

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу ШЕВКО Е.П.
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ
ГАЗОГИДРОТЕРМ КАМЧАТКИ И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ»,
представленной на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук
по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поиска
полезных ископаемых

Диссертация Е.П. Шевко представляет собой фундаментальный труд, в котором рассматриваются сложные физико-химические процессы подъема флюидов в вулканических системах. Фактический материал диссертации включает собственные экспериментальные наблюдения, которые производились автором на трех действующих вулканах Курило-Камчатского пояса: Мутновском, Эбеко и кальдере Головина. Диссертация является настоящим междисциплинарным исследованием, охватывающим различные разделы наук о Земле таких как геохимия, петрология, петрофизика, геофизика, минералогия и гидродинамическое моделирование. В связи с этим, результаты этой работы могут оказаться востребованными для широкого круга специалистов. Лично для меня эта работа важна тем, что она дает количественные физико-химические параметры вулканических флюидов вблизи к поверхности, которые можно связать с процессами дегазации в глубинных магматических очагах, изучаемых с помощью сейсмической томографии.

Питание вулканов является сложным физико-химическим процессом, в котором вещество может существовать во всех возможных агрегатных состояниях, претерпевать сложные химические превращения и совершать быстрые, порой, лавинообразные перемещения. В отличие от других геологических объектов, вулканы способны существенно изменять свои физико-химические свойства за достаточно короткие периоды времени (годы, дни и даже секунды). Эта специфика определяет особые подходы, которые необходимы для описания вулканических систем, а именно междисциплинарность исследований, наличие разнообразных экспериментальных наблюдений на конкретных вулканах и высокий уровень теоретической проработки на основе численного моделирования. Настоящее исследование является удачным примером, где все эти элементы присутствуют, что определяет **актуальность** диссертации Е.П. Шевко. Следует отметить, что, хотя на Камчатке и Курильских островах сосредоточено множество разнообразных вулканических структур, качество и количество публикаций по их изучению отстает от аналогичных исследований по многим другим вулканическим регионам мира. Актуальность данной работы состоит еще и в том, что она предоставляет

новую уникальную информацию о вулканах на российской территории, чем сокращает существующую диспропорцию в степени их изученности по сравнению с зарубежными аналогами.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые применен междисциплинарный подход для изучения физико-химического состояния вулканических флюидов с использованием широкого спектра методов геохимии, петрологии, минералогии, геофизики и гидродинамического моделирования. В результате серии полевых измерений на различных вулканах Камчатки и Курильских островов получены новые материалы, которые дали важную информацию о структуре проводников флюидов в верхней части вулканических систем. В частности, это позволило автору определить зоны фазового разделения флюида на геохимических барьерах. Автором разработаны собственные алгоритмы по моделированию прохождения флюидов от магматического очага до поверхности и оценке химической изменчивости флюидов по ходу миграции через различные породы.

Теоретическая значимость работы Елизаветы Павловны заключается в разработанных физико-химических и термодинамических моделях формирования, эволюции и функционирования вулcano-гидротермальных систем с количественным описанием процессов миграции и отложения химических элементов во флюиде при его взаимодействии с вмещающими породами и разгрузке на поверхности.

Практическое значение исследования состоит в том, что оно позволяет количественно описать процесс образования эпитеpмальных руд и, тем самым, прогнозировать их распространение в геотермальных комплексах. В работе указывается также, что в термальных водах, применяемых в бальнеологических целях, возможно наличие некоторых токсичных веществ, и их выявление является важной практической задачей. По моему мнению, автор упускает еще один аспект в работе, который может найти важное применение на практике. В последнее время все более актуальным является использование геотермальной энергии, являющейся относительно дешевой и экологически чистой. Вместе с тем, главной проблемой использования геотерм является их химическая агрессивность, приводящая к быстрому выводу из строя эксплуатационного оборудования. Изучение химических свойств вулcanoгенных флюидов, причин их аномальных значений и вариации во времени имеет ключевое значение при планировании и эксплуатации геотермальных месторождений.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. В первой главе приводится описание современного состояния изученности гидротермальных систем.

Приведенный обзор литературных источников показывает высокую степень компетентности автора, что, в свою очередь является свидетельством международного уровня проводимых ей исследований. Данная глава позволяет читателю, не совсем знакомому со всеми направлениями исследований, упоминаемых в работе, лучше ориентироваться по ходу знакомства с собственными результатами автора и более объективно оценить их значимость.

