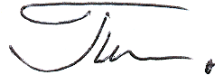


На правах рукописи

ПОЛЯКОВ Андрей Юрьевич



**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОДНОГО И ГАЗОВОГО
ПИТАНИЯ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО
РЕЗЕРВУАРА (КАМЧАТКА)**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт Вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Кирюхин Алексей Владимирович

Официальные оппоненты:

Копылова Галина Николаевна, доктор геолого-минералогических наук, Камчатский филиал государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», заведующая лабораторией геофизических исследований

Токарев Игорь Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»), Ресурсный центр РДМИ, Научный парк СПбГУ, ведущий специалист

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского»

Защита диссертации состоится 15 февраля 2018г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.224.01 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 14 декабря 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЛЕОНТЬЕВ
Василий Иванович

Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Важнейшим направлением использования геотермальной энергии является создание геотермальных электростанций (ГеоЭС), позволяющих уменьшить потребление углеводородного топлива за счет использования экологически чистых источников энергии.

В настоящее время 25% потребности в электроэнергии г. Петропавловска – Камчатского и Елизовского района покрывается выработкой Мутновских ГеоЭС и есть возможности для увеличения их продукции. Всестороннее углубленное изучение характеристик гидротермальных резервуаров, термогидродинамического и газогидрохимического режимов до начала и в процессе их эксплуатации позволяет оптимизировать добычу теплоносителя и оценить условия формирования эксплуатационных запасов.

Выявленная чувствительность изменений давления двухфазного геотермального резервуара к сейсмическим событиям важна для дальнейшего развития теории прогнозирования землетрясений, Это важно, с учетом того, что Камчатский край находится в зоне повышенной сейсмической опасности.

В целом, актуальность рассматриваемых проблем соответствует перечню критических технологий Российской Федерации по разделу «Нетрадиционные возобновляемые экологически чистые источники энергии», разделам направлений программы ФНИ ГАН: 136. Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы,: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий и 137. Эволюция окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов, научные основы рационального природопользования и устойчивого развития.

Степень разработанности исследуемого направления.

Изучению геологического строения Мутновского геотермального района, проявления в нем вулканической и гидротермальной деятельности, гидрогеологическим условиям формирования геотермальных месторождений посвящены многочисленные работы известных советских и российских геологов и вулканологов, в том числе: С.Е. Апрелькова, В.И. Белоусова, Е.А. Вакина, Г.А. Гонсовской, Е.Н. Гриб, И.Т. Кирсанова, Т.П. Кирсановой, А.В. Кирюхина, В.Л. Леонова, Т.Ю. Марениной, С.В. Остапенко, Г.Ф. Пилипенко, Б.Г. Поляка, А.Е. Святловского, Е.К. Серафимовой, А.И. Сережникова, В.М. Сугрובה, Ю.А. Тарана и многих других.

Целью работы является определение источников водного питания и условий газового питания Мутновского геотермального резервуара в связи с оптимизацией режима эксплуатации и анализом взаимосвязи термогидродинамического режима резервуара с сейсмическими событиями.

Основные задачи исследований:

- 1) Выяснение источников водного питания Мутновского геотермального месторождения на основании измерений изотопного состава воды (δD и $\delta^{18}O$).
- 2) Использование TOUGH2 моделирования для воспроизведения условий водного питания, обоснованных данными исследования изотопного состава воды.
- 3) Анализ изменений давления в Мутновском геотермальном резервуаре в связи с сейсмичностью.
- 4) Использование TOUGH2 моделирования для объяснения циклических изменений давления в Мутновском геотермальном резервуаре.
- 5) Разработка и совершенствование методик пробоотбора, мониторинга давления в геотермальных резервуарах и измерения теплофизических свойств горных пород для решения задач упомянутых выше.

Фактический материал, методы исследований, личный вклад автора.

Работа написана на основе данных, полученных автором в результате многолетней работы на Мутновском геотермальном месторождении (1984 - 2016 гг.).

Измерение изотопного состава воды осуществлялось на изотопном анализаторе LGR IWA-35EP (США). Численное моделирование процессов тепломассопереноса в геотермальном резервуаре осуществлялось с помощью программы TOUGH2 и препроцессора PetraSim. v.5.2 (США) (лицензия PS16RU01169T). Измерения давления в Мутновских геотермальных резервуарах осуществлялось при помощи системы «капиллярная трубка», производства компании Pruett Inc. (США), и при помощи комплекса: датчика давления Ashcroft T-ASH-G2-100 с блоком управления и накопления данных HOBO Energy Logger Pro и установленным аналоговым модулем Flex Smart Analog Module производства фирмы Onset Computer Corporation (США). Отбор проб газа и конденсата из fumarol, осуществляется при помощи оригинального, разработанного автором, пробоотборного устройства с автономным питанием. Вся аппаратура была дополнительно адаптирована автором к работе в экстремальных погодных условиях. Для определения теплопроводности и удельной теплоемкости горных пород, используется оригинальная, лабораторная теплокондуктометрическая установка.

В процессе более чем 30-ти летних исследований Мутновского геотермального месторождения автор принимал совместно с А.В. Кирюхиным участие в отборе 307 проб термальных и метеорных вод на изотопный и химический анализ, 93 газовых проб из скважин, термальных источников и

фумарол. Получен и проанализирован 10-ти летний непрерывный ряд данных по изменению давления в Мутновском геотермальном резервуаре (скв. 30).

Совместно с П.О. Ворониным осуществлялся изотопный анализ проб термальных и метеорных вод на изотопном анализаторе IWA-35EP. Совместно с А.В. Кирюхиным и О.О. Усачевой осуществлялась обработка и систематизация полученных результатов TOUGH2 - моделирования процессов теплопереноса для объяснения процессов водного питания месторождения и механизма циклических колебаний давления в нем. Лично разработано оборудование, повышающее скорость пробоотбора и при отсутствии притока атмосферных газов, обеспечивающее воспроизводимость и достоверность анализа проб газа и конденсата. Лично адаптировано и модернизировано имеющееся оборудование для измерения давления в низко и высокотемпературных геотермальных резервуарах.

Научная новизна.

1. Впервые данные по изотопному составу (δD , $\delta^{18}O$) подземных вод Мутновского геотермального района использованы для определения источников водного питания Мутновского геотермального месторождения.
2. Показано, что ледник в кратере Мутновского вулкана является областью водного питания Мутновского высокотемпературного геотермального резервуара.
3. Выполнена верификация условий водного питания Мутновского месторождения с использованием математического моделирования (TOUGH2).
4. Получены данные по аномальным изменениям давления в Мутновском геотермальном резервуаре, синхронизированные с сейсмическими событиями.
5. Обнаружены циклические изменения давления в Мутновском геотермальном резервуаре, и предложены TOUGH2 модели, объясняющие их механизм циклическим притоком CO_2 .
6. Выполнена адаптация приборов для измерения давления в геотермальном резервуаре (капиллярная трубка, датчик устьевого давления) к экстремальным метеоусловиям Камчатки, разработан оригинальный аппарат для отбора проб конденсата воды и газа из фумарол, разработана оригинальная установка для измерения теплопроводности горных пород.

Защищаемые положения:

1. На основании анализа изотопного состава подземных вод геотермальных скважин, термопроявлений и водотоков (δD и $\delta^{18}O$) установлено, что в естественных условиях наиболее вероятным источником водного питания Мутновского геотермального месторождения является вода лед-

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

2. Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование Мутновской гидротермальной системы показывает гидравлическую связь между областью водного питания в кратере Мутновского вулкана и Мутновским геотермальным месторождением, которая осуществляется по разлому северо-северо-восточного (ССВ) простирания, включающему плоскоориентированную продуктивную зону «Основная».

3. 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 0.10 – 4.0 бар и изменении цикличности за 1.5 – 4 часа перед сейсмическими событиями, 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 CO_2 в геотермальный резервуар.

