

ИГЕМ РАН
СМУиС ИГЕМ РАН

БОРЬБА ИСПАНСКОГО НАРОДА -
ОБЩЕЕ ДЕЛО ВСЕГО ПЕРЕДАВНОГО И
ПРОГРЕССИВНОГО ЧЕЛОВЕЧЕСТВА.
ОПРУЖИМ СОУЩЕСТВИЕМ И ОНАЖЕМ
ПОМОЩЬ ИСПАНСКОМУ НАРОДУ!

ОКТОБРЯ
АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОМОНОСОВСКИЙ ИНСТИТУТ

ДА ЗАРАВСТВУЕТ ВЕЛИКОЕ
НЕПОВЕЛИМОЕ ЗНАМЯ
МАРКСА-ЭНГЕЛСА-ЛЕНИНА!
ДА ЗАРАВСТВУЕТ АРМИИЗМУ!

ДА ЗАРАВСТВУЕТ КИХ ГОДОВЩИНА
ВЕЛИКОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ Р СССР

НОВОЕ В ПОЗНАНИИ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

Труды молодых учёных,
посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН

Научное электронное издание

ИГЕМ РАН, Москва
2020 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук
(ИГЕМ РАН)

Новое в познании процессов рудобразования

Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН

Москва-2020

УДК 553+552+548/549+550.4+550.3+502/504+550.93

ББК 26.3

Н 74

Новое в познании процессов рудообразования: Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН - Электрон. дан. (1 файл: 21 Мб) - М.: ИГЕМ РАН, 2020.

В сборнике представлены Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук. Тезисы Трудов молодых учёных посвящены изучению различных вопросов геологии, минералогии и геохимии рудных месторождений, а также вопросам геоэкологии.

Редакторы: В.А. Петров, Е.Е. Амплиева, С.А. Устинов, Е.В. Ковальчук, С.В. Ковригина

Фото на обложке: Здание ИГЕМ РАН, 1936 г. – Архив ИГЕМ РАН;
Здание ИГЕМ РАН, 2020 г. – автор С.А. Устинов.

ISBN 978-5-88918-061-6

© Коллектив авторов, 2020
© ИГЕМ РАН, 2020
© СМУиС ИГЕМ РАН, 2020

Проблемы прогноза развития кислотного дренажа при освоении сульфидсодержащих месторождений (на примере Чукотки)

Филатова О.Р.¹

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, orlova8313@yandex.ru

Значительные запасы руд черных и цветных металлов сконцентрированы в сульфидных месторождениях, освоение которых приводит к серьезным экологическим проблемам, связанных с образованием кислых сульфатных высокоминерализованных вод, загрязняющих поверхностные и подземные водные ресурсы и угнетающих сопряженные компоненты природных экосистем. Окисление сульфидсодержащих геологических материалов происходит как при естественном их нахождении в зоне гипергенеза, так и при хранении в отвалах. При этом главную роль в процессе генерации кислоты играют железосодержащие сульфиды, в первую очередь, пирит.

Основой прогноза процессов образования кислоты при окислении геологических материалов является оценка баланса между кислотопродуцирующими и нейтрализующими свойствами пород, слагающих территорию. В настоящее время для решения задач, связанных с прогнозом кислотного дренажа, используются прямые (инструментальные) и косвенные (геохимические тесты) методы анализа. Прямые методы анализа (оптическая микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, сканирующая электронная микроскопия и др.) позволяют получить конкретную информацию о минералогическом составе пород и охарактеризовать объемное содержание кислотообразующих и нейтрализующих минералов.

Косвенная оценка возможности развития процессов кислотного стока осуществляется согласно рекомендациям Руководства по прогнозу химического состава вод, дренируемых сульфидсодержащие геологические материалы (GARDGuide, 2014), на этапе разведки месторождений и включает проведение статических и кинетических геохимических тестов. Статические тестирования проводятся на начальном этапе исследований для определения общего потенциала кислотообразования геологических материалов с помощью расчетных и экспериментальных методов. Кинетическое тестирование представляет собой имитацию выветривания пород и руд в лабораторных условиях и направлено на установление скорости процессов кислотообразования и выщелачивания металлов в долговременном периоде. Как правило, кинетические тестирования проводятся после статических тестов для образцов с выявленными кислотопродуцирующими свойствами.

В настоящей работе приводятся результаты прогнозной оценки развития процессов кислотного дренажа при освоении меднопорфировых месторождений Баимской площади и золотосеребряных рудопроявлений Водораздельной площади, расположенных в Чукотском автономном округе (Северо-Восток России).

