

**ИГЕМ РАН
СМУиС ИГЕМ РАН**



НОВОЕ В ПОЗНАНИИ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ

**Сборник материалов
XIII Российской молодёжной
научно-практической Школы
Научное электронное издание**

**25 - 29 ноября 2024 г.
ИГЕМ РАН, Москва**

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

Новое в познании процессов рудобразования

Тринадцатая Российская молодёжная научно-практическая школа

25 – 29 ноября 2024 г.

Москва-2024

УДК 553+552+548/549+550.4+550.3+502/504+550.93
ББК 26.3
Н 74

Новое в познании процессов рудообразования: Тринадцатая Российская молодёжная научно-практическая Школа, Москва, 25 – 29 ноября 2024 г. Сборник материалов [Электронный ресурс] - Электрон. дан. (1 файл: 27,7 Мб) - М.: ИГЕМ РАН, 2024.

В сборнике представлены материалы Тринадцатой Российской молодежной научно-практической Школы «Новое в познании процессов рудообразования». Пленарные лекции и доклады посвящены изучению различных вопросов геологии, минералогии и геохимии рудных месторождений, а также вопросам геоэкологии. Задача Тринадцатой Школы – знакомство студентов, аспирантов и молодых специалистов с новейшими достижениями в изучении процессов рудообразования.

Редакторы: В. А. Петров, Е. Е. Амплиева, Е. В. Ковальчук, Вл. Б. Комаров, М. М. Комарова, С. А. Устинов, А. А. Усачева

Фото на обложке – Е. Е. Амплиева

© Коллектив авторов, 2024
© ИГЕМ РАН, 2024
© СМУиС ИГЕМ РАН, 2024

Прогнозная оценка формирования кислотного дренажа при освоении медно-порфировых объектов Баимской рудной зоны (Северо-Восток России)

Филатова О. Р.¹, Лубкова Т. Н.¹, Яблонская Д. А.¹

¹МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, filatovaor@my.msu.ru

Важнейшим источником меди и молибдена с попутным извлечением золота, серебра, рения, в отдельных случаях платиноидов, являются медно-порфировые месторождения (Sillitoe, 2010). Освоение Мо-Си-порфировых месторождений приводит к формированию на дневной поверхности значительных по объему и площади отвалов сульфидсодержащих геологических материалов, подверженных процессам выветривания. Окисление сульфидов (в первую очередь, пирита) приводит к образованию кислых дренажных вод с повышенной минерализацией и сверхнормативным содержанием токсичных металлов. При смешении таких дренажных вод с природными водотоками территории ухудшается качество водных ресурсов и возрастает неблагоприятное воздействие на сопряженные компоненты окружающей среды.

Оценка рисков формирования кислых дренажных вод основывается на определении кислотопродуцирующей и нейтрализующей способности геологических материалов. В настоящее время главным инструментом прогноза развития кислого дренажа являются геохимические тесты в статическом и кинетическом режиме (Price, 2009). До начала отработки месторождения в качестве объекта геохимического тестирования выступает керн скважин разведочного бурения, являющийся образцом геологических материалов, которые в дальнейшем будут складированы в отвалы.

В данной работе приведены результаты оценки кислотно-основного баланса вмещающих медно-порфировое оруденение пород на примере объектов Баимской рудной зоны, являющейся частью Олойской металлогенической зоны. Развитое на исследуемой территории Au-Мо-Си-порфировое оруденение приурочено к раннемеловому сиенит-монцонитовому егдыкгычскому комплексу, интрузивные тела которого прорывают позднеюрские вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы. Комплекс сложен диоритами, монцодиоритами, сиенитами, а также монцодиорит-порфирами и кварцевыми монцодиорит-порфирами. Интрузивные тела и вулканогенно-осадочные породы затронуты процессами метасоматических изменений, представленных калишпатизацией, серицитизацией, аргиллизацией и пропилитизацией. Рудные тела приурочены к штокам и дайкам монцодиорит-порфиров и кварцевых монцодиорит-порфиров, представлены зонами прожилково-вкрапленных руд и штокверков кварцевых жил и кварц-карбонатных прожилков субмеридионального простирания. Положение рудных тел обусловлено наличием крупных разломов (Весеннинский, Восточный), к которым примыкают вмещающие оруденение зоны повышенной трещиноватости. К главным рудным минералам относятся пирит, борнит и халькопирит, реже встречается молибденит. В рудопрооявлениях поля Находка развиты галенит, сфалерит, блеклые руды, а также присутствует слабо выраженная зона вторичного сульфидного обогащения (Николаев и др., 2016).