Вторая глава включает в себя описание всех методов, которые были использованы в работе. Мне кажется не совсем удачным решением выделение всех методических деталей по совершенно различным подходам в одной части диссертации. Например, когда в конце работы мы приступаем к прочтению описания результатов термодинамического моделирования, приходится возвращаться назад во вторую главу, чтобы напомнить себе, в чем, собственно, заключается моделирование. По моему мнению, отделять суть методик от результатов в такой междисциплинарной работе – не самый лучший способ представления материала. При прочтении описания методик не всегда можно понять персональную вовлеченность автора в их создание и практическую реализацию. Разрабатывала ли автор сама указанные методики или использовала их в качестве «черных ящиков»? Такие вопросы должны иметь в тексте однозначные ответы.

Третья глава посвящена описанию трех объектов исследования – вулканам Мутновский, Эбеко и кальдеры Головина. Я нашел для себя этот раздел чрезвычайно интересным и познавательным. Данный обзор, несомненно, будет востребованным при проведении любых научных исследований по данным вулканическим системам. Он является абсолютно необходимым для дальнейшего изложения, где описываются результаты экспериментальных и теоретических работ по этим вулканам. Например, часть этой главы относится к определению пористости, проницаемости и плотности андезитов с разной степенью гидротермальной изменённости из кальдеры Головина, что используется при задании моделей миграции флюидов в последующих разделах.

Глава 4, содержащая данные о гидрохимии термальных источников, менее всего связана с областью моих личных научных интересов. Тем не менее, достаточно простой язык изложения и наглядная графика позволили мне понять основную суть полученных результатов и оценить их значимость. В этой главе приведено описание состава термальных вод, поровых растворов, сделаны сопоставления этих параметров с определением сравнительной подвижности элементов. На примере Северо-Мутновского фумарольного поля прослежены закономерности привноса-выноса элементов в породах в процессе метасоматоза. На Донном фумарольном поле вулкана Мутновский описаны

грязевые котлы, состав которых уникален по концентрациям некоторых специфических элементов: Cr, Ni, Co, PGE, REE. Глава содержит богатый фактический материал и является основой для дальнейших построений. На основании результатов, описанных в четвертой главе сформулировано **первое защищаемое положение**, которое констатирует контрастный состав термальных растворов в зонах активной вулканической деятельности и роль в их образовании вариаций составов вмещающих пород. Я не оспариваю достоверность этого положения, поскольку оно вполне подтверждено имеющимися данными. Вместе с тем, его формулировка кажется мне несколько размытой и неконкретной, в результате чего некоторые ключевые вопросы остаются открытыми. Является ли такое разнообразие химического состава уникальным феноменом? Неужели ранее никто не отмечал такого на этих и других вулканических системах? Относится ли это положение к трем рассматриваемым вулканам или является универсальным для всех подобных систем с фумарольной активностью?

Пятая глава посвящена изучению подповерхностного строения гидротермальных систем. В этой главе приведены результаты геофизических исследований на основе электромагнитных методов в областях гидротермальных проявлений на трех выделенных вулканах. Главным образом, приведены результаты экспериментальных работ методами частотного зондирования и электротомографии, которые обеспечивают просвечивание до глубин нескольких десятков метров. Использование этих двух методов является удачным решением, поскольку, во-первых, они обеспечивают разрешение в различных интервалах глубин, а во-вторых, дают независимую оценку для одних и тех же структур. В работе автор утверждает, что эти два метода дают схожие изображения, однако, к сожалению, в работе нигде не приводится их визуальное сопоставление, что, по моему мнению, является важным упущением.

Полученные геоэлектрические разрезы демонстрируют внутреннее строение подводящих каналов и объясняют формирование контрастных составов термальных вод на поверхности. Например, аномалии с пониженным сопротивлением, вертикально уходящие вниз в районе Донного поля на вулкане Мутновский, по мнению автора, отражают подъём флюида ультра-кислых растворов, минимально измененных при взаимодействии с вмещающими породами. Для Северо-Мутновского фумарольного поля показан единый источник растворов, разделение которых происходит на последних метрах у поверхности, что и приводит к дифференциации составов. Сочетание данных электроразведки, изучения гидрохимии вод, поровых растворов, конденсатов, а также результатов численного моделирования позволило автору сформулировать **второе**

защищаемое положение о наличии зон фазовых барьеров и их ведущей роли в изменении гидрохимических особенностей поверхностных разгрузок. В целом, это защищаемое положение является вполне обоснованным, однако вынужден отметить, что внимательное рассмотрение геофизических профилей не позволяет видеть в них однозначное подтверждение утверждения о наличии барьеров фазового разделения. Автор интерпретирует области с относительно повышенным сопротивлением, расположенных над низкоомной аномалией, как зоны вскипания. Вместе с тем, можно предложить и другие варианты, объясняющие такую картину, например, наличие слоя низкопористой породы, который также может иметь повышенное сопротивление.

