

Отзыв

официального оппонента Копыловой Галины Николаевны, доктора геолого-минералогических наук, доцента, заведующей лабораторией геофизических исследований, гл. научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", Камчатский филиал (КФ ФИЦ ЕГС РАН), 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, gala@emsd.ru, р.т.+7(4152) 431-849, м.т. +7 961 963 0493, на диссертацию Рычковой Татьяны Васильевны «Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки)», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 - Гидрогеология

Общая характеристика работы.

Объектом исследования являются циклически извергающиеся кипящие термоминеральные источники (гейзеры) в зонах разгрузки высокотемпературных гидротермальных систем областей современного вулканизма, механизмы их формирования и функционирования в природных и техногенных условиях. Основное внимание в работе уделяется гейзерам гидротермальных систем Долины Гейзеров, Паужетской и Узон на полуострове Камчатка.

В диссертации рассматривается широкий круг вопросов формирования проницаемых гейзерных каналов в вулканогенных породах и термогидродинамического режима течения в них газонасыщенного флюида; особенностей цикличности функционирования гейзеров и изменений газохимического состава термальной воды; влияния новообразованных подпрудных озер при катастрофическом оползне и сходе селя на гидродинамический и гидрогеохимический режим гейзеров и разгрузку термальных вод в Долине Гейзеров.

Основными методами исследования являются геолого-гидрогеологическое картирование, наблюдения за режимом гейзеров и газо-гидрогеохимическим составом термальной воды, термодинамическое-химическое моделирование с использованием лицензионного программного обеспечения, гидрогеологический анализ литературных, полевых и режимных данных, а также результатов численного моделирования.

В основу диссертационного исследования положены материалы многолетних работ соискателя, Рычковой Т.В., на Паужетском гидротермальном месторождении и в Узон-Гейзерном гидротермальном районе полуострова Камчатка. Ей лично, совместно с научным руководителем, Кирюхиным А.В., и сотрудниками лаборатории тепломассопереноса Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН были составлены цифровые геолого-гидрогеологические карты и разрезы районов распространения современных и палео-гейзеров, положенные в основу создания концептуальных гидрогеологических моделей и численного моделирования; проведены многолетние режимные наблюдения на гейзерах и установлены закономерности их функционирования с учетом комплекса природных факторов. Т.В. Рычковой лично были созданы и протестированы комплекс TOUGH2 моделей зоны разгрузки гидротермальной системы Долины Гейзеров в естественных условиях и при воздействии двух новообразованных Подпрудных озер.

Диссертация объемом 165 страниц компактна, хорошо структурирована и иллюстрирована, включает 66 рисунков и 26 таблиц. Она состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 124 наименований.

На защиту вынесены три положения, касающиеся ключевых вопросов по механизмам образования, функционирования и изменениям режима гейзеров, существенно углубляющие научные представления по:

- условиям образования и функционирования гейзеров, как специфических форм разгрузки высокотемпературных газонасыщенных термальных вод в районах кислого вулканизма (положение 1);

- особенностям режима функционирования природных гейзеров и влияния на него метеорологических, локальных гидрологических и гидрогеологических факторов (положение 2);

- оценке влияния новообразованных Подпрудных озер на гидрогеологическое состояние геотермального (гейзерного) резервуар и на функционирование гейзеров Долины Гейзеров (положение 3).

Глава 1 посвящена обоснованию защищаемого положения 1. В Главе 2 дано обоснование защищаемого положения 2. Материал в Главах 3 и 4 обосновывает защищаемое положение 3.

Полезным дополнением к диссертации является Список принятых терминов с их краткими определениями.

По теме диссертации опубликовано 24 работы, в т. ч. 5 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, при этом 4 статьи в журналах Вулканология и сейсмология и Applied Geochemistry Journal индексируются международными базами данных Web of Science и Scopus. Все 5 статей написаны в соавторстве.

В автореферате объемом 20 страниц достаточно полно представлено содержание диссертации, защищаемые положения, их обоснование и основные результаты исследования.

