

**ФАНО РОССИИ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**НАУКИ**  
**ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ**  
**ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ**  
**НАУК**  
**(ИВиС ДВО РАН)**

**На правах рукописи**

**Поляков Андрей Юрьевич**

**Анализ условий водного и газового питания Мутновского геотермального  
резервуара (Камчатка)**

**Специальность 25.00.07 – Гидрогеология**  
**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени кандидата**  
**геолого – минералогических наук**

**Научный руководитель:**  
**д.г. – м.н., профессор А.В. Кирюхин**

**Петропавловск – Камчатский – 2018**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>ГЛАВА 1. Обзорное геологическое и гидрогеологическое описание Мутновского геотермального района</b>	11
1.1. Общая характеристика Мутновского месторождения	11
1.2. Гидротермальные объекты Мутновского геотермального района	15
1.3. Гидрогеологическое изучение месторождения	17
1.4. Основные выводы комплексных исследований	18
<b>ГЛАВА 2. Гидрогеологические условия, естественный гидродинамический и газогидрохимический режим Мутновского геотермального месторождения</b>	20
2.1. Общие гидрогеологические условия	20
2.2. Гидрохимические характеристики	26
2.3. Анализ условий водного питания Мутновского геотермального резервуара	30
2.3.1. Методика пересчета на изотопное фракционирование	30
2.3.2. Источник водного питания Мутновского геотермального месторождения согласно изотопных измерений ( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ )	35
2.3.3. Приток локальных метеорных вод в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар по данным исследований изотопного состава воды ( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ )	37
2.4. TOUGH2 – моделирование тепломассопереноса в геотермальных резервуарах.....	41
2.5. Профильная модель водного питания Мутновского геотермального месторождения	44
<b>ГЛАВА 3. Анализ изменений давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения в связи сейсмичностью</b>	50
3.1. Гидродинамические аномалии синхронизированные с сейсмическими событиями	53
3.2. Гидродинамические аномалии предшествовавшие сейсмическим событиям	55

3.3. Аномальные понижения давления в скважине 30 (Верхнее–Мутновский геотермальный резервуар) и их возможная связь с сильными ( $M \geq 5.8$ ) землетрясениями	59
3.4. Газовый состав теплоносителя	63
3.5. Циклические изменения давления в Верхне–Мутновском геотермальном резервуаре	65
3.6. Одноэлементная модель TOUGH2 – EOS2 для описания циклических изменений давления	67
3.7. Использование одноэлементной модели TOUGH2 – EOS2 для описания циклических изменений давления, синхронизированных с сейсмическими событиями	69
<b>ГЛАВА 4. Разработка методов регистрации и оценки параметров термогидродинамических процессов в полевых и лабораторных условиях</b>	<b>72</b>
4.1. Адаптация системы «капиллярная трубка» для непрерывного мониторинга давления в Мутновском высокотемпературном геотермальном резервуаре (до 300°C) (участок Верхне–Мутновский)	72
4.2. Адаптация системы для непрерывного мониторинга давления в низкотемпературном (до 125 °C) геотермальном резервуаре (участок Вилючинский)	74
4.3. Опробования геотермальных скважин оборудованных сепараторами с полным разделением жидкой и парогазовой фаз	76
4.4. Методика пробоотбора газа и конденсата воды из фонтанирующих пароводяных скважин	77
4.5. Методика пробоотбора конденсата воды из фумарол	79
4.6. Лабораторная установка для определения тепловых свойств горных пород	81
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>94</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>97</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ</b>	<b>110</b>
<b>ПЕРЕЧЕНЬ ТАБЛИЦ</b>	<b>115</b>

## ВВЕДЕНИЕ

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 ее на Мутновских ГеоЭС и есть возможности для увеличения их продукции. Перед строительством ГеоЭС и в процессе ее эксплуатации необходимо всестороннее углубленное изучение гидротермальных резервуаров. Тщательное исследование их термогидродинамических и газогидрохимических режимов позволяет определить оптимальные источники теплоносителя и прогнозировать их поведение в процессе эксплуатации. Это дает возможность оптимизировать выбор источников теплоносителя для ГеоЭС, оценивать его запасы и выдавать рекомендации наиболее оптимального их использования.

Мониторинг давления двухфазного геотермального резервуара показал его чувствительность к сейсмическим событиям, что важно для дальнейшего развития теории прогнозирования землетрясений, учитывая что Камчатский край находится в зоне повышенной сейсмической опасности.

Все сказанное выше, предопределило **актуальность** исследований, составивших предмет данной диссертации.

**Цель работы** – определение источников водного питания и условий газового питания Мутновского геотермального резервуара в связи с оптимизацией режима эксплуатации и анализом его взаимосвязи с сейсмическими событиями.

### **Основные задачи исследования:**

1. Выяснение источников водного питания Мутновского геотермального месторождения на основании измерений изотопного состава воды ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ).
2. Использование TOUGH2 моделирования для подтверждения условий водного питания, обоснованных изотопными данными 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 IWA-35EP (США). Численное моделирование процессов теплопереноса 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 Prueett Inc. (США), и при помощи комплекса: трансдюссер (цифровой манометр) Ashcroft T-ASH-G2-100 с блоком управления и накопления данных и установленным аналоговым модулем 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 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 тепломассопереноса для объяснения процессов водного питания месторождения и механизма циклических колебаний давления в нем.

Лично разработано оборудование с жестко фиксированными параметрами отбора, повышающее эффективность пробоотбора, 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** проведенных исследований заключается в следующих основных положениях:

1. Впервые данные по изотопному составу ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) подземных вод Мутновского геотермального района использованы для определения источников водного питания Мутновского геотермального месторождения.
2. Показано, что вода ледника кратера Мутновского вулкана является областью водного питания Мутновского высокотемпературного геотермального месторождения.
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, основанные на циклическом притоке углекислого газа, объясняющие их механизм.

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 fumarol, разработана оригинальная установка для измерения теплопроводности горных пород.

**Практическая ценность работы:**

1. Результаты определения изотопного состава подземных вод ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) Мутновского геотермального месторождения, позволяют осуществлять оценку условий формирования эксплуатационных запасов, что позволит повысить эффективность эксплуатации Мутновских ГеоЭС.

2. Обнаруженный факт проникновения локальных метеорных вод в Мутновский геотермальный резервуар, позволяет определить их зоны притока и локализовать скважины, участвующие в этом процессе, что повысит эффективность эксплуатации резервуара.

3. Обнаружение аномальных изменений давления перед сейсмическими событиями в Мутновском геотермальных резервуарах имеет прогнозное значение при наличии системы регистрации давления в режиме реального времени.

4. Построенные математические модели позволяют воспроизвести процессы, протекающие в геотермальном резервуаре, проследить их эволюцию и получить прогнозные оценки геотермальных ресурсов.

**Защищаемые положения:**

1. На основании анализа изотопного состава подземных вод ( $\delta D$  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.

2. Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование Мутновской гидротермальной системы объясняет гидравлическую связь между Мутновским вулканом и Мутновским геотермальным месторождением, которая осуществляется по разлому северо–северо–восточного (ССВ) простирания, включающему 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 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.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста и заключения. Занимает 116 страниц текста, содержит 11 таблиц, 52 иллюстрации. Список использованной литературы включает 85 наименований. Защищаемое положение № 1 и №2 обосновано во второй главе, положение № 3 обосновано в третьей главе.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации 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), 2–я Российская конференция по теплообмену (Москва, 1998), Научно–методическая конференция 7–е Толстихинские чтения (Санкт–Петербург, 1998), Workshop on Geothermal Resources in Kamchatka, Tohoku University (Sendai Japan, 1999), конференция Современный вулканизм и связанные с ним процессы (Петропавловск–Камчатский, 1999), Научно-методическая конференция 8–е Толстихинские чтения (Санкт–Петербург, 1999), 28–th Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (Stanford California USA, 2003), XVIII Собрание 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), International Conference Modern Information Technologies in Earth Sciences Scientific Program (Petropavlovsk–Kamchatsky, Russia, 2014), 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, 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 А.В. Кирюхина, которому автор выражает особую признательность. Автор выражает также признательность сотрудникам лаборатории тепломассопереноса: Воронину Павлу Олеговичу, Григорьеву Валерию Константиновичу, Делемень Ивану Федоровичу, Мушинскому Анатолию Владимировичу, Рычковой Татьяне Васильевне, Соломатину Алексею Владимировичу, Усачевой Ольге Олеговне, Федотову Сергею Александровичу, Черных Евгении Валерьевне, Шевцову Владимиру Ивановичу за всестороннюю помощь и поддержку. Неоценимую помощь при работе на Мутновском месторождении оказали Лесных Михаил Дмитриевич и Прудько Анатолий Васильевич. Полезные советы при обсуждении диссертации дали Копылова Галина Васильевна, Леонов Владимир Леонидович, Фирстов Павел Павлович, Озеров Алексей Юрьевич, Рычагов Сергей Николаевич, Хубуная Сергей Александрович, Калачева Елена Геннадьевна, Кузьмин Юрий Дмитриевич, Пашкевич Роман Игнатьевич, Дрознин Валерий Аркадьевич.

## ГЛАВА 1. Обзорное геологическое и гидрогеологическое описание

### Мутновского геотермального района

#### 1.1 Общая характеристика Мутновского месторождения

В 70 км к югу от г. Петропавловска–Камчатского находится Мутновский геотермальный район, на его территории расположено два действующих вулкана Мутновский и Горелый. Он изобилует проявлениями гидротермальной активности (рис.1.2). Это фумарольные поля в кратерах действующих вулканов Мутновского и Горелого с температурами парогазовых струй до 700 °С; парогидротермы: Северо–Мутновские, Дачные, Верхне–Мутновские (Перевальные) и Верхне–Жировские; горячие восходящие источники в глубоких тектонических долинах: Воиновские (93 °С), Вилючинские (90 °С) и кипящие Нижне–Жировские. Площадь Мутновского геотермального района около 750 км<sup>2</sup>. Его территория представляет собой вулканическое нагорье с отметками 700–900 м, рассеченное каньонами рек Фальшивой, Мутновской и Жировой [8].

Мутновское геотермальное месторождение представляет собой один из участков выделенной [82], Северо–Мутновской гидротермальной системы (названной по имени активного стратовулкана Мутновский состоящего из 4–х конусов с возрастом до 80 тыс. лет и высотой до 2323 м) (рис.1.1).



Рис. 1.1 Вулкан Мутновский, вид с северо – запада

Изучением геологическое строение района и проявления в нем вулканической и гидротермальной деятельности занимались известные советские

и российские гидрогеологи, геологи и вулканологи, в том числе: С.Е. Апрельков, В.И. Белоусов, Е.А. Вакин, Г.А. Гонсовская, Е.Н. Гриб, И.Т. Кирсанов, Т.П. Кирсанова, А.В. Кирюхин, В.Л. Леонов, Т.Ю. Маренина, С.В. Остапенко, Г.Ф. Пилипенко, Б.Г. Поляк, А.Е. Святловский, Е.К. Серафимова, А.И. Сережников, В.М. Сугробов, Ю.А. Таран и многие другие. Результаты их исследований представлены в работах [1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 36, 37, 43, 85].

Мутновский геотермальный район включает крупный долгоживущий магматический центр, возникший на пересечении региональных глубинных разломов субмеридионального и широтного простирания и мощных зон разрывных нарушений северо-восточного и северо-западного простираний [8]. В его пределах вулканическая и гидротермальная активность длится с конца олигоцена до настоящего времени. Схема геологического строения района представлена на рис. 1.2. Верхняя часть разреза сложена вулканогенными и вулканогенно–осадочными неоген–четвертичными образованиями - лавами, туфами, конгломератами, песчаниками, алевролитами – суммарной мощностью более 2 км. В истории вулканизма преобладали продукты основного состава (базальты и андезито–базальты). На их фоне из сформировавшихся вблизи поверхности гранитоидных магматических очагов в среднем и позднем плейстоцене произошли извержения игнимбритов [7]. Они сопровождались образованием кальдеры вулкана Горелого радиусом около 13 км, а вдоль ограничивающих ее кольцевых разломов – экструзиями остатков кислой магмы, сформировавшими, в частности, сопки Двугорбая и Скалистая.

В формировании геотермального резервуара главную роль сыграла образованная субмеридиональными сбросами грабенообразная депрессия, осевая часть которой проходит через кратеры Мутновского вулкана и далее на север, названная Северо–Мутновской вулcano–тектонической зоной.

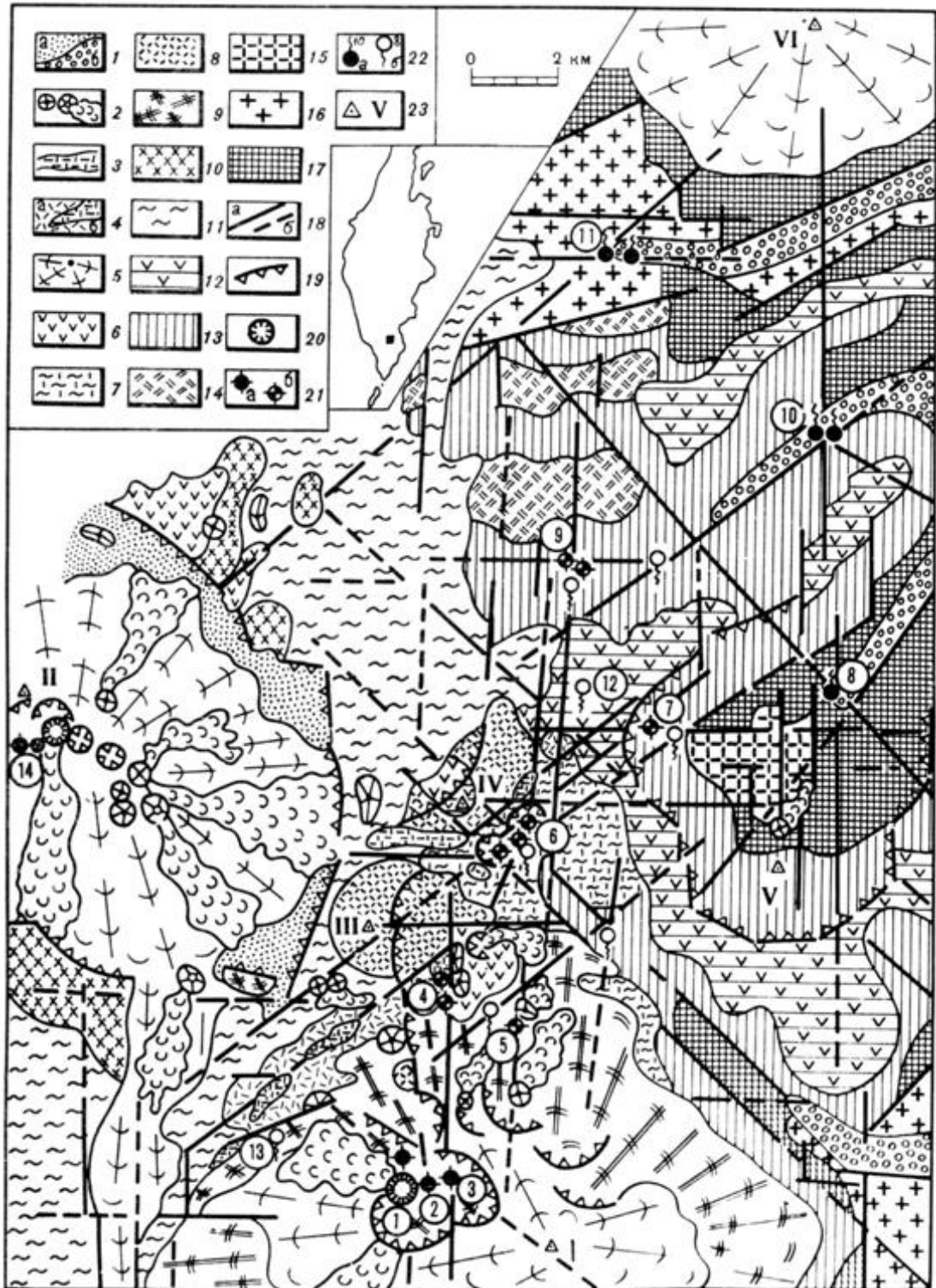


Рис. 1.2 Схема геологического строения и термопроявлений Мутновского геотермального района [8].  
(легенда на следующей странице.)

### Условные обозначения к рис. 1.2:

1 – голоценовые пирокластические (а) и аллювиально–пролювиальные (б) отложения; 2–4 – верхнеплейстоцен–голоценовые: шлаковые конусы и потоки базальтов (2), экструзии риолитов (3), риолит–дацитовые пемзы (4а) и пемзовые туфы (4б); 5 – современные стратовулканы (верхнеплейстоцен–голоценовые лавы, шлаки, агглютинаты, туфы преимущественно базальтового состава); 6 – верхнеплейстоценовые лавы, агглютинаты, туфы преимущественно базальтового состава; 7 – верхнеплейстоценовые игнимбриты и обсидианы дацитового состава, 8 – средне–верхнеплейстоценовый экструзивно–пирокластический комплекс гор Двугорбой и Скалистой (андезиты, дациты, риолиты и их туфы); 9 – средне–верхнеплейстоценовые лавы, туфы, туфобрекчии андезито–базальтового, андезитового, андезито–дацитового составов древней постройки вулкана Мутновского; 10 – средне–верхнеплейстоценовый экструзивно–пирокластический комплекс древней постройки вулкана Горелого (андезиты, дациты, риолиты, их туфы); 11 – игнимбриты вулкана Горелого андезито–дацитового состава; 12 – ниже–среднеплейстоценовые лавы, туфы, агглютинаты базальтов и андезито–базальтов вулкана Жировского; 13 – плиоцен–нижнеплейстоценовые лавы, туфы, туфобрекчии, туффиты, туфоконгломераты разнообразного состава (от базальтов до риолитов); 14 – плиоценовые экструзии дацитов, риолито–дацитов, риолитов; 15–17 – миоценовые: интрузии диоритов (15), гранодиоритов и кварцевых диоритов (16), потоки, дайки, штоки андезитов, дацитов, риолитов (17); 18 – оси основных тектонических зон установленные (а) и предполагаемые (б); 19 – вулcano–тектонические уступы, кромки кратеров и кальдер; 20 – активные кратеры вулканов; 21 – парогазовые струи: фумаролы (а), парогидротермы (б); 22 – термальные источники горячие восходящие (а) и теплые нисходящие (б); 23 – вулканические постройки.

Римскими цифрами обозначены в. Мутновский (I), в. Горелый (II), г. Двугорбая (III), г. Скалистая (IV), в. Жировской (V), в. Вилючик (VI).

Арабскими цифрами в кружках обозначены термопроявления: Активная Воронка (1); Донное поле (2); Верхнее поле (3); источники Северо–Мутновские, западная (4) и восточная (5) группы, Дачные (6), Перевальные (Верхнее Мутновские, (7), Воиновские (8), Верхне–Жировские (9), Нижне–Жировские (10), Вилючинские (11), Пиратковские (12), Западно–Мутновские (13); активный кратер и фумаролы вулкана Горелого.

Система тектонических нарушений, входящая в структуру регионального глубинного разлома, имеет ширину около 10 км, длину около 20 км [6, 7]. Сопки Двугорбая и Скалистая трассируют ее западную границу, а на востоке и северо–востоке граница выражена сбросами, секущими нижнеплейстоценовую постройку Жировского вулканического массива.

Мутновское геотермальное месторождение приурочено к пересечению Северо–Мутновской вулcano–тектонической зоны с крупным разломом северо–

восточного простирания, их пересечение отмечено термопроявлением, открытым в 1960 г. И.Т. и Т.П. Кирсановыми, которое позднее получило название Дачных источников.

Дачный участок изучен наиболее детально в результате многолетних комплексных исследований, включавших:

1. геокартирование,
2. буровые работы,
3. почвенно – газовую и ртутнометрическую съемки,
4. термометрию,
5. инфракрасную аэрофотосъемку,
6. геохимические исследования гидротермальных растворов и газов.

## **1.2 Гидротермальные объекты Мутновского геотермального района**

Мутновский геотермальный район, куда входит Мутновское месторождение, изобилует проявлениями гидротермальной активности (рис.1.2). Они включают фумарольные поля в кратерах действующих вулканов Мутновского и Горелого с температурами парогазовых струй до 700 °С; парогидротермы Северо–Мутновские, Дачные, Верхне–Мутновские (Перевальные) и Верхне–Жировские; горячие восходящие источники в некоторых глубоких тектонических долинах: Воиновские (93 °С), Вилючинские (90 °С), а также кипящие Нижне–Жировские источники [8, 9, 10]. Указанные выше термопроявления маркируют площадное распространение Северо–Мутновской гидротермальной системы.

Дистанционные наблюдения в ИК–диапазоне позволяют не только определить контуры термоаномалий, но и выявить в их пределах распределение температур и количественно оценить мощность тепловой радиации с их поверхности. Такие работы на Мутновском месторождении [11, 38], уточнили границы известных термоаномалий, обнаружили новые и подтвердили их

приуроченность к линейным зонам субмеридионального, северо–восточного и других направлений.

Е.А. Вакин детально описал термопроявления Северо–Мутновской системы, закартировал их и оценил естественный вынос глубинного тепла в их пределах (1963–1975 гг).

Согласно его данным [10], расходная часть теплового баланса геотермального района включает следующие составляющие выноса тепла:

- 1) Активным кратером Мутновского вулкана – свыше 2500 МВт;
- 2) Северным кратером вулкана Мутновского – 395 МВт;
- 3) Парогидротермами – 130 МВт;
- 4) Термальными источниками – 25 МВт.

Два последних числа, непосредственно характеризуют тепловой потенциал Северо–Мутновской гидротермальной системы доступной для бурения. Эти величины, устанавливающие нижний предел тепловой мощности потенциального месторождения, на первых этапах изучения использовались для прогнозной оценки геотермальных ресурсов района.

Данные разведочного бурения и расчеты по геохимическим термометрам показали, что действительная температура геотермального резервуара не ниже 270°C, а на юге месторождения – выше.

При подземном вскипании водного флюида с температурой около 250°C и соответственно с теплосодержанием около 1047 кДж/кг, до 20% массы флюида переходит в пар. Пар с теплосодержанием примерно 2680 кДж/кг, поднимается к поверхности и разгружается в виде фумарол, отсепарированная вода разгружается в виде горячих источников в понижениях рельефа.

По материалам, полученным до начала разведочных работ, Е.А. Вакиным предложена следующая концептуальная модель условий формирования Северо–Мутновской гидротермальной системы. Поток подземных вод, направленный из области питания (кальдеры вулкана Горелый) к региональному базису дренирования (океану), нагревается, частично испаряется в пределах Северо–Мутновской зоны потоком восходящего теплоносителя и частично разгружается в



виде паровых струй (термопроявления Мутновского месторождения). Горстовое поднятие препятствует стоку, но крупные секущие разломные зоны служат каналами для дальнейшего движения термальных вод на восток. В зонах этих нарушений, в долине р. Жировой и в бассейне р. Мутновской, сформированы обособленные напорные системы трещинно-жильных термальных вод. Их поверхностными проявлениями являются соответственно Нижне – Жировские и Воиновские источники. В этом случае, если на участке между вулканами Горелый, Мутновский, Жировской на глубине залегают достаточно выдержанные водопроницаемые слои, можно полагать, что в них заключены горизонты напорных перегретых вод. Тепловая мощность естественной разгрузки гидротерм Северо–Мутновской системы оценивается 165 МВт. [8, 10].

### **1.3 Гидрогеологическое изучение месторождения**

В результате разносторонних исследований Института вулканологии ДВНЦ АН СССР [6, 7, 8, 9 10, 82, 43, 44] в 1960-1976 гг., получены данные о строении вулканических построек, фумарольной и гидротермальной деятельности, определена тепловая мощность всех естественных термопроявлений, выделена Северо–Мутновская гидротермальная система и дан прогноз ее геотермальных ресурсов. Источником водного питания месторождения была признана кальдера вулкана Горелый [6].

В 1978 г. ПГО "Камчатгеология" начало на Мутновском месторождении детальные поисковые работы, включая бурение глубоких скважин. С 1984 года эти работы продолжила Камчатская ГГЭ ПГО "Сахалингеология", возглавляемая Г.М. Асауловым.

На разных этапах разведочного бурения руководителями и основными исполнителями были Н.П. Асаулова, П.П. Блукке, Ю.А. Краевой, В.Г. Охапкин, С.Л. Первеев, М.В. Писарева, С.В. Спектор, И.И. Чернев, Б.П. Чумак и др.

Выявленные в ходе опытных выпусков теплоносителя запасы парогидротерм участка Дачного, утвержденные ГКЗ в 1987 г, соответствуют возможности получения 50 МВт эл.

Подсчет запасов выполнен коллективом авторов в составе П.П. Блукке, С.В. Остапенко (ВСЕГИНГЕО), Б.Г. Охупкина, Н.П. Асауловой, Ю.А. Краевого, Н.С. Отман (ВСЕГИНГЕО), А.В. Кирюхина (ИВ ДВНЦ АН СССР).

В 1990 г. эксплуатационные запасы участков Дачного и Верхне-Мутновского пересчитаны в ЦКЗ и увеличены до 78 МВт.

Гидрогеологическую специфику Мутновского геотермального района составляет согласно [8, 82]:

1) обилие атмосферных осадков (свыше 3000 мм), большая часть которых выпадает в виде снега,

2) высокая водопроницаемость покровных пород в зоне выветривания и очень низкая водопроницаемость остальной части разреза на всю изученную глубину,

3) сильная расчлененность поверхности,

4) развитая сеть тектонических нарушений, в зонах которых гидрогеологические условия меняются значительным образом.

#### **1.4 Основные выводы комплексных исследований**

Результаты всего комплекса исследований, проведенных в Северо-Мутновской гидротермальной системе, обобщены Е.А. Вакиным и В.М. Сугробовым в 1986 [8, 10]. По их выводам, гидрогеологическая обстановка в пределах Северо–Мутновской гидротермальной системы представляется следующей:

Поток подземных вод на пути из области питания (кальдера вулкана. Горелый) к региональному базису дренирования (океану) нагревается в грабенообразной депрессии Северо–Мутновской вулcano–тектонической зоны – части субмеридионального глубинного разлома.

Источниками теплового питания месторождения являются магматические очаги в недрах системы, предположительно связанные с аппаратом Мутновского вулкана. В основном резервуаре гидротермы находятся в жидком состоянии, характер циркуляции парогидротерм исключительно трещинно–жильный на всю исследованную глубину месторождения. Только в зонах повышенной проницаемости над ним развита «паровая шапка», характеризующая участок Дачных источников.

Восточный борт депрессии отчасти экранирует сток, но секущие его разломные зоны служат каналами для дальнейшего движения термальных вод на восток.

В некоторых из этих зон (в долине р. Жировой и бассейне р. Мутновской) сформировались обособленные напорные системы трещинно-жильных термальных вод. Их поверхностными проявлениями являются соответственно Нижнежировские и Воиновские источники.

## **ГЛАВА 2. Гидрогеологические условия, естественный гидродинамический и гидрохимический режим Мутновского геотермального месторождения**

### **2.1 Общие гидрогеологические условия**

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, что может обеспечить 35% потребности в электроэнергии на Камчатке. Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью 50 МВт запущена в эксплуатацию на участке Дачный в 2002 г.

Продуктивная зона "Основная" находится в пределах Северо-Мутновской вулканотектонической зоны [6], рис 2.1, ее простирание согласуется с простиранием системы наиболее молодых субпараллельных разломов, выделенных В.Л. Леоновым [36]. Концептуальная модель продуктивного резервуара в Центральной части участка Дачный изображена на рис. 2.2.

Продуктивный резервуар (продуктивная зона «Основная», (рис 2.1, рис. 2.2) приурочен к разломной зоне северо, северо-восточного простирания, падением  $60^{\circ}$  на восток–юго–восток и 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. Горные породы, вмещающие продуктивную зону, имеют разный состав: диориты, миоцен-плиоценовые песчаники, риолитовые и андезитовые туфы и лавы; однако зона характеризуется отсутствием явного литологического контроля.

Кровля продуктивной зоны фиксируется зонами полного поглощения промывочной жидкости при бурении скважин.

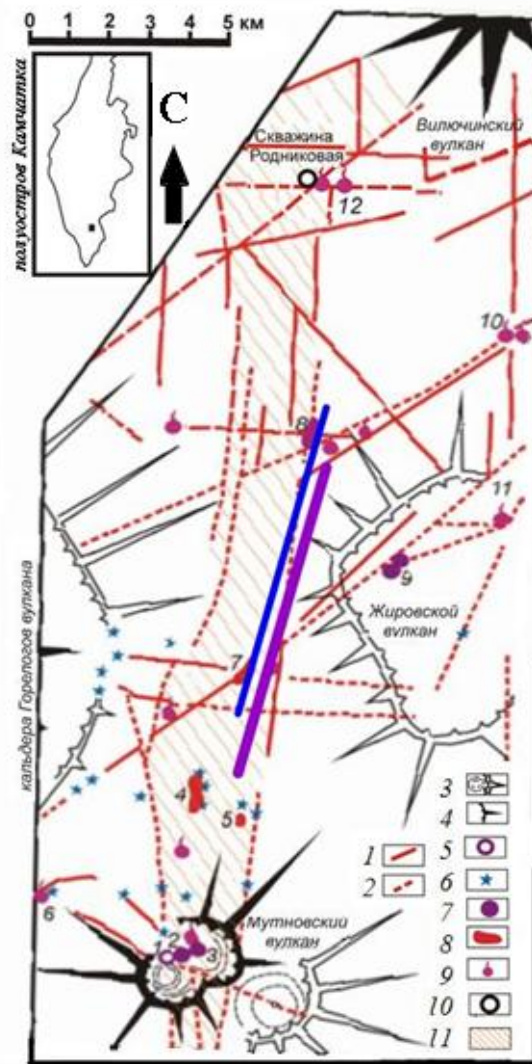


Рис 2.1. Северо–Мутновская вулканотектоническая зона (по Е.А. Вакину, с дополнениями):

1 – тектонические нарушения установленные; 2 – тектонические нарушения предполагаемые; 3 – кратеры и кальдеры доголоценовых вулканов; 4 – действующие вулканы; 5 – Активная воронка действующего Мутновского вулкана; 6 – плейстоцен-голоценовые шлаковые конусы и лавовые потоки базальтового состава; 7 – фумарольные поля; 8 – термальные поля; 9 – термальные источники; 10 – Северо–Мутновская вулcano-тектоническая зона.

