

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Змиевского Максимилиана Владимировича** “Гидрогеохимические модели зоны разгрузки рудообразующих растворов на гидротермальном поле “Логачев”, Срединно-Атлантический хребет”, представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 – “гидрогеология”.

Диссертация посвящена изучению уникального объекта, расположенного на дне Атлантического океана в пределах срединного хребта, – активного гидротермального поля “Логачев”. Поле расположено на ультраосновных породах океанского дна и морфологически связано с тектоническим разломом. Уникальность поля заключается в том, что на нем впервые Ю.А. Богдановым была описана разгрузка тяжелых и горячих высокоминерализованных дымов, которые не образуют “классические” восходящие гидротермальные плюмы, а стелятся вдоль дна. Раньше формирование тяжелых высокоминерализованных рассолов в недрах гидротермальных систем лишь предполагалось теоретически. Работа состоит из 6 глав, введения и заключения. Содержит 147 страниц текста, 64 рисунка, 4 таблицы и включает в себя список литературы из 94 наименований.

В первой главе автор приводит литературные данные по геологическому и гидрогеологическому строению Атлантического океана. В ней представлены современные карты распространения гидротермальных образований Атлантического океана и заявленного Российской Федерацией участка Срединно-Атлантического хребта. Отдельные разделы главы посвящены геологическому строению и рудогенезу Атлантики, а также геологическому строению гидротермального поля “Логачев”.

Во второй главе автор описывает основные механизмы формирования высокотемпературных гидротермальных растворов и гидротермальных плюмов. Самостоятельная часть главы посвящена общепринятой классификации гидротермальных растворов, а также их составу и механизмам формирования. В данной главе достаточно полно описаны основные достижения его предшественников в области создания математических моделей: гидродинамических и термодинамических. Автор отдельно рассматривает все главные части рециклинговой гидротермальной системы: нисходящую и восходящую ветви системы, а также зону разгрузки флюидов и зону формирования гидротермальных плюмов. Содержание этой главы указывает на глубокую вовлеченность автора в предмет исследований и характеризует его как специалиста, обладающего хорошими знаниями в области субмаринного гидротермального рудообразования.

Третья глава посвящена методу статистического моделирования. Статистический анализ литературных и оригинальных данных позволил автору диссертации убедительно показать отсутствие корреляционных связей не только между метаном и сероводородом, но и температурой гидротермальных растворов. Этот результат является интересным научным наблюдением, поскольку входит в противоречие с широко принятой в иностранной литературе гипотезой абиогенного синтеза метана, образующегося в результате серпентинизации ультраосновных пород. Интересным и важным результатом данной главы также является выделение групп химических элементов, имеющих между собой тесные корреляционные связи: Cl-Na-Ca-Mn-Fe-Zn (“большая шестерка”), которые разбиваются на две триады – Cl-Na-Ca (минерализацию) и Mn-Fe-Zn (металлоносность). Также важна найденная автором зависимость между pH и концентрацией Mn, которая указывает на возможность хемогенной садки Mn в районе источников. Однако наиболее важным результатом автора в данной главе диссертации является обнаруженная им тесная зависимость между pH и Mg, проиллюстрированная на рис. 30. Согласно этой зависимости даже при минимальных значениях pH нигде не были встречены нулевые значения Mg. На мой взгляд, такой результат является не следствием некачественного

№ 15-10
от 13.02.2018

отбора проб, как пишет автор, а доказательством присутствия Mg в первичных гидротермальных растворах, пускай и в малых количествах.

В четвертой главе обсуждаются данные по изотопному составу водорода и кислорода в гидротермальных растворах. Таких данных в научной литературе пока недостаточно для выявления глобальных механизмов изотопной дифференциации в гидротермальных системах. Подавляющая часть литературных данных относится к изотопному составу гидротермальных и метасоматических минералов. Поэтому, любая новая информация в данной области имеет заведомо высокое научное значение.

Пятая глава представляет собой результат научных достижений автора, относящийся к термодинамическому моделированию гидротермальных процессов смешения двух водных растворов: гидротермального флюида и морской воды. Согласно результатам исследований основная трансформация форм металлов в теле гидротермальных плюмов происходит в непосредственной близости от источника. Так, для форм Mn основная трансформация происходит при температурах растворов около 150° С, для форм Fe – 150-270° С, для форм Zn – 50 и 270° С и для форм Cu – 50 и 100° С. Этот результат позволяет выявить наиболее важные этапы взаимодействия между рудоносным флюидом и водной средой, а также определить механизмы осаждения рудного вещества на каждом из выделенных этапов.