В пятой главе также приводятся результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по профилю между вулканами Горелый и Мутновский, которые обеспечивают глубину просвечивания несколько километров. Мне не совсем понятно, позиционируется ли этот результат, как собственное достижение автора или же оно представлено в качестве одного из примеров изучения объекта настоящего исследования, выполненного другими авторами. Озадачивает то, что в разделе с описанием результатов МТЗ нет ни одной литературной ссылки, касающейся этой работы.

Шестая глава посвящена гидродинамическому моделированию процесса подъема флюидов от магматического очага, предположительно, с глубины 2 км до поверхности. При этом рассматриваются различные варианты изменения химического состава флюидов за счет взаимодействия со вмещающими породами и изменение фазового состояния (проще говоря, вскипание). Также изучается влияние на этот процесс пористости и проницаемости, а также времени, в течение которого происходит выход флюидов. Полученные в результате расчётов выводы хорошо согласуются с приводимыми ранее экспериментальными данными. Результаты этого раздела послужили основой для формулирования **третьего защищаемого положения**. Е.П. Шевко удалось убедительно доказать различие в фазовом и химическом составе газогидротерм, достигающих поверхности, а также показать закономерности формирования минеральных ассоциаций в разных частях разреза в зависимости от его строения. Положение вполне доказано.

Достоверность сделанных в диссертации выводов определяется большим объёмом фактического материала, применением широкого спектра методов и приёмов исследований, глубоким анализом получаемых данных, применением современных приёмов моделирования.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Работа апробирована на многочисленных международных, всероссийских и региональных конференциях. Результаты исследований были использованы в 5-ти инициативных проектах РФФИ, в которых Е.П. Шевко была руководителем. По теме диссертации опубликовано 80 работ, из них 3 монографии и 15 статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

В дополнение к замечаниям, высказанных выше, у меня имеется ряд критических комментариев, которые, как мне кажется, могут быть учтены автором в ее дальнейшей работе по данной теме.

1. Автор постулирует наличие магматического очага на глубинах ниже 2 км от поверхности, являющегося источником тепла и флюидов. При этом, в тексте я не увидел ссылки на какие-либо источники, подтверждающие это предположение. Следует отметить, что именно такие глубины кровли магматического очага, где предполагается выделение и дегазация флюидов, получаются по результатам сейсмотомографических исследований ряда активных вулканов, в некоторых из которых мне удалось участвовать. Несомненно, если автор претендует на создание полной и достоверной модели миграции флюидов, такие исследования должны приниматься в расчет.

2. Насколько я понял, основные выводы по поводу миграции флюидов основаны на предположении, что они полностью выходят из магматического очага. Фраза «генезис флюидов един», которая появляется в различных частях диссертации означает эксклюзивную роль магматических флюидов в формирование фумарол. Вместе с тем, наличие метеорных вод, приходящих в систему сверху, может сыграть значительную роль во флюидном балансе. Мне кажется, этот фактор недостаточно подробно обсуждается в работе. По крайней мере, я не вижу, чтобы он учитывался в гидродинамических моделях, представленных в шестой главе.

3. Как я уже говорил, несколько смазанным мне кажется результат по исследованию профиля между вулканами Горелый и Мутновский методом МТЗ. То что приведено в этом разделе, это лишь схема, представляющая возможную интерпретацию геофизической модели. Ни самой модели, ни распределения исходных данных в диссертации не представлено. Если этот результат позиционируется, как одно из достижений автора, то все технические детали должны быть приведены. Если же это результат других авторов, призванный подтвердить какие-либо авторские выводы, необходимо дать соответствующие ссылки, чтобы читатель в полной мере мог бы оценить надежность этих построений.