Цифры на схеме: 1 – Активная воронка Мутновского вулкана; 2 – Нижнее (Донное) фумарольное поле Мутновского вулкана; 3 – Верхнее фумарольное поле Мутновского вулкана; 4 – Северо–Мутновское термальное поле, Западная группа источников; 5 – Северо–Мутновское термальное поле, Восточная группа источников; 6 – Западно–Мутновские термы; 7 – Дачное термальное поле; 8 – Верхне–Жировские термы; 9 – термальное поле Жировского вулкана; 10 – Нижне–Жировские термальные источники; 11 – Войновские термальные источники; 12 – Вилочинские термальные источники.

Линии – проекции плоскости продуктивной зоны «Основная», (синяя – 800 м абс., сиреневая – 0 м абс.) (Дополнено [24, 26]).

Анализ распределения координат точек полной потери циркуляции и продуктивных зон по 50-ти скважинам Центрального блока участка Дачный показывает, что 75% зон полной потери циркуляции и 100% всех продуктивных скважин связаны с  $\pm 150$  м интервалом, прилегающим к плоскости «Основной» продуктивной зоны.

Ориентация зоны подтверждается также трассерным взаимодействием в субмеридиональном направлении.

Тепловое питание продуктивной зоны осуществляется за счет остывания порций магматического материала, аккумулярованных Северо–Мутновской вулканно–тектонической зоной.

Плоскость, аппроксимирующая поверхность продуктивной зоны «Основная» определяется уравнением:  $Z = -1.691076246561 * X + 0.48880109651512 * Y + 65583.1$ , рассчитанным по координатам зон полного поглощения и зон продукции теплоносителя. Указанная аппроксимирующая плоскость продуктивной зоны «Основная» пересекает активную питающую магматическую систему Мутновского вулкана на отметках +250 - +1250 м и на расстоянии 8 км от Мутновской ГеоЭС. [24, 25. 26].

Высокотемпературный теплоноситель поднимается из юго-восточного сектора зоны, имеет температуру более  $280^{\circ}\text{C}$  и находится в жидком состоянии. Там же обнаружена кварц–эпидот–хлоритовая ассоциация вторичных гидротермальных минералов. В средней и верхней части продуктивной зоны «Основная» теплоноситель переходит в двухфазное состояние, характеризующее вайрацит–хлоритовой ассоциацией вторичных гидротермальных минералов, соотношением  $\text{Cl}/\text{SO}_4 > 1$ , превышением значений Na–K геотермометра над прямыми замерами температуры.

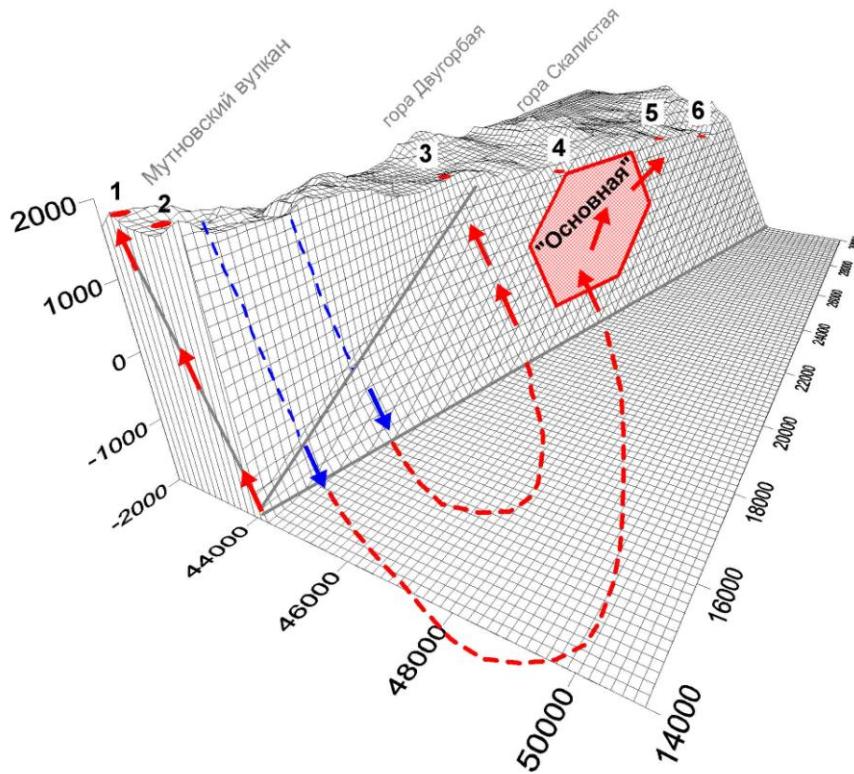


Рис. 2.2 – Блок–схема Северо–Мутновской вулcano–тектонической зоны с вырезом в плоскости продуктивной зоны «Основная».

Вероятные линии тока флюида от области метеорного питания в постройке вулкана Мутновский через область транзита (где происходит нагрев и обогащение магматической составляющей) до продуктивного геотермального резервуара и очагов естественной разгрузки показаны стрелками и пунктиром. Продуктивный геотермальный резервуар (продуктивная зона «Основная») выделен многоугольником. Следы плоскости, включающей продуктивную зону "Основная", показаны жирными линиями. Естественные термопроявления на поверхности: 1 – Активная Воронка кратера Мутновского вулкана, 2 – Донное Поле кратера Мутновского вулкана, 3 – Северо Мутновские Западные, 4 – Дачные, 5 – Пиратовские, 6 – Верхне Жировские.

Четыре дополнительные скважины (А1–А4), пробуренные в 2001–2003 гг. и оборудованные фильтрами за пределами продуктивной зоны «Основная», показали отсутствие продукции или низкую продуктивность. Парогидротермальный взрыв, произошедший в 300 м к востоку от скважины 045 (июнь 2003г.) в результате вызванного эксплуатацией понижения уровня в зоне высоких температур, является дополнительным подтверждением изображенной на рис.2.3 схемы циркуляции теплоносителя.



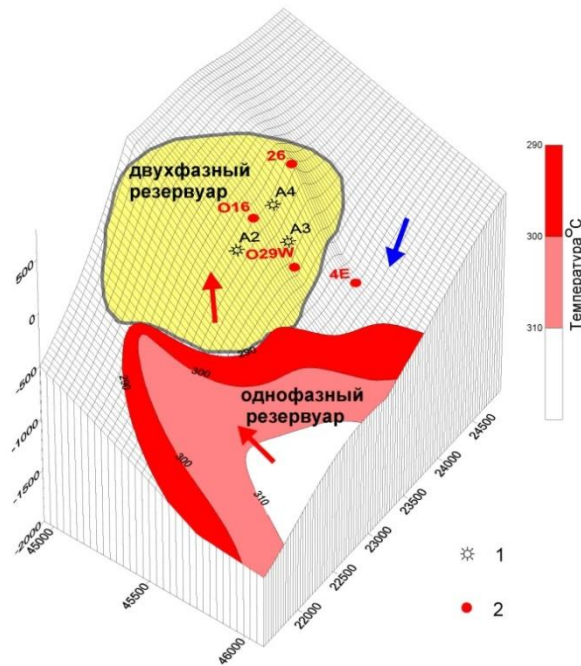


Рис. 2.3. Схема циркуляции теплоносителя – блок–схема продуктивной зоны «Основная» ССВ простирания и ВЮВ падения  $60^\circ$ , с распределением температур (изолинии  $290$ ,  $300$  и  $310^\circ\text{C}$ ) и фазового состояния теплоносителя в пределах зоны.

Легенда: 1 – проекции (на кровлю) точек отбора образцов при бурении из скважин А2, А3 и А4 (для скважин А3 и А4 проекции совпадают с фактическими координатами точек отбора, для скважины А2 – точка отбора находится на 200 м ниже кровли продуктивной зоны); 2 – точки газогидрохимического опробования (скважины 016, 26, 029W, 4E).

Продуктивная зона «Основная» в центральной части участка Дачный вскрыта скважинами 045, 01, 014, 016, 1, 029W, 26, 24, 027, показавшими производительность в процессе длительной эксплуатации или продолжительных опытных выпусков теплоносителя [14, 15, 16]. Продуктивная зона имеет северо–северо–восточное простирание, падение на восток–юго–восток  $60^\circ$ . Простирание продуктивной зоны "Основная" субпараллельно системе разломов «Встречный», «Термальный», «Пологий», «Туфовый», «Крайний», с юго-запада она ограничена разломом «Водопадный», с востока – субмеридиональной зоной аномального магнитного поля (рис.2.4, названия разломов по [9, 10, 36]). Средняя вскрытая вертикальная мощность зоны оценивается в 240 м. Геологический разрез (по линии скважин 17–030) [81], совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скважин 045–027., приведен на рис. 2.5.



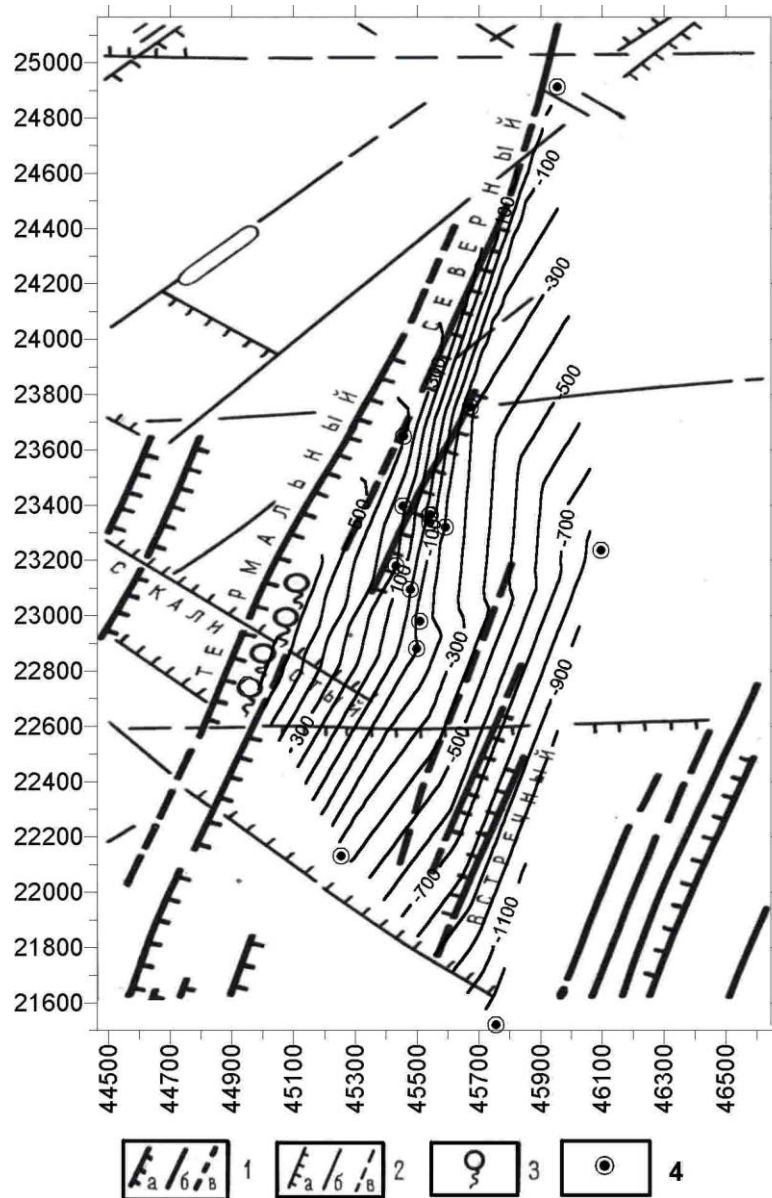


Рис. 2.4 – Структурная схема Мутновского геотермального месторождения по [36] и кровля поверхности (в изолиниях на абс. отм. от  $-1100$  до  $+500$  м) продуктивной зоны "Основная" на участке Дачный.

1 – новейшие разрывные нарушения субмеридионального (С, СВ  $20 - 30^\circ$ ) простирания: а – с установленными вертикальными смещениями, б – без установленных вертикальных смещений, в – предполагаемые; 2 – прочие разрывные нарушения: а – с установленными вертикальными смещениями, б – без установленных вертикальных смещений, в – предполагаемые; 3 – термопроявления; 4 – точки вскрытия продуктивной зоны геотермальными скважинами (таблица 2.2.1).

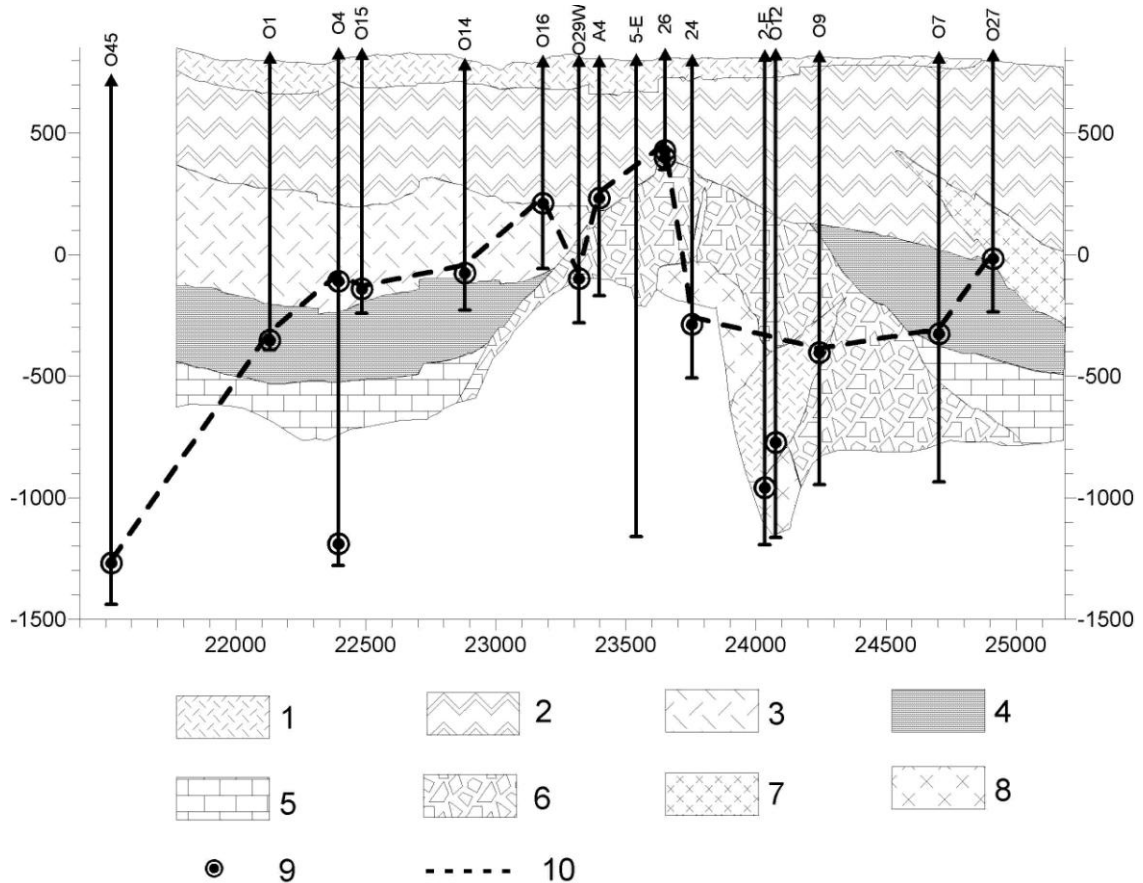


Рис. 2.5 – Геологический разрез (по линии скважин 17 – 030) [81], совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скважин 045 – 027.

1 – четвертичные игнимбриты, туфы, лавы и экструзии кислого состава; 2 – плиоценовые лавы ( $NaI_2$ ); 3 – плиоценовые риолитовые туфы ( $NaI_1$ ); 4 – миоценовые туфы и лавы ( $N_1^2as_2$ ); 5 – миоценовые песчаники ( $N_1^2as_1$ ); 6 – миоценовая интрузивная контактная зона ( $N_1br$ ); 7, 8 – диоритовые интрузии ( $\delta N_1^2$ ); 9 – точки вскрытия зон полного поглощения; 10 – кровля продуктивной зоны «Основная».

## 2.2 Гидрохимические характеристики

Продуктивная зона «Основная» вскрыта продуктивными скважинами «высокого давления» (рабочие устьевые давления могут превышать 12 бар). Она характеризуется  $Cl/SO_4 > 1$ , повышенными показаниями Na-K геотермометра по сравнению с прямыми замерами температуры, в то время как зоны растека и нисходящего движения теплоносителя вскрываются скважинами «низкого давления» и характеризуются  $Cl/SO_4 < 1$  (таблицы 2.2.1 и 2.2.2). Ориентация продуктивной зоны «Основная» подтверждается также трассерным взаимодействием в субмеридиональном направлении [12, 13, 54, 61]. Параметр

Cl/SO<sub>4</sub> можно использовать для трассировки линий тока в геотермальном резервуаре (транспорт теплоносителя происходит по направлению уменьшения Cl/SO<sub>4</sub>): 045→01→014→1→24→4E→5E и 013→029W→1→24→4E→5E (рис. 2.6).

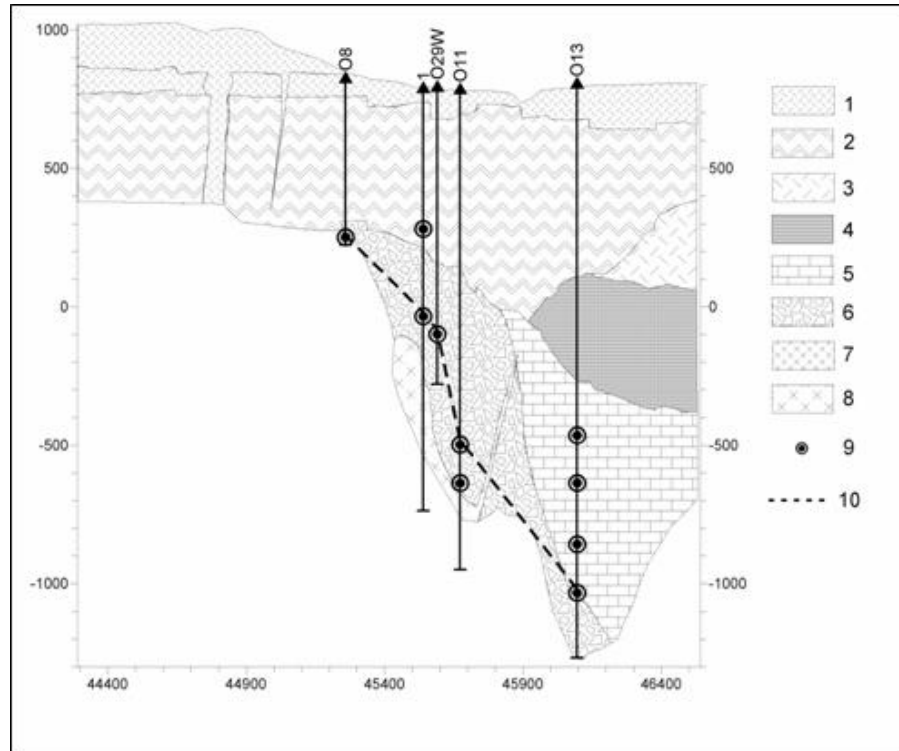


Рис. 2.6 – Геологический разрез (по линии скважин В2-4), совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скважин 08-013 [81].

- 1 – четвертичные игнимбриты, туфы, лавы и экструзии кислого состава;
- 2 – плиоценовые лавы (NaI<sub>2</sub>); 3 - плиоценовые риолитовые туфы (NaI<sub>1</sub>);
- 4 – миоценовые туфы и лавы (N<sub>1</sub><sup>2</sup>as<sub>2</sub>);
- 5 – миоценовые песчаники (N<sub>1</sub><sup>2</sup>as<sub>1</sub>);
- 6 – миоценовая интрузивная контактная зона (N<sub>1</sub>br);
- 7, 8 – диоритовые интрузии (δN<sub>1</sub><sup>2</sup>);
- 9 – точки вскрытия зон полного поглощения;
- 10 – кровля продуктивной зоны «Основная».

Термогидродинамические и гидрохимические характеристики продуктивных скважин [84], (с добавлениями по данным опробования в 1999–2003 гг.).

Скважина	Дата	Расход общий, кг/с	Расход пара, кг/с	Энтальпия, кДж/кг	Устьевое давл- ление, бар	Максим. устье вое давление, бар	Т Na-K, °C	Cl/SO <sub>4</sub>
Восходящий поток теплоносителя «Основной»								
O45	10.1991	21	16.4	2320	8.4	20.1	291	4.83
O1	08.1988	53.2	20.2	1500	9.0	21.9	303	3.06
O13	1988	44.8	12.2	1278	8.3	13.5	303	1.70
029W	02.2000	71	14.9	1150	7.3	18.4	268	2.30
029W	02.2003	72.5	16.3	1181	9.2		245	1.64
029W	09.2003						264	1.53
O14	09.1988	8.4	5.4	2050	6.8	35.8	266	1.31
1	09.1988	20	7.1	1450	8.2	14.6	276	1.25
24	1988	35		1204			275	1.1
Восходящий поток теплоносителя «Северо-Восточный»								
O37	07.1993	24.2	11.1	1665	6.6	11.6	253	1.82
O48	07.1996	85.9	32.9	1506	10.1	16.1	270	2.02
O49	01-05. 1996	30	7.9	1260	8.2	12.8	253	1.54
Нисходящий поток «Конденсатный»								
O12	1987					7.1	240	0.70
O3	1987					3.9	262	1.00
O11	1987					3.6	228-276	0.30
4E	11.1999	26.9	6.3	1200	7.3	11.8	274	0.98
4E	10.2001	32.8	6.1	1104	7.6	8.9	277	1.08
4E	09.2003						251	0.95
5E	06.2002	36.9	6.8	1097	8.7	11.7	252	0.78
5E	02.2003						267	0.71
5E	09.2003						249	0.74

Таблица 2.2.2

Химический состав конденсата (с) и сепарата (s) по данным опробования в 1999-2003 гг. эксплуатационных скважин участка Дачный Мутновского геотермального месторождения [84].

Скважин а	Дата	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	e Общ.	Al <sup>3+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>	B	SiO <sub>2</sub>	As
4E c	5.11.98	4.93	3.1	0.02	0.07	<0.01	0.047	0.004	0.014	0.008	<0.7	3.3	6.1		0.04	0.19	3.6	0.04
4E s	5.11.98	9.06	0.3	276.5	53.5	1.42	3	0.003	0.01	1.36	244.9	249.7	81.1	6.3	4.24	17.7	772.1	3.3
016 c	4.01.99	4.78	9.5	0.35	0.1	<0.01	0.4	0.003	0.03	0.028	0.71	3.84	28.06		0.02	0.43	3.7	0.036
016 s	4.01.99	9.2	1	181	25.7	0.1	8.8	0.033	0.56	1.55	36.17	297.8	93.3	9.9	0.75	19.9	476.3	1.25
26 c	5.02.99	5	6.2	0.02	0.03						<0.35	2.88	17.1		0.02		1.4	0.009
26 s	5.02.99	7.89	2	2.48	0.42	0.001	3	0.028			<0.7	5.76	15.8		0.14	5.5	29.4	0.01
029W c	19.02.99	5.3	5.2	2.26	0.55	0.016		0.01			3.9	1.92	18.3		0.11	2.3	7.6	0.059
029Ws	19.02.99	9.04	0.3	226	43	1.41	1.94	0.009			267.7	115.3	72	4.8	2.82	28.5	980.6	6.03
4E c	24.09.03	4.86	4.5	0.65	<0.1	0.003	0.08	<0.003	0.47	<0.3	1.4	3.4	11.0		0.08	0.22	3.8	<0.1
4E s	24.09.03	8.26	1.8	220.6	37.1	1.1	3.54	<0.003	0.19	<0.96	200	211.3	78.1		2.9	14.5	189.4	3.54
016 c	22.08.03	4.86	7.8	0.025	<0.1	<0.01	0.25	0.0085	0.69	<0.3	0.7	1.4	24.4		0.09	0.15	<1.0	<0.1
016 s	22.08.03	4.91	6.0	24.4	3.4	0.019	0.56	0.015	0.4	0.23	5.7	45.1	30.5		0.2	3.9	9.4	0.12
26 c	22.08.03	4.81	9.0	0.13	<0.1	<0.01	0.13	0.018	0.15	<0.3	6.4	1.9	18.3		0.09	0.09	<1.0	<0.1
26 s	22.08.03	4.91	6.0	1.5	0.55	<0.01	0.45	0.036	6.07	<0.3	<0.7	1.4	25.6		0.1	0.31	9.4	<0.1
029W c	24.09.03	4.81	6.0	0.13	<0.1	<0.01		0.009	0.5	<0.3	0.7	2.9	15.9		0.1	0.13	<1.0	<0.1
029W s	24.09.03	8.74	1.8	179.6	32.9	1.0	2.75	<0.003	0.34	0.92	219.8	144.1	53.7		2.9	16.5	190.4	4.61
5E c	24.09.03	4.47	4.2	<0.46	<0.1	<0.01	0.08	<0.003	0.11	<0.3	<0.7	1.9	11.0		0.1	0.07	<1.0	<0.1
5E s	24.09.03	7.71	1.3	222.1	36.7	1.15	2.9	<0.003	0.17	0.98	191.5	259.4	30.5		4.3	11.9	189.4	2.43

Примечание – Химические анализы приведенные в Табл. 2.2.1 -2.2.2 выполнены в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904). Аналитики: В.К. Марынова, С.В. Сергеева. Пробы отобраны - А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым.

## **2.3 Анализ условий водного питания Мутновского геотермального резервуара**

Отбор проб воды на гидроизотопный и гидрохимический анализ на месторождении начал проводиться с 1980 г. [44, 79], а с 1985 г. он регулярно осуществляется нами.

Впервые, наиболее достоверные анализы проб термальных вод на изотопный ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ) и гидрохимический состав из продуктивных скважин Мутновского геотермального месторождения, были получены при опытно-эксплуатационных выпусках в 1995–1999 г., когда они отбирались из жидкой части (сепарата) двухфазной смеси, полученной после разделения в аттестованном, промышленном сепараторе [33, 34, 39, 84].

Пробы полученные в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения (2000–2016гг.), отбирались аналогичным образом. Так же проводился отбор проб холодных и термоминеральных вод Мутновского геотермального месторождения для измерения их изотопного состава. 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 и давление при котором происходит разделение жидкости на водную и паровую составляющие (давление сепарации);
2. Исходную энтальпию воды.

Такие пересчеты уже выполнялись, но по упрощенным формулам [23, 30, 44, 84]. В настоящей работе используются более точные зависимости.

### **2.3.1 Методика пересчета на изотопное фракционирование**

Для расчета изотопного состава исходной воды в условиях геотермального резервуара, воспользуемся формулами Арнасона [49].

$$\text{Для: } \delta^{18}\text{O: } \delta_{0(O18)} = \delta_{L(O18)} \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{(O18)}} \right) \eta \right) - \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{(O18)}} \right) \eta \cdot 1000 \quad (2.1);$$

$$\text{Для } \delta\text{D: } \delta_{0(D)} = \delta_{L(D)} \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{(D)}} \right) \eta \right) - \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{(D)}} \right) \eta \cdot 1000 \quad (2.2),$$

где:

$\delta_{0(O18)}$  и  $\delta_{0(D)}$  – пересчитанные значения  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , в исходной воде,  
 $\delta_{L(O18)}$  и  $\delta_{L(D)}$  – измеренные значения  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в сепарате воды,  
 $\eta$  – доля пара образовавшегося из перегретой воды при давлении сепарации,  
 $\alpha_{(O18)}$  и  $\alpha_{(D)}$  – константы равновесия, между водой и паром, при соответствующей температуре сепарации, для  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ .

Доля пара образовавшегося из перегретой воды –  $\eta$ , при соответствующей температуре и давлении сепарации, вычисляется по формуле (2.3):

$$\eta = \frac{h_0 - h_w}{h_s - h_w} \quad (2.3),$$

где:

$h_0$  – энтальпия скважины или источника, из которых осуществлялся отбор пробы,

$h_w$  – энтальпия воды при температуре и давлении сепарации,

$h_s$  – энтальпия пара при температуре и давлении сепарации.

Значения энтальпии скважин  $h_0$ , определялась при опытно-эксплуатационных выпусках в 1995-1999 г. и в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения начиная с 2000 г, значение энтальпии Нижне – Жировского источника, взято из [6],  $h_w$  и  $h_s$  взяты из таблиц программного кода программы TOUGH2 [73].

Константы равновесия  $\alpha_{(O18)}$  и  $\alpha_{(D)}$ , для требуемой температуры, температурного диапазона 100-300 °С, вычислялись при помощи полиномиальной аппроксимации табличных значений из [49] (2.4, 2.5).

$$\alpha_{(O18)} = 1.008935664 - 0.000043002331 \times t + 0.00000005477855478 \times t^2 \quad (2.4)$$

$$\alpha_{(D)} = 1.063581119 - 0.0004410780886 \times t + 0.0000007100815851 \times t^2 \quad (2.5)$$

Исходные и пересчитанные результаты приведены в (табл.2.3.1).

Таблица 2.3.1

Изотопный состав флюидов из скважин Мутновского геотермального месторождения (сепарат воды после разделения в сепараторе) и результаты пересчета измерений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ .

$P_{sep}$  – давление сепарации (бар), энтальпия скважины (кДж/кг),  $\delta_0^{18}O$  и  $\delta_0D$  – пересчитанные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , в исходной воде,  $\delta_L^{18}O$  и  $\delta_LD$  – измеренные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в сепарате воды.