Актуальность представленной диссертационной работы не вызывает сомнений, т. к. гейзеры, особенно гейзеры Долины Гейзеров, являются уникальными гидрогеологическими объектами, имеющими высокую эстетическую, туристическую и познавательную ценность. Зона разгрузки гидротермальной системы Долины Гейзеров, называемая Жемчужиной Камчатки, представляет объект международного туризма и является «визитной карточкой» не только Камчатского края, но и России. Для района Долины Гейзеров характерна высокая оползневая опасность, проявления которой могут сопровождаться катастрофическими последствиями для гейзеров, как главных объектов туристического интереса. Влияние современных оползневых процессов, образование подпрудных озер на состояние гейзеров и всей зоны разгрузки гидротермальной системы необходимо учитывать при разработке ежегодных туристических компаний и маршрутов. Кроме этого, углубленное изучение условий формирования и функционирования гейзеров, их гидродинамического и гидрогеохимического режима позволяет получать новые знания о высокотемпературных гидротермальных системах районов современного вулканизма, которые являются природным источником экологически чистой геотермальной энергии.

Целью диссертационной работы является углубление научных представлений о механизмах формирования и функционирования гейзеров, как уникальной формы водной, тепловой и газо-гидрогеохимической разгрузки высокотемпературной гидротермальной системы.

В диссертационном исследовании решались следующие задачи:

- термогидродинамическое-химическое моделирование изменений фильтрационно-емкостных свойств вулканогенных пород риолитового и дацитового состава при напорной восходящей фильтрации термальной воды с химическим составом воды гейзеров и условий образования проницаемого гейзерного канала;

- моделирование термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера;

- выявление динамики цикличности режимных гейзеров и изменений содержания хлор-иона в их воде с оценкой эволюции очага разгрузки гидротермальной системы Долины Гейзеров;

- TOUGH2-моделирование влияния двух Подпрудных озер (Первого озера, появившегося в результате оползня 3.06.2007 г. и Второго озера, возникшего в результате селя 03.01.2014 г.) на режим гейзеров, изменение их термодинамических и гидрохимических параметров, а также на гейзерный резервуар в целом.

Научная новизна работы:

1. Впервые с использованием термогидродинамического-химического TOUGHREACT моделирования изменения фильтрационно-емкостных свойств пород риолитового и дацитового состава при проточной фильтрации термальной воды с химическим составом, соответствующим составу воды гейзеров, показана возможность формирования проницаемого гейзерного канала в зонах трещиноватости кислых туфов.

2. Выполнено моделирование термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера и оценены массовые параметры газовой разгрузки (преимущественно, углекислого газа), обеспечивающие условия кипения по всему гейзерному каналу.

3. Установлены основные закономерности в динамике цикличности функционирования режимных гейзеров и источников Долины Гейзеров и кальдеры Узон, изменений газо-химического состава термальных вод; прослежены изменения разгрузки гидротермальной системы Долины Гейзеров, включая исчезновение старых и появление новых гейзеров и горячих источников.

4. Впервые выполнено TOUGH2 моделирование влияния двух Подпрудных озер на режим гейзеров и изменение их термодинамических и гидрогеохимических параметров.

На защиту вынесены три защищаемых положения.

Первое защищаемое положение: *Установлены условия формирования гейзеров в части обоснования модели формирования проницаемого самоизолирующегося канала в артезианско-вулканогенном бассейне, сложенном риолитовыми туфами, и выявления диапазона концентраций CO_2 , необходимых для обеспечения кипения по всему каналу.*

На основе анализа геолого-гидрогеологических условий в районах распространения гейзеров (по мировым данным) в разделах 1.1-1.5 показано, что гейзеры приурочены к высокотемпературным гидротермальным системам преимущественно в областях кислого четвертичного вулканизма, и химический состав воды гейзеров соответствует хлоридно-натриевому типу.

Необходимым элементом структуры гейзеров в приповерхностных условиях является изолированный гейзерный канал. В разделе 1.6 для объяснения формирования такого субвертикального канала в кислых пирокластических отложениях, представленных туфами, выполнено моделирование напорной восходящей фильтрации термальной воды хлоридно-натриевого состава в зонах повышенной трещиноватости в риолитовых и дацитовых туфах с учетом растворения вулканического стекла и вторичного минералообразования в системе «вода – порода». Моделирование проводилось на временных интервалах 100, 1000 и 3500 лет.

Результаты многовариантного моделирования хорошо иллюстрированы и показывают, что в трещинных зонах в неизменных риолитовых и дацитовых туфах при проточной восходящей фильтрации термальной воды возможно формирование гейзерного канала за счет увеличения пористости и проницаемости риолитовых и дацитовых туфов при растворении вулканического стекла. Самоизоляция гейзерного канала от холодных грунтовых вод может осуществляться за счет вторичного минералообразования.

