

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Рычковой Татьяны Васильевны**  
«ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ (НА ПРИМЕРЕ  
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ КАМЧАТКИ)»,

представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-  
минералогических наук по специальности 25.00.07 – Гидрогеология

Объектом исследования соискателя является долина Гейзеров - уникальнейшее место не только в России, но и во всем мире, единственное гейзерное поле в Евразии, входящее в шестерку крупнейших аналогичных структур Земли. Исследования направлены на изучение условий формирования и функционирования системы, знание которых необходимо не только в плане дальнейшего развития фундаментальных исследований в этой области, но и для сугубо практической оценки потенциала использования геотермальных источников как в теплоэнергетике, так и в здравоохранении. В связи с этим *актуальность работы* Татьяны Васильевны не вызывает сомнений.

В качестве основной *цели исследования* соискатель рассматривает изучение механизмов формирования и функционирования гейзеров не только в динамичных природных условиях, но и с учетом создающих дополнительные сложности техногенных нагрузок. Достижение поставленной цели базируется на анализе многолетних гидрогеологических наблюдений в Долине Гейзеров и выявлении цикличности в функционировании гидротермальной системы с последующим термогидродинамическим-химическим моделированием.

*Научная новизна* исследования заключается в доказательстве возможности формирования проницаемого канала в туфах в результате химического взаимодействия в системе «термальная вода-порода» на базе многовариантного TOUGHREACT-моделирования, а также выявлении закономерностей изменения циклических характеристик гейзеров и суммарной разгрузки гидротерм, что представляют значительный интерес для фундаментальной науки при изучении механизмов транспорта тепловой энергии на различных горизонтах земной коры. Кроме того, несмотря на опасения ученых, касающихся существенных изменений в режиме функционирования гидротерм Долины после событий 2007 и 2014г.г., соискатель вполне доказательно показывает отсутствие существенного теплового влияния сформировавшихся в результате оползней Подпрудных Озер на гидротермальную систему Долины Гейзеров в целом.

*Представляется, что п.1 и п.2 являются целостной научной позицией и могут быть объединены, поскольку моделирование «возможности формирования проницаемого канала в риолитовых туфах в результате химического взаимодействия термальная вода-порода в режиме проточной восходящей фильтрации» (п.1 – программа TOUGHREACT) включает и*

*«многовариантное моделирование термогидродинамического режима истечения газонасыщенного флюида в канале гейзера» (п.2, программа TOUGH2-EOS2). Правильность такого подхода подтверждается и автором в заключительной части диссертации (стр. 140).*

**Практическая значимость** работы, прежде всего, на наш взгляд, определяется тем, что полученные математические модели и результаты их реализации предоставляют возможность прогнозировать формирование энергетических и минеральных ресурсов в областях современного вулканизма, в том числе, с учетом техногенных нагрузок, таких, например, как эксплуатация геотермальных электростанций. Немаловажными являются и результаты обработки гидрогеологического мониторинга, позволяющие представить среднесрочный прогноз (3-4 мес.) формирования оползневых процессов.

**Достоверность** основных научных положений и практических выводов обусловлены методиками исследований с использованием обширного фактического материала, в том числе длительных режимных наблюдений, полученного с применением широкого спектра современных методов и оборудования, и последующей обработкой данных на базе термогидродинамического-химического TOUGHREACT и TOUGH2-EOS2 моделирования.

Представленная на отзыв диссертационная **работа состоит** из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы общим объемом 165 страниц машинописного текста, в том числе 67 рисунков и 26 таблиц, список литературных источников содержит 118 наименований опубликованных работ и 6 наименований фондовой литературы, включающей диссертационные исследования и отчеты по НИР. Автореферат работы содержит 19 страниц текста, включая 9 рисунков и список публикаций по теме диссертации из 20 наименований, из них 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Введение** соответствует требованиям, определенным ВАК и включает актуальность темы, степень разработанности выбранного направления, цель и основные задачи исследования, научную новизну, теоретическую и практическую значимости работы, методы исследований, степень достоверности апробацию результатов. В основу диссертационной работы положены материалы, собранные автором при проведении полевых и химико-аналитических работ. Объект исследований отражен практически в каждом из перечисленных пунктов, *однако не описан как самостоятельный раздел Введения.*

В этом же разделе определены следующие защищаемые положения:

1. Установлены условия формирования гейзеров в части обоснования модели формирования проницаемого самоизолирующегося канала в артезианско-вулканогенном бассейне, сложенном риолитовыми туфами, и выявления диапазона концентраций  $\text{CO}_2$ , необходимых для обеспечения кипения по всему каналу.