№ пробы	Место отбора	Дата	$P_{sep}$ (бар)	Энтальпия скважины (кДж/кг)	Фазовое состояние	$\delta_LD$	$\delta_L^{18}O$	$\delta_0D$	$\delta_0^{18}O$
МК96-1	049N	13.12.1995	0,92	1260	вода	-100,9	-11,9	-109,5	-13,8
МК96-2	049N	20.12.1995	0,92	1260	вода	-102,1	-12,3	-110,7	-14,2
МК96-3	049N	27.12.1995	0,92	1260	вода	-101,5	-12,2	-110,1	-14,1
МК96-5	049N	14.02.1996	0,92	1260	вода	-101,3	-12,2	-109,9	-14,1
МК96-7	049N	22.02.1996	0,92	1260	вода	-102,0	-12,3	-110,6	-14,2
МК96-9	049N	28.02.1996	0,92	1260	вода	-101,9	-12,3	-110,5	-14,2
МК96-11	049N	10.03.1996	0,92	1260	вода	-101,1	-12,4	-109,7	-14,3
МК96-12	049N	18.04.1996	0,92	1260	вода	-101,5	-12,2	-110,1	-14,1
МК96-13	049N	24.04.1996	0,92	1260	вода	-101,5	-12,3	-110,1	-14,2
МК96-16	049N	01.05.1996	0,92	1260	вода	-101,7	-12,3	-110,3	-14,2
МК96-17	049N	07.05.1996	0,92	1260	вода	-101,2	-12,4	-109,8	-14,2
МК96-21	048	28.07.1996	0,92	1500	вода	-101,3	-12,3	-112,4	-14,7
МК96-22	014	10.08.1995	0,92	2050	вода	-98,4	-11,3	-115,2	-15,0
МК96-23	014	01.09.1995	0,92	2050	вода	-96,8	-11,2	-113,7	-14,9
МК88-51	1	02.08.1988	0,92	1500	вода	-102,0	-12,8	-113,1	-15,2
МК88-86	1	02.07.1988	0,92	1450	вода	-104,0	-13,0	-114,6	-15,3
МК88-129	24	09.09.1988	0,92	1400	вода	-106,0	-13,0	-116,0	-15,2
АК 1999	016	04.01.1999	0,92	2690	вода	-98,0	-11,3		
АК 1999	4Е	05.11.1998	0,92	1206	вода	-103,0	-12,4	-111,1	-14,2



AK 1999	26	06.02.1999	0.92	2770	вода	-101,0	-15,3		
AK 1999	O29W	14.02.1999	0.92	1183		-104,0	-12,3	-111,8	-14,0
AK 1999	O29W	15.02.1999	0.92	1214	вода	-103,0	-12,2	-111,1	-14,0
AK 1999	O14	1999	0.92	1890	вода	-113,9	-14,7	-128,8	-18,0
AK 1999	O1	1999	0.92	1400	вода	-112,8	-15,1	-122,7	-17,3
AK 1999	1	1999	0.92	1407	вода	-114,3	-15,2	-124,3	-17,4
AK 1999	24	1999	0.92	1300	вода	-115,8	-15,2	-124,7	-17,2
AK 1999	O16	04.01.1999	8.4	2690	пар	-217,0	-14,6		
AK 1999	4E	05.11.1998	7.3	1206	пар	-214,0	-16,3	-208,0	-13,8
AK 1999	26	06.02.1999	10.1	2770	пар	-181,0	-15,3		
AK 1999	O29W	14.02.1999	7.3	1183	пар	-170,0	-17,0	-163,5	-14,5
AK 1999	O29W	15.02.1999	7.3	1214	пар	-179,0	-17,1	-172,7	-14,6
AK 2003	O29W	2003	7	1220	вода	-111,0	-12,9	-113,2	-13,7
AK 2003	5E	2003	7	1070	вода	-111,0	-13,4	-112,6	-14,0
AK 2003	4E	2003	7	1340	вода	-109,0	-13,1	-111,7	-14,1
AK 2003	O16	2003	7	2690	пар	-110,0	-14,5		
AK 2003	26	2003	7	2770	пар	-113,0	-15,2		
AK 2004	O29W	2004	7	1220	вода	-112,0	-13,1	-114,2	-13,9
AK 2004	4E	2004	7	1340	вода	-113,0	-13,6	-115,7	-14,6
AK 2004	5E	2004	7	1070	вода	-114,0	-13,7	-115,6	-14,3
AK 2004	O37	2004	7	1200	вода	-106,0	-13,3	-108,1	-14,1
AK 2004	O55	2004	7	1200	вода	-106,0	-13,3	-108,1	-14,1
AK 2004	O48	2004	7	1200	вода	-108,0	-13,6	-110,1	-14,4
AK 2004	O37	2004	7	1200	вода	-107,0	-13,5	-109,1	-14,3
AK 2004	O16	2004	7	2690	пар	-110,0	-14,6		
AK 2004	26	2004	7	2770	пар	-114,0	-15,3		
AK 2014-33	Вода ВМ. ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	вода	-108,0	-14,2	-110,1	-15,0
AK 2014-34	Конденсат пара ВМ ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	пар	-110,3	-15,6	-103,4	-13,1

АК 2014-35	Вода 2 ВМ ГеоЭС	17.08.2014	7	1200	вода	-101,8	-12,4	-104,0	-13,2
АК 2014-40	Вода ВМ ГеоЭС	19.08.2014	7	1200	вода	-110,5	-14,9	-112,6	-15,7
АК 2014-80	вулкан Мутновский, донное фумарольное поле	18.09.2014	0.92			-82.9	-7.04		
АК 2014-86	Мутн. ГеоЭС Вода 1	18.09.2014	7	1200	вода	-104,8	-12,9	-106,9	-13,7
АК 2014-87	Мутн. ГеоЭС Пар 1	18.09.2014	7	1200	пар	-69,1	-7,7	-61,9	-5,2
АК 2014-88	Мутн. ГеоЭС Пар 2	18.09.2014	7	1200	пар	-69,8	-8,1	-62,6	-5,6
АК 2014-89	Мутн . ГеоЭС Вода 2	18.09.2014	7	1200	вода	-102,3	-12,6	-104,5	-13,4
АК 2014-90	В-Мут ГеоЭС Пар	18.09.2014	7	1200	пар	-105,2	-14,0	-98,3	-11,5
АК 2014-91	В-Мут ГеоЭС вода	18.09.2014	7	1200	вода	-105,1	-13,8	-107,2	-14,6
АК 2014-92	В-Мут ГеоЭС сброс	18.09.2014	0.92	1200	вода	-108,1	-14,6	-116,1	-16,3
АК 2014-93	В-Мут ГеоЭС сброс ручей	18.09.2014	0.92	1200	вода	-104,0	-13,2	-112,0	-15,0
АК 2015-27	В-Мутн ГеоЭС сброс	16.08.2015	0.92	1200	вода	-99,6	-13,0	-107,6	-14,7

Примечание: образцы за 1995-96гг отобраны - А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым и проанализированы М.Такахаша (Геологическая служба Японии), образцы за 1988,1998,1999,2003,2004гг отобраны - А.В. Кирюхиным и проанализированы В.А. Поляковым (ВСЕГИНГЕО, Москва), образцы за 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015 гг. отобраны - А.В. Кирюхиным и проанализированы П.О. Ворониным, А.Ю. Поляковым (ИВиС), образцы за 2014гг отобраны - А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым и проанализированы П.О. Воронин, А.Ю. Поляковым (ИВиС).

### 2.3.2 Источник водного питания Мутновского геотермального месторождения по данным измерений изотопного состава воды ( $\delta D$ , $\delta^{18}O$ )

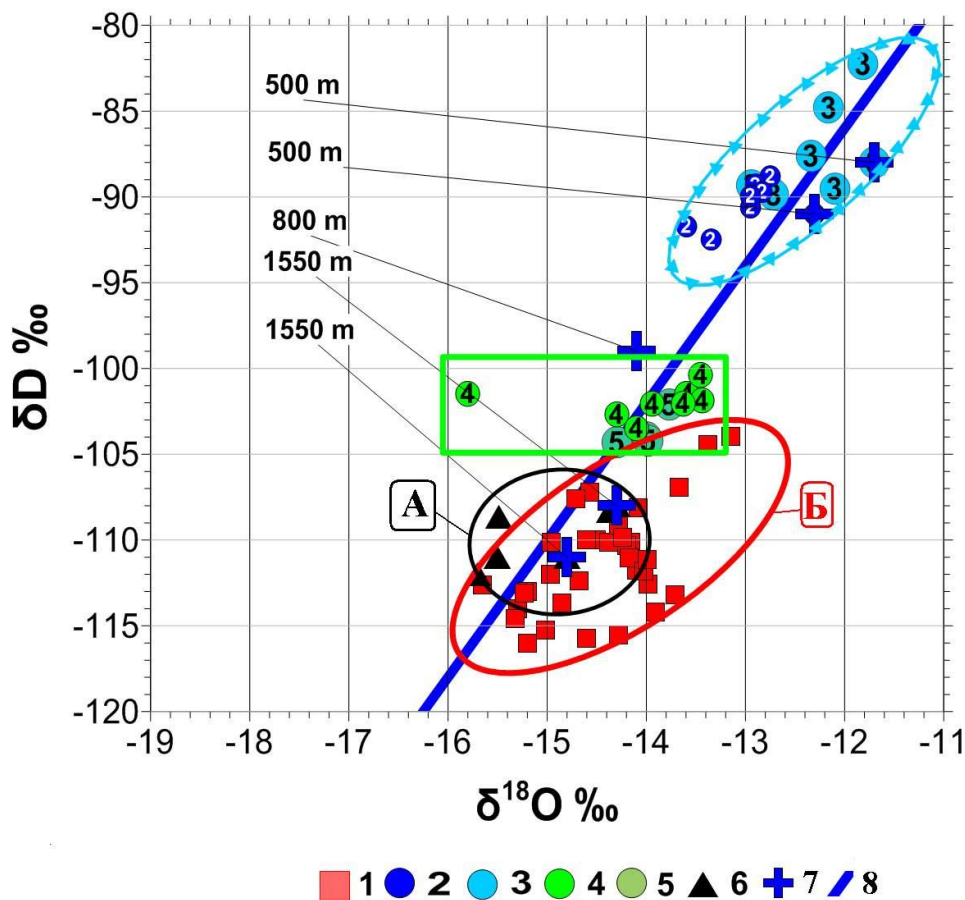


Рис. 2.7 Распределение  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в термальных водах скважин, метеорных и термоминеральных водах, Мутновского геотермального месторождения.

Условные обозначения: 1 – вода из скважин Мутновского геотермального месторождения, отбор проб осуществлялся в 1998, 1995, 1996, 1999, 2003, 2004, 2014, 2015 гг.; 2 – вода из реки Жировая, отбор проб осуществлялся в 2014, 2015 гг.; 3 – вода из реки Фальшивая, отбор проб осуществлялся в 1999, 2014, 2015 гг.; 4 – вода из Нижне-Жирового источника, отбор проб осуществлялся в 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; 5 – вода из скважины Родниковая (Вилючинские источники), отбор проб осуществлялся в 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; 6 – вода ручья из ледника вулкана Мутновский, отбор проб осуществлялся в 1999, 2001, 2004, 2005, 2014, 2015 гг.; 7 – пробы метеорных вод с соответствующих абсолютных отметок; 8 – метеорная линия (линия Крейга); А – группирование проб из ледника вулкана Мутновский; Б – группирование проб из скважин Мутновского геотермального месторождения.

Пробы отобраны А.В. Кирюхиным, А.Ю. Поляковым. Анализ выполнен М. Такахаси (1995–98), В. А. Поляковым (1988, 1998, 1999, 2003, 2004), пробы 2005, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 годов проанализированы П.О. Ворониным и А.Ю. Поляковым на изотопном анализаторе LGR IWA 35EP.

На рис.2.7 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 Жирова,я,
- г) воды из реки Фальшивая,
- д) воды из Нижне – Жировского термального источника,
- е) термальной воды из скважины Родниковая (Вилючинские 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 водное питание Мутновского геотермального резервуара ледниками из кратера Мутновского вулкана.

Все пробы флюида из скважин, находятся в диапазоне:

$$-18\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13\text{‰} \text{ и } -125\text{‰} < \delta\text{D} < -106\text{‰}.$$

Метеорные воды бассейнов рек Фальшивая и Жирова,я - не подходят на эту роль, являясь более тяжелыми:

$$-13,5\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -11,5\text{‰} \text{ и } -93\text{‰} < \delta\text{D} < -82\text{‰}.$$

Метеорное водное питание постройки Мутновского вулкана достаточно для обеспечения циркуляции в системе питающих каналов Северо–Мутновской вулканотектонической зоны с расходом в сотни кг\с. Площадь постройки вулкана с отметками выше +1400 м абс. составляет 26 км<sup>2</sup>, что при увеличивающейся с высотой интенсивности атмосферных осадков до 5000 мм [82] может обеспечить сток воды с расходом до 4,1 м<sup>3</sup>/с. Даже если только 2% от этого стока преобразуется в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения притока глубинного теплоносителя по участку Дачный, который оценивается в 55 кг/с [55]. Немаловажным является также приподнятое на 1 – 2 км положение рассматриваемой области водного питания.

Подобное предположение, несмотря на гораздо меньший массив исходных данных по изотопии, рассматривалось ранее в [4, 20, 21, 67].

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

Изменение изотопного состава термальных вод, отобранных до и во время промышленной эксплуатации Мутновского продуктивного геотермального резервуара, позволяет оценить условия формирования его эксплуатационных запасов.

За период эксплуатации месторождения, давление в резервуаре значительно снизилось относительно исходного (Рис. 2.8) [20, 21, 24, 26, 27, 30, 33, 34, 39, 40, 41], 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).

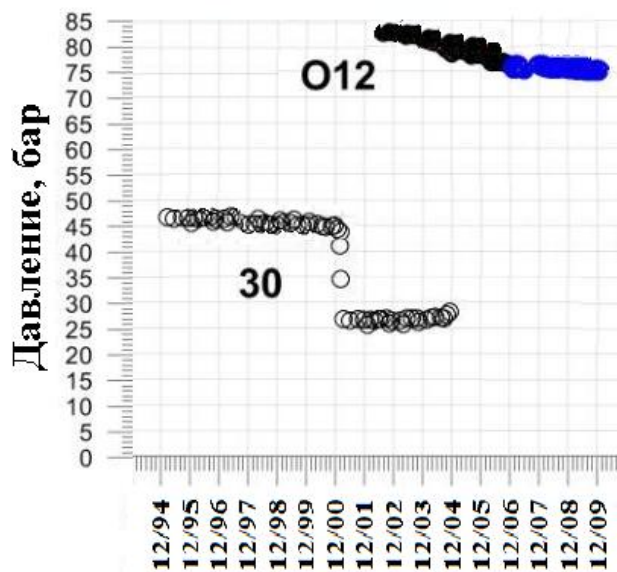


Рис. 2.8 Снижение давления в Мутновском продуктивном геотермальном резервуаре (1995-2009 гг.) согласно измерениям в скважинах 30 и О12. [67].

Подобные проникновения локальных метеорных вод, отмечались в Японии, месторождения Мори (Нигорикава), Сумикава и Огуни [48, 71, 80].

На рис.2.9 приведен гидрогеологический разрез вдоль Северо–Мутновской вулканотектонической зоны демонстрирующий структуру Мутновского

геотермального месторождения, размещение скважин, холодных и термоминеральных источников, область водного питания месторождения и уровень локальных метеорных вод.

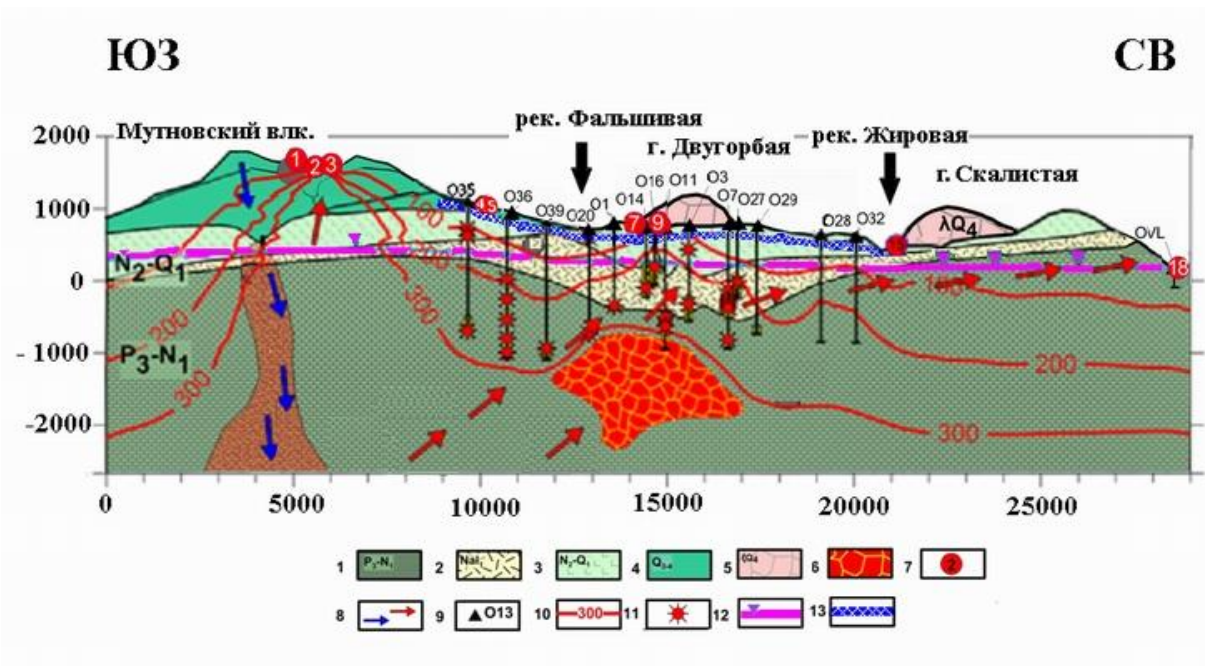


Рис 2.9. Гидрогеологический разрез вдоль Северо–Мутновской вулканотектонической зоны.

Условные обозначения: 1 – миоценовые песчаники и третичные вулканогенно–осадочные образования; 2 – миоценовые дацитовые и риолитовые туфы и лавы; 3 – плиоцен–четвертичные базальты, андезиты и андезитовые туфы; 4 – верхнеплейстоценовые и голоценовые андезиты и базальты, 5 – риолитовые экструзии; 6 – тепловые источники (недавние магматические интрузии); 7 – термопроявления (1 – Активная воронка, 2 – Донное поле, 3 – Верхнее поле, 4, 5 – Северо–Мутновские, 7 – Дачные, 9 – Медвежьи, 15 – Верхне–Жировские, 18 – Вилочинские); 8 – водное питание месторождения; 9 – скважины с соответствующими номерами; 10 – изотермы, °С; 11 – продуктивные зоны; 12 – уровень термоводоносного комплекса; 13 – бассейны локальных метеорных грунтовых вод в пределах Мутновского геотермального месторождения.

Выполненные гидроизотопные измерения 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:

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

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

$$-15.5\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -14.3\text{‰} \text{ и } -118\text{‰} < \delta\text{D} < -107\text{‰}. \text{ (рис. 2.10).}$$

Однако, после последующей 10 летней эксплуатации месторождения, полученные данные показывают утяжеление изотопного состава термальных вод, как по  $\delta^{18}\text{O}$ , так и  $\delta\text{D}$ :

$$-15.5\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -13.1\text{‰} \text{ и } -113\text{‰} < \delta\text{D} < -104\text{‰}. \text{ (рис. 2.10).}$$

Более наглядно процесс утяжеления представлен на рис.2.11, где приведены гистограммы распределения  $\delta\text{D}$  в сепарате скважин Мутновского геотермального месторождения в зависимости от даты отбора проб (утяжеление изотопного состава (относительно фонового 1998г., в 2014-2015гг. по  $\delta\text{D}$  до 6‰).

Среднее значение –  $X = -111.78$  и среднее отклонение -  $STD = 2.18265$  за 1995-1999 гг;  $X = -111.83$ ,  $STD = 2.49782$  за 2003-2004гг;  $X = -107.4$ ,  $STD = 2.91752$  за 2014-2015гг.

Наиболее вероятной причиной этого является проникновение в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар локальных метеорных вод.

Типичным примером локальных метеорных вод, являются воды рек Фальшивая и Жировая изотопный состав которых более тяжел, чем фоновые значения изотопного состава термальных вод продуктивных скважин Мутновского геотермального месторождения:

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

При регулярном мониторинге изотопного состава вод скважин Мутновского геотермального месторождения, могут быть определены зоны притока локальных метеорных вод в продуктивный геотермальный резервуар и локализованы соответствующие продуктивные скважины [40, 41].

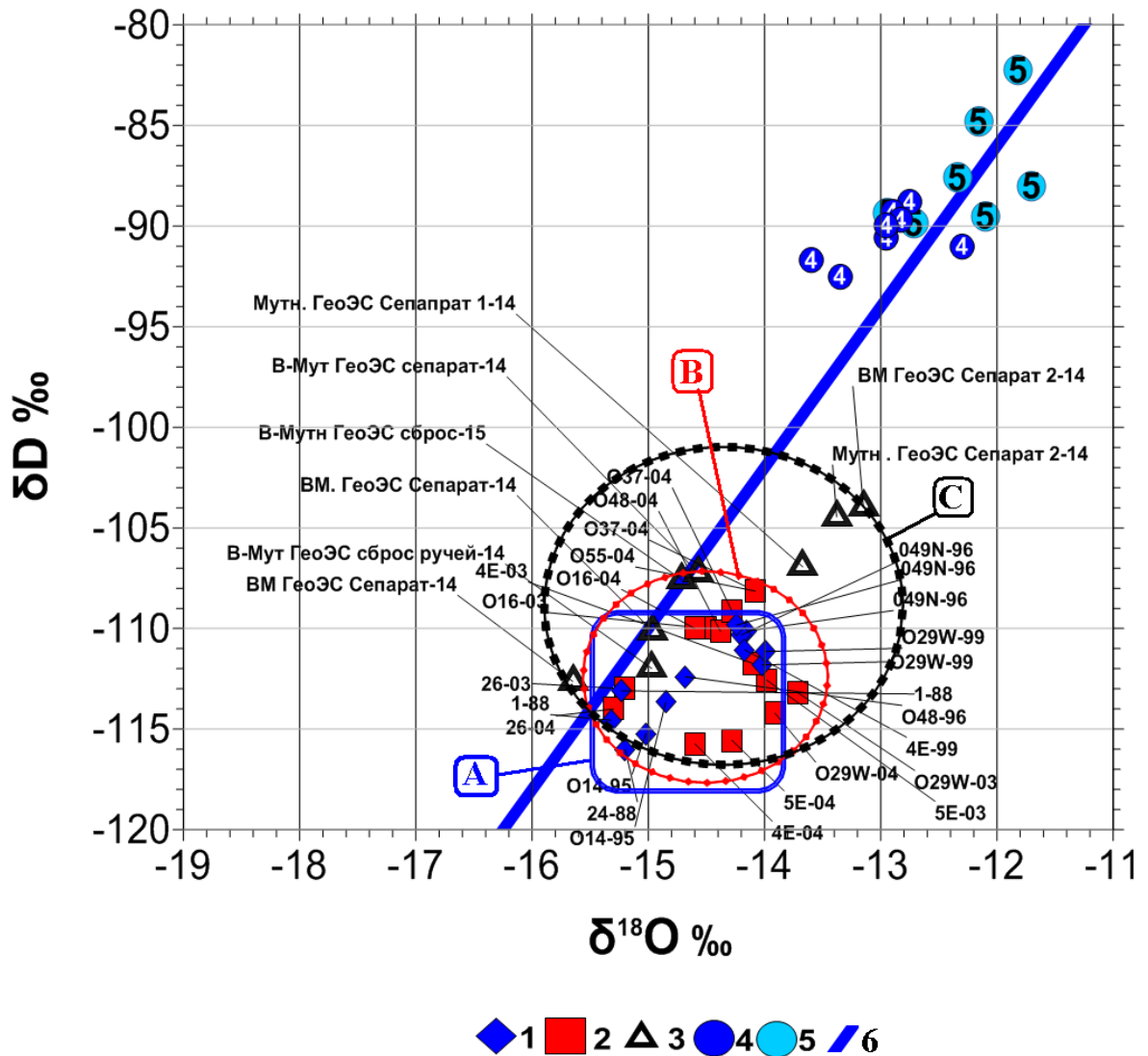


Рис 2.10. Распределение  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в термальных водах скважин и локальных метеорных водах, Мутновского геотермального месторождения. Отбор проб осуществлялся А.В. Кирюхиным и А.Ю. Поляковым.

Условные обозначения: 1 – Пробы отобранные в 1995-1999гг.; 2 – Пробы отобранные в 2003-2004; 3 – Пробы отобранные в 2015-2015; 4 – вода из реки Жирова, отбор проб осуществлялся в 2014, 2015гг; 5 – вода из реки Фальшивая, отбор проб осуществлялся в 1999, 2014, 2015гг.; 6 – метеорная линия (линия Крейга); А, В, С – группирование по годам отбора.



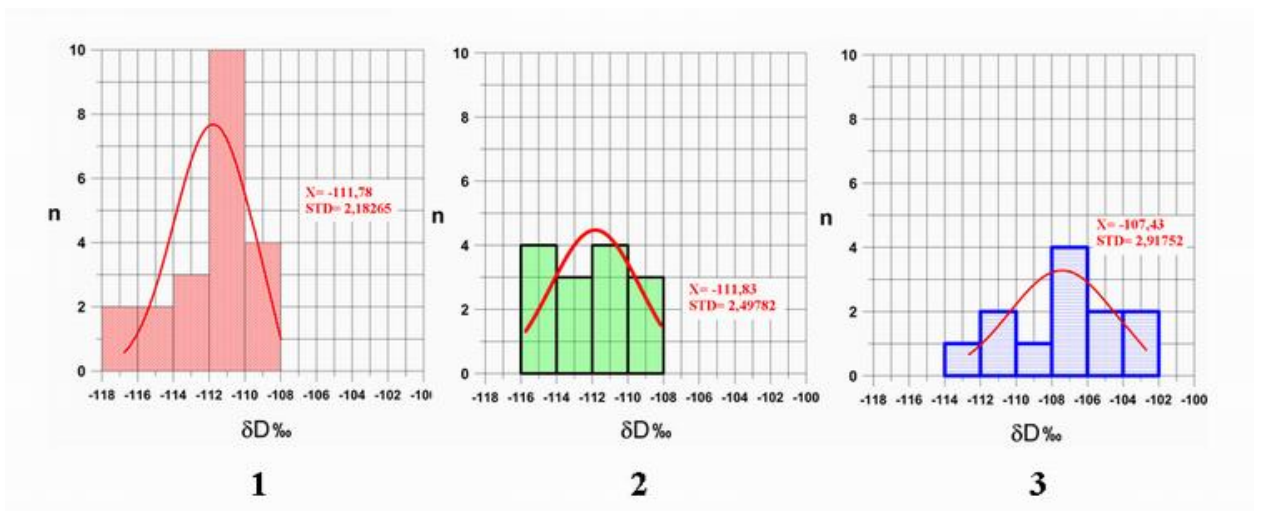


Рис 2.11. Распределение  $\delta D$  в сепарате скважин Мутновского геотермального месторождения.

Условные обозначения: 1– 1995–1999 гг.; 2 – 2003–2004 гг.; 3 – 2014–2015 гг.:  $n$ –число измерений, показаны Гауссовские аппроксимации распределений, средние значения ( $X$ ) и стандартное отклонение ( $STD$ ).

#### 2.4. TOUGH2 - моделирование теплопереноса в геотермальных резервуарах

Transport Of Unsaturated Groundwater and Heat 2 (TOUGH2) – вычислительная программа многоцелевого назначения для моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде (ГОСТ Р 56909-2016).

Программа была создана в Национальной лаборатории Беркли (LBNL), США в 1991 и продолжает свое развитие по настоящее время. В мировом научном и научно – техническом сообществе, является апробированным инструментом для моделирования теплопереноса в высокотемпературных геотермальных резервуарах и прогноза их эксплуатации [73].

В качестве математической модели для описания теплопереноса в гидротермальных системах используется система уравнений, которые выводятся из законов сохранения массы и энергии и фильтрации флюида в пористой или пористо-трещиноватой среде. Замыкающими соотношениями служат уравнения состояния, а также начальные и граничные условия.

В общем случае, для реальной, 2-х мерной или трехмерной области, эта система решается численными методами:

Первый этап численного моделирования – пространственная дискретизация объекта, создание вычислительной сетки, в каждом из узлов которой задаются необходимые параметры.

Следующий этап – переход от системы интегральных или дифференциальных уравнений к системе конечно-разностных уравнений для каждого узла сетки [74].

TOUGH2 используется для проверки моделей гидрогеологических и гидротермальных процессов, при промышленной эксплуатации геотермальных месторождений и на объектах захоронения промышленных и ядерных отходов.

Управляющие уравнения TOUGH2 (уравнения многокомпонентного многофазного теплопереноса в интегральной форме) для элемента  $V$  с границей  $\Gamma$  в общем виде записываются следующим образом [52, 73, 74, 75]:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V M dV = \iint_{\Gamma} F \cdot \vec{n} d\Gamma + \iiint_V q dV \quad (2.8), \quad \text{где:}$$

в левой части – аккумулятивный член, определяющий содержание массы/энергии в элементе  $V$ ,  $F$  – поток массы/энергии через границы элемента  $V$ ,  $q$  – тепловые/массовые источники и стоки.

Переход к конечно-разностным уравнениям осуществляется на основе интегрального – конечно - разностного метода, (без преобразования интегральных законов сохранения массы и энергии в уравнения в частных производных). Это позволяет избежать привязки к глобальной системе координат и дает возможность как регулярной, так и нерегулярной дискретизации пространства (рис. 2.12) [75].

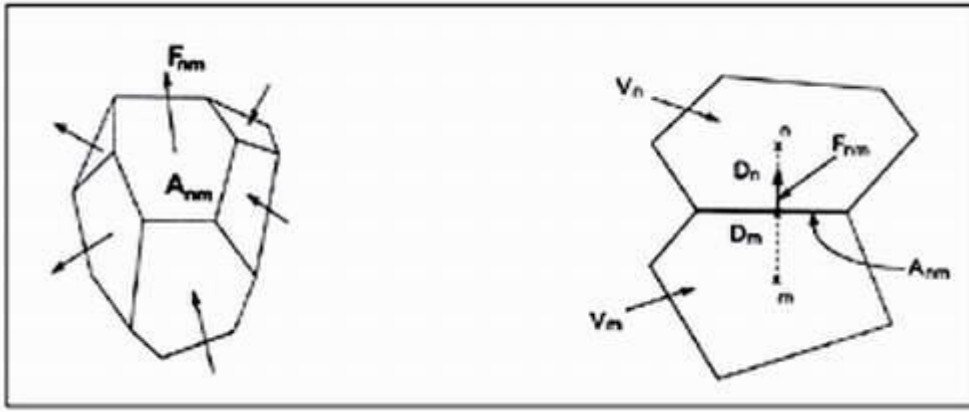


Рис.2.12. Дискретизация пространства при численном моделировании.