Геохимические тесты проводили для 25 образцов керна 8 разведочных скважин (месторождение Песчанка (6 образцов) и рудопрооявления Находкинского рудного поля (19 образцов)), представленных монцодиоритами, монцодиорит-порфирами, диоритами, андезитами, вулканогенно-осадочными разностями и породами зоны пиритизации, отобранными с глубин 60-280 м. Исследуемые вмещающие породы по петрохимическому составу в целом близки к среднему составу верхней части земной коры (Rudnick, 2003), хотя в отдельных разностях пород наблюдается обеднение по оксидам кальция и магния. Вследствие присутствия в образцах сульфидной минерализации, которая представлена преимущественно пиритом и халькопиритом, содержание железа повышено относительно среднего содержания в земной коре. Вмещающие породы различаются по содержанию рудных и сопутствующих компонентов:

содержание Cu варьирует от 0.04 до 4.4%, Mo – от 10 до 3000 мг/кг, Pb – от 20 до 3800 мг/кг, Zn – от 20 до 7000 мг/кг.

Геохимическое тестирование включало определение кислотно-основного баланса геологических материалов (Acid Base Accounting – АВА-тест) и экспериментальное определение кислотопродуцирующей способности методом прямого окисления сульфидов пероксидом водорода (Net Acid Generation - NAG-тест).

Определение кислотно-основного баланса геологических материалов содержало следующие этапы: измерение pH пасты образцов, определение содержания общей серы и сульфидной серы, содержание карбонатного углерода, расчет кислотопродуцирующего и нейтрализующего потенциалов (КП и НП), коэффициента потенциала нейтрализации ($KPN=NП/КП$) и фактического кислотопродуцирующего потенциала ($ФКП=КП-НП$). По величине КПН проводилась классификация вмещающих пород по склонности к образованию кислых дренажных вод: потенциально кислотопродуцирующие ($KPN<1$); с неопределенной способностью к генерации кислоты ($1<KPN<2$); некислотопродуцирующие породы ($KPN>2$) (GARDGuide, 2014). По величине ФКП в настоящее время нет единой классификации геологических материалов; в данном исследовании принято одно из реперных значений, приведенных в работе (Еделев, 2013), согласно которому геологические материалы могут формировать кислые дренажные воды при $ФКП> 20$ кг $CaCO_3/т$. По результатам пероксидного эксперимента также были ранжированы исследуемые вмещающие породы: при $NAG-pH <4.5$ ед. породы относятся к категории потенциально кислотопродуцирующих, а при $NAG-pH >4.5$ ед. – к категории некислотопродуцирующих (AMIRA, 2002).

По данным АВА-теста выявлено, что большая часть исследуемых вмещающих пород характеризуются околонеutralными значениями $pH_{пасты}$ (от 6,8 до 8,2 ед.). Однако $pH_{пасты}$ пород зоны пиритизации варьирует от 3,6 ед. до 5,4 ед., что связано со значительным содержанием пирита и халькопирита в образцах и растворением уже имеющихся продуктов выветривания. Для андезитов установлены слабощелочные значения $pH_{пасты}$ (pH в среднем 8,8 ед.). Содержание общей серы варьирует от 2,2 % в монцодиоритах до 12% в диоритовых порфиритах. Крайне высоким содержанием $S_{общ}$ характеризуются породы зоны пиритизации (10-20%). Сера в исследуемых образцах преимущественно находится в сульфидной форме, однако в отдельных разностях пород (диоритовые порфириты) доля $S_{сульфид}$ от $S_{общ}$ составляет около 10%, что связано с наличием гипсовых включений. Содержание карбонатного углерода ($S_{карб}$) в породах Баимской рудной зоны в среднем варьирует от 0,1 до 0,8%. Породы зоны пиритизации характеризуются минимальным содержанием $S_{карб}$ (0,07-0.10%), а андезиты – максимальным содержанием $S_{карб}$ (0,7-1,2%).