Баимская площадь приурочена к позднеюрскому-раннемеловому островодужному вулканоплутоническому комплексу Алазейско-Олойской складчатой системы. К рудоконтролирующим разломам северо-западного субмеридионального направления (Восточный, Веснинский) примыкают зоны повышенной трещиноватости, вмещающие штокверки Cu-Mo-порфирового оруденения (месторождение Песчанка и проявления Находкинского рудного поля).

Сульфидная минерализация представлена преимущественно пиритом, халькопиритом, борнитом, молибденитом, блеклыми рудами, на некоторых участках обнаружен халькозин. Реже встречаются сфалерит, галенит, самородная медь. Гидроокислы железа и марганца, халькозин, азурит, малахит, хризоколла, гематит образуют гипергенную зону мощностью до 15 м. Среди жильных минералов преобладают кварц, кальцит, доломит, гипс, в меньшей степени альбит и калиевый полевой шпат.

Водораздельная площадь входит в состав Верхне-Раучуанской рудной зоны Илринейского рудного района. На территории развиты раннемеловые кислые вулканы

Тытыльвеевской свиты (дациты, риодациты, игнимбриты, кластолавы и лавы андезитов, пачки и пласты туфов и туфобрекчий среднего состава), которые прорываются интрузиями различных фаз Илirianского комплекса субщелочных позднемеловых гранитов. Размещение прожилково-вкрапленной золотосульфидной минерализации контролируется региональными разломами и связано с телами эксплозивных, тектонических и гидротермальных полимиктовых и мономиктовых брекчий. Золото-сульфидное оруденение Водораздельной площади разделяется на два промышленных типа руд: жильные золото-серебро-теллуридные и вкрапленные, прожилково-вкрапленные и жильные золото-серебро-мышьяковые.

В рудах присутствуют три сменяющие друг друга минеральные ассоциации: пирит-арсенопиритовая, полиметаллическая и золото-серебро-теллуридная. Ранняя рудная минерализация представлена пиритом, халькопиритом, сфалеритом и галенитом, а на эту ассоциацию накладывается более поздняя золото-серебро-теллуридная, включающая гессит, петцит, алтаит, самородное золото. Основным жильным минералом является кварц (80-90%), также присутствуют серицит, кальцит, адуляр, хлорит (Николаев и др., 2013).

Геохимические тесты для сульфидсодержащих геологических материалов проводились для 75 образцов керна разведочных скважин Баймской и Водораздельной рудных площадей.

Потенциал формирования кислотного стока в статическом варианте оценивался по результатам определения кислотно-основного баланса геологических материалов (Acid Base Accounting - АВА-тест), включающего: 1) измерение рН пасты образцов, 2) анализ содержаний сульфидной серы ($S_{\text{сульфид}}$) и углерода карбонатов ($C_{\text{карб}}$) (ИК-спектроскопия, анализатор LECO), 3) расчет кислотопродуцирующего и нейтрализующего потенциалов (КП и НП), 4) расчет коэффициента потенциала нейтрализации (КПН), равного отношению НП к КП. Полученные значения КПН позволили провести классификацию пород по склонности к генерации кислотного стока: 1) потенциально кислотопродуцирующие; 2) с неопределенной способностью к генерации кислоты; 3) некислотопродуцирующие породы (GARDGuide, 2014).

Результаты расчетного АВА-теста верифицировались экспериментальными определениями нейтрализующего потенциала ($\text{НП}_{\text{эксп}}$) методом объемного титрования (Гаськова, 2007, с изм.) и фактической кислотности путем постадийного ускорения окисления сульфидов сильным окислителем (перекись водорода) с последующим определением фактического количества продуцируемой кислоты методом потенциометрического титрования (NAG-тест, Stewart, 2006).

Кинетическое тестирование проводилось согласно методике ASTM D5744–13 (Humidity Cell Test, протокол В) для 10 образцов пород и руд и заключалось в еженедельном взаимодействии образцов керна (раздробленном до размера $<6,3$ мм) с фиксированным объемом дистиллированной воды с последующим сбором и анализом фильтрата. Определение рН, минерализации и макросостава фильтратов методами потенциометрии, кондуктометрии и объемного титрования, микроэлементов методом ИСП-МС проводилось на базе лабораторного комплекса кафедры геохимии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

На начальном этапе исследований были выполнены статические тесты (Стрильчук, 2019). Значения $\text{pH}_{\text{пасты}}$ вмещающих пород изученных участков находятся в слабощелочной (pH 6,8 – 9,2) области, что связано с растворением карбонатных минералов в процессе подготовки пасты. Минимальными значениями $\text{pH}_{\text{пасты}}$ (pH 3,6 – 5,4) отличаются туфоалевролиты зоны пиритовой оторочки Баймской площади, что обусловлено значительным содержанием пирита и халькопирита в образцах – до 35%.