Практическая значимость. Результаты определения изотопного состава подземных вод (δD , $\delta^{18}O$) Мутновского геотермального месторождения, позволяют осуществлять оценку условий формирования эксплуатационных запасов. Локализация притоков локальных метеорных вод в Мутновский геотермальный резервуар, позволяет обосновать перераспределение нагрузки добычных скважин для повышения эффективности эксплуатации геотермального резервуара. Обнаружение аномальных изменений давления в Мутновском геотермальных резервуарах перед сейсмическими событиями имеет прогнозное значение при наличии системы регистрации давления в режиме реального времени. Построенные математические модели позволяют воспроизвести процессы, протекающие в геотермальном резервуаре, и выполнить их прогноз.

Достоверность защищаемых положений и выводов определяется представительностью отобранных проб и надежностью аналитических измерений изотопного состава воды на изотопном анализаторе LGR IWA-35EP (США) (прошедшим тестирование на образцах МАГАТЭ в 2016 г, WICO 2016 Core Set), исходными гидрогеологическими данными, полученными с использованием сертифицированного оборудования, результатами TOUGH2-моделирования, являющегося промышленным стандартом в энергетике (<http://www.esd.lbl.gov/TOUGH2>), непротиворечивостью полученных автором результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста и заключения. Включает 116 страниц текста, содержит 11 таблиц, 52 иллюстрации. Список использованной литературы включает 85 наименований. Защищаемые положения № 1 и №2 обоснованы во второй главе, положение № 3 обосновано в третьей главе. В **первой главе** приведено геологическое и гидрогеологическое описание Мутновского геотермального района. Рассмотрены его основные объекты, степень их изученности во время комплексных исследований. Во **второй главе** изложены результаты изучения естественного гидродинамического и газогидрохимического режима Мутновского геотермального месторождения. Обсуждаются результаты изотопных измерений (δD , $\delta^{18}O$), на основании и которых делается вывод об его источнике водного питания, возможность которого подтверждается TOUGH2 моделированием. В **третьей главе** проводится анализ изменений давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения в связи сейсмичностью. Рассматриваются циклические колебания в резервуаре, осуществлено TOUGH2 – EOS2, моделирование для их описания. Для описания циклических изменений давления в резервуаре, синхронизированных с сейсмическими событиями создана одноэлементная TOUGH2 – EOS2 модель. В **четвертой главе** рассматриваются разработанные методы регистрации и оценки параметров термогидродинамических процессов в полевых и лабораторных условиях.

Апробация работы. Основные положения диссертации были представлены в отчетах по проектам ДВО РАН (12-III-A-08-170, 12-I-П27-04), в отчете ИВиС ДВО РАН №01200963340, в отчетах РФФИ (12-05-00125-а, 15-05-0067), на конференциях, в том числе международных (22-nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University (Stanford California USA, 1997), 23-rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University (Stanford California USA, 1998), TOUGH Workshop, (Berkeley USA, 1998), Workshop on Geothermal Resources in Kamchatka, Tohoku University (Sendai Japan, 1999), Научно-методическая конференция 8-е Толстихинские чтения (Санкт-Петербург, 1999), 28-th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford California USA, 2003), XVIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, (Иркутск, 2006), конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», (Петропавловск-Камчатский, 2007), 10-я международная конференция Тепловое поле Земли и методы его изучения (Москва, 2008), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2009), конференция Современный

вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2010), World Geothermal Congress (Bali Indonesia, 2010), Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University (Stanford California USA, 2012), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2013), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2014), World Geothermal Congress (Melbourne, Australia, 2015), TOUGH Symposium (Berkeley California USA, 2015), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2016), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск-Камчатский, 2017), Международная научно-методическая конференция Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии (Санкт-Петербург, 2017)) и так же на заседаниях лаборатории тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН.

Результаты исследований автора опубликованы в 29 публикациях, из них 9 статей в журналах из перечня ВАК («Вулканология и сейсмология», «Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология.», Journal of Volcanology and Geothermal Research.

Благодарности. Работа выполнена в Лаборатории тепломассопереноса Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН под руководством доктора геолого-минералогических наук, профессора А.В. Кирюхина, которому автор выражает особую признательность. Автор выражает также признательность сотрудникам лаборатории тепломассопереноса: Воронину П. О., Григорьеву В.К., Делемень И.Ф., Мушинскому А.В., Рычковой Т.В., Соломатину А.В., Усачевой О.О., Федотову С.А., Черных Е.В., Шевцову В.И., Журавлеву Н.Б. за всестороннюю помощь и поддержку. Неоценимую помощь при работе на Мутновском месторождении оказали Лесных М.Д. и Прудько А.В. Полезные советы при обсуждении диссертации дали: Леонов В.Л., Фирстов П.П., Озеров А.Ю., Рычагов С.Н., Хубуная С.А., Калачева Е.Г., Кузьмин Ю.Д., Пашкевич Р.И., Дрознин В.А., Гирина О.А.

Геологическая и гидрогеологическое изученность Мутновского геотермального района

Мутновский геотермальный район находится в 70 км к югу от г. Петропавловска-Камчатского, на его территории расположено два действующих вулкана Мутновский (2323 м абс.) и Горелый (1829 м абс.). Активный стратовулкан Мутновский состоит из 4-х конусов с возрастом до 80 тыс. лет. Площадь района около 750 км². Его территория представляет собой вулканическое нагорье с отметками 700-900 м, рассеченное каньонами рек Фальшивой, Мутновской и Жировой. (Вакин и др., 1986). Мутновское гео-

термальное месторождение представляет собой один из участков выделенной (Вакин, 1968), Северо-Мутновской гидротермальной системы.

С начала 1960-х годов в окрестностях вулканов Мутновского и Горелый велись разносторонние исследования, в том числе сотрудниками Института вулканологии ДВНЦ АН СССР (Вакин и др., 1966, 1976, 1979; Сугробов и др., 1976, 1986; Таран и др. 1986) и многие другие. В результате получены данные о строении вулканических построек, фумарольной и гидротермальной деятельности, определена тепловая мощность всех естественных термопроявлений, выделена Северо-Мутновская гидротермальная система и выполнена оценка ее геотермальных ресурсов. Источником водного питания месторождения предполагалась кальдера вулкана Горелый (Вакин и др., 1976). Эксплуатационные запасы участков Дачного и Верхне-Мутновского, были оценены 78 МВт эл. (Асаулов и др., 1987).

На Мутновском геотермальном месторождении построены две геотермальные станции: Верхне-Мутновская (1999 г, 12 МВт) и Мутновская (2002 г, 50 МВт) с суммарной установленной электрической мощностью 62 МВт (Povarov, 2005), что может обеспечить 35% потребности в электроэнергии на Камчатке. Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью 50 МВт была запущена в эксплуатацию на участке Дачный в 2001 г.

Защищаемые положения и их обоснование

1. На основании анализа изотопного состава подземных вод геотермальных скважин, термопроявлений и водотоков (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.

Анализ условий водного питания Мутновского геотермального резервуара

Отбор проб воды на изотопный и гидрохимические анализы на месторождении проводится регулярно с 80-х годов XX века. Начиная с 1998 г пробы термальной воды из скважин отобраны из жидкой части (сепарата) двухфазной смеси, полученной после разделения в аттестованном, промышленном сепараторе. Регулярно проводился отбор и изотопный анализ проб метеорных и термальных вод. Результаты измерений полученные из холодных источников и водотоков, не требуют дальнейшей обработки, в случае же отбора проб из пароводяных скважин и кипящих источников, необходим пересчет на изотопное фракционирование, для чего необходимо учитывать: 1) температуру или давление при котором происходит разделе-

ние жидкости на водную и паровую составляющие (давление сепарации); 2) Исходную энтальпию воды. Пересчеты по упрощенным формулам выполнялись ранее: (Кирюхин и др., 1998, Кирюхин и др., 2010, Кирюхин и др., 2000). В настоящей работе используются уточненные зависимости. Учитывались энтальпия воды и пара при температуре и давлении сепарации, константы равновесия $\alpha_{(O^{18})}$ и $\alpha_{(D)}$, для требуемой температуры, температурного диапазона 100-300 °С, вычислялись при помощи полиномиальной аппроксимации табличных значений (Поляков и др., 2016). Пример исходных и пересчитанных результатов приведен в таблице 1.

