

Отзыв

официального оппонента Копыловой Галины Николаевны, доктора геолого-минералогических наук, доцента, заведующей лабораторией геофизических исследований 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 Полякова Андрея Юрьевича «Анализ условий водного и газового питания Мутновского геотермального резервуара (Камчатка)», представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 - Гидрогеология

Общая характеристика работы. Объектом исследования является Мутновский геотермальный резервуар (МГР), представляющий природное скопление высокотемпературных парогидротерм, используемых в качестве теплоносителя для Мутновской геотермальной электростанции (ГеоЭС), запущенной в эксплуатацию в 1999 г.

Диссертационная работа Полякова А.Ю. посвящена изучению источников водного питания МГР и роли газовой компоненты в его гидродинамическом режиме в связи с сейсмическими событиями (сильные землетрясения). Работа основана на комплексировании материалов полевых наблюдений, данных глубинного бурения, результатов исследования изотопного состава природных вод и режимных измерений давления в глубокой скважине, а также результатов TOUGH2 моделирования процессов тепломассопереноса в Мутновской гидротермальной системе.

В основу диссертационного исследования положены материалы многолетних работ Полякова А.Ю. на Мутновском геотермальном месторождении. Им лично и совместно с Кирюхиным А.В. были отобраны более трехсот проб природных вод, в т.ч. термальных, на изотопный и химический анализ, более 90 газовых проб. Соискатель принимал участие в получении и последующей обработке девятилетнего временного ряда данных по измерениям давления в глубокой высокотемпературной скважине 30. Совместно с коллегами им выполнялось TOUGH2 моделирование процессов водного питания МГР и механизма циклических колебаний давления в связи с сейсмическими событиями. Кроме этого, Поляковым А.Ю. было создано оборудование для отбора водных и газовых проб, повышающее эффективность пробоотбора и обеспечивающее воспроизводимость и достоверность анализов состава проб газа и конденсата. Им также было модернизировано оборудование для измерения давления в низко- и высокотемпературных гидротермах для его использования в экстремальных климатических условиях Камчатки.

Представленная диссертация компактна и хорошо структурирована. Она состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 85 наименований и включает 116 страниц текста, 11 таблиц и 52 рисунка. Главы 1 и 2 посвящены обоснованию защищаемых положений 1 и 2, в главе 3 дано обоснование защищаемого положения 3. Глава 4 имеет информационный характер, в ней представлены технические разработки соискателя, с использованием которых получены фактические данные, используемые в диссертационном исследовании. В автореферате объемом 24 страницы достаточно полно представлено содержание диссертации, защищаемые положения, их обоснование и основные результаты.

По теме диссертации опубликовано 29 работ, в т.ч. 9 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций, и индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus. Все 9 статей написаны в соавторстве.

№43-10
от 31.01.2019

Актуальность представленной диссертационной работы не вызывает сомнений, т. к. высокотемпературные парагидротермы относятся к категории экологически чистого природного источника геотермальной энергии и используются для создания геотермальных электростанций (ГеоЭС).

Мутновская ГеоЭС обеспечивает 25% потребности электроэнергии района Петропавловск-Елизовской агломерации, где сосредоточена большая часть населения Камчатского края. Для обеспечения длительной и бесперебойной работы ГеоЭС необходимо углубленное изучение свойств геотермального резервуара, его режима и формирования запасов теплоносителя в естественных и нарушенных условиях. Одним из важнейших вопросов является выяснение источников водного питания парагидротерм и получение соответствующих количественных характеристик для последующей разработки оптимального режима эксплуатации месторождения и прогнозирования техногенного влияния.

Не менее важным вопросом является исследование гидродинамического режима резервуаров перегретых термальных вод в условиях повышенной сейсмической и вулканической активности. Исследование связи гидродинамического режима двухфазного (пар+газ+вода) резервуара и процессов подготовки и реализации сейсмических событий на основе данных детальных режимных наблюдений является важной задачей в области поиска новых видов гидрогеологических предвестников, их использования для сейсмического прогнозирования и изучения влияния сейсмичности на режим высокотемпературных подземных вод.

