ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Павлов Кирилл Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОРОДАХ АВАЧИНСКОЙ ПЛОЩАДИ В ЕСТЕСТВЕННОМ СОСТОЯНИИ И ПРИ ПЕРСПЕКТИВНОМ ПОЛУЧЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук Р. И. Пашкевич

Петропавловск-Камчатский – 2017

содержание

	Введение	4
1	Характеристика и оценка тепловых ресурсов Авачинской	
	геотермальной площади	12
	1.1. Исследования фумарольной активности системы	12
	1.2. Геолого-геофизические условия системы	21
	1.3. Гидрогеологические условия системы	25
	1.4. Геохимические условия системы	31
	1.5. Оценка тепловых ресурсов системы	34
	1.6. Выводы по главе 1 и постановка задач исследования	37
2	Концептуальная модель Авачинской геотермальной площади	39
	2.1. Экспериментальное исследование тепловых свойств горных пород	39
	2.2. Оценка параметров магматического очага и окружающих его	
	горных пород	41
	2.3. Оценка начальных и граничных термогидродинамических условий	46
	2.4. Установление вариантов реализации модели для двух случаев	
	доминирующего теплопереноса в горных породах: конвективного и	
	кондуктивного	48
	2.5. Выводы по главе 2	48
3	Трехмерная численная термогидродинамическая модель	
	Авачинской геотермальной площади	50
	3.1. Разработка численной модели системы	50
	3.1.1. Программные комплексы для моделирования	
	тепломассопереноса	50
	3.1.2. Определение размеров моделируемой области и свойств ее	
	доменов	53
	3.1.3. Дискретизация доменов системы и параметров вычислительной	
	сетки	55
	3.2. Результаты и анализ численных экспериментов по исследованию	
	теплопереноса в горных породах системы	59

	3.2.1. Вариант доминирующего кондуктивного теплопереноса	62
	3.2.2. Вариант доминирующего конвективного теплопереноса	63
	3.3. Оценка тепловых ресурсов вмещающих магматический очаг пород	64
	3.4. Выводы по главе 3	66
4	Технологические параметры геотермальной циркуляционной	
	системы и технико-экономическая оценка эффективности	
	разработки тепловых ресурсов Авачинской площади	68
	4.1. Добыча тепловой энергии горных пород по технологии	
	циркуляционных систем для тепло- и электроснабжения	68
	4.2. Численное моделирование эксплуатации и установление	
	рациональных технологических параметров циркуляционной системы	
	типа «дублет»	75
	4.2.1. Влияние геометрии системы скважин на динамику параметров	
	продуктивной зоны и технологические параметры скважин	79
	4.2.2. Влияние проницаемости продуктивной зоны на технологические	
	параметры скважин	88
	4.2.3. Влияние схем расположения забоев скважин на выработку	
	тепловой и электрической энергии	90
	4.3. Технико-экономическая оценка эффективности разработки тепловых	
	ресурсов Авачинской площади	97
	4.3.1. Оценка капитальных затрат	98
	4.3.2. Финансово-экономическая эффективность	100
	4.4. Выводы по главе 4	103
	Заключение	105
	Список использованных источников	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Современные темпы развития промышленности крупных стран в условия глобального истощения традиционных видов топлива требуют поиска И повышения степени возобновляемых использования источников энергии. Немалую долю в топливно-энергетическом балансе нашей страны может составить геотермальная энергетика, что особенно перспективно для Камчатки. Уже в настоящее время до 30% энергопотребления центрального энергоузла Камчатского края обеспечивается за счет геотермальных источников. Однако. согласно Геотермальной ежегодного доклада Энергетической Ассоциации (США), среди стран мира, использующих геотермальную энергию, Россия занимает только 14 место с показателем установленной мощности ГеоЭС в 97 МВт, при этом большая ее часть приходится на Камчатку. Более того, потенциальные запасы геотермальной энергии в регионе превышают 2 ГВт.

В настоящее время, на эксплуатируемых месторождениях Камчатки, в качестве энергоресурса используется однофазный теплоноситель (пар или вода), либо пароводяная смесь. Эффективность преобразования тепловой энергии теплоносителя В электрическую незначительна, вследствие данного его невысокого эксергетического потенциала. С учетом мирового уровня развития технологий бурения и обустройства скважин в высокотемпературных зонах, последние годы привлекает внимание, прежде всего с экономической точки зрения, разработка областей близповерхностных магматических очагов. В недрах таких систем существуют Р-Т условия для формирования надкритических областей флюида. Добычные скважины, пробуренные в такие области, будут иметь более высокую энтальпию добываемого флюида и более высокую продуктивность, чем скважины на месторождениях парогидротерм. Глубокие скважины, пробуренные на месторождениях Geysers и Salton Sea (США), Kakkonda (Япония), Larderello (Италия), Krafla (Исландия) и Los Humeros забое области с температурой, превышающей (Мексика), вскрыли на критическую точку воды – 374°С. На Камчатке наличие близповерхностных

магматических очагов подтверждено геофизическими исследованиями на Ключевской и Авачинско-Корякской группе вулканов.

