

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию Калачевой Елены Геннадьевны**  
**УЛЬТРАКИСЛЫЕ СУЛЬФАТНО-ХЛОРИДНЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ**  
**ВОДЫ ВУЛКАНО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ КУРИЛЬСКИХ**  
**ОСТРОВОВ, представленную на соискание ученой степени**  
**доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 –**  
**«Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы**  
**поисков полезных ископаемых»**

Геохимическое изучение вулкано-гидротермальных островных систем является одним из наиболее актуальных вопросов в контексте современного понимания структуры и динамики мантии Земли, процессов формирования земной коры и эволюции гидросферы и атмосферы. Этот вопрос тесно связан с циркуляцией элементов в зонах субдукции, значительную роль в которой играют магматические и вулканические процессы, способствующие быстрой миграции элементов. В процессе дегазации выделяются летучие вещества, образуя высокоминерализованные флюиды, которые отражают состав высокотемпературных магматических пород. Многочисленные исследования, основанные на геохимических и изотопных данных, показали, что эти магматические флюиды взаимодействуют с грунтовыми водами по мере их подъема на поверхность. Это взаимодействие может приводить к значительным изменениям в составе и свойствах как самих флюидов, так и окружающих их горных пород. В результате образуется гидротермальная система, выносящая растворенный в воде или в газовой фазе материал из вмещающих пород на поверхность Земли.

Одним из специфических видов термальных вод, обычно встречающихся в районах с активным вулканизмом, являются кислые вулканические воды. Они образуются в результате конденсации кислых магматических газов в грунтовые воды в приповерхностных условиях. В соответствии с терминологией, предложенной в 1950-х гг. В.В. Ивановым, в советской литературе эти виды вод назывались «фумарольными ваннами

глубинного происхождения». Недавно появился новый термин – ASC-вода (кислая сульфатно-хлоридная). Интерес к ультракислым водам обусловлен их происхождением в результате депонирования вулканических газов гидросферой. Мониторинг за их составом может быть использован для наблюдения вулканической активности. Кроме того, металлы концентрируются в этих водах в результате растворения магматических летучих соединений и вмещающих пород, что позволяет изучать их геохимию. Это может помочь лучше понять формирование эптермальных рудных месторождений. Курильская островная дуга – часть Тихоокеанского огненного кольца – является интересной областью для изучения геохимии термальных вод, баланса магматических летучих веществ и химической эрозии в активных вулканических районах. В этом регионе насчитывается 38 действующих вулканов, многие из которых обладают мощными гидротермальными системами, в том числе с водами ASC, которые изучены недостаточно и не систематически. Следовательно, цель работы является актуальной.

Диссертационная работа основана на материалах многолетних полевых исследований, проводимых Е.Г. Калачевой в составе лаборатории постмагматических процессов и лаборатории геотермии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН) на Курильских островах. Экспедиционные исследования выполнялись под руководством и/или при непосредственном участии Е.Г. Калачевой.

Личный вклад автора являлся определяющим на всех этапах исследований. Анализ и обобщение большого объема новой информации позволили выявить геохимические особенности ультракислых сульфатно-хлоридных вулканических вод Курильских островов и сделать оценку гидротермального выноса магматических летучих и интенсивности химической эрозии.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 430 наименований отечественных и зарубежных изданий, и приложений с фактическим материалом. Работа

изложена на 300 страницах, иллюстрирован 119 рисунками, содержит 43 таблицы.

Во Введении сформулированы актуальность, научная новизна, основные защищаемые положения, раскрыт личный вклад автора и приведены другие обстоятельства выполнения работы.

В Главе 1 «Распространение и условия формирования ультракислых  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  ( $\text{Cl-SO}_4$ ) вулканических вод» рассматриваются закономерности формирования вулкано-гидротермальных систем с горизонтами кислых вод. Показано, что их образование в большой степени связано со специфической структурой вулканических аппаратов, а также с локальными гидрогеологическими особенностями. Такие воды формируются за счет взаимодействия восходящего потока магматических кислых газов с подземными водами в приповерхностных условиях. Приведен литературный обзор по ультракислым вулканическим водам мира.

В Главе 2 «Вулкано-гидротермальные системы Курильских островов» приводится обзор геологических и геотермических условий региона и характеристика исследованных гидротермальных систем. Гидрохимические исследования на отдельных Курильских островах выполнялись в ходе летних экспедиционных работ. Основной объем данных получен в период с 2005 по 2023 гг. Приводится методика исследований и описаны исследованные геотермальные системы. База данных автора, полученная по результатам опробования разных лет, включает достоверную информацию о химическом составе ультракислых вод восьми гидротермальных систем, приуроченных к вулканам: Эбеко (о. Парамушир), Синарка и Кунтоминтар (о. Шиашкотан), Берга и Три Сестры (о. Уруп), Баранского (о. Итуруп), Менделеева и Головнина (о. Кунашир).