По величине $S_{сульфид}$ был рассчитан кислотопродуцирующий потенциал (КП). Вмещающие породы в целом характеризуются высокими значениями КП (от 63 до 328 кг $CaCO_3/т$), а для пород зоны пиритизации величина КП составила 297-516 кг $CaCO_3/т$. Невысоким потенциалом кислотопродуцирования отличаются диоритовые порфириты (минимальный КП - 17 $CaCO_3/т$). Величина нейтрализующего потенциала была рассчитана по содержанию $S_{карб}$, а также определена экспериментально. Поскольку экспериментальное определение НП учитывает вклад как карбонатных, так и силикатных минералов в общую нейтрализующую емкость пород, то при дальнейших расчетах были использованы экспериментально полученные значения НП. Породы Баимской площади в целом обладают невысокой нейтрализующей способностью (от 6 до 60 кг $CaCO_3/т$). Максимальной нейтрализующей емкостью характеризуются андезиты (НП в среднем 71 кг $CaCO_3/т$).

По величинам КП и НП были рассчитаны значения коэффициента потенциала нейтрализации и фактического кислотопродуцирующего потенциала. По показателю КПН все исследуемые вмещающие породы относятся к категории потенциально кислотопродуцирующих (значения $KPN<1$). Минимальные значения КПН установлены для пород зоны пиритизации ($KPN 0,03-0,05$). По величине ФКП большая часть исследуемых геологических материалов относятся к категории склонных к формированию кислых вод ($ФКП>20$ кг $CaCO_3/т$), однако отдельные образцы попадают в группу с неопределенной способностью к генерации кислого

стока ($-20 < \text{ФКП} < 20$ кг $\text{CaCO}_3/\text{т}$). Обобщенные результаты определения кислотно-основного баланса вмещающих пород представлены в таблице 1. Таким образом, по результатам статического тестирования вмещающие Мо-Си-порфировое оруденение породы Баимской рудной зоны обладают высокой склонностью к формированию кислотного дренажа.

Таблица 1. Результаты определения кислотно-щелочного баланса вмещающих оруденение пород Баимской рудной зоны

Тип пород	$\text{pH}_{\text{пасты}}$	$\text{S}_{\text{сульфид}}$	$\text{C}_{\text{карб}}$	КП	НП	ФКП	КПН
		%					
монцодиориты ($n=6$)	8.2	4.2	0.1	132	24	108	0.2
монцодиорит-порфиры ($n=2$)	7.9	2.3	0.6	71	43	28	0.6
диориты ($n=3$)	8.1	3.2	0.7	99	49	50	0.5
андезиты ($n=4$)	8.8	5.8	0.8	180	71	109	0.5
диоритовые порфириты ($n=5$)	7.2	2.8	0.4	86	30	56	0.5
вулканогенно-осадочные породы ($n=2$)	8.0	3.5	0.5	109	49	60	0.5
породы зоны пиритизации ($n=3$)	4.7	11.8	0.1	370	13	357	0.04
среднее ($n=25$)	7.6	4.8	0.4	148	38	110	0.3

Для оценки фактической кислотопродуцирующей способности вмещающих оруденение пород и верификации данных, полученных в ходе статического тестирования, был проведен пероксидный эксперимент. По результатам NAG-теста большая часть сульфидсодержащих геологических материалов относится к категории кислотопродуцирующих (для 22 образцов NAG- $\text{pH} < 4.5$ ед.). Необходимо отметить, что для трех исследуемых образцов пород NAG- pH составляет 4.6-5.4 ед., что, вероятно, обусловлено присутствием в породах различных сульфидных минералов.

Сравнение данных, полученных в ходе АВА-теста и NAG-теста, представлено на рис.1. Потенциально кислотопродуцирующие геологические материалы можно разделить на три группы по степени риска формирования кислого дренажа (Weber et al., 2006). Большая часть исследуемых геологических материалов склонна к генерации кислого стока в долгосрочной перспективе (группа III). Породы зоны пиритизации относятся к категориям с относительно высоким риском формирования кислых вод, как в настоящий момент (группа I), так и ближайшей перспективе (группа II). И только 3 образца вмещающих пород являются некислотопродуцирующими по рассматриваемым показателям, хотя процессы окисления сульфидов (борнит, галенит, сфалерит) могут привести к высвобождению металлов из пород, что при изменении условий среды вызовет негативное воздействие на сопряженные компоненты.