2. Режим функционирования гейзеров чувствителен к изменениям локальных гидрогеологических и гидрологических условий: прямая инфильтрация из поверхностных водотоков приводит к прекращению функционирования гейзеров на дне образовавшихся водоемов, но в то же время к повышению частоты извержений гейзеров с каналами разгрузки в надводных условиях. Паводковое повышение давления в поверхностных водотоках и резервуарах грунтовых вод приводит к "подпору" гидротермальной системы и временному уменьшению ее суммарной разгрузки.

3. Гидрогеологический эффект Подпрудных озер, образовавшихся в результате обвала-оползня 2007 г. и схода селя в 2014 г. в Долине Гейзеров, выражается в повышении давления в Гейзерном резервуаре и соответствующем увеличении частоты извержений гейзеров при ограниченном термическом и химическом воздействии.

Обоснование перечисленных положений представлено главах 1-4.

*Первая глава* посвящена постановке проблемы и терминологическим подходам, детальному анализу состояния изученности вопроса как в мире, так и в регионе с весьма детальным описанием наиболее крупных гидротермальных систем Камчатки, приуроченности гидротерм к разнообразным геодинамическим обстановкам и составу вмещающих образований, а также методам исследований, в том числе, термогидродинамическому-химическому моделированию.

В результате вариативного TOUGHREACT-EOS2 моделирования условий формирования проницаемого канала в вулканогенных породах доказывается, что в трещинной зоне в неизменных риолитовых и дацитовых туфах создаются благоприятные условия формирования канала для разгрузки гидротермальной системы при условии того, что в процессе сквозной напорной восходящей фильтрации высокотемпературных термальных вод (с температурой выше  $140^{\circ}\text{C}$ ) одновременно с растворением вулканического стекла происходит увеличение пористости и проницаемости в осевой части восходящего термального потока, а вокруг него формируется непроницаемая зона из гейзерита. Именно это условие и положено в основу создания радиально-цилиндрической термогидродинамической-химической модели каналов для разгрузки гидротермальной системы. Кроме того, определено массовое газосодержание  $\text{CO}_2$ , необходимое для кипения по всей глубине канала и извержения гейзера. Разработанная модель позволила произвести эпигнозное и актуальное моделирование и сопоставить полученные результаты с реальными обстановками. Высокая их сходимость подтверждает *правильность выбранного подхода и обоснованность первого защищаемого положения*, в котором следовало, на наш взгляд, *перечислить набор параметров, которые определяют условия формирования гейзеров*.

Детальная проработка модели (условия термальной разгрузки, источники поступления тепла, геологическое строение вмещающих пород, химический, газовый и изотопный составы подземных вод, температурный

режим) по литературным, архивным и современным материалам, полученным, в том числе, с участием автора, предопределила высокую степень достоверности полученных результатов, а образование вторичной минерализации в полной мере отвечает современным представлениям о механизмах взаимодействия в системе «вода-горная порода», разработанных и детально описанных в работах Шварцева С.Л.

*При этом возникает несколько вопросов, связанных со структурой модели:*

*-каким образом определен химический состав первичного водного раствора при задании начальных условий (который задается «как массовый источник термальной воды с расходом 1 кг/с и энтальпией 589 кДж/кг (140°C)»): он получен на предыдущих этапах моделирования или это фактические данные, т.е. результаты стандартного химического анализа воды, приведенные в табл.1.2? Также не очень ясно, каковы предполагаемый генезис и минерализация первичного раствора?*

*- в тексте хотелось бы увидеть более подробное рассмотрение условий питания гидротермальных источников (глубокая инфильтрация – нагрев – подъем – обогащение углекислым газом и пр. – рис.1.8.) Участвуют ли в питании ювенильные или морские воды, проникающие при погружении Тихоокеанской литосферной плиты, о чем свидетельствует изотопный состав проб свободного газа из источника около гейзера «Великан» (стр.90), играет ли их состав какую-то роль в формировании химического состава первичного раствора? (это описывается в работах Шварцева С.Л. и отмечается в работе автора (стр.14): «важную роль в динамике гидротермальных систем играют тектонические нарушения и крупные трещины. Они являются основными, часто единственными, каналами поступления глубинного флюида в верхние части гидротермальных систем»).*

Разработка этого вопроса представляется серьезным заданием для продолжения начатых исследований.