В Главе 3 «Геохимические особенности ASC-вод Курильских островов» приводятся новые данные об изотопном, макрокомпонентном и микроэлементном составе ультракислых вод Курильских островов. Показано, что изотопный состав ультракислых термальных вод с высокими

концентрациями хлорид-ионов отличается от локальных метеорных вод в направлении универсального изотопного состава магматического компонента. Максимальные изотопные сдвиги наблюдаются в термальных водах вулканов Синарка и Кунтоминтар (о. Шиашкотан), Баранского (о. Итуруп). Вклад магматической компоненты для этих вод оценивается в 15–20%. На основе изотипных характеристик и отношения главных анионов и катионов разработана систематика ультракислых вулканических вод Курильской островной дуги. Выделены три группы ASC-вод, различающиеся по pH, температуре, минерализации и отношению  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ . В первую группу «классических» ультракислых  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  вод попадают источники вулканов Эбеко и Баранского, в катионном составе которых преобладают Al и Fe. Во вторую, «разбавленную» холодными грунтовыми водами, группу входят термальные воды Ca-Cl-SO<sub>4</sub> ( $\text{SO}_4\text{-Cl}$ ) состава, разгружающиеся на склонах вулканов Синарка и Берга. В третью, «смешанную» с хлоридными натриевыми водами, группу попадают источники вулканов Менделеева и Головнина, характеризующиеся Na-Cl-SO<sub>4</sub> составом вод. Показано, что катионный состав всех изученных ASC-вод Курильских островов эквивалентен растворению менее 10 грамм породы на один литр воды.

Анализ содержания микроэлементов показал, что каждая из групп ультракислых вод характеризуется определенным набором микроэлементов, распределением коэффициентов переноса и поведением редкоземельных элементов. Воды классического типа обогащены летучими элементами, высокозарядные и крупноионные лиофильные элементы переходят в раствор из породы. Для разбавленных вод наблюдается снижение концентраций за счет осаждения минералов по пути фильтрации вод, а в распределении редкоземельных элементов происходит одновременное обеднение легкими и тяжелыми лантаноидами. Содержание главы полностью обосновывают **первое и второе защищаемые положения**.

В Главе 4 «Взаимосвязь поведения ультракислых вод и вулканической активности» анализируется эволюция химического состава

термальных источников во времени. На примере вулкана Эбеко показано, что наиболее явный отклик гидротермальной системы на его извержение в 2016 г. был отмечен только в подготовительный период, когда происходило увеличение дегазации магматической системы, питающей вулкан. Через некоторый промежуток времени вновь наблюдается значительное снижение, в первую очередь, концентраций сульфат- и хлорид-ионов. Полученные результаты позволяют рассматривать данный тип вод как потенциально полезный объект для геохимического мониторинга вулканической деятельности. Содержание данной главы полностью обосновывает **третье защищаемое положение**.

В Главе 5 «Роль ультракислых вулкано-гидротермальных систем Курильских островов в переносе летучих и породообразующих элементов» приведены данные об измеренных гидротермальных потоках хлора и серы для всей Курильской островной дуги, а также выполнен их сравнительный анализ с данными о прямом фумарольном выносе этих элементов постоянно дегазирующими вулканами. Показано, что гидротермальный поток магматических летучих (Cl и S) вдоль островов неравномерен, но сопоставим с измеренным выносом магматических газов (HCl и SO<sub>2</sub>) фумаролами активных вулканов региона и должен учитываться при расчетах баланса летучих в зонах субдукции. Данная глава полностью обосновывает **четвертое защищаемое положение**.

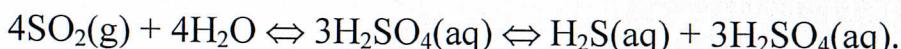
В Заключении сформулированы основные результаты исследования и приведены в кратком виде установленные закономерности.

Содержание работы полностью обосновывает научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации. Достоверность научных результатов определяется применением современных методов анализа с использованием высокоточной техники. По теме диссертации опубликовано 74 работы, в том числе 28 статей в российских и международных изданиях из перечня ВАК, находящихся в базах данных Scopus и Web of Science. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, Е.Г. Калачевой принадлежит основополагающий вклад. Материалы

диссертации апробированы на многочисленных российских и международных научных конференциях, в том числе самого высокого уровня. База данных по гидрохимии кислых вод Курильских островов получила Свидетельство о регистрации РИД.

К работе имеется ряд замечаний:

1. В первой реакции, приведенной в работе, содержится ошибка в промежуточной стадии:



Образование серной кислоты связывается с диспропорционированием сернистого газа в водном растворе. Вклад кислорода, растворенного в пластовых водах, в образовании серной кислоты и формировании кислых вод не рассмотрен.

2. На стр. 148 используется термин «конгруэнтное растворение» применительно к выносу элементов. Следует отметить, что этот термин может применяться к растворению минералов, но не для элементов. Также взаимодействие кислых вод с горными породами, очевидно, не приводит к конгруэнтному растворению, поскольку все силикаты образуют кремнезем, растворимость которого в кислой среде весьма ограничена. Поэтому при кислотном выщелачивании пород образуются вторичные кварциты.

3. Уменьшение концентрации легких редкоземельных элементов в кислых водах при увеличении pH объясняется их частичной потерей в результате соосаждения с алюнит-ярозитовой ассоциацией. Однако остается не доказанным наличие этих минералов в природной ассоциации. В минералогических описаниях упоминается наличие протяженных плащей осадков, содержащих гидроокислы железа и алюминия с примесью сульфатов, включая швертманнит.

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, соответствует требованиям пунктов 9–10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, соискатель Калачева Елена Геннадьевна заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых».

**Официальный оппонент:**

доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментальной геохимии  
Геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»

**САВЕНКО Алла Витальевна**

14 апреля 2025 г.

**Контактные данные:**

тел.: +7(495)939-54-70, e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия,  
геохимические методы поисков полезных ископаемых»

**Адрес места работы:**

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова», Геологический факультет

Тел.: +7(495)939-13-01, e-mail: dean@geol.msu.ru

Подпись сотрудника Геологического факультета ФГБОУ ВО «Московский  
государственный университет имени М.В. Ломоносова» А.В. Савенко  
удостоверяю:

Декан Геологического факультета  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»,  
доктор химических наук, чл.-корр. РАН

14.04.2025 г.



Н.Н. Еремин