Содержание углерода карбонатов ($C_{\text{карб}}$) для большинства образцов обеих площадей составляет от 0,3% до 0,8%. Минимальное содержание установлено для туфоалевролитов зоны пиритовой оторочки ($C_{\text{карб}} = 0,09\%$) Баймской площади, максимальное - для брекчий и дацитов Водораздельной площади (1,0 - 1,1%).

Основной формой серы для вмещающих пород и руд является сульфидная: от 4 до 10% для вмещающих пород Баймской площади (за исключением туфоалевролитов зоны пиритовой оторочки – более 19%). Вмещающие породы Водораздельной площади характеризуются содержанием серы до 4% (минимально - в риолитах, от 0,03 до 0,11%), а руды – до 6%.

Породы Баимской площади характеризуются высокими значениями КП (в среднем 170 – 350 кг CaCO₃/т) и относительно невысокими значениями НП (в среднем 20 – 70 кг CaCO₃/т). Туфоалевролиты зоны пиритовой оторочки имеют максимальное значение КП (740 кг CaCO₃/т) и минимальное значение НП (7 кг CaCO₃/т).

Геологические материалы Водораздельной площади характеризуются меньшими значениями КП по сравнению с Баимской площадью: для низкосортных руд КП составляет 70 – 160 кг CaCO₃/т, для вмещающих пород - от 45 до 75 кг CaCO₃/т. Нейтрализующий потенциал варьирует от 70 до 90 кг CaCO₃/т, а образцы руд обладают наименьшей нейтрализующей способностью – значения НП не превышают 50 кг CaCO₃/т.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что породы Баимской площади характеризуются высокой кислотопродуцирующей способностью при относительно низкой нейтрализующей емкости, что относит их к потенциально кислотопродуцирующим. На территории Водораздельной площади присутствуют породы как склонные к генерации кислоты, так и породы с частичным или полным отсутствием кислотопродуцирующих свойств. Рудные образцы, характеризуемые относительно высокими содержаниями серы и небольшими содержаниями углерода, относятся к категории кислотопродуцирующих (рис.1).

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений НП свидетельствует, что последние несколько ниже реальной буферной емкости пород, обусловленной не только конгруэнтным растворением карбонатных фаз, но и инконгруэнтным растворением минералов силикатной матрицы исследуемых пород.

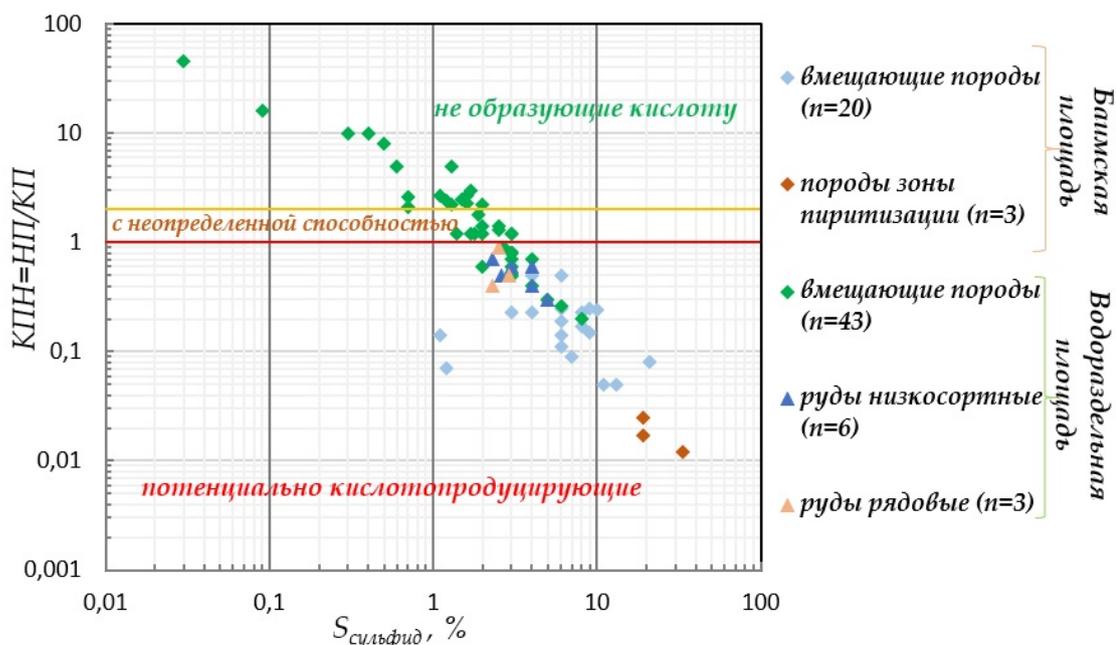


Рисунок 1. Распределение вмещающих пород и руд Баимской и Водораздельной площадей по склонности к кислотообразованию.