Аккумулятивные члены массы и энергии в уравнениях (2.8) для компонента  $k$  определяются:

$$M^{(k)} = \Phi \sum_{\beta=l,g} s_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)} \quad (2.9)$$

$$M^{(3)} = (1 - \Phi) \rho_R C_R T + \Phi \sum_{\beta=l,g} s_{\beta} \rho_{\beta} U_{\beta}^{(k)} \quad (2.10),$$

где:  $\Phi$  - пористость,  $S_{\beta}$  - насыщение фазы  $\beta$ ,  $\rho_{\beta}$  - плотность фазы  $\beta$ ,  $X_{\beta}^{(k)}$  - массовая доля компонента  $k$  в фазе  $\beta$ ,  $\rho_R$  - плотность горных пород,  $C_R$  - удельная теплоемкость скелета горных пород,  $T$  - температура,  $U_{\beta}$  - удельная внутренняя энергия фазы  $\beta$ .

Массовый поток компонента  $k$  определяется как сумма массовых потоков этого компонента для каждой фазы:

$$F^{(k)} = \sum_{\beta=l,g} F_{\beta}^{(k)} \quad (2.11)$$

$$F_{\beta}^{(k)} = -k \frac{k_{r\beta}}{\mu_{\beta}} \rho_{\beta} X_{\beta}^{(k)} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g) \quad (2.12),$$

где:  $k$  - абсолютная проницаемость,  $k_{r\beta}$  - относительная проницаемость фазы  $\beta$ ,  $\mu_{\beta}$  - вязкость фазы  $\beta$ ,  $P_{\beta}$  - давление в фазе  $\beta$ ,  $g$  - ускорение свободного падения.

Полный тепловой поток, содержащий кондуктивную и конвективную составляющие, определяется уравнением:

$$F^{(3)} = -\lambda \nabla T + \sum_{\substack{\beta=l,g \\ k=1,2}} h_{\beta}^{(k)} F_{\beta}^{(k)} \quad (2.13)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности насыщенных пород,  $h_{\beta}^{(k)}$  – удельная энтальпия компонента  $k$  в фазе  $\beta$  [52, 73, 74, 75].

В случае однокомпонентного флюида (вода), имеем для каждого элемента два уравнения (2.8) для двух неизвестных (в однофазном состоянии – давление и температура, в двухфазном – давление и паронасыщенность). Система из  $N$  элементов описывается системой  $2N$  уравнений для  $2N$  неизвестных, которая решается методом итераций Ньютона–Рафсона [73].

## **2.5 Профильная модель водного питания Мутновского геотермального месторождения**

Для описания тепломассопереноса в гидротермальных системах эффективным инструментом является программа моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде – TOUGH2 [73, 74]. TOUGH2 использован для проверки концептуальных моделей гидрогеологических и гидротермальных процессов, при эксплуатации геотермальных месторождений. Для лучшей 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 [4] (рис. 2.13), было осуществлено построение профильной математической модели процесса теплового и водного питания Мутновского геотермального резервуара (рис. 2.14 и 2.15). Продуктивный резервуар (продуктивная зона «Основная») приурочен к разломной зоне северо-

северо-восточного простирания, падением  $60^\circ$  на восток, юго-восток и 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 пересекает активное жерло Мутновского вулкана на абсолютных отметках +250 – +1250 м на расстоянии 8 км от участка эксплуатации.

Модель разломной зоны включает постройку Мутновского вулкана, Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинские термопроявления. Область моделирования по оси Z от 2000 м до -3000 м, по оси X от 0 до 29000 м, по оси Y от 0 до 1000 м. Водная разгрузка: Дачные, Верхне-Мутновские, Нижне-Жировские и Вилючинские источники.

На рис. 2.14, показано зонирование модели, в каждой из зон, задаются различные значения, проницаемости, пористости, плотности, теплопроводности.

FIXED – зона с фиксированным состоянием окружающей среды (температурой и давлением),

MPIPE – проницаемое жерло вулкана по которому происходит водное питание,

NAL1 – проницаемые отложения алнейской серии,

DYKE – зона где задаются тепловые источники,

RESER – проницаемый продуктивный резервуар Мутновского месторождения,

CAPR – водоупор,

BASE – вмещающие породы фундамента, низкопроницаемые зоны.

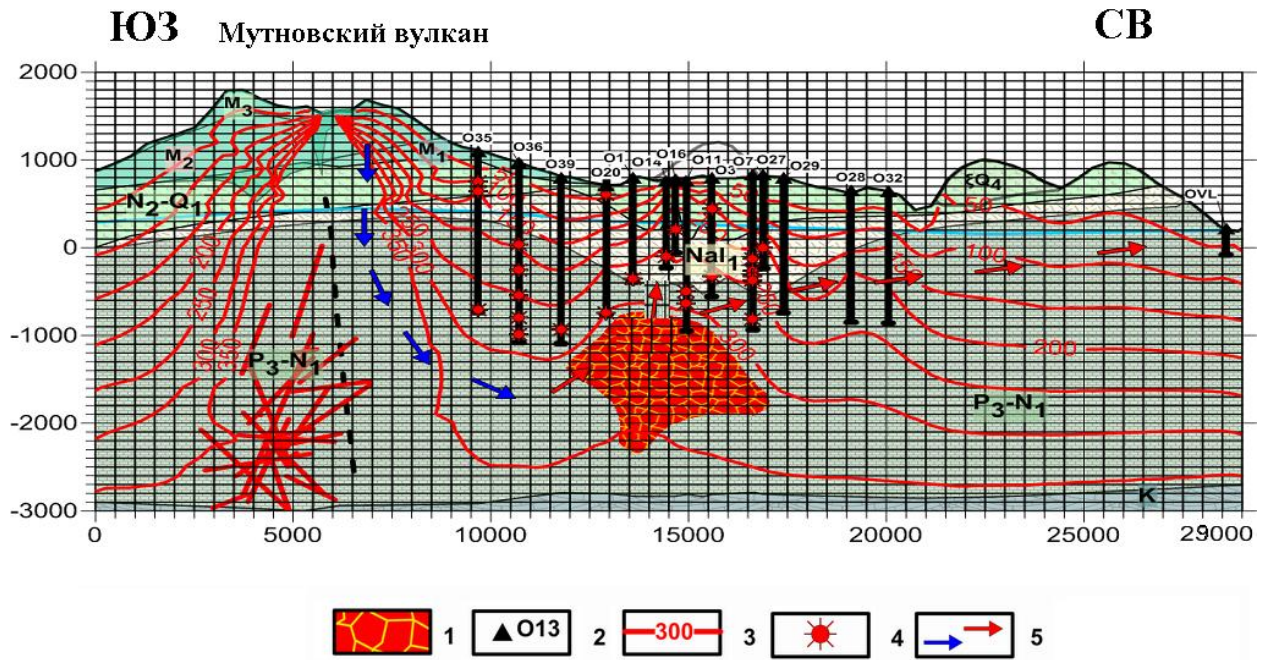


Рис 2.13 Концептуальная модель системы Мутновский вулкан – Мутновское геотермальное месторождение.

Условные обозначения: 1 – тепловые источники (недавние магматические интрузии); 2 – скважины с соответствующими номерами; 3 – изотермы, °С; 4 – продуктивные зоны; 5 – потоки теплоносителя и холодных вод.

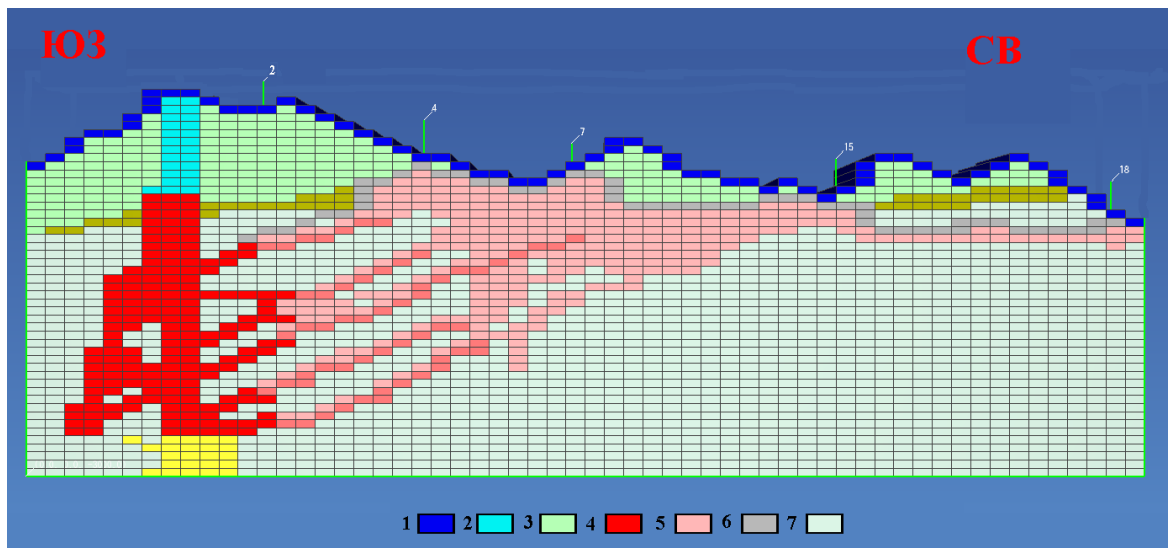


Рис 2.14. Зонирование модели на домены с различными материальными свойствами зон:

Условные обозначения: 1 – FIXED, 2 – MPIPE, 3 – NAL1, 4 – DYKE 5 – RESER, 6 – CAPR, 7 – BASE.

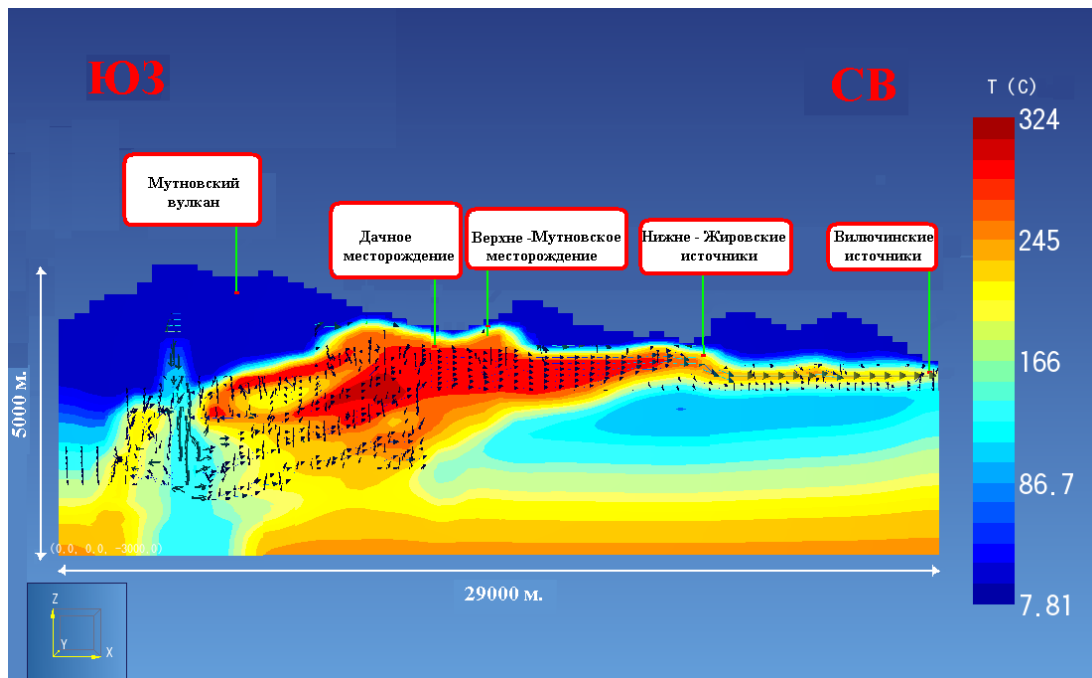


Рис 2. TOUGH2 – моделирования условий формирования Мутновского геотермального месторождения. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя. Цветом показано распределение температуры.

В итоге моделирования получены следующие результаты:

1. Показано, что вода, поступает через проницаемую зону проходящую через вулкан Мутновский 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 достигает 50 кг/с, на Верхне-Мутновском участке – 25 кг/с, на Нижне-Жировских и Вилючинских источниках – 10–12 кг/с.
3. Получен профильный разрез модели, на котором показано распределение температур. Максимальные значения температур приходятся на область, в которой были заданы тепловые источники. Изолинии максимальных температур вытянуты в направлении движения потоков теплоносителя в геотермальном резервуаре и участкам разгрузки на поверхности. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя.

На модели так же был воспроизведен пароконденсатный резервуар (рис 2.16), вскрытый скважинами 16 и 026.

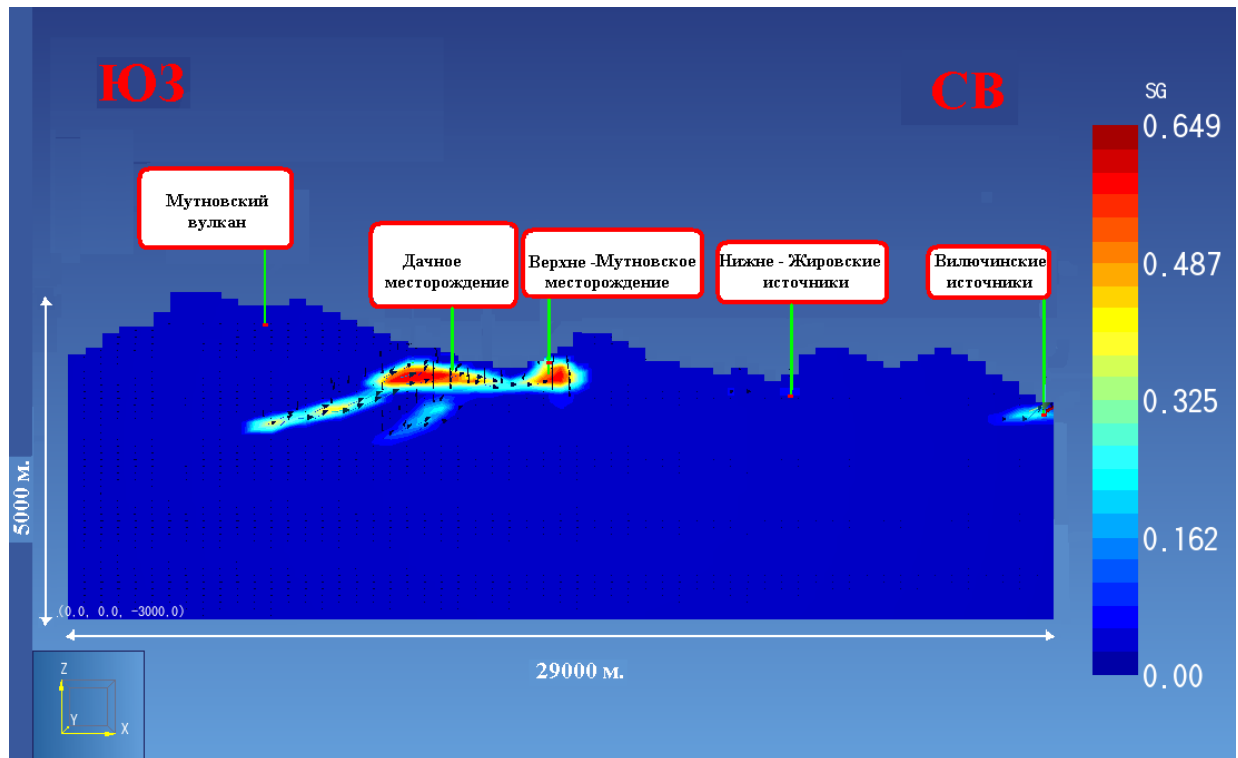


Рис 2.16 Профильная модель водного питания Мутновского геотермального месторождения, на рисунке показаны контуры пароконденсатного резервуара. Цветом показана доля пара (SG).



**Выводы.** Изотопный состав воды из скважин Мутновского геотермального месторождения совпадает с изотопным составом воды р. Вулканной на истоке из ледника вулкана Мутновский. Это доказывает водное питание Мутновского геотермального резервуара ледниками из кратера Мутновского вулкана.

В результате многолетних наблюдений за изотопным составом термальных вод продуктивных скважин, холодных и термоминеральных вод в Мутновском геотермальном районе, выявлено утяжеление изотопного состава геотермального флюида в продуктивном резервуаре, особенно контрастное по  $\delta D$  и проявившееся через 10 лет после начала промышленной эксплуатации.

Наиболее вероятным источником такого утяжеления могут являться локальные метеорные грунтовые воды над кровлей геотермального резервуара:

$$-13.5\text{‰} < \delta^{18}\text{O} < -11.5\text{‰} \text{ и } -93\text{‰} < \delta D < -92\text{‰}.$$

Учитывая контрастный состав локальных метеорных вод и геотермальных флюидов Мутновского месторождения, регулярный мониторинг изотопного состава термальных вод добычных скважин Мутновского месторождения, анализ вариации изотопного состава по конкретным скважинам – может быть использован для выявления зон притока локальных метеорных вод в продуктивный геотермальный резервуар и процессов формирования малоглубинных пароконденсатных резервуаров [39].

TOUGH2 моделирование по разрезу вдоль Северо-Мутновской вулканотектонической зоны (Мутновского вулкана, Дачных, Верхне-Мутновских, Нижне-Жировских и Вилючинских источников), с использованием программы PetraSim, показало возможность гидротермальной циркуляции от источника водного питания (ледника в кратере Мутновского вулкана) к Мутновскому продуктивному геотермальному резервуару и источникам разгрузки Дачным, Верхне-Мутновским, Нижне-Жировским и Вилючинским.

Двухфазное состояние резервуара воспроизведено на модели.

### **ГЛАВА 3. Анализ изменений давления в двухфазном геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения в связи сейсмичностью**

Высокотемпературные геотермальные резервуары приурочены к активным разломам глубокого заложения, по которым осуществляется транспорт магматического материала к поверхности Земли, и соответственно, происходят изменения напряженного состояния горных пород, сопровождающиеся землетрясениями и (или) извержениями вулканов. Давление геотермальных флюидов тесно связано с напряжениями в горных породах, контролирующими раскрытие трещин и объем трещинно-жильного пространства, причем изменения напряженного состояния в локальном объеме геотермального резервуара могут с достаточно высокой скоростью (тысячи м/сут) распространяться в «глобальном» гидродинамическом объеме геотермального резервуара [5]. В связи с этим мониторинг термогидродинамических параметров в геотермальных резервуарах весьма важен для индикации подготовки сейсмических и вулканических событий.

Имеются сведения, показывающие связь гидродинамического режима геотермального резервуара Крабла (Исландия) с извержениями одноименного вулкана [76].

Непрерывные наблюдения за газовым и гидродинамическим режимом скважин проводимые в Геологической службе Японии на протяжении 10 лет в 6-ти скважинах показывают что в некоторых скважинах за несколько часов до землетрясения начинаются вариации гидродинамического режима, причем радиус гидродинамического отклика  $D$  (расстояние от эпицентра до точки наблюдения, км) связан с магнитудой  $M$  следующей формулой (3.1):

$$M = 2.45 \lg D + 0.69, \quad (3.1),$$

где:  $M$ —магнитуда землетрясения [70].

В последнее время проводятся также непрерывные наблюдения с использованием системы "капиллярная трубка" в высокотемпературной геотермальной скважине (температура 194°C, глубина 1005 м) в кальдере Нигорикава (о. Хоккайдо) в пределах одноименного геотермального

месторождения (заметим, что там уже долгое время эксплуатируется ГеоЭС мощностью 50 МВт). По результатам наблюдений (1993–1995 гг.) отмечены гидродинамические вариации связанные с сейсмическими событиями (землетрясение в Кобе , 01.1995 и др.) [30].

Наблюдения на Камчатке, проводимые ИВ ДВО РАН и, впоследствии КФ ФИЦ ЕГС РАН на источниках и скв. ГК–1 (станция Пиначево, периферическая часть Кеткинского геотермального месторождения, 40°C) показывают достаточно явную постсейсмическую реакцию (увеличение расхода и сопряженных макрокомпонентов химического состава) в большинстве случаев [35], однако частота регистрации наблюдаемых параметров (1 раз в 3 сут.) не позволяет ответить на вопрос о существовании краткосрочных предсейсмических аномалий.

Мониторинг давления в скважине 30 (52.551° с.ш., 158.234° в.д.) на Верхне-Мутновском участке (рис. 3.1), вскрывающей двухфазный 250–270 °С трещиноватый геотермальный резервуар, осуществлялся с 1995 г. с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett Inc.), установленной на глубине 950 м. Благодаря двухфазным условиям и низкой проницаемости, скважина практически не реагировала на эксплуатацию месторождения (начавшуюся в 1999 г.), и поэтому аномальные вариации давления в ней предполагаются вызванными естественной динамикой резервуара.

Выявлены аномальные вариации давления (гидродинамические аномалии) в геотермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения, синхронизированные с сейсмическими событиями.

При анализе данных наблюдений 1995–2004 гг. выявлены аномальные снижения давления в скважине 30 на Мутновском геотермальном месторождении (на 1.0–1.5 бар и более), предшествовавшие землетрясениям с  $M > 5.8$  (анализировались сейсмические события в области, ограниченной 157–161° в.д., 50–54° с.ш. и глубиной до 40 км). Кроме того, при переходе в 1998 г. на более высокую частоту записи наблюдений (2 мин<sup>-1</sup>) обнаружены циклические изменения давления с частотами 72–180 сут<sup>-1</sup> и амплитудой более 0.5 бар [3, 21, 55, 56, 57, 58]. Близкие частоты вариаций расхода (давления) характерны также

для некоторых других пароводяных скважин Мутновского геотермального месторождения (36–300 сут<sup>-1</sup>, скважины О15, Э–2, Э–4, А4 и др.), гейзеров на Паужетском геотермальном месторождении 85–720 сут<sup>-1</sup> [3] и в Долине Гейзеров (4–50 сут<sup>-1</sup>) [83].

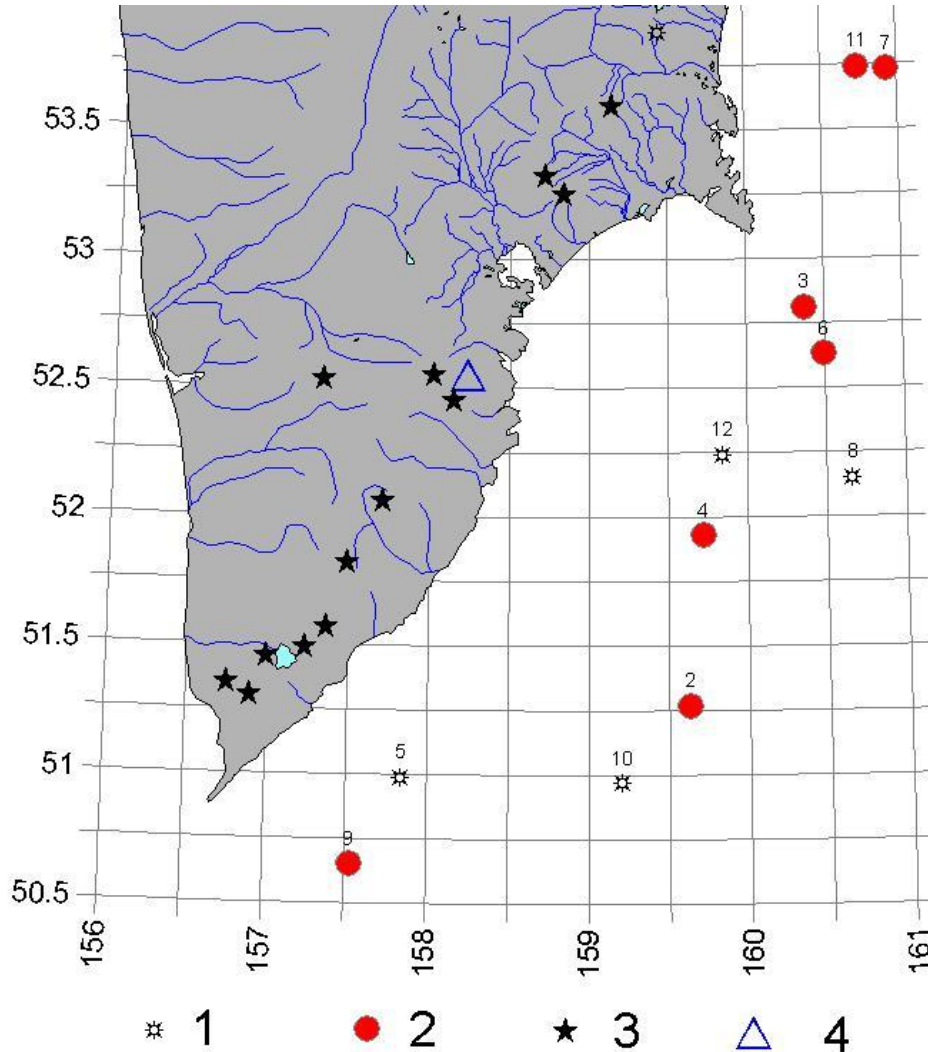


Рис.3.1 – Горизонтальная проекция области (157–161° в.д., 50–54° с.ш.), по которой проводился анализ связи гидродинамических аномалий с сильными землетрясениями.

Условные обозначения: 1,2 – эпицентры роев землетрясений; кружки (2) отмечают землетрясения, сопоставляемые гидродинамическим аномалиям; 3 – активные вулканы; 4 – пункт гидродинамических наблюдений (скв. 30 на Мутновском геотермальном месторождении).

### 3.1. Гидродинамические аномалии синхронизированные с сейсмическими событиями

Четыре значимые гидродинамические аномалии зафиксированы в период наблюдений 1995–2000 гг. (рис. 3.2–3.5). Они характеризуются средним снижением давления на 0.10–0.15 бар за 2–4 часа до землетрясений, и постсейсмическими циклическими вариациями давления (с амплитудой 0.7–0.95 бар и периодом 1–1.5 часа) в течение 1–1.5 сут после землетрясений (с  $M=4.1$ – $4.5$  на расстоянии 90–235 км от точки наблюдений) [17, 18, 19, 30, 60, 64]

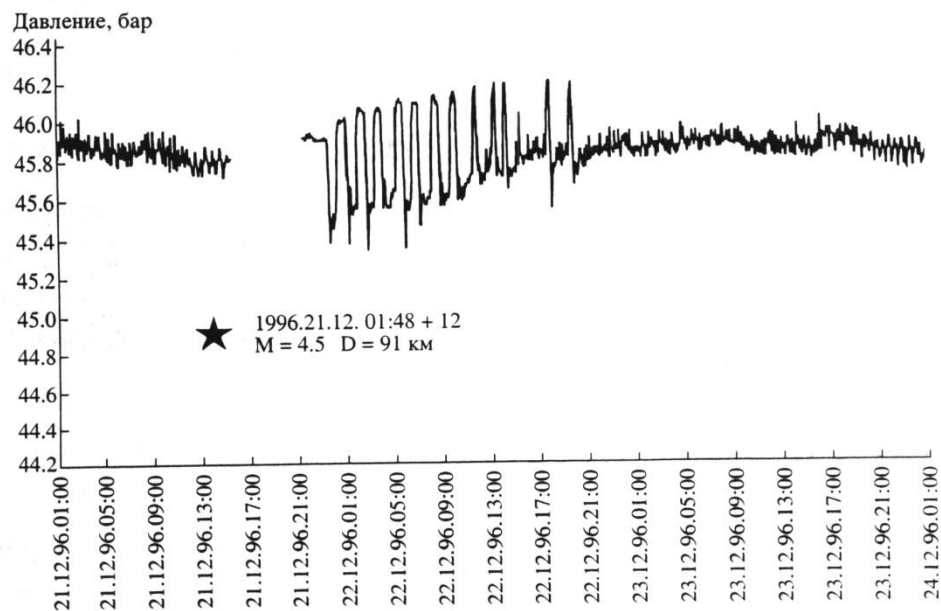


Рис. 3.2. Изменение давления в скв. 30 (21–24 декабря 1996 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением  $M=4.5$ ,  $D=91$  км, глубина 41 км, 01:48 по Гринвичу 21 декабря 1996 г (+12 час).

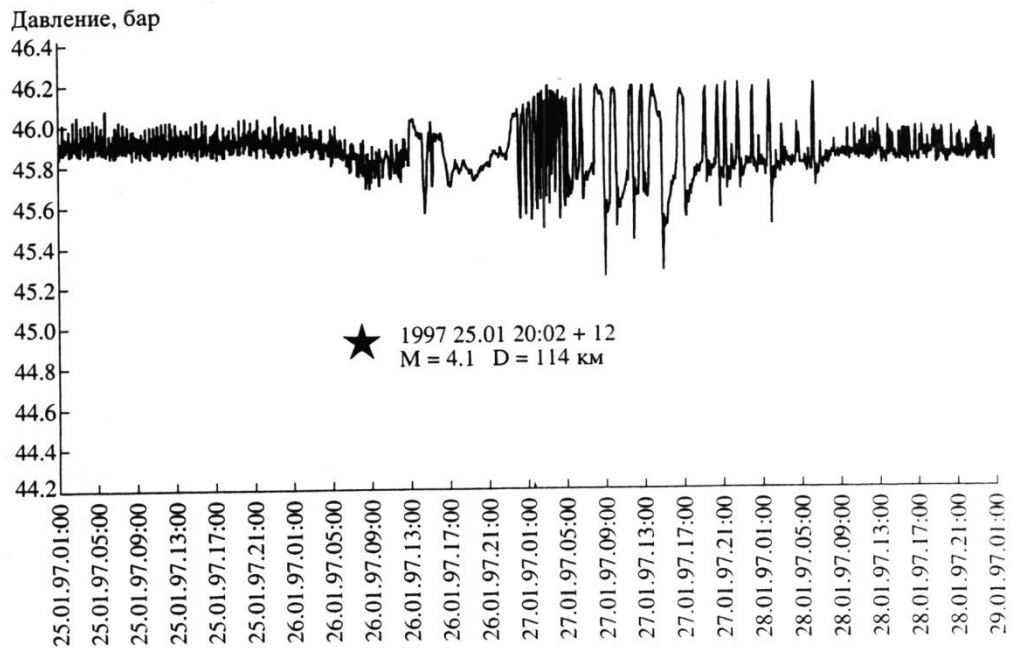


Рис. 3.3. Изменение давления в скв. 30 (25-29 января 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением  $M=4.1$ ,  $D=114$  км, глубина 38 км, 20:02 по Гринвичу 25 января 1997 г (+12 час).