*- «Разгрузка гейзера на поверхности модели задана как самоизливающаяся скважина», т.е. это граничные условия II рода? Носит ли эта граница неизменный характер в процессе всего периода, который охватывает моделирование?*

*- чем обусловлена принятая мощность модели 50 м (рис.1.12. стр.60) при общей мощности системы более 2500 м (рис.1.8 «Концептуальная модель и геолого-гидрогеологический разрез гидротермальной системы Долины Гейзеров»)*

*- в главе (стр.58) представлены результаты моделирования, выполненного на различные периоды времени и для различных геолого-структурных условий, однако, из текста не совсем ясно, являются ли временные периоды (100, 1000 и 3500 лет) реконструкцией геологической истории, т.е. эпигнозным и актуальным этапами, результаты которых при достаточной сходимости с реальными обстановками свидетельствуют о*

*правильности выбора краевых условий, или же это прогноз, оценить достоверность которого можно только в необозримом будущем?*

Доказательства *второго защищаемого положения* приводятся во *второй главе* диссертационной работы, где анализируются результаты многолетних режимных наблюдений за гидродинамическим и гидрогеохимическим режимами системы Долины Гейзеров. Наблюдения за периодичностью работы гейзеров начаты с момента ее (Долины) открытия (т.е. с 1941г.), с 1996г. для регистрации периодичности извержений гейзеров использовался способ В. А. Дроздина, в период с 2005г. по 2007г. работы были частично прекращены, а затем велись непрерывно до 2015г. В главе детально описываются методы полевых исследований и методики проведения режимных наблюдений за цикличностью извержения гейзеров логгерами НОВО U12-015, регистрацией уровня Подпрудного озера-1 логгерами давления НОВО WATER LEVEL LOGGER U20-001-04, а также оценки скрытой термальной разгрузки гидрохимическим методом и по эмпирической зависимости А.В. Кирюхина.

Результаты обработки полученных данных доказывают, что между событиями 2007 и 2014 г.г. основные характеристики двух наиболее мощных гейзеров Великан и Большой претерпели заметные изменения, в том числе, уменьшился интервал между извержениями (ИВЕ), снизилось содержание хлор-иона, изменилось соотношение объемов питания за счет эндо- и экзогенного источников в пользу последнего, что отражается на содержании газовых компонент: ранее доминировали углекислый газ и азот, а после 3 января 2014 г. в гейзерах Великан и Большой преобладающими стали атмосферные газы, в то же время в источнике, находящемся в восьми метрах от ванны гейзера Великан, доминирующими по-прежнему остались газы магматического генезиса ( $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ), отмечается значительное количество метана и водорода. Перечисленные показатели и их изменения *подтверждают вывод соискателя* о том, что режим функционирования гейзеров чувствителен к изменениям локальных гидрогеологических и гидрологических условий.

*Вопросы и комментарии по второй главе:*

- *количественные показатели разгрузки термальной глубинной компоненты на створе «Плотина», полученные путем прямых измерений и расчетным путем с использованием проводимости, чаще всего не совпадают (стр.80, рис.2.10). Хотелось бы понять, чем обусловлены эти несовпадения и учитывалось ли эта разница при определении тепловой мощности, составившей 194 МВт (стр.79)?*

- *очень большой объем фактического материала, связанного с химическим составом подземных вод, особенно газовым и изотопным, нуждается в дополнительных анализе и осмыслении с точки зрения структурно-тектонических позиций;*

- *сложно воспринимаются табл.2.2-2.8 и рис. 2.12 -2.12в без соответствующего анализа и комментариев в тексте. При этом*

*результаты точечного нерегулярного опробования (август-сентябрь), как верно отмечает соискатель, «не отражают возможные сезонные изменения в течение годового гидрологического цикла», что подтверждают и значения показателей, приведенных в вышеперечисленных таблицах, в связи с чем возможно ли эти исследования рассматривать как «мониторинговые наблюдения» (название раздела 2.3), которые по своей сути предназначены для прогнозных оценок происходящих процессов?*

*- в работе в явном виде нет данных о сезонных колебаниях дебитов гидротерм, хотя основным источником их питания названы метеогенные воды, о чем свидетельствуют результаты изотопного анализа кислорода и водорода вод Нижне-Гейзерного и Верхне-Гейзерного полей (рис.2.13).*

*Можно ли предположить, что здесь сыграли роль не только атмосферные осадки, но и питание за счет грунтовых пресных вод, что в модели было изначально исключено? Или все-таки основной источник – это глубинная составляющая (свидетельство – повышенное содержание бора и кремниевой кислоты в гейзере Шаман, Карпов, 2012)? В связи с вышеперечисленным возникают вопросы: каков же генезис исходного раствора и какая задача решается при моделировании - стационарная или нестационарная? Возможно, суммарная минерализации по объектам и ее изменения во времени помогли бы ответить на вопрос о генезис.*

Скорее всего, соискателем этот интереснейший вопрос оставлен для будущих исследований.