Источники водного питания Мутновского геотермального месторождения по данным измерений изотопного состава воды (δD , $\delta^{18}O$)

На рис.1 приведены обобщенные данные по изотопному составу: а) исходного геотермального теплоносителя вскрываемого скважинами Мутновского месторождения (с поправкой на фракционирование), б) воды р. Вулканной на истоке из ледника вулкана Мутновский, в) воды из реки Жировая, г) воды из реки Фальшивая, д) воды из Нижне - Жировского термального источника, е) термальной воды из скважины Родниковая (Виллючинские источники), ж) отмечены абсолютные отметки формирования метеорных вод. Из рисунка видно, что изотопный состав воды из скважин Мутновского геотермального месторождения совпадает с изотопным составом воды р. Вулканной на истоке из ледника вулкана Мутновский. Это доказывает необходимость водного питания Мутновского геотермального резервуара ледниками из кратера Мутновского вулкана, поскольку других источников метеорной воды с соответствующим изотопным составом не обнаружено в Мутновском геотермальном районе.

Все пробы флюида из скважин, находятся в диапазоне:

$-18\text{‰} < \delta^{18}O < -13\text{‰}$ и $-125\text{‰} < \delta D < -106\text{‰}$. Метеорные воды бассейнов рек Фальшивая и Жировая - не подходят на эту роль, являясь более тяжелыми: $-13,5\text{‰} < \delta^{18}O < -11,5\text{‰}$ и $-93\text{‰} < \delta D < -82\text{‰}$.

Метеорное водное питание постройки Мутновского вулкана достаточно для обеспечения циркуляции в системе питающих каналов Северо-Мутновской вулканотектонической зоны. Это можно показать упрощенными водно-балансовыми расчетами. Площадь постройки вулкана с отметками выше +1400 м абс. составляет 26 км², что при увеличивающейся с высотой интенсивности атмосферных осадков до 5000 мм (Вакин, 1968) может обеспечить сток воды с расходом до 4,1 м³/с. Даже если только 2% этого стока преобразуется в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения притока глубинного теплоносителя по участку Дачный, который оценивается в 55 кг/с (Kiryukhin, 1996).

Приток локальных метеорных вод в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар по данным исследований изотопного состава воды (δD , $\delta^{18}O$)

За период эксплуатации месторождения, давление в резервуаре значительно (до 9 бар.), снизилось относительно исходного (Kiryukhin et al, 2018), что повысило вероятность проникновения в него локальных метеорных вод за счет инфильтрации сверху (уровень термальных вод находится на глубинах 600-700 м ниже поверхности Земли).

Анализ изменений изотопного состава термальных вод, отобранных до и во время промышленной эксплуатации Мутновского продуктивного геотермального резервуара, позволяет оценить условия формирования его эксплуатационных запасов, в том числе притоки локальных метеорных вод.

Выполненные измерения изотопного состава воды показали отсутствие изменений за первые 5 лет эксплуатации Мутновского месторождения (2003-2004 гг.) относительно фоновых (не нарушенных эксплуатацией) значений изотопного состава термальных вод из продуктивных скважин, полученных при опытно-эксплуатационных выпусках в 1997-1999 г.

Фоновые: $-15.5\text{‰} < \delta^{18}O < -14.2\text{‰}$ и $-118\text{‰} < \delta D < -109\text{‰}$,

За 5 лет эксплуатации месторождения (2003-2004 гг.):

$-15.5\text{‰} < \delta^{18}O < -14.3\text{‰}$ и $-118\text{‰} < \delta D < -107\text{‰}$.

Однако, после 10-ти летней эксплуатации месторождения, выявлено утяжеление изотопного состава термальных вод, как по $\delta^{18}O$, так и δD : $-15.2\text{‰} < \delta^{18}O < -13.1\text{‰}$ и $-113\text{‰} < \delta D < -104\text{‰}$.

Процесс утяжеления представлен на рис.2, где приведены гistogramмы распределения δD в сепарате скважин Мутновского геотермального месторождения в зависимости от даты отбора проб. Утяжеление изотопного состава относительно фонового 1998 г., в 2014-2015гг. достигло по δD до 6‰.

Среднее значение $X = -111.8$ и среднее отклонение $STD = 2.18$ за 1995-1999 гг.; $X = -111.8$, $STD = 2.49$ за 2003-2004 гг.; $X = -107.4$, $STD = 2.91$ за 2014-2015 гг. Наиболее вероятной причиной этого утяжеления является проникновение в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар локальных метеорных вод, типичным примером которых являются воды рек Фальшивая и Жировая изотопный состав которых более тяжел, чем начальные значения изотопного состава термальных вод продуктивных скважин Мутновского геотермального месторождения:

$-13.5\text{‰} < \delta^{18}O < -11.5\text{‰}$ и $-93\text{‰} < \delta D < -82\text{‰}$.

В связи с вышесказанным, заметим, что притоки локальных метеорных вод, отмечались в Японии на геотермальных месторождениях Мори

(Нигорикава), Сумикава и Огуни (Arikí et al, 2000, Hanano, 2003, Mineyuki et al, 2005).

2. Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование Мутновской гидротермальной системы показывает гидравлическую связь между областью водного питания в кратере Мутновского вулкана и Мутновским геотермальным месторождением, которая осуществляется по разлому северо-северо-восточного (ССВ) простираения, включающему плоско-ориентированную продуктивную зону «Основная».

Эффективным инструментом для описания тепломассопереноса в гидротермальных системах является вычислительная программа TOUGH2 - программа многоцелевого назначения для моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде - ГОСТ Р 56909-2016. (Pruess et al, 1999).

Для графической визуализации результатов математического моделирования, в последнее время, совместно используется препроцессор PetraSim. При его помощи и исходя из концептуальной модели системы Мутновский вулкан – Мутновское геотермальное месторождение (Кириухин и др, 2016), осуществлено построение профильной термогидродинамической модели процесса теплового и водного питания Мутновского геотермального резервуара (Рис. 3 и 4).

Продуктивный резервуар (продуктивная плоско-ориентированная зона «Основная») приурочен к разломной зоне северо-северо-восточного простираения, падением 60° на восток-юго-восток со средней вертикальной мощностью около 240 м (истинная мощность 120 м). Зона «Основная» вскрыта продуктивными скважинами 045, 01, 014, 016, 1, 029W, 26, 24, 4E с высоким устьевым рабочим давлением. Плоскость разломной зоны, рассчитанная по отметкам вскрытия продуктивных зон скважин, указанных выше, пересекает активное жерло Мутновского вулкана на абсолютных отметках +250 – +1250 м на расстоянии 8 км от участка эксплуатации.

Профильная модель разломной зоны включает постройку Мутновского вулкана, Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинскиетермопроявления. Область моделирования по оси Z от -3000 м абс. до 2000 м абс., по оси X от 0 до 29000 м, по оси Y от 0 до 1000 м. Водная разгрузка, заданная на модели включает Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинские источники. Вычислительная сетка представлена 2333 активными ячейками. Высота каждой ячейки 40 м. (Z), ширина 1000 м. (Y) и длина 500 м. (X).

На рис. 3 и Табл. 2., показано зонирование модели. В каждой из зон задаются значения проницаемости, пористости, плотности, теплопроводности

сти в соответствии с результатами инверсионного моделирования эксплуатации (Kiryukhin et al, 2013): FIXED – зона с фиксированным состоянием (Т, Р), соответствующая граничным условиям на поверхности Земли, MPIPE – проницаемое жерло Мутновского вулкана по которому происходит водное питание, NAL1 - проницаемые отложения алнейской серии, DYKE - зона где задаются тепловые источники, RESER - проницаемый продуктивный Мутновский резервуар, CAPR - водоупор, BASE – вмещающие низкопроницаемые породы фундамента.

Начальные условия задаются линейным распределением температуры и давления. Разгрузка в модели задается граничными условиями самоизлива. Время моделирования 18000 лет.

В итоге моделирования получены следующие результаты:

1. Показано, что вода, поступает через проницаемую жерловую зону вулкана Мутновский-3 на глубины в интервале -700 -3000 м, где нагревается под действием тепловых источников и движется в сторону разгрузки: к Дачным, Верхне-Мутновским, Нижне-Жировским и Вилючинским источникам.