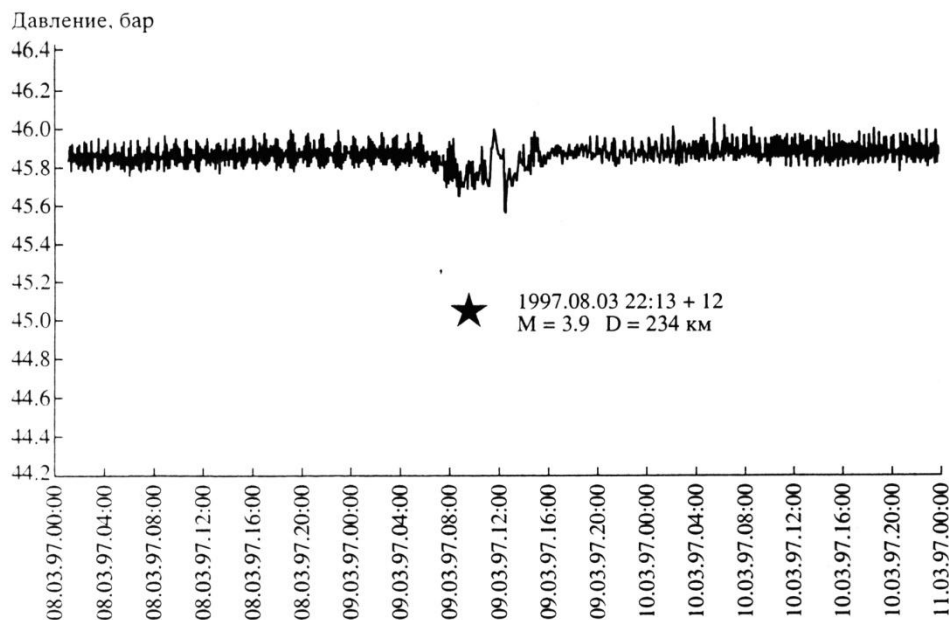


Рис. 3.4. Изменение давления в скв. 30 (8-10 марта 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением  $M=3.9$ ,  $D=234$  км, глубина 19 км, 22:13 по Гринвичу 8 марта 1997 г (+12 час).

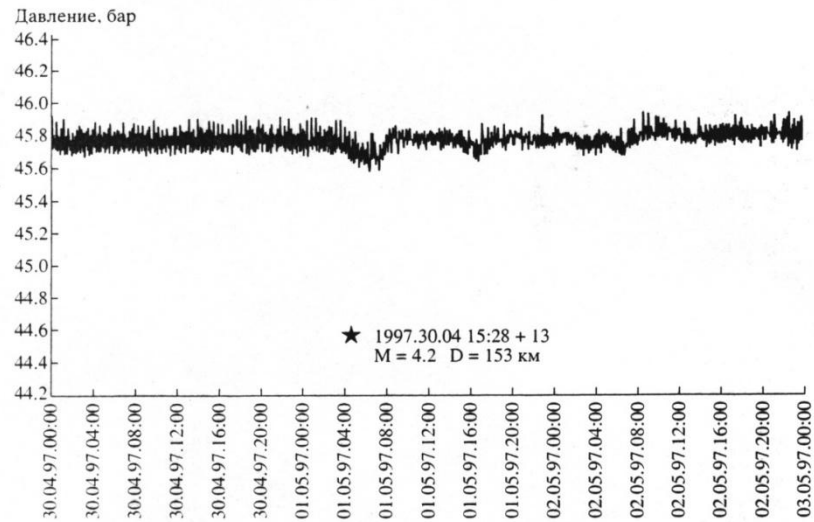


Рис. 3.5. Изменение давления в скв. 30 (30 апреля – 2 мая 1997 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением  $M=4.2$ ,  $D=153$  км, глубина 24 км, 15:28 по Гринвичу 30 апреля 1997 г (+13 час).

### 3.2 Гидродинамические аномалии, предшествовавшие сейсмическим событиям

Приведем также информацию по трем гидродинамическим аномалиям, предшествующим сейсмическим событиям (период наблюдений 2001–2004 гг).

Первая из них зафиксирована за 17 ч до землетрясения ( $M=5.2$ , глубина 13 км, координаты  $52.55^\circ$  с.ш.,  $160.54^\circ$  в.д.). Аномалия проявилась в изменениях давления с амплитудой до 6.5 бар с постепенным затуханием в течение 1.5 ч (рис. 3.6).

Вторая гидродинамическая аномалия (рис. 3.7) синхронизирована с землетрясением ( $M=5.7$ , глубина 37 км, координаты  $52.96^\circ$  с.ш.,  $160.45^\circ$  в.д.). Эта аномалия аналогична представленным на рис. 3.2–3.5, однако проявлена более контрастно: перед землетрясением наблюдалось понижение давления в течение

1.5 часов на 4.5 бара, после землетрясения проявились циклические колебания с амплитудой 8.5 бар, которые постепенно затухали в течение 1 часа.

Отметим также третью гидродинамическую аномалию (рис. 3.8), зафиксированную за 24 ч. до цунамигенного землетрясения ( $M=9.0$ ), произошедшего 26 декабря 2004 г. у берегов о. Суматра (Индонезия). Аномалия проявилась в резком снижении давления на 2.5 бара, наблюдавшемся в течение 2 ч.

Пространственное положение эпицентров рассматриваемых Камчатских сейсмических событий приведено на рис. 3.9.

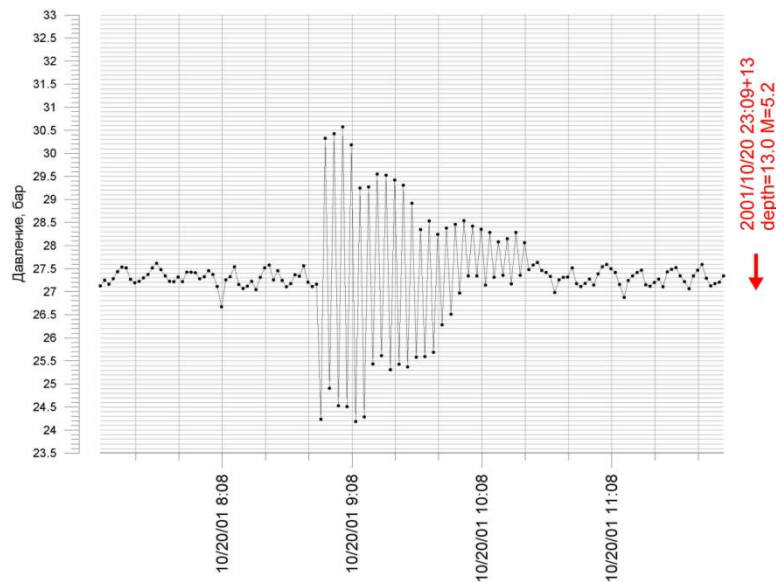


Рис. 3.6. Изменение давления в скв. 30 (20 октября 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), зафиксированная за 17 часов до землетрясения ( $M=5.2$ ,  $D=196$  км, глубина 13 км, координаты  $52.55^\circ$  с.ш.,  $160.54^\circ$  в.д.).



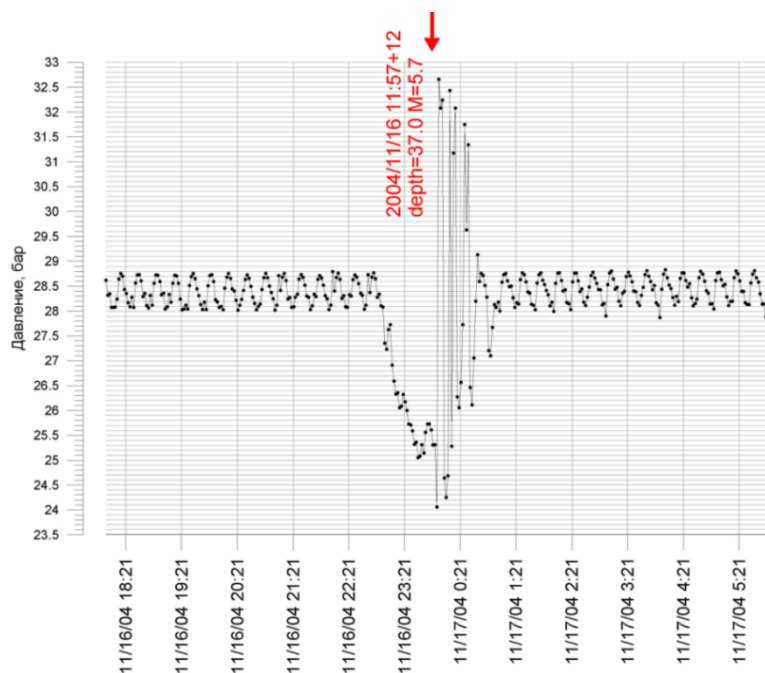


Рис. 3.7. Изменение давления в скв. 30 (16 ноября – 17 ноября 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением ( $M=5.7$ ,  $D=191$  км, глубина 37 км, координаты  $52.96^\circ$  с.ш.,  $160.45^\circ$  в.д.).

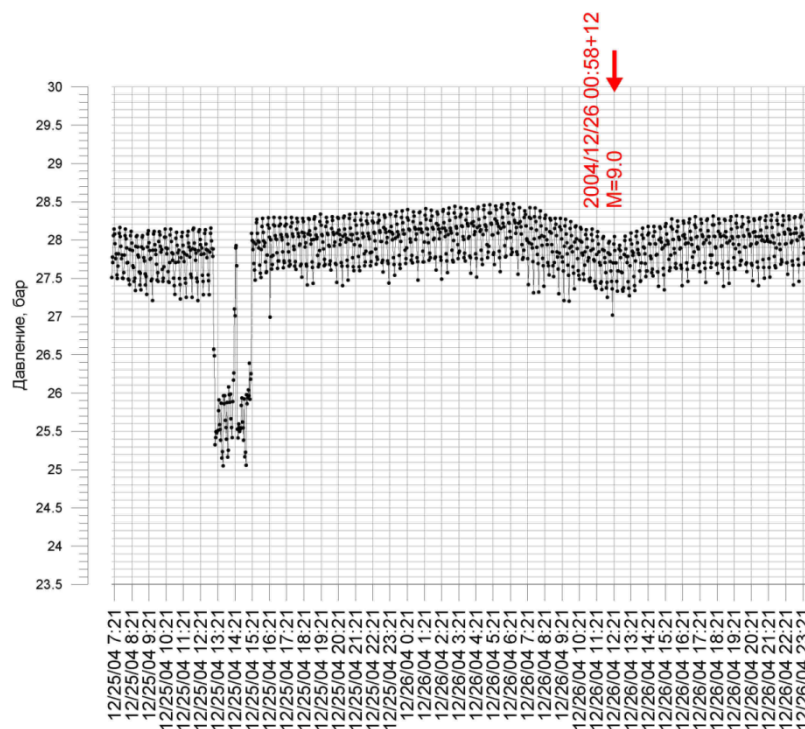


Рис. 3.8. Изменение давления в скв. 30 (25 – 26 декабря 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), зафиксированная за 24 ч до цунамигенного землетрясения ( $M=9.0$ ), произошедшего 26 декабря 2004 г. у берегов о. Суматра (Индонезия).

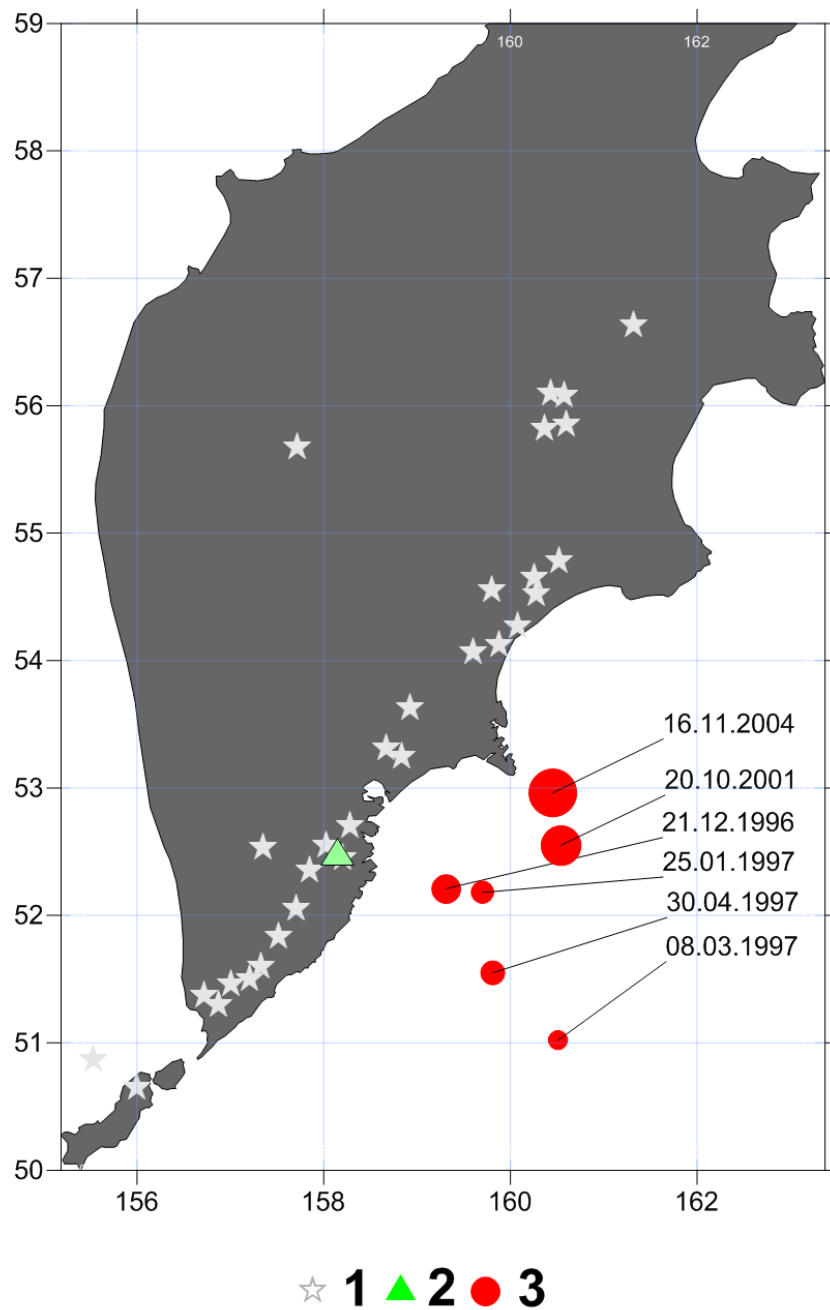


Рис. 3.9. Эпицентры землетрясений связанных с гидродинамическими аномалиями.

Условные обозначения: 1 – вулканы; 2 – точка гидродинамических наблюдений; 3 – эпицентры землетрясений (диаметр окружности пропорционален магнитуде землетрясения);

### 3.3 Аномальные понижения давления в скважине 30 (Верхне-Мугновский геотермальный резервуар) и их возможная связь с сильными ( $M \geq 5.8$ ) землетрясениями

На рисунке 3.10 изображен график изменения давления в скважине 30, времена землетрясений ( $M \geq 5.8$  в области, ограниченной  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $50\text{--}54^\circ$  с.ш. и глубиной до 40 км). На том же рисунке показаны моменты, интерпретируемые нами как аномальные понижения давления в геотермальном резервуаре (на 1.0-1.5 бар и более), предшествующие сильным землетрясениями ( $M \geq 5.8$ ).

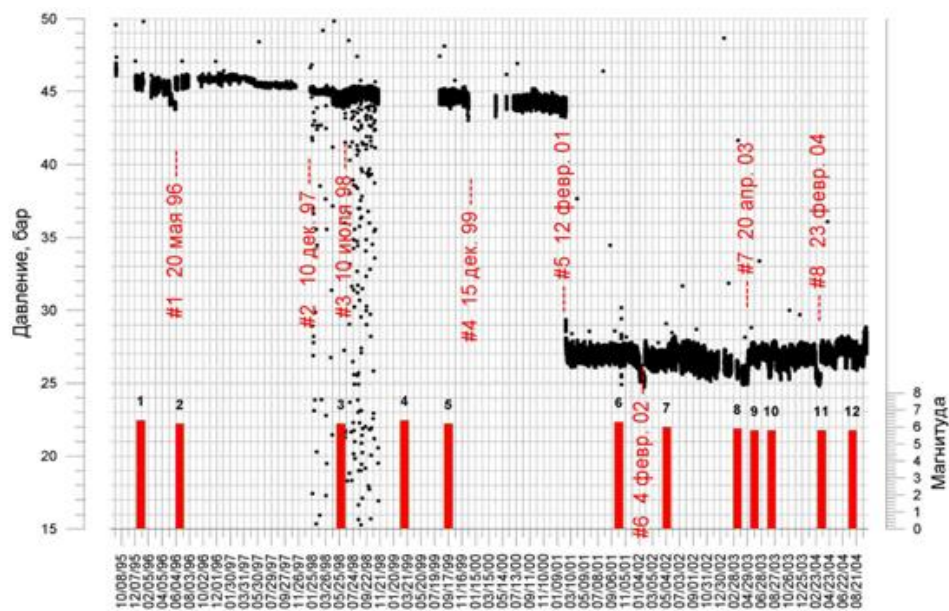


Рис.3.10 – Верхний график – изменение давления в скважине 30, нижний график – времена и магнитуды роев землетрясений ( $M > 5.8$  в области, ограниченной  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $51\text{--}54^\circ$  с.ш. и глубиной до 40 км, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН). На графике давления пунктирной линией изображены моменты аномального снижения давления. Прямоугольники 1–12 – землетрясения с магнитудой не менее 5.8, произошедшие в области  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $51\text{--}54^\circ$ .

В табл. 3.1 приведены данные КФ ФИЦ ЕГС РАН по сильным землетрясениям: 21 землетрясение ( $M \geq 5.8$ ), из числа которых выделяются наиболее сильные землетрясения в группах и одиночные, относительно которых диагностировались гидродинамические аномалии в скважине 30 (всего их выделяется за девять лет в рассматриваемой области – двенадцать, за период с октября 1995 по октябрь 2004 г.).

Таблица 3.1

Землетрясения с магнитудой не менее 5.8, произошедшие в области (157–161° в.д., 51–54° с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 гг. (по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН).

№	№№	Дата	Время ч., мин., с.	Град. с. ш.	Град. в.д.	Глубина, км	Магнитуда
1	1	01 янв 96	09:57:45.8	53.88	159.44	0	6.4
2	2	21 июн 96	13:57:05.6	51.27	159.63	2	6.2
	2	30 июн 96	11:32:20.4	51	160.84	0	5.8
	2	18 июл 96	22:54:58.0	51.22	159.82	8	6
	3	28 май 98	04:58:50.1	51.83	160.25	40	5.9
3	3	01 июн 98	05:34:02.9	52.81	160.37	31	6.2
	4	08 мар 99	05:39:57.3	51.93	159.77	32	5.8
	4	08 мар 99	05:57:46.2	51.99	159.74	0	5.8
4	4	08 мар 99	12:25:42.8	51.93	159.72	7	6.4
5	5	18 сен 99	21:28:34.2	50.99	157.84	40	6.2
	5	05 окт 99	05:01:36.1	51.08	157.77	40	5.8
	6	08 окт 01	18:14:25.7	52.62	160.46	31	6.2
6	6	08 окт 01	18:20:37.5	52.63	160.49	24	6.3
	7	08 май 02	04:12:47.1	52.22	160.44	32	5.8
7	7	08 май 02	19:45:20.1	53.73	160.93	35	6
8	8	15 мар 03	19:41:24.3	52.15	160.66	4	5.9
9	9	29 май 03	05:59:08.7	50.65	157.53	40	5.8
10	10	12 авг 03	11:45:07.4	50.97	159.2	19	5.8
11	11	20 мар 04	08:53:14.8	53.74	160.74	31	5.8
12	12	04 авг 04	11:03:31.0	52.24	159.84	5	5.8
	12	04 авг 04	21:15:11.2	52.15	159.86	4	5.8

Примечание. Землетрясения, относящиеся к одному рою, имеют одинаковый номер во второй колонке. Номера землетрясений соответствуют рисункам 3.1, 3.2.

По данным табл. 3.2 возможна оценка фактического распределения вероятности времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии (если в качестве вероятностного пространства используются восемь пар событий с вероятностью каждой реализации 0.125).

Таблица 3.2.

Исходные данные для расчета фактической функции распределения времени с момента гидродинамической аномалии до роя сильных землетрясений (таблица 3.1)

№ на рис. 1	Гидродинамическая аномалия	№ нарис. 1	Землетрясение	Магнитуда	Интервал времени между гидродинамической аномалией и землетрясением, сут.	Фактическая интегральная вероятность
8	23 фев 04	11	20 мар 04	5.9	26	0.125
1	20 май 96	2	21 июн 96	6.4	32	0.250
7	20 апр 03	9	29 май 03	5.8	39	0.375
6	04 фев 02	7	08 май 02	6.0	93	0.500
2	10 дек 97	3	01 июн 98	6.2	173	0.625
3	10 июл 98	4	08 мар 99	6.4	185	0.750
5	12 фев 01	6	08 окт 01	6.3	238	0.875
4	15 дек 99	6	08 окт 01	6.3	663	1.000

Примечание. Номера землетрясений соответствуют рисункам 3.1, 3.2.

На рисунке 3.11 изображен график, соответствующий распределению вероятности времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии. Для сравнения, на том же рис. 3.11 изображено показательное распределение, соответствующее процессу Пуассона с интенсивностью потока событий  $3.70 \times 10^{-3}$  сут<sup>-1</sup> (что соответствует 9 – месячному среднему значению интервала времени, в течение которого происходили рассматриваемые сильные землетрясения).

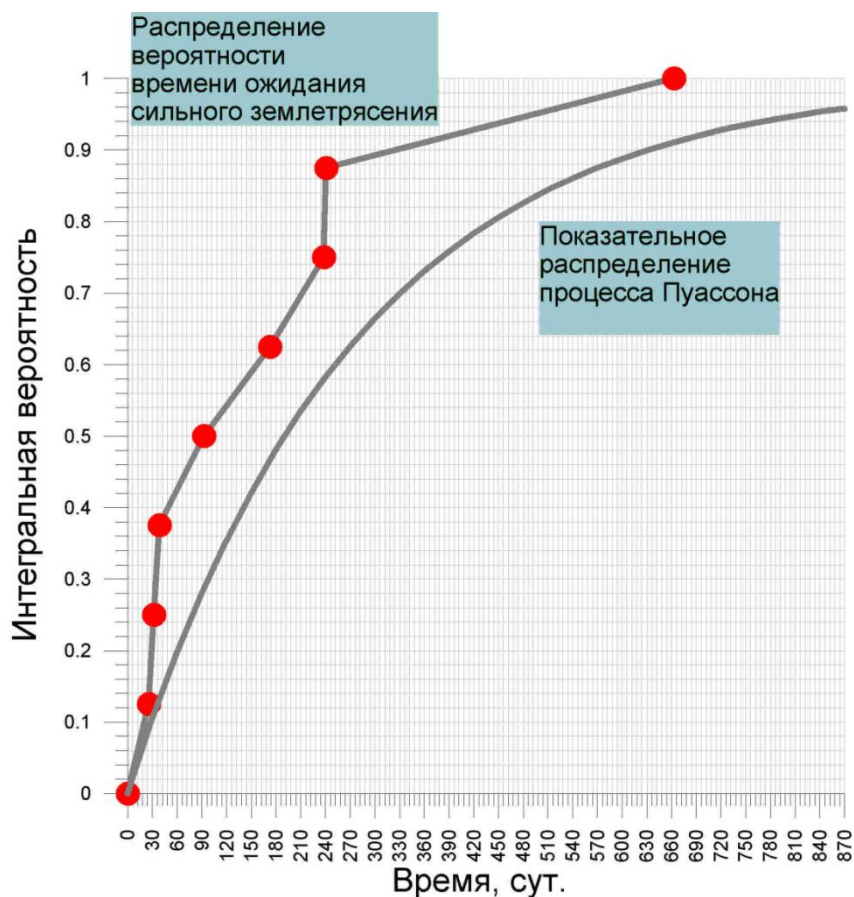


Рис. 3.11. Интегральная вероятность времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии – график с кружками. Показательное распределение, соответствующее процессу Пуассона с интенсивностью потока событий  $3.7 \times 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$  (1 землетрясение в 9 месяцев) – непрерывная линия, соответствующая интегральной вероятности землетрясения с  $M > 5.8$  в зоне  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $50\text{--}54^\circ$  с.ш., до глубины 40 км.

На рисунке видно, что вероятность сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии достигает 0.38 в первые 40 суток, и 0.88 в первые 8 месяцев, что значительно превышает вероятность соответствующего Пуассоновского процесса. Заметим также, что землетрясения, приведенные в таблице 3.2, характеризуются однотипным механизмом (таблица 3.3): это взбросы северо-восточного простирания с падением сместителя  $21\text{--}32^\circ$  СЗ или  $58\text{--}70^\circ$  ЮВ. В последнем случае геометрия подвижек совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне–Мутновском участке [16, 17, 18, 19, 20, 45, 56, 57, 58, 59]. Это может служить объяснением того, что некоторые

сильные землетрясения (2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, см. таблицу 3.2) сопоставляются с гидродинамическими аномалиями (геометрия подвижек совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне–Мутновском участке), а некоторые (5, 8, 10) – нет (геометрия подвижек не совпадает с параметрами продуктивной трещины на Верхне–Мутновском участке).

Таблица 3.3

Механизмы землетрясений с магнитудой не менее 5.8, произошедших в области ( $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $51\text{--}54^\circ$  с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 гг. (по данным Harvard CMT Catalog).

№	Дата	Простираие 1	Угол падения 1	Угол сдвига 1	Простираие 2	Угол падения 2	Угол сдвига 2
2	21 июн 96	211	25	83	38	66	93
3	01 июн 98	210	22	78	43	68	95
4	08 мар 99	242	28	101	49	62	84
6	08 окт 01	189	26	51	51	70	107
7	08 май 02	233	28	108	33	64	81
8	15 мар 03	229	21	96	43	70	88
9	29 май 03	217	32	96	30	58	86
12	04 авг 04	208	26	89	30	64	91

Примечание. Номера землетрясений соответствуют рисункам 3.1, 3.2.

### 3.4 Газовый состав теплоносителя

Анализ вариаций характеристик газового состава теплоносителя в процессе эксплуатации, необходим для получения достоверной информации об изменении термогидродинамического состояния геотермального резервуара. В таблице 3.4 приводятся сведения о газовом составе теплоносителя до начала эксплуатации в 1998–1999 гг., с добавлениями по данным опробования в 1999–2003 гг.

По увеличению доли метеорных газов ( $N_2$ ) и уменьшению доли  $H_2S$  можно предположить, что происходит привлечение поверхностных вод в продуктивную зону скважин O16, O29W и 26.

Доминирующим в газовом составе теплоносителя, является  $CO_2$  объемная концентрация которого составляет от 77.4 до 94.3%.

Таблица 3.4

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

Скважина	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	He	H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	Весовое газо- содержание, %	P сепарата, бар
Опытные выпуски 1999 - 2000 гг										
029W	77.4	21.0	МОК<	0.10	0.03	1.5	0.04	0.0004	0.010	8.2
26	83.8	11.3	МОК<	0.20	0.10	4.4	0.17	МОК<	0.108	7.3
016	87.0	10.7	МОК<	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	МОК<	0.02	0.09	2.2	0.16	МОК<	0.036	6.0
26	83.6	7.33	МОК<	0.50	0.21	7.7	0.67	МОК<	0.037	6.0
016	92.1	4.4	МОК<	0.26	0.06	2.7	0.42	МОК<	0.118	6.0
4E	94.3	4.12	0.0001	0.01	0.07	1.4	0.07	МОК<	0.045	6.0
5E	89.4	7.26	0.0001	0.02	0.10	3.2	0.04	МОК<	0.067	6.0

МОК – минимальная определяемая концентрация

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



### 3.5 Циклические изменения давления в Верхне–Мутновском геотермальном резервуаре

Циклические изменения давления в скважине 30 были обнаружены с первых часов наблюдений в сентябре 1995 г., когда частота записи составляла 1 мин<sup>-1</sup>, периодичность достаточно отчетливо проявлена и при опросе с частотой 2 мин<sup>-1</sup>, которая осуществляется с июня 1998 г.

Циклические изменения давления характеризуются частотами 72 – 180 сут<sup>-1</sup> и амплитудой более 0.5 бар.

На рисунке 3.12 показано изменение давления за четырехчасовой интервал времени 16 ноября 2004 г.

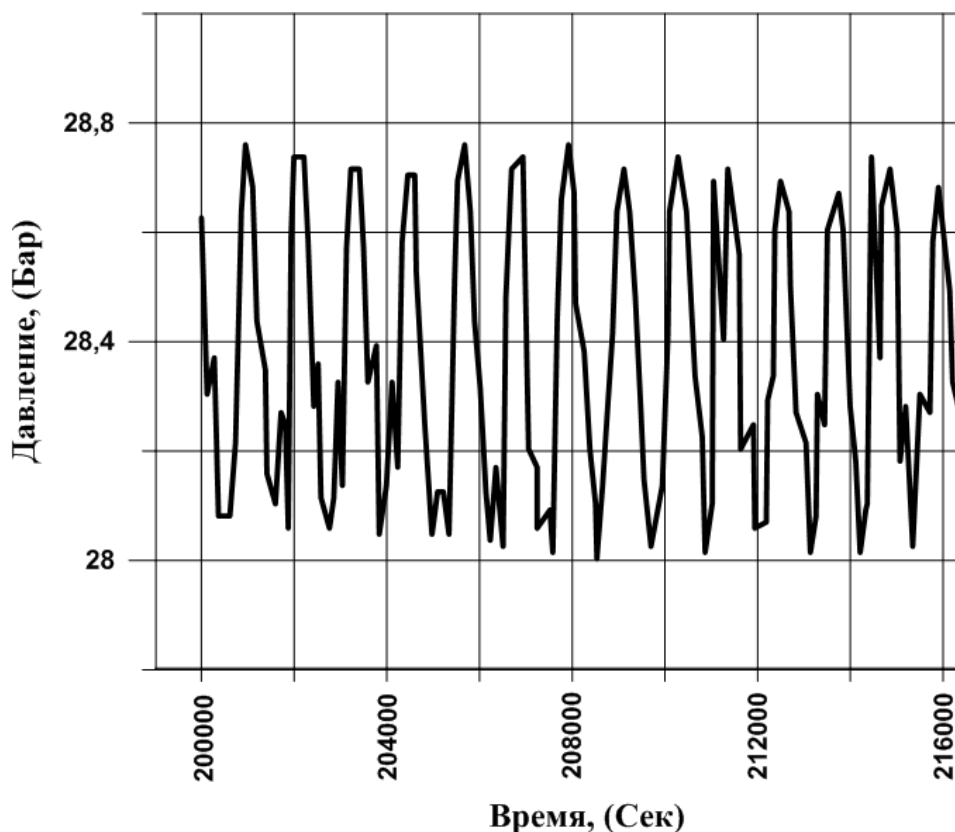


Рис. 3.12. Пример циклических изменений давления в скважине 30, Мутновское геотермальное месторождение. График показывает изменение давления за 4 часа, 16 ноября 2004 г.