4. В части малоглубинных электромагнитных построений приведено множество моделей, полученных методами частотного зондирования и электротомографии. Эти результаты являются решением обратной задачи, которая, как известно, имеет определенные ограничения по разрешающей способности и степени неоднозначности решения. При проведении такого рода работ важным является не столько демонстрация самих результатов, сколько представление доказательств того, что полученные модели, действительно, отражают структуры на глубине. Хорошим тоном в большинстве геофизических работ является выполнение ряда тестов, призванных показать надежность тех или иных аномалий. В случае данной работы, например, разрешение, скорее всего, сильно падает с глубиной. При этом, вертикальные аномалии, уходящие вниз, вполне могут оказаться результатом размазывания структур вследствие низкого разрешения. Такого рода ограничения могут быть выявлены с помощью синтетического моделирования, которое, как я понимаю, в данной работе не выполнялось.

5. Частично вопросы о достоверности результатов геофизических исследований, поставленные в предыдущем пункте, могли бы быть сняты, если бы было проведено специальное сравнение моделей, полученных с помощью частотного зондирования и электротомографии. Эти два независимых метода имеют различные области неоднозначности, и совпадение результатов послужило бы важнейшим аргументом, подтверждающим наличие тех или иных структур. К сожалению, автор лишь постулирует согласование моделей, но нигде специально не демонстрирует (в одном масштабе, в единой цветовой шкале).

6. При обсуждении результатов электротомографии и частотного зондирования следовало бы провести измерения удельного электрического сопротивления для разного типа растворов и пород, в т.ч. с разной влажностью для обоснования интерпретации.

7. Недостатком представления геофизических результатов является разнородность цветовых шкал, используемых для представления одного и того же физического параметра – УЭС. В некоторых случаях зоны пониженных сопротивлений представлены красным цветом, а в некоторых – синим. Это сильно затрудняет рассмотрение результатов.

8. На многих рисунках подписи не содержат всей необходимой информации и отсутствуют обозначения на осях (например, Рисунки 3.11, 4.4, 4.12, 4.17, обозначенный как 3.17). На рисунке 5.6 нет цветовой шкалы. На Рисунке 4.4 нет никаких обозначений. Мне непонятен смысл линий и обозначений на рисунках 4.4 и 4.12.

9. В главе, описывающей методы исследования, следовало бы привести карты-схемы с точками опробования пород и растворов. Табличные данные – это очень хорошо, но для понимания представительности выборки хотелось бы видеть места отбора проб.

10. Недостаточно информативные объяснения изменения пористости и проницаемости метасоматически изменённых пород. Предположение о том, что снижение пористости при высоких значениях коэффициента проницаемости происходит вследствие формирования глинистых минералов не подкреплено фактическими данными.

11. В таблицах по гидрохимии где-то электропроводность растворов обозначена как «S», где-то как «X» без указания размерности (то же относится к Eh – размерности нет). Это небрежность.

Несмотря на возникшие замечания, можно сделать вывод, что Елизаветой Павловной Шевко проведена большая работа по исследованию гидрохимии активных вулканов и моделированию вулкано-гидротермальных процессов, которая имеет **научную новизну, очевидную практическую значимость** и важна для решения многих фундаментальных проблем. В совокупности результаты диссертации Е.П. Шевко могут быть квалифицированы как крупное научное обобщение, имеющее высокую значимость для науки и практики. Поставленные в работе задачи полностью выполнены и цель достигнута. Работа написана грамотно и хорошо иллюстрирована рисунками и таблицами фактического материала, полученного автором.

Диссертация соответствует паспорту специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых в пунктах: 3. «Разработка принципов и методов математической обработки геохимических данных, геохимического картирования биосферы, и математического моделирования геохимических процессов», 4. «Изучение химического состава всех типов природного вещества (земной коры, глубинного вещества Земли, гидросферы, атмосферы, живого вещества, внеземного вещества) и закономерностей распространенности в них химических элементов и изотопов». 5. «Изучение состояния и форм нахождения химических элементов во всех типах природного вещества», 6. «Изучение закономерностей распределения химических элементов и изотопов в природных процессах», 7. «Изучение закономерностей концентрирования химических элементов в геологических процессах», 11. «Экспериментальное физико-химическое и математическое моделирование процессов массопереноса и поведения химических элементов и изотопов в системах и процессах в условиях, близких к природным»

Диссертационная работа Е.П. Шевко удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. (№ 842) (ред. от 21.04.2016).

Считаю, что диссертация Е.П. Шевко отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор достойна присуждения степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поиска полезных ископаемых.

Заместитель директора по науке

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук
доктор геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН
18.09.2018

Кулаков Иван Юрьевич

630090, Новосибирск. Проспект академика Коптюга, 3, ИНГГ СО РАН
e-mail: KoulakovIY@ipgg.sbras.ru
Тел.: 913 453 89 87