В разделе 1.7, с использованием моделирования, рассматривается механизм кипения газонасыщенной термальной воде в гейзерном канале, как необходимое условие

гейзерного режима извержений. Также оценено массовое содержание углекислого газа, обеспечивающее режим извержений гейзеров Великан и Большой в Долине Гейзеров. Показано, что гейзерный режим может обеспечиваться притоком в нижнюю часть канала углекислого газа с газосодержанием от 1 до 10 г/с, что вызывает кипение термальной воды по всему гейзерному каналу. В качестве обоснования правильности расчетов и моделирования приводится распределение замеренных величин температуры термальной воды в гейзерном канале с ее расчетными значениями.

Таким образом, первое защищаемое положение можно считать полностью обоснованным.

Второе защищаемое положение: *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.*

В главе 2 приводится обобщение литературных и авторских данных по регистрации периодичности извержений гейзеров в Долине Гейзеров (параметр ИВЕ – интервал между извержениями) за многолетний период и их связи с годовым гидрологическим циклом, осадками, атмосферным давлением, сейсмичностью и другими природными факторами. Особый интерес представляют данные 5-минутных измерений температуры воды в каналах гейзеров на уровне излива с использованием температурных логгеров НОВО U12-015 в 2007-2015 гг., а также данные гидрометрических измерений с определениями электропроводности и концентрации хлорид-иона в воде р. Гейзерной для оценки суммарной разгрузки Гейзерной гидротермальной системы и ее тепловой мощности. Представлены оценки изменчивости разгрузки глубинной компоненты термальных вод в связи со сходом оползня и селом и образованием Подпрудных озер. Приводятся данные мониторинга газогидрохимических параметров термальной воды из отдельных гейзеров и прослежено влияние Подпрудных озер 1 и 2 на химический состав воды гейзеров, свидетельствующие о разбавлении термальной воды поверхностными водами, уменьшении притока углекислого газа и увеличении содержания в термальной воде газов атмосферного происхождения. Выполнены измерения изотопного состава (дейтерий и кислород-18) в воде гейзеров. Материалы режимных наблюдений обработаны в соответствии с современными методами анализа временных рядов и влияния на них различных природных факторов, иллюстрируются графиками и таблицами, имеющими самостоятельное значение для документирования и сохранения материалов выполненных режимных наблюдений.

Приведенные материалы режимных наблюдений, расчетов и аналитических определений состава вод и газов достаточно хорошо согласованы между собой и, в целом, обосновывают защищаемое положение 2. Вместе с тем, вызывает сомнение, что паводковое повышение давления в поверхностных водотоках и грунтовых водах вызывает «подпор» гидротермальной системы в целом (предложение 2 в Положении 2, а также см. определение «Гидротермальная система» в Списке принятых терминов). Более логичным было бы объяснить наблюдаемых изменений режима термопроявлений Долины Гейзеров локальным «подпором» восходящего потока глубинных гидротерм в зоне разгрузки гидротермальной системы.

Третье защищаемое положение: *Гидрогеологический эффект Подпрудных озер, образовавшихся в результате оползня-обвала 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.

В главе 3 рассматривается влияние инфильтрации из образовавшегося после катастрофического оползня Подпрудного озера на гейзерный резервуар Долины Гейзеров на основе многоэтапного численного 2D моделирования. При создании модели использованы цифровые топографическая и геолого-гидрогеологическая карты района распространения гейзеров, их расположение, параметры и состояние по данным полевого обследования. В модели приняты величины расхода, энтальпии и концентрация хлора теплоносителя, обоснованные данными наблюдений, как в Долине Гейзеров, так и на других разбуренных высокотемпературных гидротермальных системах Камчатки и мира.

Результаты моделирования показывают увеличение давления в зоне разгрузки гейзерного резервуара, синхронизированное с увеличением разгрузки гейзеров и уменьшением ИВЕ. Полученные результаты хорошо согласовываются с данными полевых обследований и режимных наблюдений.

В главе 4 проводится многовариантное моделирование влияния Подпрудного озера 2 в сопоставлении с данными по природным гейзерам. В результате была определена зона охлаждающего воздействия озера на гейзерный резервуар вследствие образования линзы холодных вод под озером мощностью 40-50 м. Показано, что Подпрудное озеро 2 не оказало значимого теплового и гидродинамического воздействия на гейзерный резервуар в целом.