Целью диссертационной работы является определение источников и условий водного питания МГР с оценками связи его гидродинамического режима с сейсмическими событиями и роли газового фактора.

В диссертационном исследовании последовательно решались следующие задачи:

- разработка и совершенствование методик пробоотбора водных и газовых проб на высокотемпературных скважинах, измерения теплофизических свойств водовмещающих пород; проведение долговременных мониторинговых измерений давления в двухфазном резервуаре Мутновского геотермального месторождения и полевого опробования природных вод, их химического и изотопного анализа; комплексный анализ полученных данных;

- выяснение источников и условий водного питания Мутновского геотермального месторождения на основе данных по изотопному составу природных вод района (δD и $\delta^{18}O$) с использованием результатов *TOUGH2* моделирования процессов теплопереноса в Мутновской гидротермальной системе;

- анализ изменений давления в Мутновском геотермальном резервуаре в связи с сейсмическими событиями по данным режимных наблюдений в скважине 30 и *TOUGH2* моделирования влияния импульсного поступления газа CO_2 на циклические вариации давления.

Научная новизна работы заключается (1) в определении генезиса и расположения источника водного питания парагидротерм Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода и водорода, заверенных результатами моделирования; (2) в обнаружении аномальных вариаций давления парагидротерм, синхронизированных с сейсмическими событиями, и в создании модели таких вариаций за счет циклического поступления углекислого газа в водоносную систему скважины.

На защиту вынесены три защищаемых положения.

Первое защищаемое положение: *На основании анализа изотопного состава подземных вод (δD и $\delta^{18}O$) установлено, что в естественных условиях наиболее вероятным источником водного питания Мутновского геотермального месторождения*

является вода ледника кратера Мутновского вулкана, а в условиях нарушенных эксплуатацией, происходит дополнительное привлечение локальных метеорных вод.

Для обоснования этого положения в главах 1 и 2 рассмотрены геолого-тектонические и гидрогеологические условия района работ, приведены данные о структуре основных зон притока высокотемпературного теплоносителя по материалам бурения, гидрогеохимические данные и данные по изотопному составу природных вод.

При оценке изотопного состава воды из высокотемпературных скважин Поляковым А.Ю. использовалась усовершенствованная методика пересчета содержания δD и $\delta^{18}O$ из сепарата с учетом изотопного фракционирования в системе «вода – пар». Новым элементом, по сравнению с традиционным способом учета фракционирования изотопов, являлось применение полиномиальной аппроксимации табличных значений констант равновесия δD и $\delta^{18}O$ в диапазоне температур 100-300 °С (автором использовалась модель 2-ого порядка). Такой подход позволил получить уточненные оценки содержания изотопов δD и $\delta^{18}O$ в воде из паро-водяных скважин.

Данные по изотопии кислорода-18 и дейтерия в природных водах района Мутновского геотермального месторождения представлены на рис. 2.7. в сопоставлении с метеорной линией Крейга. Убедительно продемонстрировано, что изотопный состав воды из высокотемпературных скважин МГР совпадает с изотопным составом воды р. Вулканной на истоке из ледника в кратере влк. Мутновский, что показывает источник водного питания МГР за счет ледниковых вод. Этот результат является принципиально новым, т. к. в более ранних работах других исследователей полагалось, что источником водного питания МГР служат метеорные воды кальдеры влк. Горелый.

Мониторинговыми исследованиями МГР с участием автора было установлено снижение в нем давления в процессе эксплуатации, а также утяжеление изотопного состава термальной воды, показывающее поступление метеорных вод в МГР в процессе его эксплуатации (рис. 2.10, 2.11).

Таким образом, первое защищаемое положение можно считать полностью обоснованным. В результате этого этапа исследования с участием соискателя был построен детальный гидрогеологический разрез вдоль Северо-Мутновской вулканотектонической зоны (рис. 2.9), обобщающий комплекс новых и уточненных данных по формированию Мутновской гидротермальной системы. В дальнейшем этот разрез использовался для построения концептуальных и математических моделей теплового и водного питания Мутновского геотермального резервуара.