2. Величина водной разгрузки теплоносителя, на Дачных источниках оценивается в 50 кг/с, на Верхне-Мутновском участке – 25 кг/с, на Нижне-Жировских и Вилючинских источниках - 10-12 кг/с.

3. На профильной модели получено распределение температур. Максимальные значения температур фиксируются в области, где заданы тепловые источники. Изолинии максимальных температур вытянуты в направлении движения потоков теплоносителя в геотермальном резервуаре к участкам разгрузки на поверхности. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя.

Полученные расчетные распределения температур 220-340 °С и их локализация, соответствуют реально наблюдаемым, то же касается и величины водной разгрузки теплоносителя, на настоящее время составляющей 80 кг/с.

3. 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 0.10 – 4.0 бар и изменении цикличности за 1.5 – 4 часа перед сейсмическими событиями, 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 CO₂ в геотермальный резервуар.

Анализ изменений давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения в связи с сейсмичностью.

Мониторинг давления в скважине 30 (52.551° с.ш., 158.234° в.д.) на Верхне-Мутновском участке, вскрывающей двухфазный 250-270 °С трещиноватый геотермальный резервуар, осуществляется с 1995 г. с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett Inc.), установленной на глубине 950 м. При сопоставлении данных наблюдений 1995-2004 гг. с сейсмическими событиями в области, ограниченной 157-161° в.д., 50-54° с.ш. и глубиной до 40 км, выявлены аномальные снижения давления в скважине 30 на Мутновском геотермальном месторождении (на 1.0-1.5 бар и более), предшествовавшие землетрясениям с $M > 4$. Кроме того, при переходе в 1998 г. на более высокую частоту записи наблюдений (2 мин⁻¹) обнаружены циклические изменения давления с частотами 72-180 сут⁻¹ (0.8–2.1E-3 Гц) и амплитудой более 0.5 бар (Кирюхин и др. 2005, Kiryukhin et al, 1998). Близкие частоты вариаций расхода (давления) характерны также для некоторых других пароводяных скважин Мутновского геотермального месторождения (36-300 сут⁻¹ (0.4–3.5E-3 Гц), скважины О15, Э-2, Э-4, А4 и др.), гейзеров на Паужетском геотермальном месторождении 85-720 сут⁻¹ (1.0–8.3E-3 Гц) (Аверьев и др., 1965) и в Долине Гейзеров (4-50 сут⁻¹) (0.05–0.58E-3 Гц) (Дрознин, 2002), (скв. 042) (25-35 сут⁻¹) (0.29–0.4E-3 Гц) (Shulyupin, 2017).

Гидродинамические аномалии синхронизированные с сейсмическими событиями

В период наблюдений 1995-2006 гг. зафиксированы пять значимых гидродинамических аномалий, рис.5 – рис.9. Пространственное положение эпицентров рассматриваемых сейсмических событий приведено на рис. 10. Это демонстрирует повышенную чувствительность двухфазного геотермального резервуара к сейсмическим событиям с $M = 4.1-5.7$ на глубинах до 40 км и расстоянии 90-235 км от точки наблюдений.

Газовый состав теплоносителя

В таблице 3 приводятся сведения о газовом составе теплоносителя до начала эксплуатации в 1998-1999 гг., с добавлениями по данным опробования в 1999-2003 гг. Доминирующим в газовом составе теплоносителя, является CO₂ объемная концентрация которого составляет от 77 до 94%.

Одноэлементная модель TOUGH2 - EOS2 для описания циклических изменений давления

Процесс циклического изменения давления в скважине 30 Мутновского геотермального месторождения (с амплитудой около 1 бар) воспроизведен с использованием TOUGH2-моделирования с модулем состояния EOS2. С этой целью построена одноэлементная модель с объемом элемента модели равным объему скважины (12 м^3), разгрузка в модели задается через граничные условия самоизлива (коэффициент продуктивности $PI=1.0E-14 \text{ м}^3$, забойное давление $P_b=1.0E^5 \text{ Па}$) (Рис.11-А). Начальные условия моделирования соответствуют реально наблюдаемым (температура $259 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 27 бар). Приток воды в скважину задан постоянным (0.03 кг/с), приток CO_2 задан циклическим с интервалом 10 мин. В результате удалось воспроизвести циклический процесс изменения давления в скважине при величине импульсного притока CO_2 в 0.035 кг/с (Рис.11-Б). Заметим, что аналогичный механизм циклических извержений гейзера Великан за счет импульсного воздействия CO_2 показан в работе (Kiryukhin, 2016).

Использование одноэлементной модели TOUGH2 - EOS2 для описания циклических изменений давления, синхронизированных с сейсмическими событиями

При анализе данных наблюдений 1995-2004 гг. выявлены аномальные предсейсмические понижения давления в скважине 30 на Мутновском геотермальном месторождении (на 1.0-1.5 бар и более), синхронизированные с сейсмическими событиями с $M>4$. Анализировались сейсмические события в области, ограниченной $157-161^\circ \text{ в.д.}$, $50-54^\circ \text{ с.ш.}$ и глубиной до 40 км. (Кирюхин и др., 2006). Пример одной из таких гидродинамических аномалий изображен на рис. 9.

Для воспроизведения указанной аномалии одноэлементная TOUGH2 – EOS2 модель дополнена следующим образом: приток воды в скважину задается постоянным (0.03 кг/с) только до и после периода гидродинамической аномалии, во время же аномалии, он изменяется циклически с указанной на рис. 12 величиной. Аналогично изменяется и цикличность притока CO_2 . Результаты моделирования воспроизводят наблюдаемую аномалию (рис. 12).

***Разработка методов регистрации и оценки параметров термогидродинамических процессов в полевых и лабораторных условиях
Адаптация системы непрерывного мониторинга давления в высокотемпературном геотермальном резервуаре (до 300°C) «капиллярная трубка» к условиям Мутновского месторождения***

Мониторинг давления на Верхне-Мутновском участке (двухфазный $250 - 270^\circ\text{C}$ трещиноватый геотермальный резервуар) осуществлялся с 1995 г по 2007 г. с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett

Inc.), установленной на глубине 950 м. Регистрация давления осуществлялась каждые 5 мин., с июня 1998 г. осуществлялась каждые 2 мин., результат записывался на магнитный диск. Система была доработана автором для эксплуатации в местных экстремальных условиях. Для повышения автономности системы, в светлое время суток питающий аккумулятор подзарядился от солнечной батареи, для чего было изготовлено соответствующее коммутирующее приспособление. В случае питания от электрической сети, аккумулятор становился резервным питанием, автоматически подключающимся при отсутствии сетевого напряжения. Осуществлялся обогрев и термостабилизация, оборудования и компьютерной техники.

Адаптация системы непрерывного мониторинга давления в скв. R27

Режимные гидродинамические наблюдения в Мутновском геотермальном районе с июля 2012 г. дополнены наблюдениями на скв. R27, в районе Вилючинских источников (Камчатка), (52.65° с.ш., 158.22° в.д.) находящейся на северном окончании Северо-Мутновской вулканотектонической зоны. Сконфигурированная автором, система непрерывного мониторинга изменения давления в скважине является логическим продолжением непрерывных наблюдений проводимых на скв.30. На скважине установлен датчик давления Ashcroft T-ASH-G2-100 с блоком управления и накопления данных HOBO Energy Logger Pro и установленным аналоговым модулем Flex Smart Analog Module производства фирмы Onset Computer Corporation (США). Объем памяти модуля с интервалом измерений 10 мин. достаточно более чем на 700 суток. Автором разработан ряд мер, позволившим использовать регистрирующее оборудование, предназначенное для работы в помещении, для экстремальных погодных условий. Разработанная система, исправно функционирует с 2012 года при ежегодной одноразовой профилактике и замены элементов питания.

Опробования геотермальных скважин оборудованных сепараторами с полным разделением жидкой и парогазовой фаз

Во время проведения работ по договору №32 от 15.09.98, впервые на Мутновском месторождении, было осуществлено опробования геотермальных скважин 4Э, 016, 26, 029W с полным разделением жидкой и парогазовой фаз, что осуществлялось при помощи полнообъемных сепараторов высокого давления. Проведен отбор проб и определение химического и изотопного (δD и $\delta^{18}O$) состава сепарата горячей воды, конденсата пара и газа на каждой ступени опробования скважин. Газогидрохимическое опробование осуществлялось после стабилизации измеряемых параметров скважины в конце каждой ступени опробования.