*В третьей и четвертой главах приводится анализ влияния 1-ого и 2-ого Подпрудных озер на функционирование гейзеров на основе поэтапного многовариантного решения задач методом термогидродинамического моделирования.*

Моделирование влияния Подпрудного озера-1 показало увеличение разгрузки практически всех гейзеров, что подтверждается реальным уменьшением ИВЕ гейзеров Большого и Великана, а также изменение температуры воды в каналах гейзеров, в которые заливалась вода из озер. При этом на модели не удалось воспроизвести наблюдаемое в реальных условиях снижение иона хлора в воде гейзеров Большой и Великан, что рассматривается соискателем в качестве задачи дальнейших исследований.

При моделировании влияния Подпрудного озера-2 определена зона его теплового воздействия, в результате которого в гейзерном резервуаре под озером сформировалась линза холодной воды, при этом не происходит теплового и гидродинамического воздействия на гейзерный резервуар в целом в связи с тем, что формируется баланс между высоким давлением притока глубинного теплоносителя и давлением холодной воды из озера-2.

Следует отметить тщательную проработку модели при воспроизведении актуальной ситуации, включая краевые условия и термогидродинамические характеристики, что предопределяет высокую степень достоверности результатов количественного анализа и выявления основных факторов, воздействующих на изменения параметров термодинамической системы

Долины Гейзеров, произошедших после формирования Подпрудных озер – 1 и 2.

*Небольшой комментарий сводится к тому, что в тексте работы не сделан акцент на обосновании выбора Cl-иона в качестве модельного трассера.*

Важнейший практический вывод заключается в оценке роли давления в термодинамической системе как основного параметра, контролирующего изменения температуры и концентрации Cl-иона, что необходимо учитывать при оценке гидротерм как источников энергетических ресурсов.

Полученные результаты в полной мере *отражаются в третьем защищаемом положении и доказывают его состоятельность.*

Соискателем определена и *задача дальнейших исследований:* воспроизведение на модели снижения концентрации Cl-иона в воде гейзеров Большой и Великан и уточнение причин происходящего процесса.

*Прочие незначительные комментарии* касаются преимущественно оформления графического и текстового материалов, например:

- на стр.42, рис.1.7 представлены условные обозначения, на которые автор ссылается по всему тексту, но там отражены не все знаки, что затрудняет понимание других изображений: например, на рис. 1.8 неясно, что означает контур, показанный красной пунктирной линией с берк-штрихами, а также фиолетовая линия, показывающая, очевидно, пьезометрическую поверхность;

- на стр.43, рис.1.8. следует приводить масштаб в принятом в геологии виде, а описание в виде «Разметка по горизонтали - 500 м, по вертикали - 250 м» не совсем представительна;

- на стр.78, рис.2.9. описание условных обозначений: «Кружки с крестами соответствуют времени проведения гидрометрических наблюдений и времени отбора проб воды», при этом графики построены вероятнее всего не по этим наблюдениям, а «кружки» отражают только время отбора проб воды;

- условные обозначения к графикам в описательном виде значительно затрудняют восприятие графических изображений – рис. 2.9, 2.10, 2.11 и далее;

- дублирование рисунков, например, 2.25 и 3.1;

- для простоты восприятия необходима правильная простановка верхних и нижних индексов (табл.1.2, 3.2 и далее по тексту).

Перечисленные выше вопросы и комментарии ни в коей мере не умаляют значимость представленной работы, которая по своей наукоемкости и выводам, базирующимся на мощном фактическом материале, явно превосходит уровень кандидатской диссертации.

В целом достоверность сделанных в диссертационном исследовании выводов базируется на впечатляющем объеме уникального фактического

материала и обширной апробации в виде докладов на форумах различного уровня и публикаций.

В работе весьма явственно просматривается проблематика будущих исследований, касающихся генезиса исходного флюида и условий формирования гидротерм региона с точки зрения структурно-тектонических позиций.

Следует отметить, что соискателем весьма корректно используются материалы других исследователей со ссылками и указанием результатов работ коллег.

Автореферат в полной мере отражает основные идеи и выводы диссертации, содержит необходимый и достаточный материал для оценки научного и прикладного значения работы.

Анализ представленных материалов позволяет сделать вывод о том, что диссертация «Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки)» соответствует требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Рычкова Татьяна Васильевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 – Гидрогеология.

Официальный оппонент  
канд.геол.-мин.наук,  
доцент кафедры «Прикладная геология, геофизика  
и геоинформационные системы» ИРНИТУ,  
научн.руководитель лаборатории моделирования  
геологических, гидрогеологических

и инженерно-геологических процессов

Аузина Л.И.

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.83  
<https://www.istu.edu>, [auzina@istu.edu](mailto:auzina@istu.edu), +7-914-899-5982

Я, Аузина Лариса Ивановна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

« 25 » марта 2020г.

Подпись Аузиной Л.И. заверяю