На рисунке 3.13 показана спектрограмма за декабрь 2001 г., на которой хорошо видны частоты 90 и 160 сут<sup>-1</sup>, Эти графики являются достаточно характерными для режима скважины за весь период наблюдений с 1995 по 2004 гг.

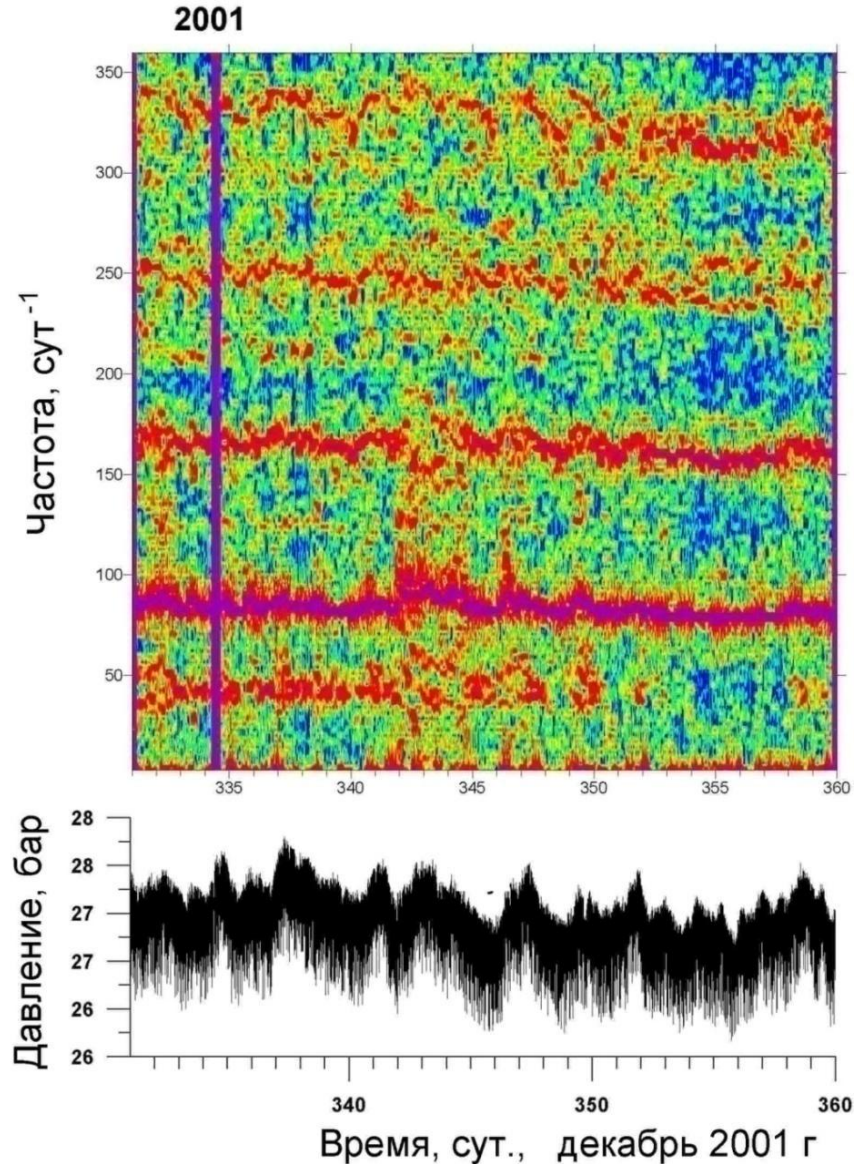


Рис.3.13. Пример циклических изменений давления в скважине 30, Мутновское геотермальное месторождение. Нижние графики показывают изменение давления в скважине, верхние графики – соответствующую спектрограмму за декабрь 2001 г.

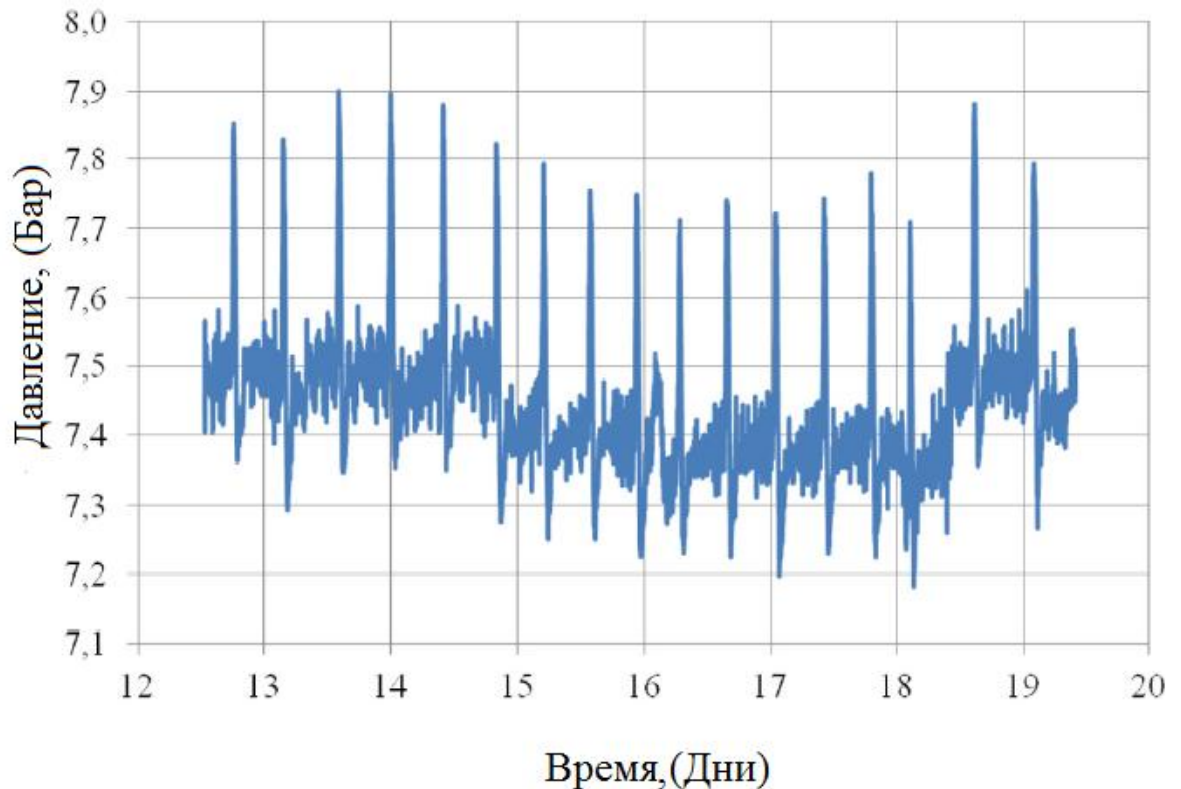


Рис. 3.14. Пример циклических изменений давления в скважине 042, 12 – 19 января 2014, Мутновское геотермальное месторождение [78].

### 3.6 Одноэлементная модель TOUGH2 -EOS2 для описания циклических изменений давления

Мониторинг давления в скважине 30 ( $52.55^{\circ}$  с.ш.,  $158.23^{\circ}$  в.д.) на Верхне-Мутновском участке, вскрывающей двухфазный  $250\text{--}270^{\circ}\text{C}$  трещиноватый геотермальный резервуар, осуществлялся с 1995 г. с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett Inc.), установленной на глубине 950 м. Благодаря двухфазным условиям и низкой проницаемости, скважина практически не реагировала на эксплуатацию месторождения (начавшуюся в 1999 г.), и поэтому аномальные вариации давления в ней предполагаются вызванными естественной динамикой резервуара.

Циклические изменения давления в скважине 30 обнаружены с первых часов наблюдений в сентябре 1995 г., когда частота записи составляла  $1\text{ мин}^{-1}$ , периодичность достаточно отчетливо проявлена и при опросе с частотой  $2\text{ мин}^{-1}$ ,

которая осуществляется с июня 1998 г [56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 67, 69]. С использованием программы TOUGH2 / PetraSim, проведено моделирование процесса циклического изменения давления в скважине 30, Мутновского геотермального месторождения (с амплитудой около 1 бар).

Для этого построена одноэлементная модель – объем модели равен объему скважины ( $12 \text{ м}^3$ ), разгрузка задается через граничные условия самоизлива (рис. 3.15). Начальные условия моделирования соответствуют реально наблюдаемым (температура  $259 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление 27 бар). Приток воды в скважину задан постоянным ( $0.03 \text{ кг/с}$ ), приток углекислого газа задан циклическим, с длительностью 5 мин и таким же интервалом.

При моделировании использовался модуль состояния EOS2 (однокомпонентный многофазный флюид вместе с  $\text{CO}_2$ ).

В результате удалось воспроизвести циклический процесс изменения давления в скважине при величине импульсного притока  $\text{CO}_2$  в  $0.035 \text{ кг/с}$  (рис. 3.16).

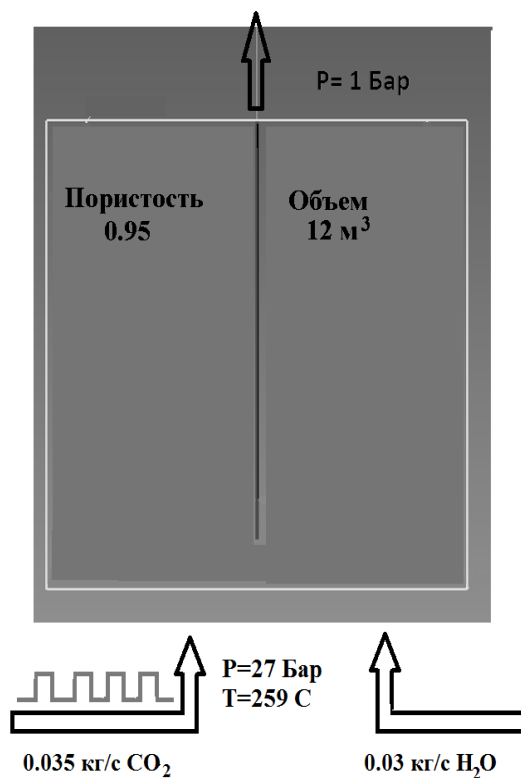


Рис.3.15 – 1–элементная модель.

Полученный результат согласуется с описанием ключевой роли влияния импульсного воздействия  $\text{CO}_2$  на периодичность извержения гейзера Великан [68].

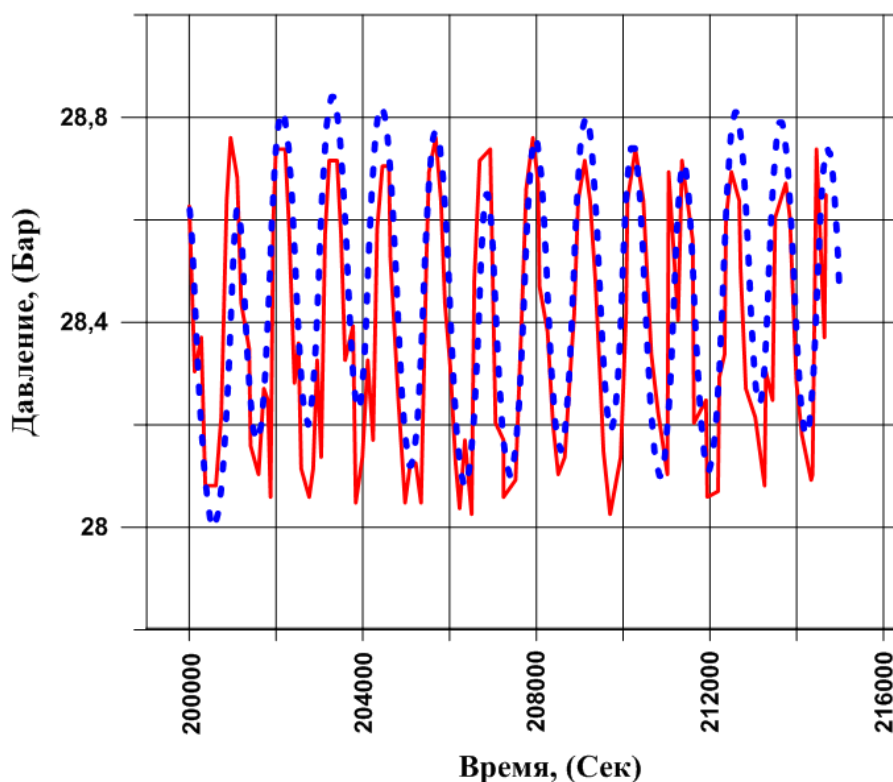


Рис. 3.16. Модельные и фактические данные изменения давления в скважине 30., сплошной линией показаны фактические данные (16 ноября 2004 г.), пунктирной — модельные значения.

### **3.7 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), с постсейсмическими вариациями давления, синхронизированные с сейсмическими событиями с  $M > 4$ . Анализировались сейсмические события в области, ограниченной  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $50\text{--}54^\circ$  с.ш. и глубиной до 40 км. [30, 42, 64, 65, 66]. Пример подобной гидродинамической аномалии изображен на рис. 3.7.

При помощи программы PetraSim v.5.2, нами проведено моделирование этой гидродинамической аномалии. Для этого доработана одноэлементная TOUGH2 – EOS2 модель, рассмотренная выше: 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 величиной расхода указанной на рис. 3.17. Аналогично изменяется и циклически приток углекислого газа (рис. 3.17). Результаты моделирования приведен на рис. 3.17.

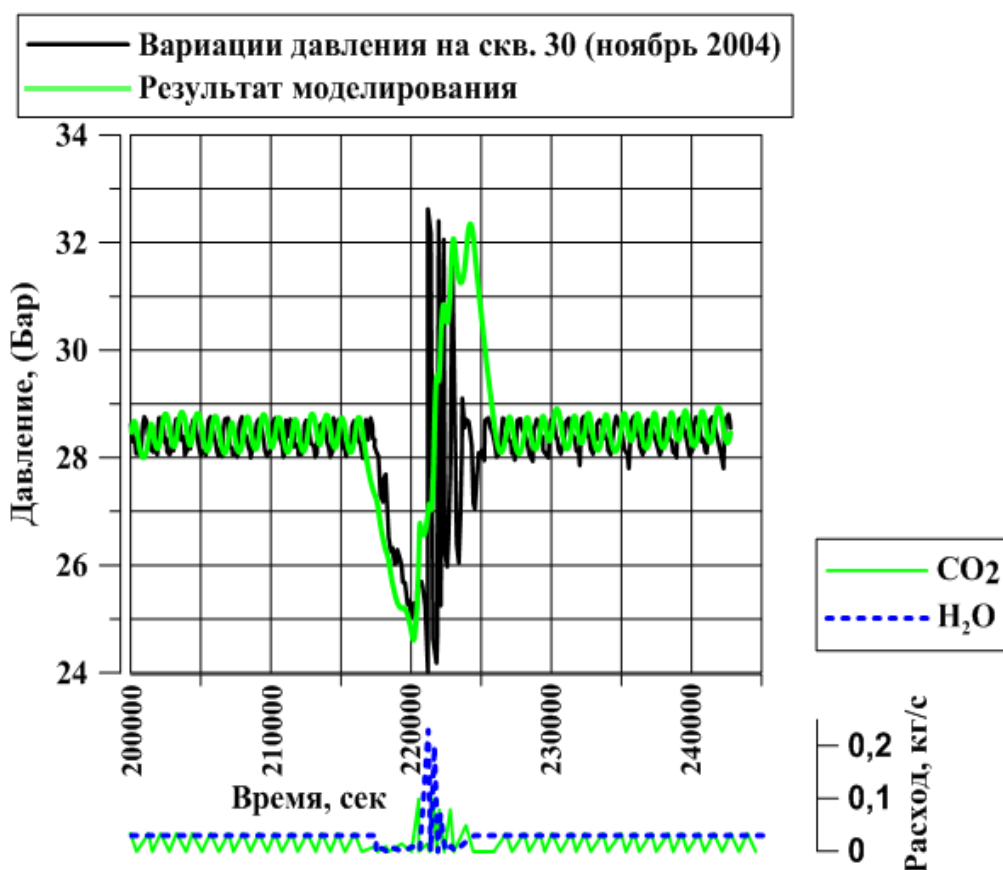


Рис 3.17. Вариации давления связанные с сейсмическими событиями (рис.3.7) и их воспроизведение на модели. Ниже изображен график циклическости расхода  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .

**Выводы.** Установлена повышенная 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.

Доминирующим в газовом составе теплоносителя, является  $CO_2$ , объемная концентрация которого составляет от 77.4 до 94.3%.

По результатам TOUGH2-EOS2 моделирования показано, что сходимость модельных и фактических данных по циклическим изменениям давления в скважине 30 достигается при циклическом расходе углекислого газа.

## **ГЛАВА 4 Разработка методов регистрации и оценки параметров термогидродинамических процессов в полевых и лабораторных условиях**

Непрерывные наблюдения за изменением гидродинамического давления в высокотемпературных геотермальных резервуарах Камчатки в связи с прогнозом вулканической и сейсмической активности начали впервые проводиться с сентября 1995 г, когда на Мутновском геотермальном месторождении в скв. 30 на глубине 950 м была установлена система для непрерывной регистрации давления в геотермальном резервуаре – «капиллярная трубка» (работы выполнялись совместно с Геологической службой Японии в рамках Российско-Японского проекта «Вулканы и вулканическая энергия»).

Впоследствии инструментальная база была расширена, и в настоящее время непрерывные наблюдения на скважинах и источниках осуществляются:

за температурой при помощи портативных логгеров температуры HOBOU12 производства США.

за давлением логгерами HOBO Energy Logger совместно с трансдюссерами давления ASHCROFT.

Логгеры программируются на компьютере, имеют внутреннее питание и энергонезависимую память, длительное время могут работать в автономном режиме.

Текущие изотопные измерения отобранных образцов воды ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ), самостоятельно производятся при помощи анализатора изотопного состава воды компании Los Gatos Research США, IWA-35EP.

На оригинальной лабораторной установке производится определение теплопроводности и удельной теплоемкости образцов горных пород.

### **4.1 Адаптация системы «капиллярная трубка» для непрерывного мониторинга давления в Мутновском высокотемпературном геотермальном резервуаре (до 300°C) (участок Верхне-Мутновский)**

Режимные гидродинамические наблюдения в Мутновском геотермальном районе проводятся с 1995 г. Целью этих наблюдений является изучение связи



режима гидротермальной системы с региональной сейсмичностью и вулканической активностью. Мониторинг давления в скв. 30 (52.55° с.ш., 158.23° в.д.) на Верхне-Мутновском участке, вскрывающей двухфазный 250–270°С трещиноватый геотермальный резервуар, осуществлялся с 1995 г по 2007г. с использованием системы типа «капиллярная трубка» (Pruett Inc.), установленной на глубине 950 м. За период наблюдений зарегистрировано пять краткосрочных аномалий давления, предшествовавших сейсмическим событиям [19, 25, 27].

Система «капиллярная трубка» производства Pruet Inc. (США), включает следующие элементы:

1) Трубка из нержавеющей стали диаметром 3.2 мм и длиной 1500м, установленную на лебедку с барабаном диаметром 300 мм; на конце трубки, опущенном в скважину, находится камера длиной 3 м и централизатор;

2) Трансдюссер (устройство для преобразования изменений давления в электрический сигнал в стандарте RS232C);

3) Портативный персональный компьютер (PC) для записи показаний давления на дискету);

4) аккумуляторная батарея 12V (250А/ч);

5) Солнечная батарея (SP) (20V, 3A при максимальной освещенности);

6) Баллон с гелием (1500 PSI=10.5 МПа);

7) устройство для подзарядки аккумулятора от солнечной батареи.

Для опускания капиллярной трубки в скв.30 использовался также специальный лубрикатор. Конфигурация системы "капиллярная трубка" показана на рис.4.1. Регистрация давления осуществлялась на глубине 950м, запись производилась каждые 2 минуты, и результат записывался на магнитный диск. Технология эксплуатации системы "капиллярная трубка" предусматривает периодические прокачки системы гелием, которые проводились один раз в 2–3 недели. Моменты прокачек фиксировались кратковременным (до 30 мин.) повышением давления в системе в соответствующие моменты времени. Автором система была доработана для работы в местных экстремальных условиях. Для большей автономности

системы, в светлое время суток питающий аккумулятор подзаряжался 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.

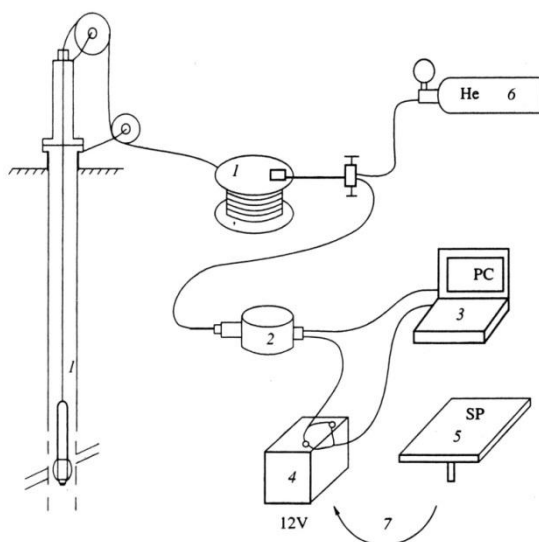


Рис. 4.1. Конфигурация системы «капиллярная трубка»: 1 – капиллярная трубка, 2 – трансдьюсер, 3 – персональный компьютер (PC). 4 – аккумуляторная батарея, 5 – солнечная батарея, 6 – баллон с гелием, 7 – устройство для подзарядки аккумулятора от солнечной батареи.

В 2007 г. скв. 30 была ликвидирована и наблюдения с использованием системы «капиллярная трубка» прекратились.

#### **4.2 Адаптация системы для непрерывного мониторинга давления в низкотемпературном (до 125 °С) геотермальном резервуаре (участок Вилючинский)**

Режимные гидродинамические наблюдения в Мутновском геотермальном районе с июля 2012 г. дополнены наблюдениями на скв. R27, участок Родниковый в районе Вилючинских источников (Камчатка) (рис 4.2), (52.65° с.ш., 158.22° в.д.) находящейся на северном окончании Северо–Мутновской вулcano–тектонической зоны (рис. 1.1) [6].



Рис 4.2 Скважина R27.

Изготовленная система непрерывного мониторинга изменения давления в скважине является логическим продолжением непрерывных наблюдений проводимых на скв. 30. В отличие от той системы, производится непрерывное измерение давления на устье скважины. На скважине установлен трансдюсер Ashcroft T-ASH-G2-100, производства фирмы Onset Computer Corporation (США) с блоком управления и накопления данных (НОВО Energy Logger Pro) с установленным аналоговым модулем Flex Smart Analog Module. Объем памяти модуля с интервалом измерений 10 мин. хватает на более чем 700 сут. Диапазон измерения давления от 0 до 6,89 бар, с погрешностью измерения  $\pm 1\%$  в температурном диапазоне  $-20^{\circ} - +85^{\circ}\text{C}$ .

Автором разработан ряд мер, позволивший использовать регистрирующее оборудование, предназначенное для работы в помещении для экстремальных погодных условиях. Разработанная система, исправно функционирует с 2012 года, требуя минимальной профилактики и замены элементов питания.

Наблюдения за изменением давления на скважине (Родниковая) используются для оценки термогидродинамического влияния эксплуатации Мутновского месторождения на прилегающие термоминеральные источники и

изучение связи режима гидротермальной системы с региональной сейсмичностью и вулканической активностью.



Рис 4.3. Трансдюсер Ashcroft T-ASH-G2-100, производства фирмы Onset Computer Corporation (США) с блоком управления и накопления данных (HOBO Energy Logger Pro) с установленным аналоговым модулем Flex Smart Analog Module.

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



Рис 4.4. Полнообъемный сепаратор высокого давления.

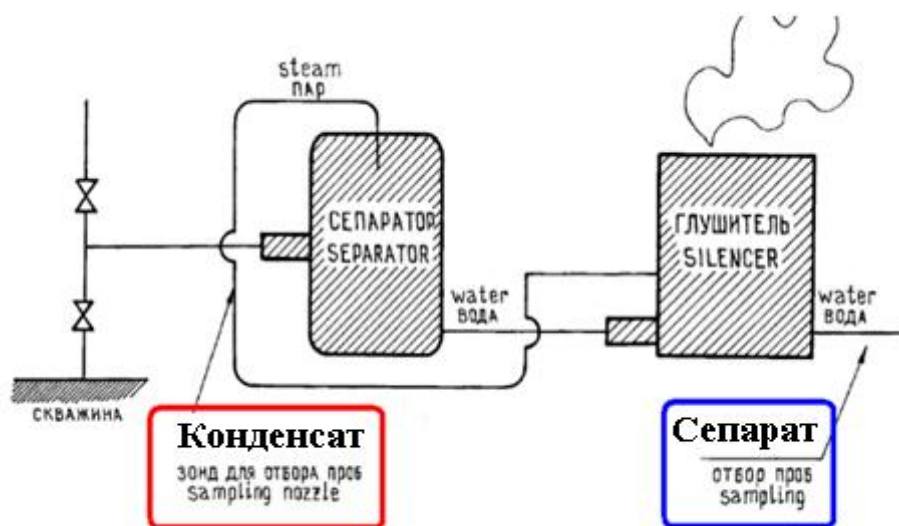


Рис 4.5 Схема опробования геотермальных скважин с полным разделением жидкой и парогазовой фаз.

Во время проведения работ по договору №32 от 15.09.98, впервые на Мутновском месторождении, 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 ( $\delta D$  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 [18, 84].

#### 4.4 Методика пробоотбора газа и конденсата воды из фонтанирующих пароводяных скважин

Для регулярного мониторинга фонтанирующих пароводяных скважин возникла задача отбора водной и газовой фаз. Для этого автором разработана система пробоотбора состоящая из Г – образной пробоотборной трубки из нержавеющей стали или титана, диаметром 6 мм и длиной 1 м (рис 4.6).

К ее концу, посредством 1,5 силиконового шланга присоединен титановый холодильник, охлаждение которого производится холодной водой и снегом. Для более жесткой конструкции пробоотборная трубка закреплена на бамбуковом 1,5 м

шесте. Высокая скорость потока позволяет производить отбор проб с высокой достоверностью и воспроизводимостью, для чего требуется жесткая фиксация кончика трубки в середине потока теплоносителя. Вначале осуществляется 5 минутная промывка системы теплоносителем, затем осуществляется отбор пробы. Заполнение емкости в 0.5 л происходит в течении нескольких минут, производится 3х кратное ополаскивание бутылки, затем производится конечный отбор пробы.



Рис 4.6 Г- образная пробоотборная трубка.

Отбор проб жидкой фазы осуществляется в пластиковые бутылки объемом 0.5 л, свободного газа, методом вытеснения, в стеклянные емкости объемом 0.1 л и затыкаются стандартными силиконовыми пробками. Процесс отбора проб изображен на рис. 4.7. Система использовалась при отборе проб в 2016-2017 гг, результаты частично опубликованы в JVGR [69].





Рис 4.7 Отбор проб из фонтанирующей скважины № 019.

#### **4.5 Методика пробоотбора конденсата водяного пара и газа из fumarol.**

Традиционно подобный отбор осуществлялся при помощи перфорированной титановой трубки соединенной с охлаждающей системой, состоящей из одного или двух барботеров, помещенных в емкость с водой. Конденсат накапливается в барботерах, газ отбирается в стеклянные бутылки, методом вытеснения жидкости. Откачка пробы осуществлялась, при помощи стандартного стеклянного медицинского шприца Жане, емкостью 150 мл (рис. 4.8) [44].

Для повышения эффективности процесса отбора на базе портативного насоса турбинного типа создано устройство пробоотбора (рис 4.9), позволяющее отбирать пробы конденсата и газа с калиброванной скоростью. Максимальная скорость отбора 1 литр в минуту.

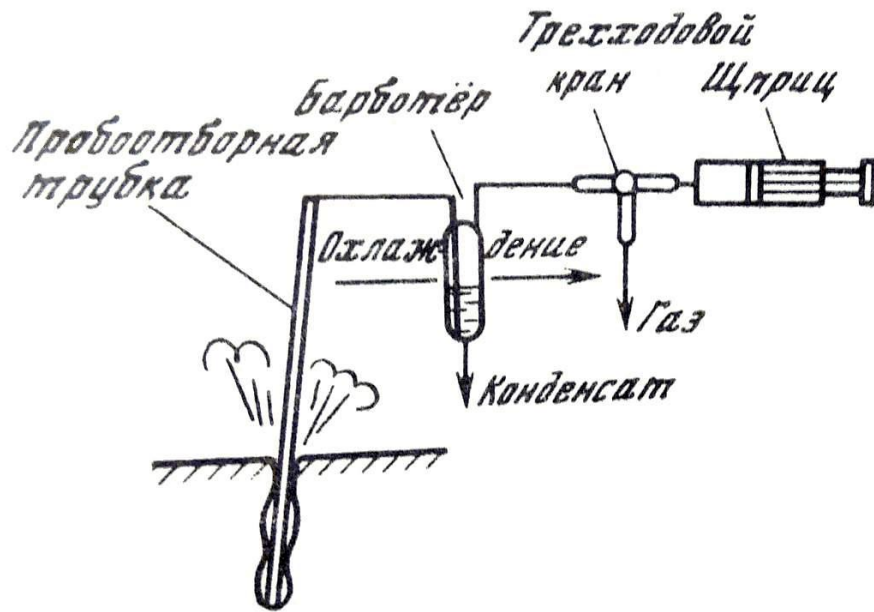


Рис 4.8. Стандартная схема пробоотбора из термального источника.