Последняя шестая глава посвящена гидрогеохимическим поискам скоплений сульфидных руд в пределах российского заявочного участка Срединно-Атлантического хребта. Отдельный раздел главы посвящен принципам работы ион-селективных электродов. Их применение в автономном режиме в составе мониторинговых буйковых станций представляется весьма перспективным направлением в океанологических исследованиях.

Выводы, сделанные автором диссертации, считаю обоснованными и логичными. Они объективно отражают цели и задачи, поставленные перед соискателем, а также хорошо согласуются с результатами исследований других авторов.

Список используемой литературы исчерпывающий и соответствующий заявленной теме диссертации. Все работы процитированы корректно.

Актуальность и значение избранной темы. Высокая актуальность исследований определяется тем, что поиск небольших по размерам активных гидротермальных источников на дне Мирового океана связан с высокими временными и материальными затратами. Совершенствование методов поиска – одна из главных задач современных океанологических исследований.

Диссертация имеет важное научное и прикладное значение. Научное значение определяется развитием новых и совершенствованием имеющихся компьютерных математических моделей, описывающих природные процессы. В настоящее время для описания сложных гидрогеохимических процессов методами химической термодинамики широко используют подобные математические модели. Такие модели позволяют получать результаты, недостижимые другими методами исследований. Высокое прикладное значение диссертации определяется перспективностью освоения новых и перспективных сырьевых ресурсов Мирового океана, таких как глубоководные полиметаллические сульфиды. Важность этого направления исследований возрастает в связи с подписанием контракта Российской Федерацией на проведение разведки полиметаллических сульфидов на заявленном участке Срединно-Атлантического хребта.

Степень обоснованности научных положений и выводов. В целом, структура и содержательные части диссертационной работы хорошо продуманы и дают читателю исчерпывающую информацию об объекте исследований. Содержание автореферата хорошо согласуются с содержанием диссертационной работы. К достижению автора диссертации следует отнести хорошо проработанный материал по отечественным математическим моделям, описывающим механизмы циркуляции морской воды сквозь трещиноватые породы океанской коры и взаимодействие между водой и породой,

разработанные А.В. Тутубалиным и Д.В. Гричуком. В целом, представленный во второй главе обзорный материал по моделированию процессов в зоне разгрузки и формированию гидротермальных плюмов хорошо согласуется с темой и содержанием диссертационной работы. Выводы работы основаны на фактическом материале и результатах математического моделирования. Используемая автором диссертации термодинамическая модель "HCh" (Hydrochemistry), разработанная Ю.В. Шваровым, имеет международное признание, а результаты, полученные с ее помощью, хорошо согласуются с данными прямых наблюдений.

Достоверность и новизна. Достоверность данных, представленных в диссертации, подтверждается их хорошей сходимостью с результатами других авторов, опубликованными в научной литературе. Список привлеченных литературных данных достаточный для объективной оценки достоверности полученных диссертантом результатов. Новизна работы заключается в привлечении новых оригинальных данных, полученных в ряде национальных и международных экспедициях на поле "Логачев".

ЗАМЕЧАНИЯ

Несмотря на общее положительное заключение о представленной к защите диссертации М.В. Змиевского, к ней есть ряд замечаний, которые не умоляют ее общего достоинства.

Защищаемые положения. Основным третьим защищаемого положения является вывод о невозможности использования данных по стабильным изотопам водорода и кислорода для поисковых целей. Во-первых, как было упомянуто выше, имеющихся на сегодняшний день данных пока недостаточно для глубокого анализа фракционирования стабильных изотопов водорода и кислорода в гидротермальных системах. Во-вторых, следует ли отрицательный результат выносить в защищаемые положения? Даже, несмотря на то, что отрицательный результат тоже результат.

Замечания к тексту диссертации. Наклонным шрифтом выделены выдержки из текста диссертации.

Глава 1 Основные черты геологического и гидрогеологического строения Атлантического океана

Стр. 13. *"Индо-Атлантическое звено СОХ подразделяется, в свою очередь, на три района: Северо-Атлантический, Южно-Атлантический и Западно-Атлантический хребты"*. На известных мне картах нет Западно-Атлантического хребта, а Южно-Атлантический и Северо-Атлантический – это две части одного Срединно-Атлантического хребта.