Таким образом, третье защищаемое положение в части гидрогеологического эффекта от образования Подпрудного озера 1 в достаточной степени обосновано моделированием и данным режимных наблюдений, а также подтверждается результатами моделирования влияния Подпрудного озера 2 на гейзерный резервуар в части ограниченного термического и химического воздействия влияния вод озера и линзы холодных вод под ним.

Замечания:

1. В диссертации приводится Список принятых терминов с их определениями и ссылками. Вместе с тем, в случаях применения к конкретным условиям Долины Гейзеров терминов «гидротермальный резервуар», «геотермальный резервуар», «гейзерный резервуар» остается не вполне ясными различия между этими понятиями. Если между этими понятиями и соответствующими гидрогеологическими объектами имеются различия, то их нужно определить более четко и показать соответствующие границы на картах и схемах, т.к. понятие «резервуар» в любом случае предполагает определение его границ. Если это сделать затруднительно для Гейзерной гидротермальной системы в силу ее естественного состояния и отсутствия данных бурения, то было бы достаточно в тексте диссертации ограничиться использованием более традиционных терминов «гидротермальная система» и «зона разгрузки гидротермальной системы».

Полезным было бы также привести Список принятых терминов в Автореферате, его разрешенный объем в 24 страницы это допускает.

2. В разделе 1.3 дано описание высокотемпературных гидротермальных систем (ГТС) полуострова Камчатка по различным литературным источникам, а в разделе 1.5 приводятся данные о гейзерах и палеогейзерах на Камчатке.

С учетом целевой направленности диссертационного исследования эти разделы следовало бы объединить и дополнить таблицей с основными характеристиками высокотемпературных ГТС Камчатки и указать в ней наличие либо отсутствие современной гейзерной активности или ее палеопроявлений в пределах отдельных ГТС. В представленном виде данные о ГТС в разделе 1.3 недостаточно систематизированы с учетом целевой направленности диссертационного исследования.

3. Для отдельных фрагментов текста диссертации и графических материалов характерна небрежность в оформлении и описании содержания:

- наряду с использованием физических единиц в системе СИ, что является необходимым условием оформления научных текстов, местами физические единицы представлены в устаревшей смешанной системе единиц (например, ккал/сек×км², стр. 26).

- Рис. 1.1. В подрисуночной подписи говорится о распределении *...геотермальных систем...*, в тексте с указанием на рис. 1.1 – о распределении *...гидротермальных систем...* Так что же показано на рис.1.1? И есть ли различие между этими понятиями?

- Стр. 17: Фраза «Геотермальная энергия высокотемпературных ГТС *разгружается* в виде 23 действующих вулканов и 9 крупных ГТС.. со ссылкой на работы Кирюхина, Пилипенко» и также последующее предложение нуждаются в редакции. По-видимому, речь все же идет о преимущественно конвективном выносе глубинного тепла действующими вулканами и ГТС, а не о разгрузке «геотермальной энергии».

- при определении типов термальных вод, например, на стр. 20 «хлоридно-натриевые азотно-углекислые воды» или на стр. 26 «сульфатно-хлоридно натриевые воды» следовало бы указать, какая и чья типизация используется.

- Рис. 1.3: отсутствует расшифровка условных обозначений 1-5.

- Стр. 21, строки 5-7 сверху. Из текста следует, что «...водоносный комплекс... служит фундаментом Паужетского месторождения». В продолжение этого фрагмента на стр. 22 написано, что «разгрузка гидротерм происходит *из водоупора...*». Необходима редакция этого фрагмента.

- стр. 38. Фраза «Гидротермальная система Долины Гейзеров представлена тремя основными очагами разгрузки гидротерм...» находится в противоречии с определением «гидротермальная система».

На этой же странице приводится ссылка на данные радарной интерферометрии о *положительной деформации с амплитудой до 15 см...* Из текста не ясно, что означает «положительная деформация»? Т.к. этот фрагмент касается наличия частично расплавленного магматического тела, являющегося источником тепла для Гейзерной ГТС, полезно было бы привести рисунок, иллюстрирующий результаты интерферометрии.