Рис 4.9 Пробоотборное устройство с автономным питанием.

Система активно используется при отборе проб начиная с 2013 г. На рис 4.10 изображена протототборная система в сборе.





Рис 4.10 Пробоотборная система, в сборе при работе в кратере Авачинского вулкана.

1 – пробоотборная трубка, 2 – силиконовый шланг, 3 – емкость с водой для охлаждения и стеклянным барботером, 4 – пробоотборное устройство, 5 – отобранные пробы, 6 – фумарола (фото Кирюхина А.В.).

#### **4.6 Лабораторная установка для определения тепловых свойств горных пород**

Лабораторное определение тепловых и петрофизических свойств горных пород является фундаментальной задачей геотермальных исследований, т.к. на этих параметрах основываются разнообразные геодинамические модели, подсчет геотермальных ресурсов и эксплуатационных запасов геотермальных месторождений, модели тепломассопереноса и различные технологии, связанные с извлечением и закачкой флюидов (пара, воды, нефти, газа и др.), в том числе в подземных резервуарах трещинно–блокового строения [46]. Наблюдения на высокотемпературных скважинах в связи с прогнозом землетрясений показали чувствительность плохопроницаемой матрицы двухфазных резервуаров к сейсмическим событиям [25, 26], из чего также вытекает необходимость

углубленных исследований ее тепловых и петрофизических свойств. В Институте вулканологии в 80–е годы 20 века, Ф.А. Яновским [47] было налажено измерение теплопроводности горных пород, было проанализировано более 200 образцов. По его данным, теплопроводность вулканогенно-осадочных пород из керна скважин Камчатки изменяется от 1.0 до 2.4 Вт/м °С. При оценке геотермальных ресурсов Камчатки В.М. Сугрбовым [43] удельная тепловая емкость флюидонасыщенных горных пород принималась равной 2.5–2.7 Дж/см<sup>3</sup> °С по данным циркуляра Геологической службы США №790. Разработка методов определения тепловых и петрофизических свойств горных пород продолжена с использованием методов инверсионного моделирования (iTOUGH2) и с учетом появления новых технических измерительных средств (термологеров и приборов дистанционного оптического сканирования тепловых характеристик [72]).

Используемый метод определения теплопроводности и удельной теплоемкости горных пород базируется на приложении инверсионного моделирования (iTOUGH2) к зондовому прослеживанию распространения и релаксации фронта температурной волны в исследуемом образце [29, 31, 32, 65, 66].

Разработанная нами лабораторная установка, представляет собой четыре независимые маломощные теплоизолированные нагревателя (тепловых ячейки) мощностью менее 12 Вт (рис 4.11), в которые помещаются стандартные цилиндрические образцы горных пород [32, 66]. На рис.4.12 изображено устройство индивидуальной тепловой ячейки, использующейся для лабораторных испытаний.

Нагрев осуществляется с нижней торцевой части, которая однородно зачернена (сажа). Измерение температуры производится в верхней торцевой части через отверстие диаметром 2.4 мм и глубиной 10мм.) при помощи четырех цифровых термометров Hioki 3447-01 (точность измерения температуры 0.1°С). (рис.4.11, рис.4.12, рис.4.13) Для улучшения термоконтакта зонда использовалась теплопроводящая паста КПТ-8 (теплопроводность пасты при 20 °С не менее: 0.7 Вт/м·°С).



Рис. 4.11 Лабораторная установка.

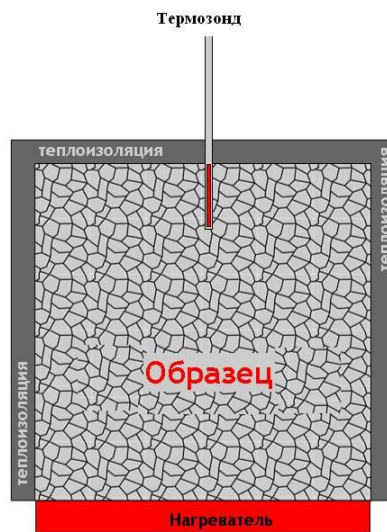


Рис 4.12 Тепловая ячейка.

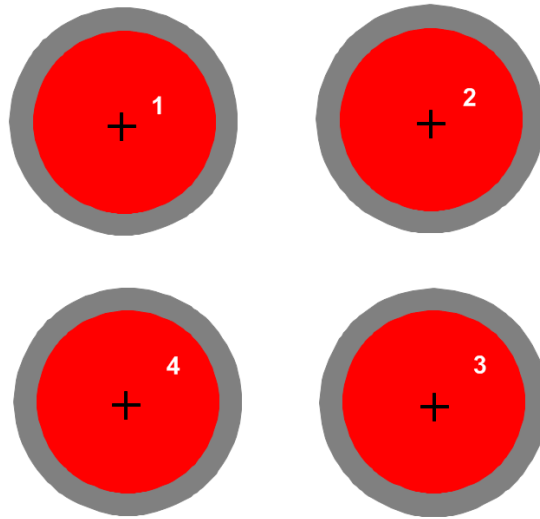


Рис 4.13. Конфигурация лабораторной установки: 1,2,3,4 – номера тепловых ячеек, красные кружки – нагреватели, серые участки – теплоизоляция, крестики – термозонды.

Для обеспечения постоянной начальной температуры эксперимента, установка с образцами и регистрирующими термометрами выстаивалась в течение 18 ч до начала эксперимента в специальном подземном лабораторном помещении, в котором обеспечивались минимальные суточные колебания температуры (не более  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Регистрация температуры термозондом осуществлялась с временным интервалом 10 с. Регистрация начиналась за 5 мин до включения нагревателя (регистрировалась начальная температура образца), затем на 10 мин включался тепловой источник и регистрировалось прохождение температурной волны через образец, далее регистрировалось восстановление температуры в течение 3-х часов.

Численная модель базируется на вычислительной программе TOUGH2, разработанной для моделирования многомерных, неизотермических, многофазных, многокомпонентных потоков флюидов в пористой и трещиноватой среде [73, 74]. Реализованные в вычислительной программе TOUGH2 управляющие уравнения многокомпонентного многофазного теплопереноса (уравнения сохранения массы и энергии) в трещинно-пористой среде редуцируются применительно к эксперименту по нагреванию образца следующим образом.

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, воздух) вычислительной программы iTOUGH2 [52].

Цилиндрический образец рассматривается относительно теплоизолированным с боковой поверхности и на верхнем торце, на нижнем торце задается тепловой поток, равный мощности теплового источника. Потери тепла происходящие через боковую поверхность и верхний торец цилиндра учитываются граничными условиями Дирихле, которые заданы с помощью одного внешнего модельного элемента (с фиксированной начальной температурой), соединенном с элементами боковой поверхности и верхнего торца модели.

Радиально-цилиндрическая вычислительная сетка, используемая для представления нагреваемого образца и обработки эксперимента показана на рис.4.14. Сетка включает 26 слоев и 12 радиальных зон. Каждый слой имеет мощность 2 мм, радиальные зоны задаются последовательностью логарифмически увеличивающихся радиусов (с коэффициентом 1.165), первый радиус соответствует радиусу зонда 1.2 мм, последний радиус – радиусу цилиндрического образца 25 мм. Нумерация элементов вычислительной сетки осуществлялась с использованием кодового имени элемента модели в формате AI\_K, где I - номер слоя (слои нумеровались сверху вниз), K – номер радиальной зоны (от центра к периферии). Термозонд задавался в элементах модели AI\_1, где I=1,2,3,4,5 определялось глубиной зондировочного отверстия 10 мм.



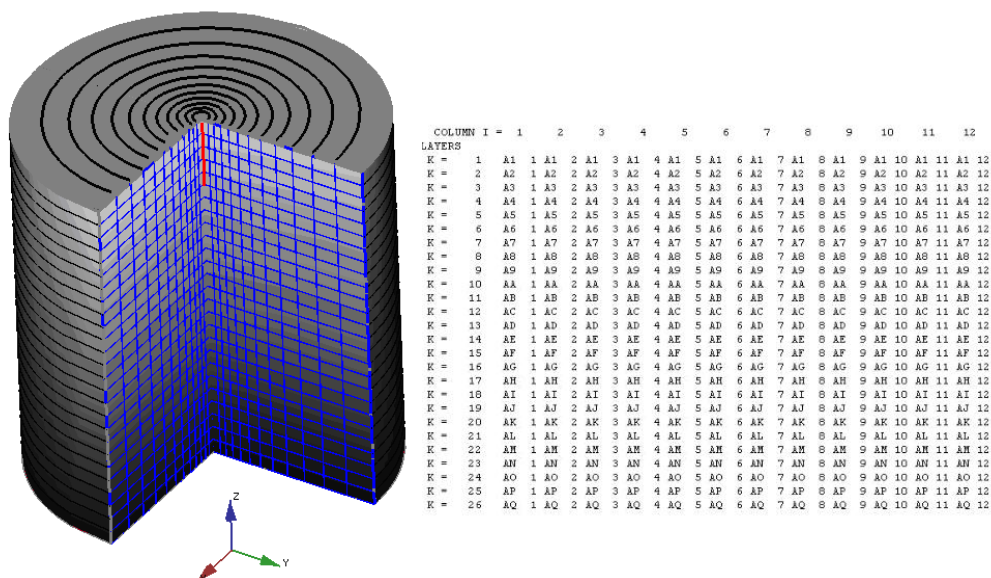


Рис 4.14 Геометрия вычислительной сетки, используемой для моделирования прохождения температурного фронта в цилиндрическом образце. На верхнем торце показано местоположение зонда термометра, используемого для регистрации температурного фронта, перемещающегося от теплового источника, размещенного в нижнем торце образца. Вычислительная сетка состоит из 26-ти горизонтальных слоев (LAYERS) и 12-ти радиальных зон (COLUMNS).

В качестве известных исходных петрофизических параметров задавались минеральная плотность, пористость и проницаемость (табл. 4.1). Поскольку поровое пространство образцов заполнено воздухом (эксперименты проводились на сухих образцах), в качестве уравнения состояния использовался модуль EOS-3, включающий две фазы: газовую (воздух с парами воды) и водную (вода с растворенным воздухом). В данном уравнении состояния в качестве основных переменных используются три: давление (P), насыщение газовой фазы (воздух) ( $S_g$ ), температура (T).

Начальные значения:  $P = 10^5$  Па;  $S_g = 0.999$  (образцы сухие).

Зависимость теплопроводности  $\lambda$  от насыщения порового пространства водой задавалась формулой (4.1)

$$\lambda = \lambda_r + (\lambda_w - \lambda_r) S_w, \quad (4.1),$$

где:  $\lambda_w$  теплопроводность насыщенных водой горных пород;  
 $\lambda_r$  – теплопроводность сухих горных пород;

$S_w$  – насыщение воды.

Процесс нагрева задан постоянной генерацией тепла  $W$  в течение ограниченного времени 10 мин во внешнем элементе модели **В**, который соединяется с нижними элементами цилиндрического образца  $AA_K$  ( $K=1, 2, \dots, 12$ ).

В качестве одиннадцати оцениваемых (неизвестных) модельных параметров рассматривались:

теплопроводность  $\lambda_r$  (сухого образца),

удельная теплоемкость образца  $C_r$ ,

$\lambda_i, i=1, 2, 3, 4$  – теплопроводность теплоизоляционных покрытий,

$W_i, i=1, 2, 3, 4$  – мощность тепловых источников,

$C_p$  – удельная теплоемкость термозонда.

Для снижения количества оцениваемых (неизвестных) параметров ( $W_i, i=1, 2, 3, 4$  – мощность тепловых источников), была произведена калибровка установки на эталонном образце. В качестве эталона, использовался цилиндрический образец изготовленный из плавленного кварца QU1, физические и теплофизические свойства которого известны:

теплопроводность 1.38 Вт/м °С,

удельная теплоемкость 728 кДж/кг °С,

минеральная плотность 2210 кг/м<sup>3</sup> (при 25 °С) [51, 77].

Для калибровки использован кварцевый эталон (рис. 4.15), изготовленный ОАО Tydex ([www.tydex.ru](http://www.tydex.ru)) с размерами соответствующими анализируемым образцам (высота 50 мм, диаметр 50 мм, с отверстием диаметром 2.4 мм и глубиной 10мм в верхней торцевой части).



Рис. 4.15 Кварцевый эталон.

При калибровке экспериментальной установки эталон перемещался последовательно по 4-м тепловым ячейкам лабораторной установки, в каждой ячейке эксперимент по нагреву эталона осуществляется 3 раза (т.е. по эталону осуществлено всего 12 экспериментов).

По данным эксперимента оценивались следующие девять параметров лабораторной установки: тепловые мощности источников по каждой из четырех ячеек  $W_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$  – тепловые источники в каждой ячейке),  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) эффективные теплопроводности по оболочке каждой из четырех ячеек, контролирующие тепловые потери в окружающую среду и  $C_p$  - удельная тепловая емкость термозонда (см. табл. 4.2). Оценка производилась методом инверсионного 9-ти параметрического iTOUGH2 моделирования по данным экспериментов с размещением эталона в 4-х различных ячейках лабораторной установки (рис.4.11, рис.4.13). Для оценки воспроизводимости эксперименты повторялись три раза (табл. 4.1).

Проверка полученных оценок характеристик лабораторной установки (табл. 3.2) осуществлялась оцениванием теплопроводности  $\lambda_r$  и удельной теплоемкости  $C_r$  эталонного образца и сравнением полученных оценок с известными характеристиками (табл.4.2).



Получена хорошая сходимость экспериментальных данных и результатов моделирования, что отражено на рис. 4.16.

Таблица 4.1

Результаты оценки тепловых характеристик лабораторной установки по данным экспериментов на эталонном образце методом инверсионного 9-ти параметрического iTOUGH2 моделирования. Каждый из вариантов обработки (#2011-7-LOG-1, #2011-7-LOG-A-1, #2011-7-LOG-B-1) соответствует данным экспериментов с размещением эталона в 4-х различных ячейках лабораторной установки. STD – стандартное отклонение.

Оцениваемый параметр	Размерность	Серии экспериментов			Среднее значение	STD
		#2011-7-LOG-1	#2011-7-LOG-A-1	2011-7-LOG-B-1		
$C_p$	кДж/кг <sup>o</sup> C	23598	23993	24102	23898	265
$\lambda_1$	Вт/м <sup>o</sup> C	0.0116	0.0117	0.0116	0.0116	0.0001
$\lambda_2$	Вт/м <sup>o</sup> C	0.0107	0.0109	0.0109	0.0109	0.0001
$\lambda_3$	Вт/м <sup>o</sup> C	0.0107	0.0107	0.0107	0.0107	0.0000
$\lambda_4$	Вт/м <sup>o</sup> C	0.0105	0.0106	0.0107	0.0106	0.0001
$W_1$	Вт	6.989	7.057	7.051	7.032	0.038
$W_2$	Вт	6.127	6.253	6.293	6.224	0.087
$W_3$	Вт	5.279	5.289	5.289	5.286	0.006
$W_4$	Вт	5.079	5.118	5.133	5.110	0.028

Таблица 4.2

Проверка оценок расчетных характеристик лабораторной установки (табл. 4.1) методом инверсионного iTOUGH2 моделирования на эталонном образце. Каждый из вариантов обработки (#2011-8, #2011-8-A, #2011-8-B) соответствует данным экспериментов с размещением эталона в 4-х различных ячейках лабораторной установки. STD – стандартное отклонение.

Оцениваемый параметр	Размерность	Серии экспериментов			Среднее значение	STD
		#2011-8	#2011-8-A	#2011-8-B		
$\lambda_r$	Вт/м <sup>o</sup> C	1.386	1.364	1.358	1.369	0.015
$C_r$	кДж/кг <sup>o</sup> C	732.9	723.8	722	726.2	5.8

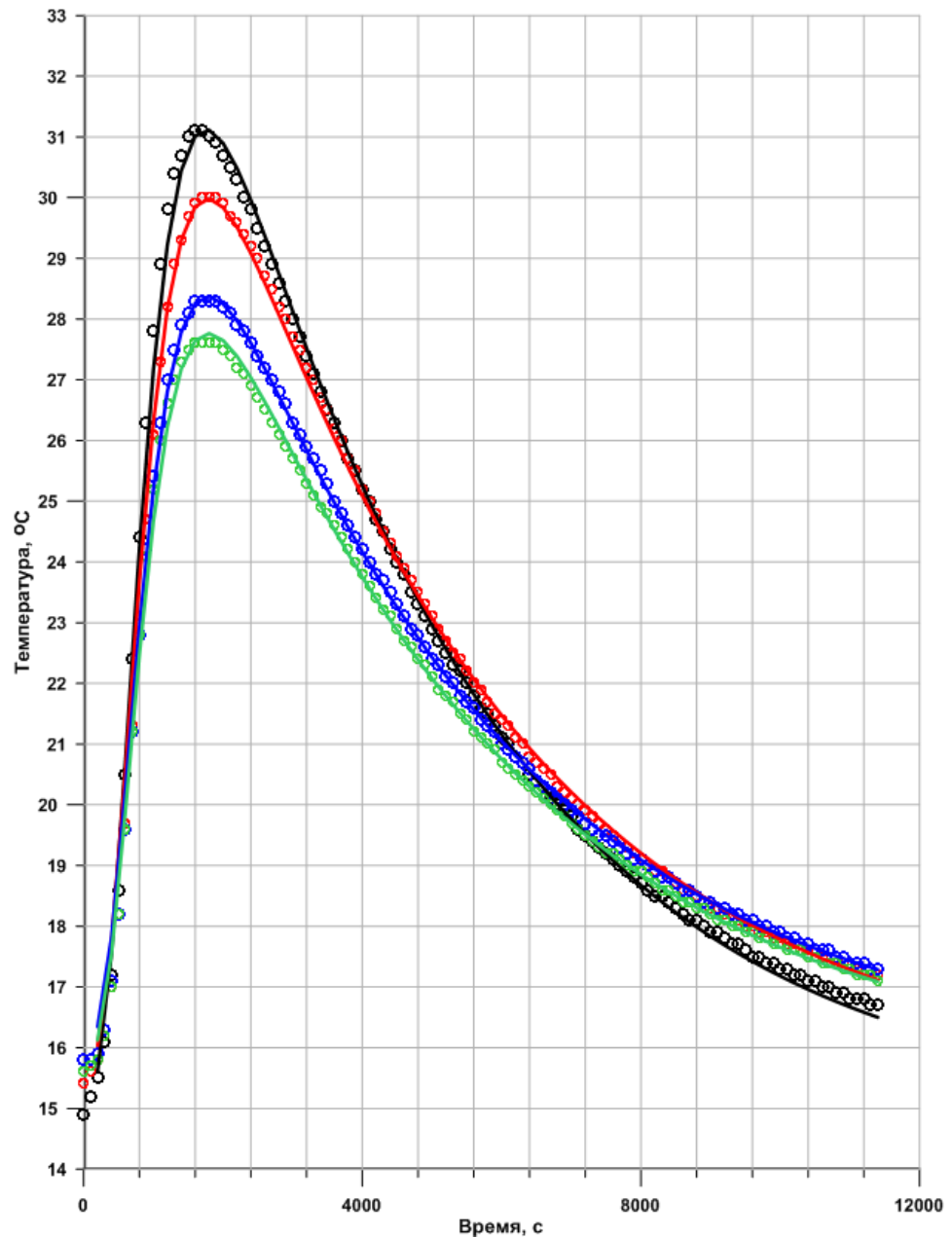


Рис. 4.16. Сопоставление экспериментальных данных (кружки) и результатов моделирования (сплошные линии) (эксперимент #2011-7-LOG-1, табл. 4.2). Экспериментальные данные и модельные результаты по одним и тем же ячейкам показаны одинаковым цветом.

Для определения теплофизических свойств (теплопроводности и удельной теплоемкости) использованы образцы, отобранные на геотермальных месторождениях Камчатки.

Теплопроводность  $\lambda_r$  и удельная теплоемкость  $C_r$  образца оценивается с учетом установленных в результате калибровки экспериментальной установки

данных: мощности тепловых источников ( $W_1, W_2, W_3, W_4$ ) по каждой из ячеек и  $C_p$  тепловой емкости зонда (табл. 4.1).

Оценивание  $\lambda_r$  и  $C_r$  образца осуществлялось методом 6-ти параметрического инверсионного iTOUGH2 моделирования по данным экспериментов с размещением образца в 4-х различных ячейках лабораторной установки (рис. 4.11, рис.4.13) В число оцениваемых 6-ти параметров входят:  $\lambda_r$  – теплопроводность образца,  $C_r$  – удельная теплоемкость образца,  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) – эффективные теплопроводности первой, второй, третьей и четвертой ячеек, контролирующие тепловые потери в окружающую среду) (табл. 4.4). Включение в число оцениваемых параметров эффективных теплопроводностей оболочек ячеек необходимо для учета влияния отклонения индивидуальных геометрических характеристик образцов от диаметра эталона.

Для определения тепловых свойств использовалось восемь цилиндрических образцов диаметром 49 мм и высотой 48 – 51 мм горных пород (табл. 4.3). Результаты определений тепловых свойств, представлены в табл. 4.4.

Получена достаточно хорошая воспроизводимость при повторных определениях, что отражено на рис. 4.17.

Определение минеральной плотности осуществлялось пикнометрическим методом; определение объемной плотности - весовым методом, по этим данным осуществлялся расчет пористости в соответствии с лабораторным регламентом. Определения плотности и пористости по пробам из тех же образцов осуществлялись в ИВиС ДВО РАН (Н.П. Богатко и О.М. Топчиевой, 2011), петрографическое описание осуществлялись в ИВиС ДВО РАН (Ю.М. Пузанков, 2011).

Таблица 4.3

Каталог проб, по которым выполнялись определения тепловых и петрофизических свойств.

№ п/п	Шифр образца	Дата отбора	Название породы	Место отбора образца
1	АК 28-09-2009	28.09.2009	Риодациты	Пиначевский экструзивный купол, 3 км вверх по течению ручья от Пиначевских источников
2	АК 2008-043	2008	Туфы	Долина Гейзеров, Ручей Ступенчатый; N54.43728 E160.14897, 482 м
3	АК 2607-2007-1	26.07.2007	Блоки туфов	Долина Гейзеров, плотина
4	21	23.07.2008	Туфы	Долина Гейзеров
5	DG	13.09.2010	Блоки туфов	Долина Гейзеров, тело оползня
6	DG140	15.09.2010	Блоки туфов	Долина Гейзеров, тело оползня N54.43403 E160.12939
7	DG138	15.09.2010	Блоки туфов	Долина Гейзеров, тело оползня N54.43263 E160.13318
8	DG139	15.09.2010	Блоки туфов	Долина Гейзеров, тело оползня

Таблица 4.4

Оценка теплопроводности  $\lambda_r^i$  (Вт/м<sup>0</sup>С) и удельной теплоемкости  $C_r^i$  (кДж/кг<sup>0</sup>С) образцов вулканогенных пород Камчатки. № – номер образца,  $\phi$  – пористость %,  $\rho_R$  – минеральная плотность (10<sup>3</sup> кг\м<sup>3</sup>),  $i=1,2,3$  – номер испытания, STD – стандартное отклонение. Примечание: минеральная плотность определена Н.П. Богатко и О.М. Топчиевой (ИВиС ДВО РАН) пикнометрическим методом.

№	$\phi$	$\rho_R$	$\lambda_r^1$	$C_r^1$	$\lambda_r^2$	$C_r^2$	Среднее значение		STD	
							$\lambda_r$	$C_r$	$\lambda_r$	$C_r$
21	47.98	2.12	1.000	1330.0	1.500	1200.0	1.25	1265	0.354	91.9
DG	12.85	2.44	1.360	676.9	1.360	676.9	1.36	888	0.000	0.0
DG140	53.39	1.99	1.700	1200.0	1.800	1200.0	1.75	1245	0.071	0.0
DG138	43.80	2.11	0.687	1100.0	0.534	1148.0	0.61	951	0.108	33.9
DG139	29.67	1.68	0.872	1290.0	0.844	1140.0	0.86	1066	0.020	106.1
АК 2008-043	7.20	2.52	1.150	802.9	1.080	769.1	1.12	765	0.049	23.9
АК 2607-2007-1	12.53	2.66	1.070	841.0	0.999	800.2	1.03	841	0.050	28.8
АК 2809-2009	10.41	2.72	0.981	728.0	0.931	700.0	0.96	728	0.035	19.8

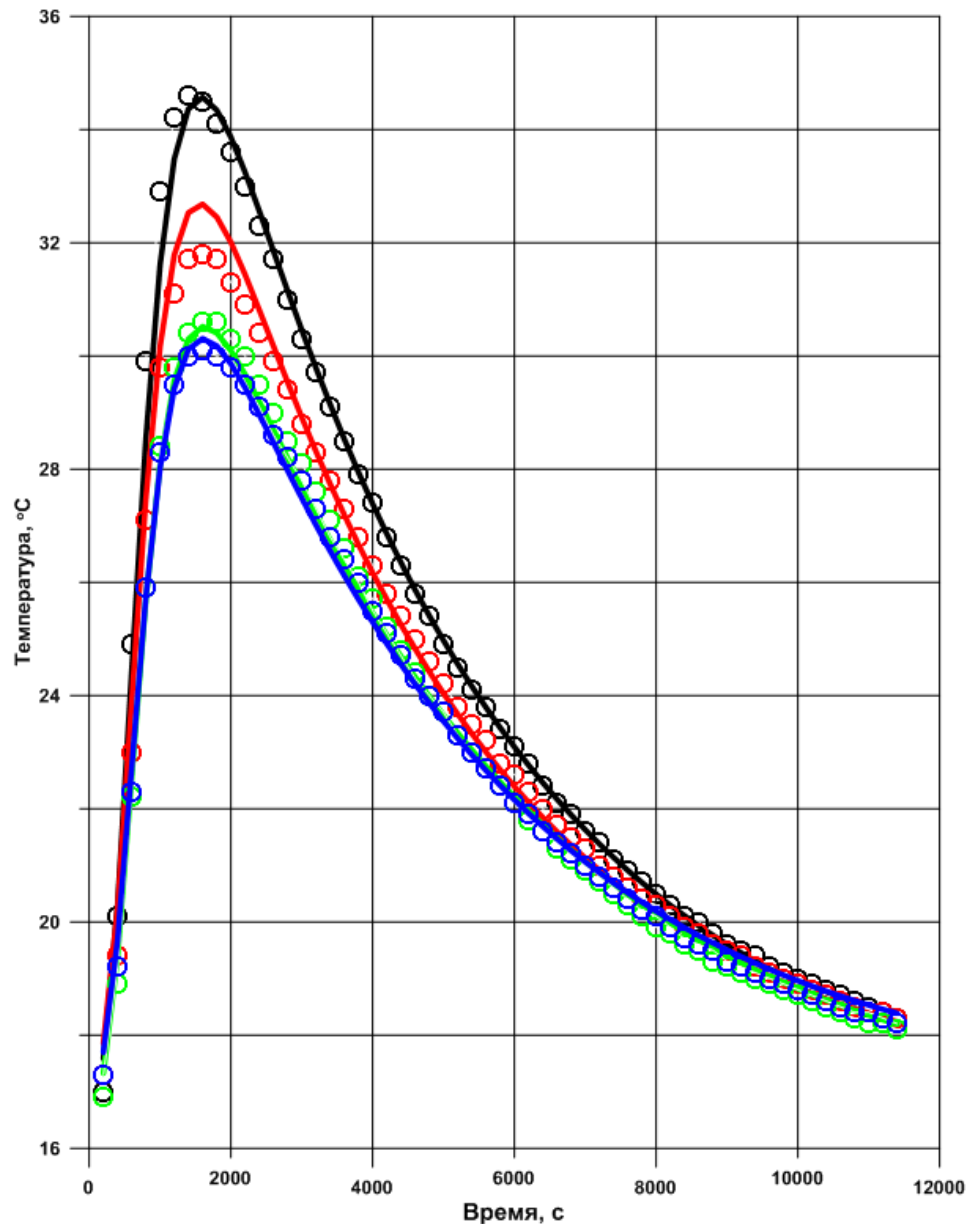


Рис.4.17 Сопоставление экспериментальных данных (кружки) и результатов моделирования (сплошные линии) (образец DG139, табл. 4.3). Экспериментальные данные и модельные результаты по одним и тем же ячейкам показаны одинаковым цветом.

**Выводы.** Разработаны и дополнены методики измерения давления в высокотемпературных (скв.30) и низкотемпературных (скв. R27) геотермальных резервуарах; 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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически неисчерпаемым и экологически чистым источником энергии в областях современного вулканизма являются геотермальные ресурсы, что подтверждается увеличением их использования более чем в 65 странах мира в последние 20 лет (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Динамика изменения выработки электроэнергии в мире с 1995 по 2015г. и прогнозы до 2020г. [50].

	Установленная мощность, МВт, 1995	Выработка энергии, ГВт/ч, 1995	Установленная мощность, МВт, 2005	Выработка энергии, ГВт/ч, 2005	Установленная мощность, МВт, 2015	Выработка энергии, ГВт/ч, 2015	Прогноз на 2020, МВт
Европа	722	3881	1124	7209	2133	14821	3385
Африка	45	366	136	1088	601	2858	1601
Америка	3800	21303	3911	25717	5089	26353	8305
Азия	1980	10129	3290	18903	3756	22084	6712
Океания	286	2353	441	2792	1056	7433	1440
<b>Всего</b>	<b>6832</b>	<b>38032</b>	<b>8903</b>	<b>55709</b>	<b>12635</b>	<b>73549</b>	<b>21443</b>

На Камчатке, активно используется Мутновское геотермального месторождение, разведанное советскими геологами, вулканологами и буровиками в 60-е–80-е годы XX века. Здесь эксплуатируются две ГеоЭС: Мутновская с установленной мощностью 50 МВт и Верхне-Мутновская (12 МВт), покрывающие 25% потребности в электроэнергии Камчатского края.

Гидрогеологическое изучение указанных выше энергетических объектов, включая определение источников водного питания, изучение процессов проходящих в резервуаре в связи с эксплуатацией и сейсмичности - необходимы для обеспечения рациональной эксплуатации месторождения.

