considerable attention is paid to the physical and chemical modeling of water formation, the study of the geochemistry of salt water and brines, thermal and mineral waters, studies of isotope composition and many other issues. Proceedings of this conference are of interest to a wide range of experts in the field of geology, hydrogeology, hydrology, hydrogeochemistry, hydrobiology, as well as for academic instructors and students.

УДК 556.3+556.5
ББК 26.326

Проведение конференции и подготовка ее материалов осуществлены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-20057), Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, а также спонсорской помощи Л. В. Заманы (ИПРЭК СО РАН), О. Е. Лепокуровой (ТФ ИНГГ СО РАН).

ISBN 978-57925-0536-0

© Коллектив авторов, 2018
© Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН, 2018
© Томский филиал Института нефтегазовой геологии
и геофизики им. А.А. Трофимука, 2018

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ВОДА–ТВЕРДАЯ ФАЗА» ПРИ ВЫВЕТРИВАНИИ ВМЕЩАЮЩИХ МЕДНО-ПОРФИРОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ПОРОД

Яблонская Д.А., Лубкова Т.Н., Шестакова Т.В., Николаева И.Ю.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, E-mail: daria.yablonskaya@gmail.com

АННОТАЦИЯ: В статье приведены результаты экспериментального моделирования взаимодействия «вода-твердая фаза» для сульфидсодержащих вмещающих пород медно-порфировых объектов Баимской рудной зоны (Западная Чукотка). Полученные данные составляют основу прогноза возможности возникновения кислых высокометалльных вод при формировании отвалов вмещающих пород в ходе промышленной отработки месторождений как на начальном этапе складирования, так и в долговременном периоде.

1. ВВЕДЕНИЕ

При выветривании сульфидсодержащих пород в зоне гипергенеза, за счет окисления железосодержащих сульфидных минералов, происходит образование агрессивных кислых вод с повышенной минерализацией и высокими содержаниями рудных и сопутствующих элементов [3]. Аналогичные процессы происходят при складировании в отвалы сульфидсодержащих геологических материалов (забалансовых руд и вмещающих пород) в результате их взаимодействия с атмосферными водами, приводя к формированию кислых высокометалльных дренажных стоков [6]. Инфильтрация и поступление таких вод в природные водотоки обуславливает изменение состава вод, снижение их качества и, в конечном итоге, деградацию компонентов природной среды.

В настоящее время прогноз состава потенциальных дренажных вод осуществляется на этапе разработки проекта освоения месторождения и базируется на результатах специальных геохимических тестов, суть которых заключается в: 1) расчетной оценке баланса потенциалов кислотообразования и нейтрализации; 2) лабораторном изучении процесса выветривания пород и формирования химического состава вод в ходе экспериментального моделирования взаимодействия «вода-твердая фаза» в статических и динамических условиях [5, 6].

2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Экспериментальные работы по моделированию состава дренажных вод проводились для вмещающих пород медно-порфировых объектов Баимской рудной зоны (Западная Чукотка), расположенной в юго-восточной части Олойского металлогенического пояса. Территория сложена верхнеюрскими вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями,

меднорудные объекты зоны локализованы в раннемеловых монцонитовых и диоритовых интрузивных комплексах, внедрение которых сопровождалось гидротермальными изменениями пород.

Порфировое Cu–Mo-оруденение пространственно связано с каливошпатовыми и кварц-серицитовыми зонами, включающими штокверки кварц-карбонатных жил и прожилков с борнитом, халькопиритом, молибденитом и пиритом, на отдельных участках развита зона вторичного сульфидного обогащения с борнитом и халькозином, второстепенные минералы представлены гематитом, сфалеритом, галенитом [2].

Повышенная сульфидность и объемы медно-порфирового оруденения определяют состав поверхностных вод территории. Дренирующие его водотоки характеризуются кислым ($pH=3,5-4,5$) сульфатным магниевым и кальциево-магниевым составом, средней – высокой минерализацией (0,5-2,2 г/л, максимально - 25 г/л). По соотношению комплекса металлов и величине pH эти воды являются кислыми высокометалльными. Воды фоновых водотоков нейтральные ($pH=6,4-7,3$), сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые с малой минерализацией (0,06-0,12 г/л) [1].