- Рис. 1.6 совместно с Рис. 1.7 (условные обозначения) является одним из наиболее важных. На нем представлено расположение термопроявлений, водотоков, тела оползня 2007 г. и тектонических элементов на геологической карте. Однако его название «условия циркуляции теплоносителя в гидротермальном резервуаре Долины Гейзеров» не соответствует содержанию рисунка. Мы не обнаружили на рис. 1.6 ряда условных обозначений, представленных на рис. 1.7, в частности, стрелок, показывающих направление потоков термальных вод и направления потоков пара.

- На не менее важном Рис.1.8 представлена концептуальная модель и геолого-гидрогеологический разрез ГТС Долины Гейзеров, на котором имеются ряд условных обозначений без расшифровки, в частности, субвертикальных прерывистых черных линий, толстых зеленых линий, синих стрелок, а также синей субгоризонтальной прерывистой линии.

4. Раздел 2.5.2. Недостаточно обоснованным является утверждение об отсутствии влияния атмосферного давления на периодичность извержений гейзера Великан на основе простого сопоставления величин ИВЕ и абсолютных значений атмосферного давления. Есть и другие, более приемлемые способы статистического анализа наличия или отсутствия связи между временными рядами с отдельными аномальными выбросами.

5. Таблица 2.12. Данные из мирового каталога сейсмической активности со ссылкой на каталог USGS. Не ясно, что такое Класс в шапке таблицы и откуда или каким образом эта величина была получена? Также не ясно, что обозначает Суммарная энергия в шапке таблицы и в каких единицах она представлена.

Заключение

Несмотря на высказанные выше замечания, имеющие, в основном, технический характер, диссертационная работа Рычковой Т.В. может рассматриваться как законченное

научное исследование, выполненное лично соискателем, и вносящее существенный вклад в развитие гидрогеологии высокотемпературных термальных вод вулканических районов с проявлениями гейзерной активности.

В рассмотренной диссертации выполнено комплексное исследование механизмов образования и функционирования гейзеров в зонах разгрузки высокотемпературных гидротермальных систем в районах кислого четвертичного вулканизма.

На примере уникальных гейзеров Долины Гейзеров изучены особенности и закономерности изменения их гидродинамической активности, теплового потенциала и газо-гидрогеохимической разгрузки под влиянием различных природных факторов, включая последствия катастрофического оползня и схода селя с образованием Подпрудных озер, вызвавших изменения рельефа, подтопление ряда гейзеров, образование новых гейзеров и других поверхностных проявлений гидротермальной активности в зоне разгрузки Гейзерной гидротермальной системы.

С использованием термогидродинамического моделирования оценено влияние Подпрудных озер на режим отдельных гейзеров и на термо-гидродинамическое состояние высокотемпературных гидротерм зоны разгрузки Гейзерной гидротермальной системы. Показано, что влияние современных катастрофических экзогенных процессов, таких как оползни, сели, образования поверхностных водоемов могут сопровождаться изменениями гейзерной активности, от незначительных изменений периодичности извержений отдельных гейзеров до их полного исчезновения и образования новых гейзеров и других форм поверхностной гидротермальной активности. Установлено, что образование Подпрудных озер не оказало необратимого воздействия на гейзерный резервуар, в котором под озером сформировалась линза холодных вод до глубин 40-50 м с отсутствием нисходящей фильтрации вследствие установившегося равновесия между давлением глубинных высокотемпературных гидротерм (глубинный теплоноситель) и давлением воды в озере и в линзе холодных вод под озером.

Результаты диссертационного исследования имеют важное научное и практическое значение для развития гидрогеотермических исследований, планирования рекреационной и туристической деятельности в районах современной гейзерной активности, организации и проведения наблюдений за режимом гейзеров, включая вопросы прогноза сильных землетрясений.

Диссертация «Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки)» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о порядке присуждения ученых степеней» и требованиям, установленным ВАК РФ, а ее автор Рычкова Татьяна Васильевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 – Гидрогеология.

Официальный оппонент

Копылова Галина Николаевна,
заведующая лабораторией КФ ФИЦ ЕГС РАН, гл.н.с.,
д. г.-м. н. по специальности 25.00.07 – Гидрогеология
доцент по специальности 25.00.07 – Гидрогеология

Я, Копылова Галина Николаевна, автор официального отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

14 сентября 2020 г.

Копылова Г.Н.


Подпись Г.Н. Копылова
заверяю
Начальник ОК КФ ФИЦ ЕГС РАН
Т. Л. Мамонова