Второе защищаемое положение: *Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование Мутновской гидротермальной системы объясняет гидравлическую связь между Мутновским вулканом и Мутновским геотермальным месторождением, которая осуществляется по разлому северо-северо-восточного (ССВ) простириания, включающему продуктивную зону «Основная».*

С использованием вычислительной программы многоцелевого назначения TOUGH2, данных бурения и опробования скважин, концептуальных моделей гидродинамических и гидрогеотермических процессов (рис. 2.13) с участием соискателя выполнено моделирование потоков многофазного флюида и тепла в порово-трещинной среде применительно к Мутновской гидротермальной системе. Результатом этого этапа исследований является создание профильной математической модели процесса теплового и водного питания МГР, включающей обширную зону с влк. Мутновский, очагами разгрузки термальных вод, областью эксплуатационных и наблюдательных скважин.

На моделях (рис. 2.13 - 2.16), показано, что продуктивная зона «Основная» (пароконденсатный резервуар) мощностью 120 м приурочена к разлому ССВ простириания с падением 60 ° на В и ЮВ. Указанный разлом пересекает жерло влк. Мутновский на абсолютных отметках +250 – +1250 м на расстоянии 8 км от эксплуатационных скважин. Тем самым показана возможность гидравлической связи района влк. Мутновский и МГР

по разлому ССВ простираения и водного питания МГР за счет инфильтрации ледниковых вод и их нагрева глубинным теплоносителем в зонах максимальных температур, приуроченных к скоплениям магматического вещества. При этом аккумуляция высокотемпературных парогидротерм приурочена к области продуктивной зоны «Основная», выделенной по данным глубинного бурения.

По нашему мнению, второе защищаемое положение является обоснованным в достаточной степени. Совокупность научных результатов и предложенные модели формирования Мутновской гидротермальной системы, представленные в главах 1 и 2, имеют важное практическое значение для дальнейшего развития гидрогеотермических исследований МГР и разработки оптимальных способов освоения его геотермальных ресурсов.

Третье защищаемое положение: Установлена повышенная чувствительность Мутновского двухфазного геотермального резервуара к сейсмическим событиям ($M=4.1-5.7$ на глубинах до 40 км и расстоянии от 90 до 235 км), выражающаяся в снижении давления на 0.1 – 4 бар за 1.5-4 часа перед сейсмическими событиями и постсейсмическими циклическими вариациями давления (с амплитудой 0.7-4.5 бар и периодом 0.3-1.5 часа) в течение 0.1-1.5 суток после землетрясений. Предложены TOUGH2 модели, объясняющие возможный механизм циклических вариаций за счет импульсного притока углекислого газа в геотермальный резервуар.

С 1995 по 2004 гг. на скважине 30, расположенной на Верхне-Мутновском участке геотермального месторождения, проводились наблюдения за давлением на глубине 950 м в паро-газовой «шапке» с использованием системы «капиллярная трубка» (Pruett Ink.). Периодичность измерений составляла вначале 5 минут и с 1998 г. – 1 минута. Скважина вскрывает двухфазный резервуар с температурами 250-270 °С в породах низкой проницаемости и характеризуется естественными и слабонарушенными условиями формирования ее гидродинамического режима.

В главе 3 в разделах 3.1-3.2 дано описание условий и данных мониторинга давления в скважине 30 в 1995-2000 г. В течение этого времени наблюдений были обнаружены значимые гидродинамические аномалии в связи с землетрясениями с магнитудами $M=4.1-4.5$ на расстоянии 90-235 км от скважины (рис. 3.2-3.5). Такие аномалии характеризовались средним снижением давления на 0.1-0.15 бар за 2-4 часа до землетрясений и постсейсмическими циклическими вариациями давления с амплитудой 0.7 – 0.95 бар с периодом 1-1.5 ч в течение 1-1.5 сут.