Методика пробоотбора газа и конденсата воды из фонтанирующих пароводяных скважин

Для регулярного мониторинга изотопного и газового состава фонтанирующих пароводяных скважин необходим отбор водной и газовой фаз. С этой целью автором разработана система пробоотбора состоящая из Г – образной пробоотборной трубки из нержавеющей стали или титана, диаметром 6 мм и длиной 1 м. К ее концу, посредством 1,5 м. силиконового шланга присоединен титановый холодильник, охлаждение которого производится холодной водой и снегом. Для ввода в поток пробоотборная трубка закреплена на 1,5 м направляющей, обеспечивающей жесткую фиксацию пробоотборника в потоке теплоносителя, После 5 минутной промывки системы теплоносителем осуществляется отбор пробы. Отбор проб жидкой фазы осуществляется в пластиковые бутылки объемом 0.5 л, свободного газа, методом вытеснения, в стеклянные емкости объемом 0.1 л, которые герметизируются стандартными силиконовыми пробками. Система использовалась при отборе проб в 2016-2017 гг, результаты частично опубликованы в (Kiryukhin et al, 2018).

Устройство для пробоотбора конденсата водяного пара и газа из фумарол.

Создано на базе портативного насоса турбинного типа RS-360SH, с автономным питанием, позволяющим осуществлять отбор проб конденсата воды и газа с калиброванной скоростью. Максимальная скорость отбора 1 литр в минуту. Система активно используется при отборе проб начиная с 2013г.

Лабораторная установка для определения тепловых свойств горных пород

Используемый метод определения теплопроводности и удельной теплоемкости горных пород базируется на приложении инверсионного моделирования (iTOUGH2) к зондовому прослеживанию (цифровой термометр Hioki 3447-01, Япония) распространения и релаксации фронта температурной волны в исследуемом образце (Кирюхин и др., 2014). Так как образцы высушиваются перед экспериментами, поровое пространство занято в основном воздухом. Следовательно, начальное насыщение газовой фазы (воздуха) может быть задано на модели 0.9999, что соответствует уравнению состояния, реализованному в модуле EOS3 (вода и воздух) программы iTOUGH2 (Finsterle, 1999). На нижнем торце задается тепловой поток, равный мощности теплового источника. Для снижения количества оцениваемых (неизвестных) параметров проводилась калибровка установки на цилиндрическом кварцевом эталоне изготовленный ОАО Tydex

(www.tydex.ru) с размерами соответствующими анализируемым образцам (высота 50 мм, диаметр 50 мм).

Заключение

Исследования Мутновской высокотемпературной гидротермальной системы, проведенные автором лично и в соавторстве, привели к следующим результатам:

1. 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.

2. Разработана профильная термогидродинамическая модель, описывающая гидравлическую связь между вулканом Мутновским и одноименным месторождением по разлому северо-северо-восточного простирания, включающего продуктивную плоско-ориентированную зону «Основная». TOUGH2-моделирование вдоль Северо-Мутновской вулканотектонической зоны (включающей Мутновский вулкан, Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинские источники) показывает возможность гидротермальной циркуляции от области водного питания (ледника в кратере Мутновского вулкана) к Мутновскому продуктивному геотермальному резервуару и области разгрузки гидротерм (Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинские термопроявления) и воспроизводит двухфазное состояние резервуара.

3. На основании анализа изотопного состава (δD , $\delta^{18}O$) термальных вод продуктивных скважин за многолетний период эксплуатации обнаружено проникновение локальных метеорных вод в Мутновский геотермальный резервуар.

4. Установлена чувствительность двухфазного Мутновского геотермального резервуара к сейсмическим событиям с $M=4.1-5.7$ на глубинах до 40 км и расстоянии до 235 км, выражающаяся в снижении давления на 0.10–4.0 бар и изменении цикличности 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.

5. TOUGH2–EOS2 моделирование воспроизводит наблюдаемые характеристики циклических изменений давления в двухфазном Мутновском геотермальном резервуаре (скважина 30) при задании на модели циклического притока CO_2 в резервуар.

6. Разработаны и дополнены методики измерения давления в геотермальных скважинах В-Мутновского резервуара (скв.30, 259 °С на забое) и

участке Родниковый (скв. R27, 75°C на устье); разработана методика отбора газа и конденсата водяного пара из фумарол; разработана методика отбора газа и сепарата воды из фонтанирующих скважин; разработана лабораторная установка и метод определения теплофизических свойств (теплопроводности и удельной теплоемкости) цилиндрических образцов горных пород. Эти методики значительно повышают эффективность процесса получения научной информации при исследовании высокотемпературных гидротермальных систем.

7. Задачей дальнейших исследований является модельное воспроизведение аномалий флюидного давления в геотермальных резервуарах, предшествующих и синхронизированных с сейсмическими событиями, а также осуществление наблюдений за изменением термогидродинамических параметров Мутновского геотермального резервуара в режиме реального времени с целью прогноза сильных землетрясений.

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кирюхин А.В. Исследование условий водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода (^{18}O) и водорода (D). / А.В. Кирюхин, М. Такахашаи, **А.Ю. Поляков**, М.Д. Лесных, О.П. Батаева // Вулканология и сейсмология. –1998. – №4–5. – С. 54–62.
2. Кирюхин А.В. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью. / А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, **А.Ю. Поляков** // Вулканология и сейсмология. – 2002. – №1. – С. 51–60.
3. Кирюхин А.В. Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт. / А.В. Кирюхин, В.Л. Леонов, И.Б. Словцов, И.Ф. Делемень, М.Ю. Пузанков, **А.Ю. Поляков**, Г.О. Иванысько, О.П. Батаева, М.Е. Зеленский // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 19–44.
4. Кирюхин А.В. Термогидродинамическое-химическое моделирование процессов вторичного минералообразования в продуктивных зонах геотермальных месторождений. / А.В. Кирюхин, М.Ю. Пузанков, И.Б. Словцов, С.Б. Бортникова, С.В. Москалева, М.Е. Зеленский, **А.Ю. Поляков** // Вулканология и сейсмология. – 2006. – №5. – С. 27–41.
5. Кирюхин А.В. О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре.

/ А.В. Кирюхин, В.А. Корнеев, **А.Ю. Поляков** // Вулканология и сейсмология. – 2006. – №6. – С. 3–11.

6. Кирюхин А.В. Измерения теплопроводности и удельной теплоемкости на примере вулканогенных горных пород. / А.В. Кирюхин, **А.Ю. Поляков**, А.В. Мушинский // Вулканология и сейсмология. – 2014. – №5. – С. 27-37.

7. Кирюхин А.В. Оценка влияния инфильтрации при эксплуатации высокотемпературных геотермальных месторождений (Паужетского и Мутновского Месторождений, Камчатка, Россия). / А.В. Кирюхин, Н.П. Асаулова, О.Б. Вереина, **А.Ю. Поляков** // Вулканология и сейсмология. – 2014. – №3. – С. 24-36.

8. Кирюхин А.В. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка. / А.В. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин, С.А. Федотов, В.Ю. Лаврушин, Т. В. Рычкова, Г.В. Рябинин, **А.Ю. Поляков**, П.О. Воронин // Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – №4. – С. 306-320.

9. **Поляков А.Ю.** Исследования изотопного состава воды в Мутновском геотермальном районе (вулкан, месторождение, Нижне-Жировской источник, Родниковый), влияние фазового фракционирования. / А.Ю. Поляков, А.В. Кирюхин, П.О. Воронин, О.О. Усачева // Материалы XIX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 - 30 марта 2016 г. – Петропавловск-Камчатский. – ИВиС ДВО РАН. – 2016. – С. 416-424.

10. **Поляков А.Ю.** Проникновение локальных метеорных вод в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар, по данным исследований изотопного состава воды (δD , $\delta^{18}O$). / А.Ю. Поляков // Научная конференция, посвящённая дню вулканолога ИВиС ДВО РАН «Вулканизм и связанные с ним процессы» 30 – 31 марта 2017 г. – Петропавловск-Камчатский. – ИВиС ДВО РАН. – 2017. – С. 192-195.