Кислотопродуцирующая способность вмещающих пород Баимской рудной зоны на несколько порядков превосходит их возможности по нейтрализации образующейся кислоты; соответственно существует высокая вероятность формирования кислых дренажных вод при формировании отвалов в ходе разработки месторождений [4].

Основой для прогноза состава потенциальных дренажных вод являются результаты статических и динамических тестов, проводимых для образцов (керн) представительных типов

вмещающих пород. Статические тесты по выщелачиванию (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) моделируют процессы активизации окисления сульфидов вмещающих пород при взаимодействии с атмосферными осадками, и в первом приближении состав полученных фильтратов соответствует составу потенциальных дренажных вод на начальном этапе складирования вмещающих пород. [6].

Моделирование состава дренажных вод в долгосрочном периоде хранения геологических материалов в отвалах осуществляется при проведении динамических тестов, имитирующих процессы выветривания в лабораторных условиях (Humidity Cell Test). Основой является еженедельное взаимодействие образца с водой с контролем температуры и влажности на протяжении всего эксперимента, сбор и анализ еженедельных фильтратов [5].

Определение химического состава однократных разовых (водные вытяжки) и еженедельных фильтратов проводилось в лабораториях кафедры геохимии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Основные характеристики фильтратов - pH и электропроводность - определялись методами потенциометрии (pH-метр «Эксперт-001», pH-тестер Hanna Instrument Checker-1) и кондуктометрии (кондуктометр портативный НМ Digital COM80).

Определение макрокомпонентов в фильтрах производилось с использованием методов объемного титрования (гидрокарбонаты, хлориды, сульфаты, ионы кальция, магния), атомно-абсорбционной спектроскопии (натрий, калий; спектрометр ContrAA 700, Analytik Jena, Германия, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ им. М.В. Ломоносова, аналитик ст.н.с. Пчелинцева Н.Ф.).

Для определения содержания микроэлементов порция разового или еженедельного фильтрата пропускалась через мембранный фильтр (диаметр пор 0,45 мкм, «Millipore», США) с последующей консервацией HNO_3 и анализировалась методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (масс-спектрометр высокого разрешения ELEMENT2, Thermo Finnigan; аналитик н.с. Николаева И.Ю.). Калибровка осуществлялась по растворам мультиэлементного стандарта (набор ICP-MS-68A, High-Purity Standards, США). Правильность измерений контролировалась использованием внутреннего стандарта (Indium ICP Standard CertiPUR 1002 мг/л $\pm 0,4\%$, Merk, Германия). Относительное

стандартное отклонение при определении большинства элементов не превышало 5%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты оценки состава потенциальных дренажных вод (табл. 1) свидетельствуют об отсутствии видимых признаков формирования кислотного дренажа.

На начальном этапе взаимодействия «вода-порода» как в статическом, так и в динамическом режиме значения pH фильтратов варьирует от 7,0 до 8,1, минерализация – 0,08-0,8 г/л. Основную роль в составе анионов играет сульфат-ион, его доля составляет от 59 до 93% (соответственно доля гидрокарбонат-иона не превышает 40%). Катионный состав фильтратов варьирует от магниевое-кальциевое-натриевого (гидролиз натрийсодержащих силикатов) до преимущественно магниевое-кальциевого. По содержанию микроэлементов дренажные воды на этом этапе преимущественно низкометаллические.

Исключением являются породы зоны пиритовой оторочки с повышенным содержанием сульфидов, водные вытяжки которых характеризуются низкими значениями pH (3,3-4,5), минерализацией 0,6-1,5 г/л, содержанием сульфат-иона в растворе на уровне 98-100 экв%.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что на начальном этапе формирования породных отвалов потенциальный состав дренажных вод будет аналогичен составу поверхностных вод водотоков территории (рис. 1).

Лабораторные исследования динамики состава потенциальных дренажных вод, проводимые для нескольких образцов пород Баимской рудной зоны, показывают, что и при достаточно долгом взаимодействии пород с водой формирования кислых высокометаллических стоков не происходит – величина pH еженедельных фильтратов за весь период эксперимента (70 недель) остается в околонейтральном диапазоне. Основной вынос легкорастворимых солей происходит в первые 4-6 недель; анионный состав меняется с сульфатного на гидрокарбонатный за счет растворения сульфатных солей и выноса сульфат-иона на начальной стадии выветривания.