В 2000-2004 гг. наблюдения продолжались (раздел 3.3.) и были зафиксированы еще три гидродинамические аномалии перед двумя местными землетрясениями с $M=5.2$ и 5.7 и одним удаленным сильнейшим землетрясением (Суматра-Андаманским 26.12.2004 г., $M=9$, эпицентрального расстояния 8400 км) (рис. 3.6 – 3.8).

В разделе 3.3 приводятся данные за весь период наблюдений в сопоставлении с местными сейсмическими событиями с $M \geq 5.7$, произошедшими на глубинах до 40 км. Показано, что в связи с 12 такими событиями (из общего числа 21) наблюдались предшествующие гидродинамические аномалии. По этим данным выполнена оценка вероятности времени ожидания землетрясения при возникновении гидродинамической аномалии в сопоставлении с распределением вероятности возникновения таких землетрясений по закону Пуассона. Показано, что интегральная вероятность сильного землетрясения после гидродинамической аномалии достигает 0.38 в течение первых 40 суток и 0.88 в первые 8 месяцев, что превышает вероятность возникновения таких событий в соответствии с Пуассоновским законом повторяемости землетрясений. Этот результат показывает наличие связи между гидродинамическими аномалиями и последующими землетрясениями, что имеет важное прикладное значение в задачах по прогнозированию времени сильных камчатских землетрясений.

В разделе 3.4 приводятся данные по газовому составу паровой фазы высокотемпературных термальных вод в естественных условиях и в процессе эксплуатации месторождения. Показано, что в газовом составе доминирующим газом является CO_2 , концентрация которого составляет 77 – 94 об. %.

В разделе 3.5 с использованием спектрального и спектрально-временного анализа данных наблюдений в пароводяных скважинах Мутновского геотермального месторождения показано, что для изменений давления паро-газовой фазы характерны циклические высокочастотные вариации в диапазоне частот от 72 до 180 сут⁻¹ с амплитудами более 0.5 бар.

В разделе 3.6 представлена одноэлементная *TOUGH2* модель квазипериодических вариаций давления за счет циклического притока углекислого газа длительностью 5 мин с перерывами такой же продолжительности (рис. 3.15). Получено удовлетворительное соответствие модельных и фактических данных наблюдений по изменениям давления в скважине 30 для времени порядка одних суток.

В разделе 3.6 с использованием созданной математической модели представлены результаты моделирования гидродинамической аномалии в форме предсейсмического понижения давления и постсейсмических циклических вариаций давления в связи с местным землетрясением с $M=5.7$ (рис. 3.7). На модели показано удовлетворительное соответствие модельных и фактических данных (рис. 3.17). Предшествующее землетрясению понижение давления воспроизведено путем перерыва в притоке воды и газа, а постсейсмический рост давления и его циклические колебания были обусловлены увеличением притока воды и газа и его циклическими вариациями.

Таким образом, третье защищаемое положение обосновано в достаточной степени данными режимных наблюдений и результатами моделирования.

Замечания:

1. В диссертации автор использует ряд базовых терминов – гидротермальная система, гидротермальное месторождение, геотермальный резервуар (двухфазный резервуар, однофазный резервуар). Для этих понятий следовало бы привести краткие определения и, в случае их заимствования, соответствующие ссылки.

2. Для отдельных фрагментов текста диссертации и графических материалов характерна небрежность.

В частности, к рис. 2.1 дано 11 условных обозначений и 10 расшифровок условных обозначений (?). На этом рисунке следовало бы показать расположение Мутновской ГеоЭС. Расположение ГеоЭС нигде в диссертации не показано.

В качестве знака умножения на стр. 22 используется знак звездочки *, на стр. 61 и в подрисуночной подписи к рис 3.11 – буква х.

В шапке к таблице 2.2.2 Химический состав... не показаны единицы измерения компонентов химического состава воды. Не ясно, что обозначает eОбщ?

Таблица 3.2. Несоответствие номеров в шапке и в материалах главы 3.