11. **Поляков А.Ю.** Моделирование циклических и аномальных изменений давления, Мутновском геотермальном резервуаре, при помощи программы PetraSim V.5.2. / А.Ю. Поляков, О.О. Усачева, А.В. Кирюхин // 6-я научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 1–7 октября 2017 г. – Петропавловск-Камчатский. – 2017. – С. 315-318.

12. Kiryukhin A.V. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia). / A.V. Kiryukhin, **A.Y. Polyakov**, O.O. Usacheva, P.A. Kiryukhin // – Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2018. – Vol. – 356C. – P. 36-55.

Таблица 1. Изотопный состав флюидов из скважин Мутновского геотермального месторождения 2003-2004 гг., (сепарат воды после разделения в сепараторе) и результаты пересчета измерений δD и $\delta^{18}O$.

P_{sep} - давление сепарации (бар), энтальпия скважины (кДж/кг), $\delta_{0(O18)}$ и $\delta_{0(D)}$ – пересчитанные значения δD и $\delta^{18}O$, в исходной воде, $\delta_{L(O18)}$ и $\delta_{L(D)}$ – измеренные значения δD и $\delta^{18}O$ в сепарате воды.

Образцы отобраны - А.В. Кирюхиным, проанализированы В.А. Поляковым (ВСЕГИНГЕО), Москва.

| № | Место отбора | P_{sep} (bar) | Энтальпия скважины (кДж/кг) | До пересчета | | После пересчета | | Дата |
|-------------------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|---------------|------------------|-----------------|------------------|------|
| | | | | $\delta_L D$ | $\delta_L^{18}O$ | $\delta_0 D$ | $\delta_0^{18}O$ | |
| 1 | O29W | 7 | 1220 | -111.0 | -12.9 | -113.2 | -13.7 | 2003 |
| 2 | 5E | 7 | 1070 | -111.0 | -13.4 | -112.6 | -14.0 | 2003 |
| 3 | 4E | 7 | 1340 | -109.0 | -13.1 | -111.7 | -14.1 | 2003 |
| 4 | O29W | 7 | 1220 | -112.0 | -13.1 | -114.2 | -13.9 | 2004 |
| 5 | 4E | 7 | 1340 | -113.0 | -13.6 | -115.7 | -14.6 | 2004 |
| 6 | 5E | 7 | 1070 | -114.0 | -13.7 | -115.6 | -14.3 | 2004 |
| 7 | O37 | 7 | 1200 | -106.0 | -13.3 | -108.1 | -14.1 | 2004 |
| 8 | O55 | 7 | 1200 | -106.0 | -13.3 | -108.1 | -14.1 | 2004 |
| 9 | O48 | 7 | 1200 | -108.0 | -13.6 | -110.1 | -14.4 | 2004 |
| 10 | O37 | 7 | 1200 | -107.0 | -13.5 | -109.1 | -14.3 | 2004 |
| Средние значения | | | | -109.7 | -13.4 | -111.9 | -14.2 | |
| Стандартное отклонение | | | | 2.91 | 0.26 | 2.88 | 0.26 | |

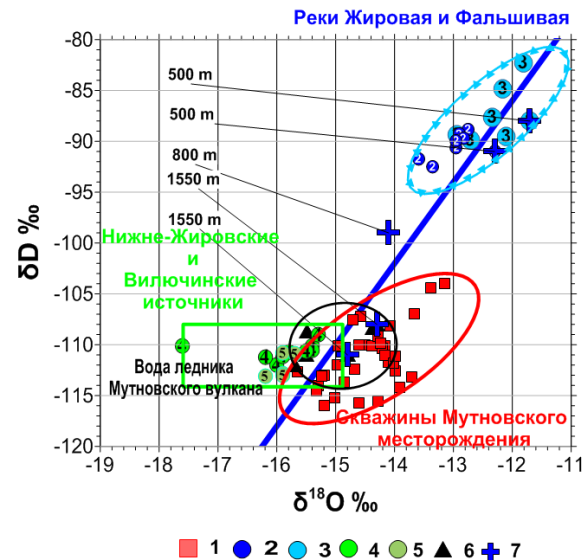


Рис. 1. Распределение δD и $\delta^{18}O$ в термальных водах скважин, метеорных и термоминеральных водах, Мутновского геотермального месторождения. 1 - скважины Мутновского геотермального месторождения, 2 – река Жировая, 3 – река Фальшивая, 4 – Нижне - Жировской источник, 5 – скважина R27 (Родниковая, Вилочинские источники), 6 - ручей из ледника вулкана Мутновский, 7 - абсолютные отметки формирования метеорных вод. Пробы отобраны А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым. Анализ проб выполнялся: М. Такахаши, В.А. Поляковым, П.О. Ворониным и А.Ю. Поляковым

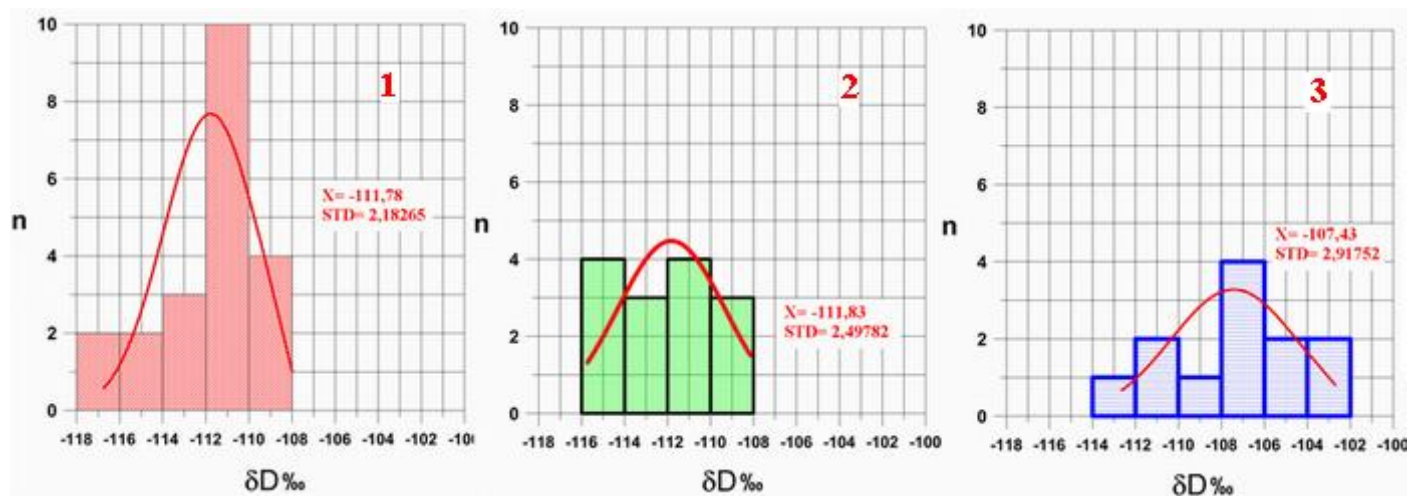


Рис 2.

1 - 1995-1999 гг.;

2 - 2003-2004гг.;

3 - 2014-2015 гг.;

n-число измерений.

Показаны Гауссовские аппроксимации распределений, средние значения (X) и стандартное отклонение (STD).