Полученные экспериментально значения фактической кислотности также ниже расчетных значений КП, что обусловлено присутствием в породах не содержащих железо сульфидов, при окислении которых не происходит образования кислоты, а также одновременным протеканием процесса нейтрализации образующейся кислоты.

Результаты статических тестов свидетельствуют, что породы, вмещающие высокосульфидный медно-порфировый тип оруденения, более склонны к формированию кислотного дренажа, чем породы, локализующие низкосульфидные золото-серебряные руды. Таким образом, при размещении в отвалах на поверхности все типы вмещающих пород Баимской рудной зоны могут явиться причиной начала процессов кислотного дренажа за счет окисления сульфидов атмосферными осадками.

По результатам статических тестов были выбраны образцы для кинетического тестирования:

- 3 образца вмещающих пород Баимской площади с содержанием сульфидной серы от 3 до 6% и низким значением КПН (0,14 - 0,25);

- 5 образцов вмещающих пород Водораздельной площади с низким содержанием $S_{\text{сульфид}}$ (1,2 – 3%); для андезитов КПН > 1 (1,8 – 2,4), для дацитов и брекчий КПН < 1 (0,5 – 0,9);

- 2 образца низкосортных руд Водораздельной площади с содержанием сульфидной серы от 2,6 до 5% и низким значением КПН (0,3 – 0,5).

В настоящее время, несмотря на высокий потенциал кислотообразования и значительный период проведения эксперимента (4 года), формирование кислотного стока не наблюдается, образуемые в ходе эксперимента фильтраты характеризуются околонеитральными и слабощелочными значениями водородного показателя (рН 7.0-8.0).

В первые 4-6 недель эксперимента происходит основной вынос легкорастворимых солей: вымываются К и Na, выводится сульфат-ион за счет растворения сульфатных минералов, электропроводность фильтратов варьирует от 500 до 1000 мкСм/см. В дальнейшем минерализация фильтратов снижается до 100-200 мкСм/см, основными ионами становятся гидрокарбонат-ион и ион кальция. Вследствие отсутствия кислого стока наблюдается слабый вынос рудных и сопутствующих элементов из пород и руд: вымываются элементы, способные мигрировать в околонеитральных и слабощелочных условиях (медь, молибден, алюминий). Концентрации других элементов в еженедельных фильтратах стабильны или постепенно уменьшаются с течением времени.

Таким образом, наиболее распространенное для прогноза процессов кислотного дренажа статическое тестирование не всегда позволяет получить достоверную оценку кислотопродуцирующих свойств геологических материалов.

Определение кислотопродуцирующего потенциала расчетным способом приводит к завышению его значений в результате учета сульфидной серы не кислотопродуцирующих минералов. При расчете НП не учитывается нейтрализующий эффект силикатной матрицы пород. Кроме того, в природе отсутствуют жесткие окислительные условия, способные за короткий период вызвать полное окисление сульфидных минералов. В связи с этим применение расчетных значений НП и КП приводит к завышению возможности развития кислотного дренажа при складировании геологических материалов.

Некорректность использования расчетных значений НП и КП подтверждается кинетическим тестированием в долговременном периоде, в ходе которого не произошло образования кислых высокоминерализованных вод. Для точного прогноза развития кислотного дренажа необходимо применять не только косвенные (геохимические) методы, но и прямые методы анализа, позволяющие определить минералогический состав и соотношения сульфидных, карбонатных и силикатных минералов.

Гаськова Л.О., Бортникова С.Б. К вопросу о количественном определении нейтрализующего потенциала вмещающих пород // Геохимия. 2007. № 4. С. 461-464.

Золото-теллуридная минерализация Западной Чукотки: минералогия, геохимия и условия образования / Николаев Ю.Н., Прокофьев В.Ю., Аплеталин А.В., Власов Е.А., Башеев И.А., Калько И.А., Комарова Я.С. // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. №2. С. 114 – 144.

Стрильчук Н.А. Прогноз развития процессов кислотного дренажа при освоении сульфидных месторождений Северо-Востока России // Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». 8-12 апреля 2019 г. М., 2019.

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.

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>.

Stewart W., Stuart M., Smart R. Advances in acid rock drainage (ADR) characterization of mine wastes // Journal American Society of Mining and Reclamation (ASMR). 2006. P. 2098 – 2119. DOI: 10.21000/JASMR06022098

Научное электронное издание

Коллектив авторов

Новое в познании процессов рудообразования
Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН

Утверждено к использованию Учёным советом ИГЕМ РАН: 16.12.2020

Гарнитура Times New Roman

Ответственный редактор И.А.Чижова



Подписано к использованию 16.12.2020 г.
Тираж 300 экз. Заказ № 20-2э.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук
(ИГЕМ РАН)
119017, Москва,
Старомонетный пер., 35