Стр. 16. *"Океаническая кора по своему строению делится на три слоя: осадочный и базальтовый слои, а также, подстилающий их слой габбро, амфиболитов и ультрабазитов"*. Океанические слои 2В и 3 характеризуются габбро-долеритовым составом. Амфиболиты встречаются в составе коры континентального типа.

"Ниже располагаются породы верхней мантии литосферы, которые отграничены от верхних слоев границей Мохоровичича". Мантия – понятие геологическое, т.е. выделяется по составу пород. Литосфера – понятие петрологическое, т.е. выделяется по пластическим свойствам пород. В тоже время, поверхность Мохоровичича (Мохо или М) выделяется исключительно по геофизическим данным, т.е. она не совпадает с изменением минерального состава вещества. Эту границу проводят на основе скачка продольных волн в диапазоне от 7.5 до 8.2 км/с. По ней разделяют верхнюю мантию и кору. Нельзя в одном предложении смешивать три разных понятия.

Стр. 17. *"Отличительной особенностью ферробазальтового комплекса является повышенное содержание железа в составе слагающих минералов, темно-желтым*

цветом из-за микроскопической рудной сыпи титаномагнетита Пикроферробазальтовый комплекс приурочен к неовулканической зоне СОХ”.

“В состав базальтового слоя океанической коры также относятся породы, составляющие океанические поднятия: океанические земли (океаническое плато), вулканические и вулканотектонические хребты, поднятия, образовавшиеся за счет спрединга; а также горячие пятна”.

Не ясно, что этими предложениями хотел сказать автор. Более того, обычно, вместо горячих пятен употребляют термин “горячие точки (hot points)”.

Стр. 18. “Вулканические хребты и нагорья тесно связаны с переходной неспрединговой зоной, время заложения большинства которых относится к концу раннего мела, что соответствует переходной зоне без проявления спрединговых процессов (апт–кампан) по модели формирования Мирового океана Андреева С.И”. Кампанский ярус относится к позднему мелу.

Стр. 20. “В пределах САХ постройки встречаются на территории рифтовой долины шириной около 10-15 км и даже за ее пределами (поле Петербургское (Лост Сити)) [42]”. Петербургское и Лост Сити – это два разных поля.

Стр. 25. “...с многочисленными обломками обломочных пород...”. Без комментариев.

Стр. 28-29. Идет повторение текста стр. 16.

Глава 3 Статистическое моделирование формирования состава гидротерм Океана

Стр. 60. “Среди высокотемпературных растворов ($>200^{\circ}\text{C}$) встречаются как заметно распресненные (в 2 – 3 раза) до слабых рассолов, значительно превышающих соленость морской воды”. Распресненные растворы имеют меньшую минерализацию по сравнению с морской водой.

“Анализ регрессионной модели, связывающей концентрации хлорид-иона и кислотность гидротермальных растворов Океана показывает, что эти параметры характеризуются отрицательной зависимостью (рисунок 15)”. Не следует употреблять термин “регрессионная модель”, в то время как речи идет о простой корреляции между двумя переменными.

Стр. 66. “На рисунках №№ 20-23 отображены результаты анализов, полученных в экспедиции ДайверсЭкспедишн (2001 г.). На данных графиках наблюдается тесная корреляция между изучаемыми компонентами, что позволяет получить концентрацию выбранного компонента в КГР, исключая эффект от смешения с морской водой. Линия тренда проведена до нулевых значений концентрации магния, тем самым указывая на концентрацию исследуемого компонента в КГР”. В тоже время, из представленных графиков следует только то, что при повышении концентраций растворенного магния, концентрации Fe, Mn и Zn в растворах, наоборот, снижаются. Это не указывает на концентрацию выбранного компонента в конечном гидротермальном растворе. Это указывает на осаждение этих металлов в результате смешения флюидов с морской водой. Более того, говорить о тесной корреляции по семи точкам с большим диапазоном разброса вряд ли возможно.

Стр. 67-70. “Результаты анализа общего массива данных как по гидротермам ВТП, так и САХ представлены на рисунках №№ 24, 25. В данном случае связь между компонентами менее явная, но максимальные концентрации изучаемых элементов появляются с понижением концентрации магния”. В данном случае, речь идет также о снижении концентраций Fe и Mn по мере разбавления первичного гидротермального раствора морской водой, содержащей Mg. Интересно также отметить, что подавляющая часть данных указывает на отсутствие видимой корреляции между упомянутыми металлами и магнием.