В связи с этим, исследования Мутновской высокотемпературной гидротермальной системы, проведенные автором лично и в соавторстве, привели к следующим результатам:

1. На основании анализа изотопного состава подземных вод ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) установлено, что в естественных условиях, наиболее вероятным источником

водного питания Мутновского геотермального месторождения является вода ледника кратера Мутновского вулкана.

2. Гидравлическая связь между вулканом Мутновским и одноименным месторождением осуществляется по трещинам разлома северо-северо-восточного простирания, включающего продуктивную зону «Основная». TOUGH2/ PetraSim моделирование по разрезу вдоль Северо–Мутновской вулканотектонической зоны (включающей Мутновский вулкан, Дачных, Верхне–Мутновских, Нижне–Жировские и Вилючинские источники) показало возможность гидротермальной циркуляции от источника водного питания (ледника в кратере Мутновского вулкана) к Мутновскому продуктивному геотермальному резервуару и источникам разгрузки Дачным, Верхне–Мутновским, Нижне–Жировским и Вилючинским.

3. На указанной выше модели воспроизведено двухфазное состояние резервуара.

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

5. 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 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.

6. По результатам TOUGH2–EOS2 моделирования показано, что циклические изменения давления в двухфазном Мутновском геотермальном резервуаре (скважина 30) воспроизводятся на модели при циклическом притоке в резервуар углекислого газа.

7. Разработаны и дополнены методики измерения давления в высокотемпературных (скв.30) и низкотемпературных (скв. R27) геотермальных

резервуарах; 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.

8. Задачей дальнейших исследований является модельное воспроизведение аномалий флюидного давления в геотермальных резервуарах, синхронизированных с сейсмическими событиями, а также возобновление наблюдений за изменением термогидродинамических параметров в геотермальных резервуарах.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аверьев В.В. Особенности динамики пароводяных скважин / В.В. Аверьев // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. – М. – 1960. – Вып. 18. – С. 113–122.
2. Аверьев В.В. О соотношении между гидротермальной и вулканической деятельностью / В.В. Аверьев // Проблемы вулканизма. Материалы 2-го Всесоюзного вулканологического совещания, 3–17 сентября 1964 г. – Петропавловск-Камчатский. – 1964. – С. 251–257.
3. Аверьев В.В. Естественные термопроявления на Паужетском месторождении / В.В. Аверьев, В.М. Сугробов // Паужетские горячие воды на Камчатке. – М. Наука. – 1965. – С. 31–43.
4. Басманов О.Л. Термогидрогеомеханическое моделирование вертикальных деформаций земной поверхности при эксплуатации Мутновского геотермального месторождения. / О.Л. Басманов, А.В. Кирюхин, М.А. Магуськин, В.Н. Двигало, Дж Рутквист // Вулканология и сейсмология. – 2016. – №2. – С. 1–13.
5. Белоусов В.И. Геологическая и гидрогеотермическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных систем Камчатки / В.И. Белоусов В.М. Сугробов // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. – Владивосток. – 1976. – С. 5–22.
6. Вакин Е.А. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района / Е.А. Вакин, И.Т. Кирсанов, Т.П. Кирсанова // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. – Владивосток. – 1976. С. 85–114.
7. Вакин Е.А. Мутновский геотермальный район на Камчатке / Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. – М. – Наука. – 1979. – С. 36–46.
8. Вакин Е.А. Общая характеристика Мутновского месторождения и прогнозная оценка ресурсов / Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко, В.М. Сугробов //

Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (отв. ред. В.М. Сугробов). – М. – Наука. – 1986. – С. 6–40.

9. Вакин Е.А. Основные проблемы геотермии вулканических областей / Е.А. Вакин, Б.Г. Поляк, В.М. Сугробов // Вулканизм и глубины Земли. – М. – Наука. – 1971. – С. 197–201.

10. Вакин Е.А. Основные результаты комплексных исследований и их применение при изучении геотермальных месторождений / Е.А. Вакин, В.М. Сугробов // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (отв. ред. В.М. Сугробов). – М. – Наука. – 1986. – С. 189–201.

11. Дрознин В.А. Инфракрасная аэрофотосъемка, методика и результаты / В.А. Дрознин, И.К. Дубровская // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (отв. ред. В.М. Сугробов). – М. – Наука. – 1986. – С. 63–77.

12. Кирюхин А.В. Высокотемпературные гидротермальные резервуары. / А.В. Кирюхин, Д.Н. Гусев, И.Ф. Делемень. – М. : Наука, 1991. – 161 с.

13. Кирюхин А.В. Моделирование естественного состояния и эксплуатации высокотемпературного гидротермального резервуара Дачный Мутновского геотермального месторождения / А.В. Кирюхин // Вулканология и сейсмология. – 1993. – №3. – С. 3–23.

14. Кирюхин А.В. Использование трёхмерной гидрогеологической модели в качестве путевода по Мутновскому геотермальному месторождению / А.В. Кирюхин, И.Б. Слобцов, И.Ф. Делемень, М.Д. Лесных А.Ю. Поляков, Е.Г. Калачева, И.А. Рычка // Минерало-рудообразование в вулcano-гидротермальных системах островных дуг (Камчатка-Курильские и Японские острова). – Петропавловск-Камчатский. – ИВ ДВО РАН. – 1998. – С. 201–205.

15. Кирюхин А.В. Исследование условий водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода ( $^{18}\text{O}$ ) и водорода (D). / А.В. Кирюхин, М. Такахаши,

А.Ю. Поляков, М.Д. Лесных, О.П. Батаева // Вулканология и сейсмология. – 1998. – №4–5. – С. 54–62.

16. Кирюхин А.В. Использование численного моделирования для анализа изменения давления в Верхне – Мутновском геотермальном резервуаре, Камчатка. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, М.Д. Лесных, Е.Г. Калачева // 2-я Российская конференция по теплообмену (РНКТ). – М.– 1998. – том 5. – С. 55–57.

17. Кирюхин А.В. Изучение природы разломов и сейсмической активности на Верхне – Мутновском геотермальном месторождении, Камчатка. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, М.Д. Лесных, Е.Г. Калачева. // Научно методическая конференция 7–е Толстихинские чтения «Проблемы региональной гидрогеологии». – СПб. – 1998. – С. 146–152.

18. Кирюхин А.В. Испытания геотермальных скважин на Мутновском геотермальном месторождении: предварительные данные по газогидрохимическим характеристикам теплоносителя, оценка возможного загрязнения атмосферы в процессе эксплуатации. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, С. М. Фазлуллин, Е.Г. Калачева, В.Н. Шапарь, М.Д. Лесных // Научно методическая конференция 8-е Толстихинские чтения «Экологические проблемы гидрогеологии». – СПб. – 1999. – С. 115–118.

19. Кирюхин А.В. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью. / А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, А.Ю. Поляков // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 12-15 апреля 1999 г. – Петропавловск-Камчатский. – ИВ ДВО РАН. – 1999. – С. 99-102.

20. Кирюхин А.В. Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений / А.В. Кирюхин. – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 216 с.

21. Кирюхин А.В. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической

активностью. / А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, А.Ю. Поляков // Вулканонология и сейсмология. – 2002. – №1. – С. 51–60.

22. 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 // Вулканонология и сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 19–44.

23. Кирюхин А.В.. Оценка влияния реинжекции на эксплуатацию Мутновсколго геотермального месторождения (Дачный участок). / А.В. Кирюхин, Л.К. Москалев // Проблемы водных ресурсов, геотермии и геоэкологии. – Минск. – 2005. – т.1. – С. 309–323.

24. 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 // Вулканонология и сейсмология. – 2006. – №5. – С. 27–41.

25. 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 // Вулканонология и сейсмология. – 2006. – №6. – С. 3–11.

26. Кирюхин А.В. Изменения термогидродинамического и газогидрохимического режима резервуара в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения. / А.В. Кирюхин, Л.К. Москалев, А.Ю. Поляков, И.И. Чернев // XVIII Совецание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, 19–23 июня 2006 г. – Иркутск. – 2006. – С. 267–270.

27. Кирюхин А.В. Аномальные изменения давления в Верхне-Мутновском двухфазном геотермальном резервуаре, связанные с сейсмичностью. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков // Научно-техническая

конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». – Петропавловск-Камчатский. – КФ ФИЦ ЕГС РАН. – 2007. – С. 16-19.

28. Кирюхин А.В. Исследование петрофизических свойств гидротермально измененных пород в очагах разгрузки парогидротерм. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, Н.П. Богатко // 10-я международная конференция «Тепловое поле Земли и методы его изучения». – М.. – 2008. – С. 107-111.

29. Кирюхин А.В. Исследование тепловых свойств скальных пород геотермальных месторождений. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, А.В. Мушинский, О.М. Топчиева // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30 марта 2009 г. – Петропавловск-Камчатский. – ИВиС ДВО РАН. – 2009. – С. 149-156.

30. Кирюхин А.В. Гидрогеология вулканогенов. / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин. – СПб.: Наука, 2010. – 395 с.

31. Кирюхин А.В. Измерение теплопроводности и теплоемкости пород на коллекции петротипов-коллекторов триасового вулканогенного резервуара. / А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, А.В. Мушинский // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», 29–30 марта 2010. – Петропавловск-Камчатский. – ИВиС ДВО РАН. – 2010. – С. 127-134.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. Копылова Г.Н. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений. / Г.Н. Копылова, В.М. Сугробов, Ю.М. Хаткевич // Вулканология и сейсмология. Поляк Б.Г. – 1994. – №2. – С. 53–70.

36. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. / В.Л. Леонов – М.: Наука, 1989. – 104 с.

37. Поляк Б.Г. Тепловая мощность межпароксизмальной стадии активности Мутновского вулкана. / Б.Г. Поляк // Доклады АН СССР. – 1965. – т.162, – № 3. – С. 643–646.

38. Поляк Б.Г., Безух Б.А., Кафтан В.И. Опыт наземной ИК-съемки для оценки температуры и теплоизлучения термальных полей вулкана Мутновского (Камчатка). / Б.Г. Поляк, Б.А. Безух, В.И. Кафтан // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 3. – С. 54–63.

39. 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.

40. Поляков А.Ю. Проникновение локальных метеорных вод в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар, по данным исследований изотопного состава воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ). / 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.

41 Поляков А.Ю. Анализ условий притока локальных метеорных вод в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар (Камчатка, Россия), по данным исследований изотопного состава воды ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ). / А.Ю. Поляков // II Международная научно-методическая конференция "Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии", 23-24 мая 2017 г. Сборник научных трудов ISBN 978-5-94211-789-4. – СПб. – 2017. – С. 152-157.

42. 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.

43. Сугробов В.М. Современные гидротермальные системы. / В.М. Сугробов // Тепловой режим недр СССР. Таран Ю.А., Пилипенко В.П., Рожков А.М. – М. – Наука. – 1970. – Вып. 218. – С. 181–198.

44. Таран Ю.А. Геохимия гидротермальных растворов и газов Мутновской гидротермальной системы. / Ю.А. Таран, В.П. Пилипенко, А.М. Рожков // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. – М. – Наука. – 1986. – С. 140–189.

45. Фишман Б.Е. Территориальные исследования: цели, результаты и перспективы. / Б.Е. Фишман, К.Ф. Шлюфман, А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, В.Н. Компаниченко // Математическая характеристика колебаний давления в Мутновской гидротермальной системе. – Биробиджан. – ИКАРП ДВО РАН – ДВГСГА. – 2007. – С. 179-181.

46. Фокин В.М. Неразрушающие методы оценки тепловых свойств строительных материалов. / В.М. Фокин, В.Н. Чернышев. – М. – Машиностроение. – 2004. – 212 с.

47. Яновский Ф.А. О теплопроводности вулканогенно-осадочных пород Камчатки. / Ф.А. Яновский // Вулканонология и сейсмология. – 1989. – №5. – С. 77–84.

48. Arika K. Characteristics and Management of the Sumikawa Geothermal Reservoir, Northeastern Japan. / K. Arika, H. Kato, A. Ueda, M. Bamba // Geothermics. – 2000. – Vol. 29. – P. 171–189.

49. Arnason B. Hydrothermal Systems in Iceland Traced by Deuterium. / B. Arnason // Geothermics. – 1977. – Vol.5– №1/4– P. 140–144.

50. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010–2014 Update Report. / R. Bertani // Proceedings World Geothermal Congress 2015. – Melbourne, Australia. – 2015, – 19 p.

51. Clauser C. Thermal Conductivity of Rocks and Minerals , “Rock Physics and Phase Relations”. / C. Clauser, E. Huenges // A Handbook of Physical Constants. – NY. – AGU Reference Shelf 3. – 1995. – 22 p.

52. Finsterle S. “iTOUGH2 User’s Guide”, LBNL-40040 / S. Finsterle. – Berkeley, CA, USA. – 1999. – 130 p.

53. Kiryukhin A.V. High temperature fluid flows in the Mutnovsky hydrothermal system, Kamchatka. / A.V. Kiryukhin // Geothermics. – 1993. – Vol. 23. – № 1. – P. 49–64.

54. Kiryukhin A.V. Geochemistry and Isotope Applications to Reservoir Engineering of the Mutnovsky and Pauzhetsky Geothermal Fields, Kamchatka, Russia. / A.V. Kiryukhin // Advisory Group Meeting on Isotope Applications in Geothermal Energy Development, AG-909. – Vienna. – IAEA. – 1995. – 10 p.

55. Kiryukhin A.V. Modeling Studies: the Dachny Geothermal Reservoir , Kamchatka, Russia. / A.V. Kiryukhin // Geothermics. – 1996. – Vol.25. – №.1. – P. 63–90.

56. Kiryukhin A.V. Analysis of pressure transient data of Verkhne Mutnovsky site, Mutnovsky geothermal field, Kamchatka, Russia. / A.V. Kiryukhin, Y. Yano, S. Nakao, T. Ishido, M.D. Leshykh, A.Y. Polyakov, D.G.



Zorin // Proceeding 22-nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Berkeley, CA, USA. – 1997. – 7 p.

57. Kiryukhin A. TOUGH Applications to Analysis of the Pressure Transient Data of the Verkhne-Mutnovsky Site, Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka. / A. Kiryukhin, M. Lesnykh, A. Polyakov, E. Kalacheva // Proceeding of the TOUGH Workshop'98, LBNL-41995. – Berkeley, CA, USA. – 1998. – P. 65-70.

58. Kiryukhin A. Modeling Studies of Pressure Cycling Associated with Seismicity in Mutnovsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia. / A. Kiryukhin, K. Pruess // Proceedings World Geothermal Congress, 2000(Beppu-Morioka, Japan). – Tohoku – 2000. – P. 2659–2664.

59. Kiryukhin A. Long Term Pressure Monitoring in Verkhne–Mutnovsky (Kamchatka, Russia) Two-Phase Geothermal Reservoir : Data Analysis and Possible Interpretation Based on Numerical Modeling. / A. Kiryukhin, M. Lesnykh, T. Ishido, K. Pruess, A. Polyakov // – San-Francisco, USA. – AGU. – 2001, – 6 p.

60. Kiryukhin A. Pressure Perturbations in Two Phase Geothermal Reservoir Associated with Seismicity. / A. Kiryukhin, M. Lesnykh, A. Polyakov // Stanford University Proceedings 28 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford, CA, USA. – 2003. – 6 p.

61. Kiryukhin A.V. Modelling study of the Mutnovsky geothermal field (Dachny) in connection with the problem of steam supply for 50 MWe PP. / A.V. Kiryukhin // Proceedings 29<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 26–28, 2004, SGP-TR-175. – Stanford, CA, USA. – 2004. – 7 p.

62. Kiryukhin, A.V. Modelling of the Dachny Site Mutnovsky Geothermal Field (Kamchatka, Russia) in Connection with the Problem of Steam Supply for 50 MWe Power Plant. / A.V. Kiryukhin // Proceedings World Geothermal Congress 2005, (Antalya, Turkey, 24–29 April 2005). – Antalya. – 2005. – 5 p.

64. Kiryukhin, A.V. Modelling of the fault type geothermal reservoir (Dachny site, Mutnovsky geothermal field). / A.V. Kiryukhin, O.B. Vereina // Proceedings 30<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Jan. 31–Feb. 2, 2005. SGP-TR-176. . – Stanford, CA, USA. – 2005. – 7 p.

65. Kiryukhin A.V. INVERSE MODELING AND FORECASTING FOR THE EXPLOITATION OF THE PAUZHETSKY GEOTHERMAL FIELD, KAMCHATKA, RUSSIA. / A.V. Kiryukhin, N.P. Asaulova, S. Finsterle // Geothermics. – 2008. – Vol. 37. – Issue 5. – P. 540-562.

66. Kiryukhin A.V. Inverse modeling of laboratory tests for rocks thermal property estimation. / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, A.V. Mushinsky // Proceedings, Thirty–Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 – February 1, 2012 SGP-TR-194. . – Stanford, CA, USA. – 2012. – 8 p.

67. Kiryukhin A.V., Maguskin M.A., Miroshnik O.O., Delemen I.F. Modeling and Observations of the Enthalpy, Pressure, Chloride, CO<sub>2</sub> and Vertical Deformation Transient Change in the Mutnovsky Geothermal Field (Kamchatka, Russia). / A.V. Kiryukhin, M.A. Maguskin, O.O. Miroshnik, I.F. Delemen // Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, February 11–13, 2013. – Stanford, CA, USA. – 2013. – 8 p.

68. Kiryukhin A. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia). / A. Kiryukhin // – Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2016. – Vol. 323. – P. 129–147.

69. 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.

70. Matsumoto N. Coseismic Changes of Ground Water Level in Haibara, Shizuoka – An Application of Time Series Analysis. / N. Matsumoto, M. Takahashi // Proceedings Earthquake Prediction Technology. – 1990. – Tsucuba. – 10 p.

71. Mineyuki Hanano. Overview of Production at the Mori Geothermal Field, Japan. / Hanano Mineyuki, Kajiwara Tatsuya, Hishi Yasuyuki, Arai Fumiaki, Asanuma Mikihiro, Sato Kei, Takanohashi Morihiko. // Proceedings World Geothermal Congress 2005, (Antalya, Turkey, 24–29 April 2005). – Antalya. – 2005. – P. 1–10.

72. Popov Yu. A. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. / Yu. A. Popov, D.F.C. Pribnow, J.H. Sass // – Geothermics – 1999. – Vol.28. – P. 253–276.

73. Pruess K. TOUGH2, User's Guide version 2.0. / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis. – CA, USA. : Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999. – 197 p.

74. Pruess K. Two-Phase Unsaturated Flow at Yucca Mountain, Nevada: A Report on Current Understanding Flow and Transport Through Unsaturated Fractured Rock, 2<sup>nd</sup> Edition. / K. Pruess // Geophysical Monograph. – 2001 – Vol. 42. – P. 113–133.

75. Pruess K. Mathematical modeling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems – an introduction in five lectures. / K. Pruess. – CA, USA. : UNU G.T.P., Iceland, 2002. – 84 p.

76. Stefansson V. The Krafla Geothermal field, North East Iceland. / V. Stefansson // Geothermal Systems: Principles and Case Histories. Ed. L. Rybach, L.J.P. Muffler. – Pergamon Press. – 1981. – P. 271–294.

77. Sugawara A. The Precise Determination of Thermal Conductivity of Pure Fused Quartz. / A. Sugawara // Journal of Applied Physics. – 1968. – Vol. 39. – № 13. – P. 5994–5997.

78. Shulyupin A.N. Steam-water flow instability in geothermal wells. / A.N. Shulyupin // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 105. – P. 290–295.

79. Taran Y.A. Deuterium and Oxigen-18 in Waters in the Mutnovsky Geothermal Region, Kamchatka. / Y.A. Taran, A.D. Yesikov, A.L. Cheshko // Geochemistry International. – 1986. – Vol. 23. – № 8. – P. 50–60.

80. Hanano M. Sustainable Steam Production in the Matsukawa Geothermal Field, Japan. / M. Hanano // Geothermics. – 2003. – Vol. 32. – P. 311–324.

### **Список фондовой литературы**

81. Блукке П.П. Отчет о результатах предварительной разведки на участке Дачном Мутновского месторождения парогидротерм с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди геотермальной электростанции мощностью 50 МВт. / П.П. Блукке, Г.М. Асаулов, Н.П. Асаулова, С.В. Остапенко. – ПГО “Сахалингеология”. – 1987. – 5500 с.

82. Вакин Е.А. Гидрогеология современных вулканических структур и гидротермы юго-востока Камчатки: диссертация кандидата геолого-минералогических наук : 25.00.07 / Вакин Евгений Александрович. – Петропавловск-Камчатский, 1968, – 250 с.

83. Дрознин В.А. Отчет по проекту «Интеграция» №Ч0103, «Создание центра коллективного пользования по изучению и мониторингу уникального природного объекта – Долины Гейзеров». / В.А. Дрознин. – ИВ ДВО РАН. – 2002. – 36 с.

84. Кирюхин А.В. Отчет по договору № 32 от 15.09.98 г по теме “Подготовка программы испытаний скважин, проведение работ по газогидрохимическому опробованию скважин и составление отчета, обобщающего данные опытных выпусков теплоносителя“, предусмотренных в составе работ по контракту № 589/35806573/8-0002/02”. / А.В. Кирюхин,

И.Б. Словцов, С.М. Фазлуллин, В.К. Марынова, В.Н. Шапарь, И.Ф. Тимофеева, А.Ю. Поляков. – ИВ ДВО РАН. – 2000. – 23 с.

85. Федотов С.А. «Разработка концептуальной модели Мутновского геотермального месторождения ПВС (участки Центральный и Южный) и оценка промышленных ресурсов теплоносителя. Внутренний отчет». / С.А. Федотов, Г.А. Карпов, И.Ф. Делемень.– ИВ ДВО РАН. – 2001. – 550 с.

## ПЕРЕЧЕНЬ РИСУНКОВ

Рис. 1.1 Вулкан Мутновский, вид с северо – запада.

Рис. 1.2 Схема геологического строения и термопроявлений Мутновского геотермального района [8].

Рис 2.1. Северо–Мутновская вулканотектоническая зона (по Е.А. Вакину, с дополнениями).

Рис. 2.2 Блок-схема Северо–Мутновской вулcano-тектонической зоны с вырезом в плоскости продуктивной зоны «Основная».

Рис. 2.3 Схема циркуляции теплоносителя.

Рис. 2.4 Структурная схема Мутновского геотермального месторождения по [36] и кровля поверхности (в изолиниях на абс. отм. от – 1100 до +500 м) продуктивной зоны «Основная» на участке Дачный.

Рис. 2.5 Геологический разрез (по линии скважин 17-030) [81], совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скважин 045-027.

Рис. 2.6 Геологический разрез (по линии скважин В2-4) [81], совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скважин 08-013.

Рис. 2.7 Распределение  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в термальных водах скважин, метеорных и термоминеральных водах, Мутновского геотермального месторождения.

Рис. 2.8 Снижение давления в Мутновском продуктивном геотермальном резервуаре (1995–2009 гг.) согласно измерениям в скважинах 30 и О12. [67].

Рис 2.9. Гидрогеологический разрез вдоль Северо–Мутновской вулканотектонической зоны:

Рис 2.10. Распределение  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в термальных водах скважин и локальных метеорных водах, Мутновского геотермального месторождения.

Рис 2.11. Распределение  $\delta D$  в сепарате скважин Мутновского геотермального месторождения.

Рис.2.12. Дискретизация пространства при численном моделировании.

Рис 2.13 Концептуальная модель системы Мутновский вулкан – Мутновское геотермальное месторождение.

Рис 2.14. Профиль модели с материальными свойствами зон.

Рис 2.15 Двухмерная модель водного питания Мутновского геотермального месторождения.

Рис 2.16 Двухмерная модель водного питания Мутновского геотермального месторождения. Паросодержание.

Рис. 3.1 Горизонтальная проекция области ( $157-161^\circ$  в.д.,  $50-54^\circ$  с.ш.), по которой проводился анализ связи гидродинамических аномалий с сильными землетрясениями.

Рис. 3.2 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. 3.3 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. 3.4 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. 3.5 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. 3.6 Изменение давления в скв. 30 (20 октября 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), зафиксированная за 17 часов до землетрясения ( $M=5.2$ , глубина 13 км, координаты  $52.55^\circ$  с.ш.,  $160.54^\circ$  в.д.).

Рис. 3.7 Изменение давления в скв. 30 (16 ноября – 17 ноября 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), синхронизированное с землетрясением ( $M=5.7$ , глубина 37 км, координаты  $52.96^\circ$  с.ш.,  $160.45^\circ$  в.д.).

Рис. 3.8 Изменение давления в скв. 30 (25 – 26 декабря 2004 г, Мутновское геотермальное месторождение), зафиксированная за 24 ч до цунамигенного землетрясения ( $M=9.0$ ), произошедшего 26 декабря 2004 г. у берегов о. Суматра (Индонезия).

Рис. 3.9. Эпицентры землетрясений связанных с гидродинамическими аномалиями. 1 – активные вулканы; 2 – точка гидродинамических наблюдений, 3 -- эпицентры землетрясений; (диаметр окружности пропорционален магнитуде землетрясения);

Рис. 3.10 Верхний график – изменение давления в скважине 30, нижний график – времена и магнитуды роев землетрясений ( $M>5.8$  в области, ограниченной  $157\text{--}161^\circ$  в.д.,  $51\text{--}54^\circ$  с.ш. и глубиной до 40 км, по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Рис. 3.11 Интегральная вероятность времени ожидания сильного землетрясения после наблюдаемой гидродинамической аномалии – график с кружками.

Рис. 3.12. Пример циклических изменений давления в скважине 30, Мутновское геотермальное месторождение. График показывает изменение давления за 4 часа, 16 ноября 2004 г.

Рис. 3.13 Пример циклических изменений давления в скважине 30, Мутновское геотермальное месторождение. Нижние графики показывают изменение давления в скважине, верхние графики – соответствующую спектрограмму за декабрь 2001 г.

Рис.3.14 Пример циклических изменений давления в скважине 042, 12 – 19 января 2014, Мутновское геотермальное месторождение [78].



Рис.3.15 1–элементная модель.

Рис. 3.16. Модельные и фактические данные изменения давления в скважине 30., сплошной линией показаны фактические данные (16 ноября 2004 г.), пунктирной – модельные значения.

Рис 3.17. Вариации давления связанные с сейсмическими событиями (Рис.3.7) и их воспроизведение на модели. Ниже изображен график цикличности расхода  $H_2O$  и  $CO_2$

Рис. 4.1. Конфигурация системы "капиллярная трубка.

Рис. 4.1. Конфигурация системы "капиллярная трубка": 1 – капиллярная трубка, 2 – трансдюссер, 3 – персональный компьютер (PC). 4 – аккумуляторная батарея, 5 – солнечная батарея, 6 – баллон с гелием, 7 – устройство для подзарядки аккумулятора от солнечной батареи.

Рис 4.2 Скважина R27.

Рис 4.3 Трансдюссер Ashcroft T-ASH-G2-100, производства фирмы Onset Computer Corporation (США) с блоком управления и накопления данных (NOVO Energy Logger Pro) с установленным аналоговым модулем Flex Smart Analog Module.

Рис 4.4. Полнообъемный сепаратор высокого давления.

Рис 4.5 Схема опробования геотермальных скважин с полным разделением жидкой и парогазовой фаз.

Рис 4.6 Г- образная пробоотборная трубка.

Рис 4.7 Отбор проб с фонтанирующей скважины № 019.

Рис 4.8 Стандартная схема пробоотбора из термального источника.

Рис 4.9 Пробоотборное устройство с автономным питанием.

Рис 4.10 Пробоотборная система, в сборе, при работе в кратере Авачинского вулкана.

Рис. 4.11 Лабораторная установка.

Рис 4.12 Тепловая ячейка.

Рис 4.13 Конфигурация лабораторной установки: 1, 2, 3, 4 – номера тепловых ячеек, красные кружки – нагреватели, серые участки – теплоизоляция, крестики – термозонды.

Рис 4.14 Геометрия вычислительной сетки, использующейся для моделирования прохождения температурного фронта в цилиндрическом образце.

Рис. 4.15 Кварцевый эталон.

Рис. 4.16 Сходимость экспериментальных данных (кружки) и результатов моделирования (сплошные линии) (эксперимент #2011-7-LOG-1, табл. 4.2).

Рис.4.17 Сходимость экспериментальных данных (кружки) и результатов моделирования (сплошные линии) (образец DG139, табл. 4.3).

## ПЕРЕЧЕНЬ ТАБЛИЦ

Таблица 2.2.1 Термогидродинамические и гидрохимические характеристики продуктивных скважин [84] (с добавлениями по данным опробования в 1999-2003 гг.).

Таблица 2.2.2 Химический состав конденсата (с) и сепарата (s) по данным опробования в 1999–2003 гг. эксплуатационных скважин участка Дачный Мутновского геотермального месторождения.

Таблица 2.3.1 Изотопный состав флюидов из скважин Мутновского геотермального месторождения (сепарат воды после разделения в сепараторе) и результаты пересчета измерений  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ .

$P_{sep}$  - давление сепарации (бар), энтальпия скважины (кДж/кг),  $\delta_0^{18}O$  и  $\delta_0D$  – пересчитанные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , в исходной воде,  $\delta_L^{18}O$  и  $\delta_LD$  – измеренные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в сепарате воды.

Таблица 3.1 Землетрясения с магнитудой не менее 5.8, произошедшие в области (157–161° в.д., 51–54° с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 гг. (по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Таблица 3.2. Исходные данные для расчета фактической функции распределения времени с момента гидродинамической аномалии до роя сильных землетрясений.

Таблица 3.3 Механизмы землетрясений с магнитудой не менее 5.8, произошедших в области (157–161° в.д., 51–54° с.ш.) в период с 15 октября 1995 по 15 октября 2004 гг. (по данным Harvard CMT Catalog).

Таблица 3.4 Газовый состав паровой фазы эксплуатационных скважин участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, вес. %.

Таблица 4.1 Результаты оценивания тепловых характеристик лабораторной установки по данным экспериментов на эталонном образце методом инверсионного 9-ти параметрического iTOUGH2 моделирования.

Таблица 4.3 Каталог проб, по которым выполнялись определения тепловых и петрофизических свойств.

Таблица 4.4 Оценка теплопроводности  $\lambda_r^i$  (Вт/м<sup>0</sup>С) и удельной теплоемкости  $C_r^i$  (кДж/кг<sup>0</sup>С) образцов вулканогенных пород Камчатки.

Таблица 5.1 Динамика изменения выработки электроэнергии в мире с 1995 по 2015г. и прогнозы до 2020г. [50].