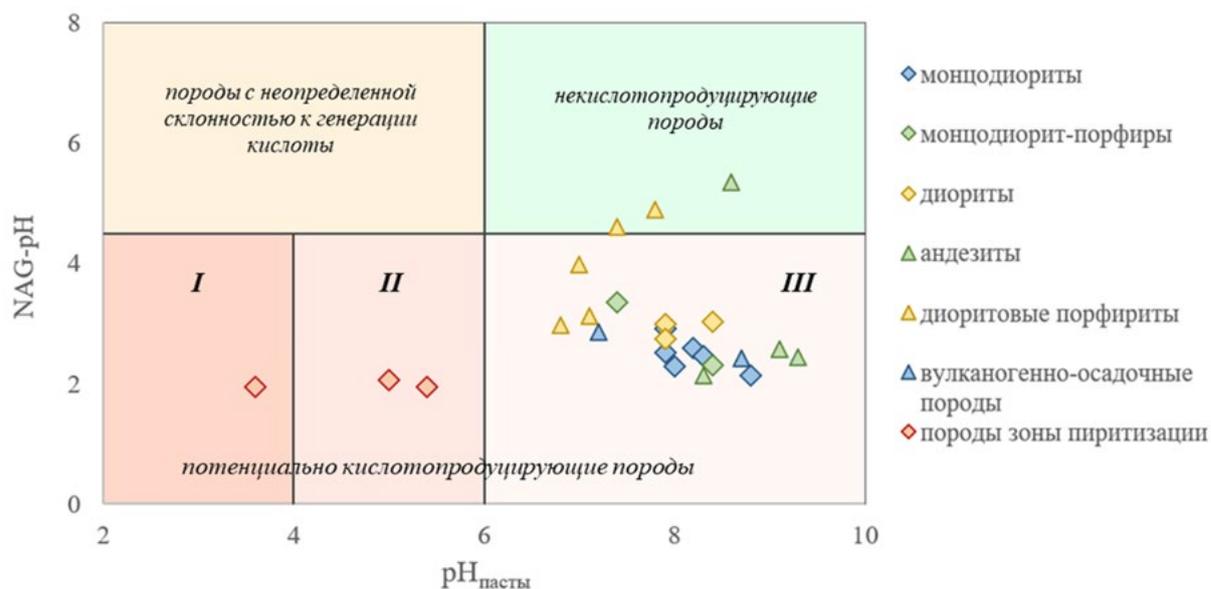


Рисунок 1. Классификация вмещающих Мо-Си-порфировое оруденение пород Баимской рудной зоны по величинам pH_{пасты} и NAG-pH.

Таким образом, исследуемые вмещающие Мо-Си-порфировое оруденение породы Баимской рудной зоны по данным статического тестирования характеризуются как склонные к генерации кислого стока (КПН<1, ФКП> 20 кг CaCO₃/т). Результаты пероксидного эксперимента в целом подтверждают высокую кислотопроизводящую способность геологических материалов. Часть образцов вмещающих пород по величине NAG-pH классифицированы как некислотопроизводящие, однако при совместном складировании вмещающих пород на дневной поверхности, вероятно, могут формироваться кислые воды.

Еделев А.В. Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 1. С.144-157

Николаев Ю. Н., Бакшеев И. А., Прокофьев В. Ю. и др Au-Ag минерализация порфирово-эпитермальных систем Баимской зоны (Западная Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 4. С. 319–345.

AMIRA. ARD Test Handbook, Project P387A. Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage, AMIRA International Limited, Melbourne, Australia, pp. A1-G2, 2002.

Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulfidic Geologic Materials. 2014.

Price W.A. Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. CANMET, Mining and Mineral Sciences Laboratories. 2009. 579 p.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R.L., Ed., Treatise on Geochemistry, Elsevier, Amsterdam. 2003. P.1-64.

Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems. Economic Geology.2010. V.105. P. 3-41

Weber P.A., Hughes J.B., Conner L.B., Lindsay P., Smart R. St.C. Short-term acid rock drainage characteristics determined by paste pH and kinetic NAG testing: Cypress prospect, New Zealand. Journal of the American Society of Mining and Reclamation. 2006. P. 2289-2310.