Содержания микроэлементов в еженедельных фильтрах также снижаются и с десятой недели эксперимента в целом достигают уровня содержаний в природных водах фоновых водотоков территории (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика состава поверхностных вод и водных фильтратов из пород в районе Находкинского рудного поля (за исключением пород зоны пиритовой оторочки)

Элемент состава	Состав поверхностных вод [1]		Потенциальный состав дренажных вод				
	Фоновые	Около- рудные	Начальный этап		Долговременное хранение		
			Водная вы- тяжка	Неделя 1 - 5	Неделя 10	Неделя 30	Неделя 55
Макросостав, мг/л							
pH	6,4 - 6,7	4,4 - 4,7	7,0 - 7,8	7,1 - 8,1	7,0 - 7,5	7,1 - 7,6	7,0 - 7,2
HCO ₃ ⁻	22 - 72	3,7 - 6,1	4,7 - 42,9	21,3 - 47,3	18,5 - 30,6	19,5 - 32,5	17,6 - 26,9
Cl ⁻	3,2 - 4,3	3,2 - 3,9	3,8 - 13,4	-	-	-	-
SO ₄ ²⁻	17 - 77	55 - 559	32,2 - 438	26,2 - 513	5,9 - 59,9	10,7 - 45,6	8,7 - 58,0
Ca ²⁺	8,2 - 25	14 - 93	3,4 - 113	9,1 - 181,2	4,6 - 29,6	4,0 - 13,4	8,0 - 15,3
Mg ²⁺	1,1 - 9,2	5,8 - 96	0,2 - 27,3	1,2 - 38,6	2,0 - 5,0	0,6 - 7,8	0,4 - 10,1
Na ⁺	1,7 - 2,2	2,1 - 16	2,9 - 27,8	1,0 - 63,7	0,5 - 0,9	0,4 - 1,0	-
K ⁺	0,4 - 1,3	0,5 - 2,9	5,2 - 14,6	3,9 - 43,8	2,4 - 2,5	1,0 - 1,6	-
M	57 - 161	85 - 758	68 - 650	84 - 824	54 - 203	32 - 94	35 - 116
Микроэлементы, мкг/л							
Cu	3,3-11	360-3690	3-70	3-72	4,9-84	2,7-55	2,2-11
Mo	0,14-0,3	0,9-8,9	0,6-118	4-50	2,1-12,3	1,5-8,8	1,3-4,2
Zn	2,5-13	40-1020	2,3-283	1,5-6,2	1,7-0,3	1,8-8,3	2,1-7,3
Pb	0,1-0,8	2,8-20	0,3-5,0	0,3-7,9	0,5-8,6	0,3-4,7	0,1-1,2
Cd	0,01-0,03	0,7-2,9	0,04-1,7	0,05-0,5	0,03-0,2	0,02-0,1	0,05-0,1
Fe	9,0-20	131-2800	1,7-31	1,8-162	1,8-25	1,5-11	0,7-3,2
Mn	1,5-9,0	269-4210	30-1900	22-400	14-146	17-77	15-47
Sr	65-182	81-590	70-5260	390-5515	212-2360	151-991	75-202