Глава 4 Геохимическая модель формирования изотопного состава гидротермальных растворов

Дейтерий принято обозначать символом D.

Стр. 87-88. “К облегчению состава могут поспособствовать процессы кипения, а так же последующая их фазовая сепарация”. Кипение – это и есть процесс фазовой сепарации.

Глава 5 Термодинамическое моделирование процессов формирования гидротермальных растворов

Стр. 91. “Это также подтверждается корреляционным анализом, выполненным по данным для КГР, результаты которого свидетельствуют о переносе компонентов в кислых восстановительных гидротермальных растворах в форме хлоридных комплексов. [44] По мере разбавления с привнесом новых порций морской воды, содержание последних должно увеличиваться”. В действительности по мере разбавления гидротермального флюида содержание хлоридных комплексов снижается вследствие повышения парциального давления кислорода, т.е. Eh, в растворе.

“Поведение химических элементов в растворах определяется, в первую очередь, их физико-химическими свойствами, что находит отражение в распределении химических элементов в Периодической системе”. Нет необходимости в диссертационной работе приводить цитату из школьного учебника по химии.

Стр. 92-96 в разделе 5.3 “Термодинамическое моделирование процессов смешения морской воды и гидротермальных растворов” не упоминается о том, как получены результаты расчетов, представленные на рисунках 39 и 40. Вместо этого дается только таблица из справочника с энтальпией и энтропией химических компонент, и приводятся формулы для расчета, также из справочника. Самых расчетов нет, что не позволяет дать объективную оценку используемой модели. В тоже время, согласно этим рисункам, содержание хлоридных комплексов Zn и Cu по мере смешения с морской водой растет. Как это объяснить?

На стр. 100 одно и тоже предложение повторяется дважды.

Стр. 105. “При этом в геохимической структуре плюма можно выделить две зоны: 1) высоких температур (350-100°C) с преобладанием хлоридных комплексов; 2) низких температур (100-2°C) с доминированием переноса в виде свободного двухвалентного иона.

Первую зону можно условно ассоциировать с так называемым «восходящим» плюмом повышенной плавучести с высокой турбулентностью, вторую – с «латеральным» плюмом, в пределах которого марганец в форме Mn^{2+} может переноситься на несколько десятков километров от гидротермального источника [87, 88]”.

Градиент температуры между плюмом нейтральной плавучести и морской водой, как правило, не превышает 0.02 градусов. Таким образом, температурный диапазон 100-2°C скорее отражает зону всплывающего плюма, чем нейтрального.

Стр. 110-111. Несоответствие результатов, полученных при расчетах форм миграции Zn, никак не объяснены в тексте. Так, на рис. 39 при максимальном разбавлении флюида морской водой в плюме преобладает $ZnCl^+$ над Zn^{2+} , в тоже время на рис. 53 и 55 в тех же условиях, наоборот, преобладает Zn^{2+} над $ZnCl^+$.

Стр. 113. Аналогичная ситуация справедлива и для рисунков 40 и 56. На первом при максимальном разбавлении флюида доминирует $CuCl^+$, а на втором – $CuCO_3$ и Cu^{2+} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, несмотря на высказанные замечания, которые не затрагивают смысловую часть защищаемых положений и выводов диссертации, работа М.В. Змиевского представляет собой научно-квалифицированную работу, в которой решены поставленные научные задачи по изучению гидрогеохимического взаимодействия между гидротермальным флюидом и морской водой, имеющие высокое научное значение для развития теории рудогенеза полиметаллических колчеданных месторождений и

гидротермально-осадочного рудообразования. Результаты работы имеют существенное значение для развития сырьевой базы страны. Основное содержание диссертации отражено в автореферате, а защищаемые положения соответствуют содержанию диссертационной работы.

Данная работа отвечает требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Максимилиан Владимирович Змиевский заслуживает присуждения искомой степени кандидата геолого-минералогических наук по специализации 25.00.07 – “гидрогеология”.

Ведущий научный сотрудник ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ им. В.И. ВЕРНАДСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГЕОХИ РАН),
Лаборатории геохимии осадочных пород,
доктор геолого-минералогических наук

Русаков Валерий Юрьевич



Российская Федерация, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, дом 19
Москва, В-334, ГЕОХИ РАН.

Телефон: (499) 137-60-79.

Эл.почта: rusakov@geokhi.ru

21.01.2018 г.



Русаков Валерий Юрьевич



Удостоверено
21.01.2018 г.
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского ГЕОХИ РАН