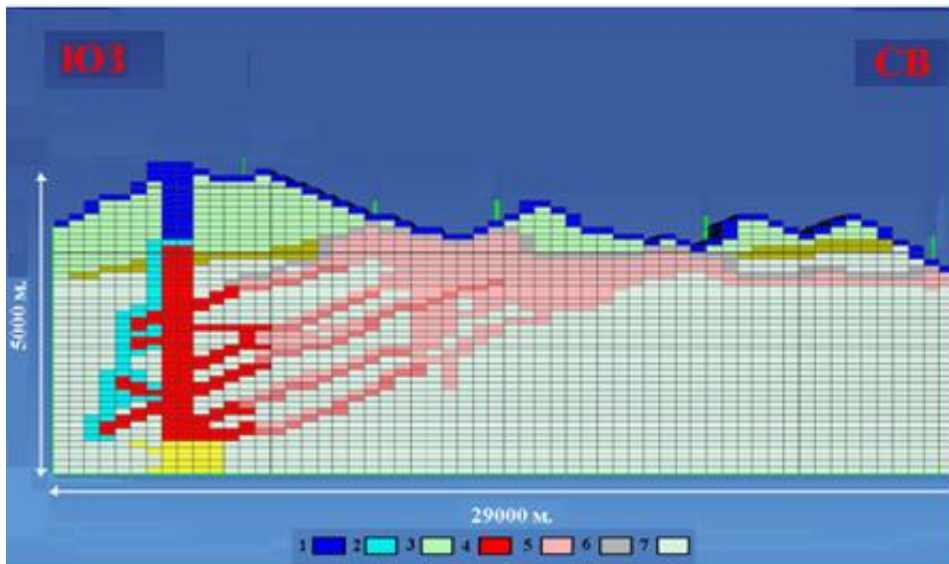


Рис. 3. Зонирование модели на домены с различными материальными свойствами зон: Условные обозначения: 1 – FIXED, 2 – MPIPE, 3 – NAL1, 4 – DYKE, 5 – RESER, 6 – CAPR, 7 – BASE

Таблица 2. Фильтрационно-емкостные и теплофизические свойства зон

| Зона модели | Минер. плотн. (кг/м ³) | Пористость | Проницаемость (м ²) | Теплопроводн. (Вт/м °С) | Удельная теплоемкость (Дж/кг °С) |
|--------------|------------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| FIXED | 2200 | 0.2 | 1.0E-12 | 1.4 | 1000 |
| MPIPE | 2200 | 0.2 | 1.0E-13 | 1.4 | 1000 |
| NAL1 | 2200 | 0.2 | 1.0E-13 | 1.4 | 1000 |
| DYKE | 2700 | 0.02 | 1.0E-12 | 2 | 1000 |
| RESER | 2400 | 0.2 | 5.0E-13 | 2.5 | 1000 |
| CAPR | 2000 | 0.02 | 1.0E-17 | 2 | 1000 |
| BASE | 2700 | 0.02 | 1.0E-15 | 2.1 | 1000 |

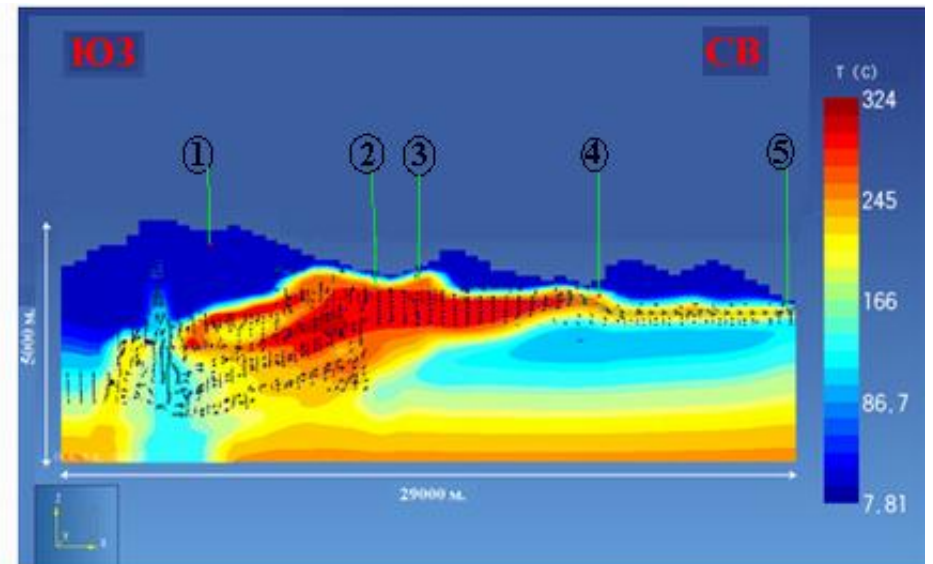


Рис 4. Результаты TOUGH2- моделирования условий формирования и водного питания Мутновского геотермального месторождения. Векторами на разрезе показано движение воды. Цветом показана температура воды.

1 - вулкан Мутновский, 2 - Дачное месторождение, 3 - Верхне-Мутновское месторождение, 4 - Нижне-Жировские источники, 5 - Вилючинские источники

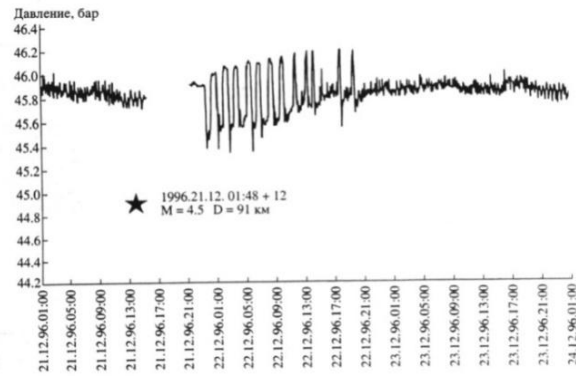


Рис. 5. Изменение давления в скв. 30 (21-24 декабря 1996 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением $M=4.5$, $D=91$ км, глубина 41 км, 01:48 по Гринвичу 21 декабря 1996 г (+12 час).

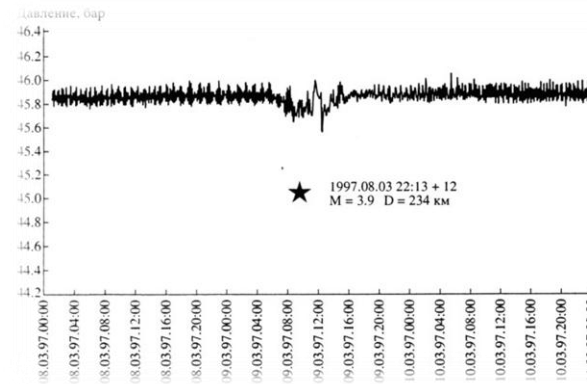


Рис. 6. Изменение давления в скв. 30 (25-29 января 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением $M=4.1$, $D=114$ км, глубина 38 км, 20:02 по Гринвичу 25 января 1997 г (+12 час).

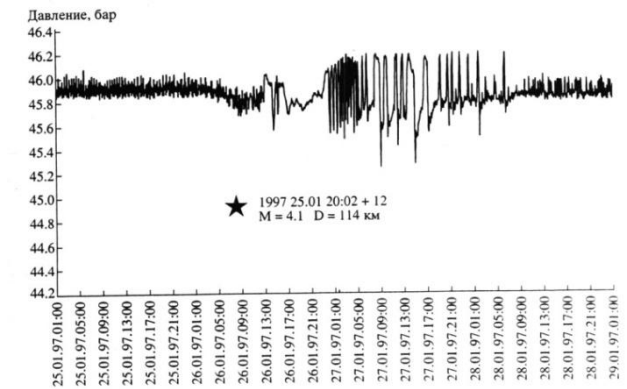


Рис. 7. Изменение давления в скв. 30 (8-10 марта 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением $M=3.9$, $D=234$ км, глубина 19 км, 22:13 по Гринвичу 8 марта 1997 г (+12 час).

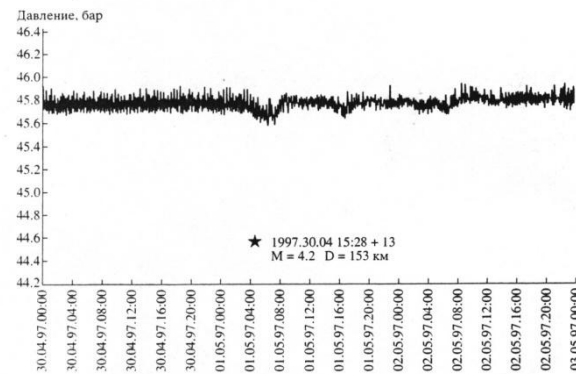


Рис. 8. Изменение давления в скв. 30 (30 апреля – 2 мая 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением $M=4.2$, $D=153$ км, глубина 24 км, 15:28 по Гринвичу 30 апреля 1997 г (+13 час).