3. На рис. 3.10 приводится график изменения давления в скважине 30 за весь период наблюдений с 1995 по 2004 гг. в сопоставлении с землетрясениями с $M>5.8$. На этом графике в 2001 г. наблюдается скачкообразное падение давления с амплитудой около 18 бар. В тексте отсутствует пояснение причин такого падения давления (?).

4. В подрисуночной подписи к рис. 3.10 и в шапке к таблице 3.1 сказано, что землетрясения приводятся по данным Камчатского филиала Федерального исследовательского центра Геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Если автор использовал региональный каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН, то следовало бы привести ссылку на соответствующий интернет-ресурс. В этом каталоге в

качестве характеристики энергии землетрясений приводятся данные по величинам энергетических классов. Возникает вопрос, как получены величины магнитуд землетрясений M и какие использовались магнитуды?

То же самое замечание - о необходимости ссылки на интернет-ресурс, относится к таблице 3.3, в которой помещены данные по механизмам очагов землетрясений по каталогу СМТ.

5. В шапке к таблице 3.4 сказано, что состав газа приводится в весовых %. Так ли это? Обычно, газовый состав выражается в объемных %.

6. Анализ материала в главе 3 показывает, что защищаемое положение 3 в части конкретизации параметров землетрясений, сопровождающихся гидродинамическими аномалиями, основывается на ограниченном материале наблюдений и не учитывает всего спектра наблюдаемых гидродинамических эффектов, в т.ч. представленных в главе 3.

Например, в указанные в положении 3 диапазоны магнитуд и эпицентральных расстояний не «вписывается» Суматра-Андаманское землетрясение с $M=9$, произошедшее на расстоянии 8400 км.

7. Недостатком работы является отсутствие рассмотрения причин поведения водной и газовой разгрузки (прекращение поступления воды и газа в скважину) на стадиях подготовки землетрясений, которые сопровождались предсейсмическими вариациями давления.

Заключение

Несмотря на высказанные выше замечания, имеющие, в основном, технический характер, диссертационная работа Полякова А.Ю. может рассматриваться как законченное научное исследование, выполненное лично соискателем, и вносящее существенный вклад в развитие гидрогеологии высокотемпературных термальных вод районов активного вулканизма и высокой сейсмичности.

В рассмотренной диссертации выполнено комплексное исследование процессов водного питания и формирования гидродинамического режима Мутновского геотермального резервуара на новом аналитическом, техническом и методическом уровне.

С использованием уточненных данных по составу изотопов дейтерия и кислорода-18 в составе природных вод района установлен источник водного питания геотермального резервуара и его местоположение – ледниковые воды района кратера влк. Мутновский;

С использованием данных бурения и моделирования показана возможность гидравлической связи района влк. Мутновский и Мутновского гидротермального месторождения; предложена обобщенная модель фильтрации метеорных вод, их нагрева и движения по трещинам разлома ССВ простирания, включающему продуктивную двухфазную зону «Основная».

Установлена чувствительность двухфазного Мутновского геотермального резервуара к сильным местным и удаленным сильнейшим землетрясениям и выделен новый вид гидродинамического предвестника в форме снижения давления в течение времени от 0.1 до 1.5 суток до события. Обнаружена новая форма гидрогеодинамических аномалий, вызванных прохождением сейсмических вол, выражающихся в циклических вариациях давления высокотемпературных подземных вод. Показано, что наблюдаемые вариации давления в скважине 30 могли быть вызваны импульсным притоком углекислого газа в скважину.

Результаты диссертационного исследования имеют важное практическое значение для развития гидрогеотермических исследований в районе Мутновской гидротермальной системы в условиях техногенного влияния эксплуатации ГеоЭС, а также для решения вопросов прогноза сильных землетрясений Камчатки.

Диссертация «Анализ условий водного и газового питания Мутновского геотермального резервуара (Камчатка)» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о порядке присуждения ученых степеней» и требованиям, установленным ВАК РФ, а ее автор Поляков Андрей Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.07 – Гидрогеология.

Официальный оппонент

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

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

21 января 2019 г.

Г.Н. Копылова



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