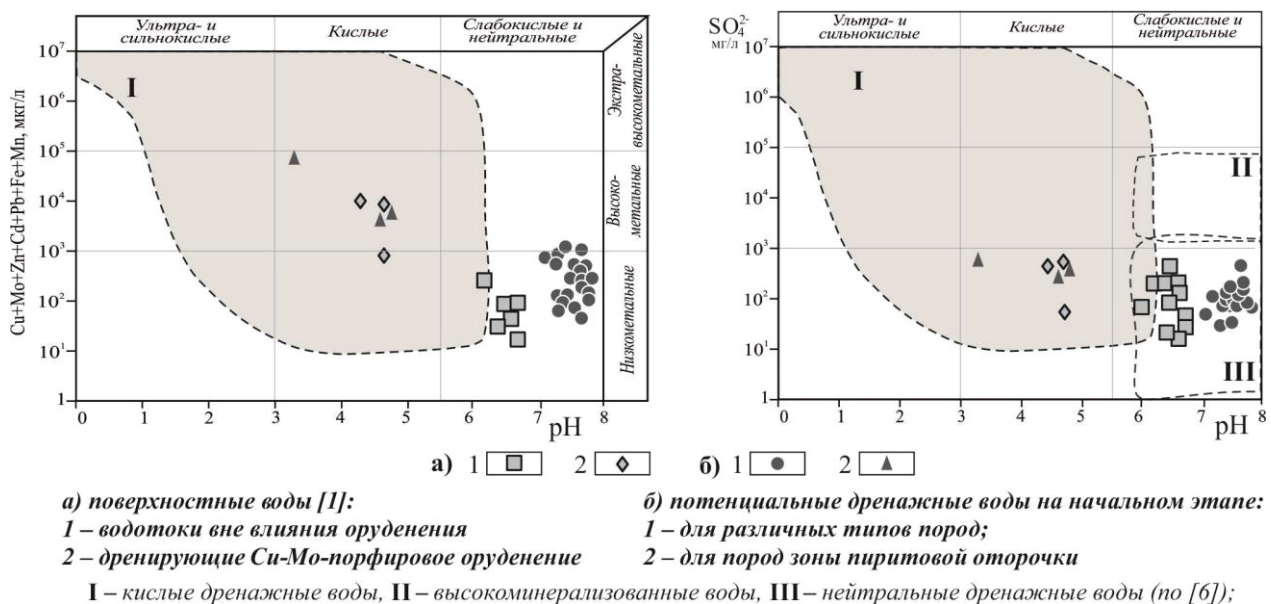


Рис. 1. Типизация вод по соотношению содержания комплекса типоморфных элементов и сульфат-иона с водородным показателем.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментального моделирования взаимодействия «вода-твердая фаза» при выветривании сульфидсодержащих пород Бамской рудной зоны получены прогнозные оценки состава дренажных вод. Установлено, что буферирующая емкость пород длительное

время будет обеспечивать сохранение около-нейтральных значений pH, что препятствует выносу большинства элементов. При этом складирование пород из зон пиритовых оторочек рудных тел может обуславливать формирование кислых высокометаллических дренажных вод уже в краткосрочном периоде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лубкова Т.Н. и др. Геохимические особенности состава поверхностных вод Находкинского медно-порфирового рудного поля, Чукотка // Вода: химия и экология. – 2013. № 12. – С. 29-34.
2. Марущенко Л.И. и др. Кварц-серицитовые метасоматиты и аргиллизиты Au-Мо-Си-месторождения Песчанка (Чукотка), Россия // Геология рудных месторождений. 2015. № 3. – С. 213-225.
3. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. Москва, Изд-во Академии Наук СССР, 1951. – 334 с.
4. Acid rock drainage prediction for host rocks of porphyry copper deposits in the Baimka ore trend (static and kinetic tests) / Yablonskaya D., Lubkova T., Shestakova T. et al. // Proceedings of 17 international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017. – "Alexander Malinov" Bulgaria, 2017. – Vol. 52 of Soils, Forest ecosystems. – P. 63-71.
5. ASTM D5744 – 13. Standard Test Method for Laboratory Weathering of Solid Materials Using a Humidity Cell. Copyright by ASTM International, United States. – 2013. – 23 p.
6. Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulfidic Geologic Materials. 2014. November. Available: <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>.

EXPERIMENTAL MODELING OF THE «WATER-SOLID PHASE» INTERACTION DURING THE WEATHERING OF THE HOST ROCKS OF PORPHYRY COPPER DEPOSITS

Yablonskaya D.A., Lubkova T.N., Shestakova T.V., Nikolaeva I.Y.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, E-mail: daria.yablonskaya@gmail.com

ABSTRACT: This study presents the results of experimental modeling of the "water-solid phase" interaction for sulfide-bearing host rocks of copper-porphyry deposits of the baimka ore trend (Western Chukotka). The obtained data are the basis for the forecast of the occurrence of acid rock drainage and metal leaching (ARD/ML) that develops during storage host rock at a dumps of mining, both at the initial stage of storage and in the long-term period.