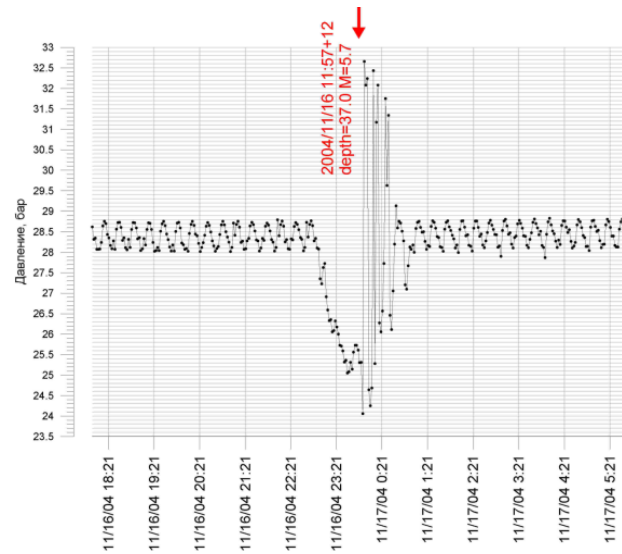


Рис. 9. Изменение давления в скв. 30 (16 ноября – 17 ноября 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением $M=5.7$, $D=191$ км, глубина 37 км

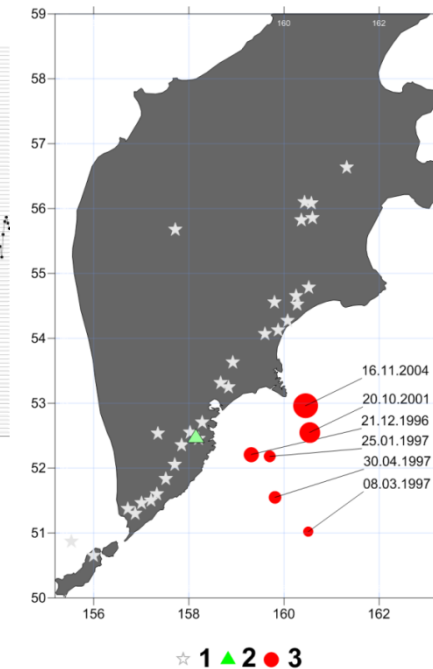


Рис. 10. Эпицентры землетрясений связанных с гидродинамическими аномалиями. 1 - вулканы; 2 - пункт гидродинамических наблюдений; 3 - эпицентры землетрясений (диаметр окружности пропорционален магнитуде землетрясения)

Таблица 3. Газовый состав паровой фазы эксплуатационных скважин участка Дачный, Мутновского геотермального месторождения, вес. %

| Скважина | CO ₂ | H ₂ S | He | H ₂ | Ar | N ₂ | CH ₄ | CO | Весовое газосодержание, % | P сепарата, бар |
|--------------------------------|-----------------|------------------|--------|----------------|------|----------------|-----------------|--------|---------------------------|-----------------|
| Опытные выпуски 1999 - 2000 гг | | | | | | | | | | |
| 029W | 77.4 | 21.0 | НО | 0.10 | 0.03 | 1.5 | 0.04 | 0.0004 | 0.010 | 8.2 |
| 26 | 83.8 | 11.3 | НО | 0.20 | 0.10 | 4.4 | 0.17 | НО | 0.108 | 7.3 |
| 016 | 87.0 | 10.7 | НО | 0.21 | 0.07 | 1.9 | 0.12 | 0.0005 | 0.164 | 7.5 |
| 4E | 87.5 | 9.00 | 0.0001 | 0.02 | 0.11 | 3.3 | 0.03 | 0.0002 | 0.030 | 7.5 |
| Эксплуатация, август 2003 г | | | | | | | | | | |
| 029W | 87.8 | 9.74 | НО | 0.02 | 0.09 | 2.2 | 0.16 | НО | 0.036 | 6.0 |
| 26 | 83.6 | 7.33 | НО | 0.50 | 0.21 | 7.7 | 0.67 | НО | 0.037 | 6.0 |
| 016 | 92.1 | 4.4 | НО | 0.26 | 0.06 | 2.7 | 0.42 | НО | 0.118 | 6.0 |
| 4E | 94.3 | 4.12 | 0.0001 | 0.01 | 0.07 | 1.4 | 0.07 | НО | 0.045 | 6.0 |
| 5E | 89.4 | 7.26 | 0.0001 | 0.02 | 0.10 | 3.2 | 0.04 | НО | 0.067 | 6.0 |

Примечания: Отбор проб осуществлялся по методике ASTM E 1675-95a. Пробы отобраны А.В. Кирюхиным и А.Ю. Поляковым; Н.О. - не определен, Анализы газа выполнены в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904). Аналитики: В.Н. Шапарь, С.Ф. Тимофеева.

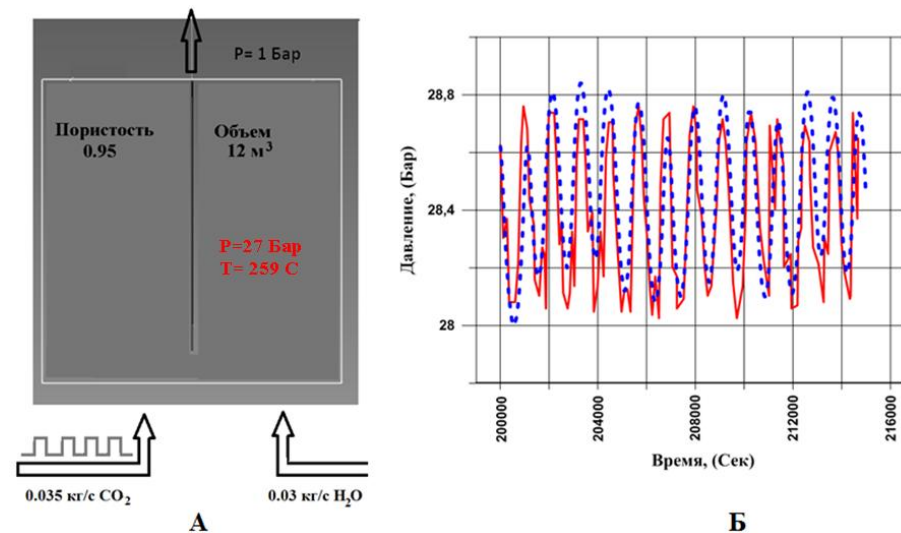


Рис 11. (А) - Одно-элементная модель; (Б) - результаты моделирования и фактические данные изменения давления в скважине 30. Расход флюида 0.03 кг/с, CO₂ - 0.035 кг/с., синим цветом (пунктиром) показаны результаты моделирования, красным цветом (сплошной) показаны фактические данные.

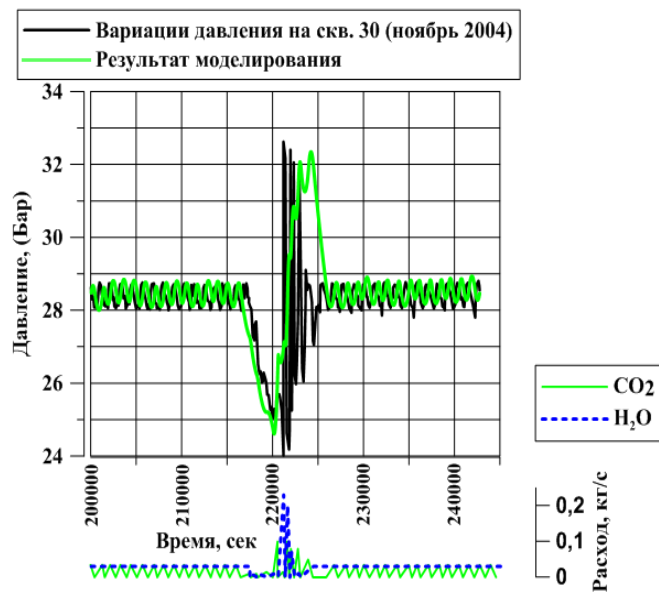


Рис 12. Вариации давления связанные с сейсмическими событиями (рис.9) и их воспроизведение на модели.

Ниже изображен график модельного притока H₂O и CO₂.