Лабораторное исследование процессов тепломассопереноса, протекающих в таких системах при высоких термодинамических параметрах, требует наличия дорогостоящего оборудования и значительного времени исследования. В связи с чем, в последнее время, в мире получило развитие численное моделирование гидрогеотермальных и магматогенно-геотермальных процессов в геотермальных системах. В качестве инструментов используются различные программные комплексы (ПК), в том числе свободно распространяемый ПК HYDROTHERM. Используемые в численных экспериментах математические модели основываются на фундаментальных законах сохранения массы и энергии, чем обеспечивается достоверность получаемых результатов, при условии адекватной калибровки численных моделей по всей совокупности доступных фактических данных.

В последнее время Авачинская геотермальная площадь вновь стала привлекать внимание как перспективный источник энергоснабжения для г. Петропавловска-Камчатского. В 2015 г. НИГТЦ ДВО РАН в рамках контракта с КГБУ «Региональный центр развития энергетики и энергосбережения» выполнил работы по исследованию геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов. С 2016 г. начаты работы по оценке теплоэнергетического потенциала Авачинской геотермальной площади, проводимые АО «Росгеология» при участии НИГТЦ ДВО РАН. В связи с этим, исследование теплопереноса в горных породах Авачинской геотермальной площади весьма актуально и необходимо как часть комплекса исследований системы.

Работы по моделированию процессов теплопереноса, с целью оценки тепловых ресурсов Авачинской площади, выполнялись ак. Федотовым С.А., Сугробовым В.М., Уткиным И.С., Уткиной Л.И., Поляком Б.Г., Кирюхиным А.В., Пашкевичем Р.И. Однако, в большинстве случаев, в моделях этих авторов не учитывался фактический рельеф дневной поверхности И исследование теплопереноса выполнено случая В моделях только для кондуктивной теплопроводности в горных породах, без учета конвективной составляющей и

возможного формирования областей с надкритическими термодинамическими условиями.

Технология геотермальных циркуляционных систем в докритических термодинамических условиях геотермального коллектора была разработана в трудах Аладьева И.Т., Ароновой Н.Н., Артемьевой В.Л., Богуславского Э.И., Вознюка Л.Ф., Гендлера С.Г., Дядькина Ю.Д., Егорова А.Г., Забарного Г.Н., Кононенко Г.Н., Кремнева О.А., Мерзлякова Э.И., Морозова Ю.П., Павлова И.А., Парийского Ю.М., Пашкевича Р.И., Пискачевой Т.Ю., Пудовкина А.М., Романова В.А., Рыженко И.А., Саламатина А.Н., Смирновой Н.Н., Трусова В.Н., Цырульникова А.С., Шурчкова А.В. Работы при надкритических начальных условиях немногочисленны и выполнены лишь в трудах Пашкевича Р.И. и Таскина В.В. для системы скважин типа «триплет» (две добычных и одна нагнетательная). В работах Шулюпина А.Н. разработаны модели течения пароводяной смеси в системах добычи и транспортировки геотермального теплоносителя, а также методы измерения расходных параметров пароводяных скважин.

Цель диссертационной работы состоит в установлении рациональных схем извлечения теплового потенциала Авачинской геотермальной площади на основе исследования теплофизических процессов в массиве горных пород методом численного моделирования.

Идея диссертационной работы заключается в использовании выявленных закономерностей теплопереноса в горных породах методом численного моделирования для установления зон пород с надкритическим флюидом, а также для обоснования рациональных схем циркуляционных скважинных систем при получении геотермальной энергии.

Задачи исследования:

- разработка концептуальной модели Авачинской геотермальной площади;

разработка трехмерной численной термогидродинамической модели
Авачинской геотермальной площади;

- установление на базе численных экспериментов распределения температуры и фазового состояния флюида в горных породах системы в принятом и обоснованном диапазоне параметров;

- выполнение численных экспериментов по исследованию теплофизических и гидродинамических параметров надкритического теплового коллектора при его разработке по циркуляционной скважинной технологии типа «дублет» (одна нагнетательная и одна добычная скважины);

 установление рациональных технологических параметров циркуляционной системы типа «дублет» с целью освоения тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади.

Методы исследований

Принята комплексная методика исследования, включающая: обобщение и анализ натурных наблюдений за тепловым режимом Авачинской геотермальной площади, анализ мирового опыта использования технологии геотермальных циркуляционных систем для выработки тепловой и электрической энергии, компьютерное моделирование процессов теплопереноса в породах Авачинской геотермальной площади и в надкритическом геотермальном коллекторе.

Научная новизна работы:

- разработана трехмерная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной площади, учитывающая: фазовые переходы теплоносителя в полном диапазоне возможных состояний (надкритический флюид, перегретый пар, сухой насыщенный и влажный пар, жидкость), теплофизические свойства горных пород и теплоносителя в диапазоне температур и давлений 1200°С и 1 ГПа, наличие зон повышенной проницаемости горных пород, а также фактический рельеф поверхности геотермальной системы;

- на базе разработанной модели установлены закономерности распределения температуры и фазового состояния флюида в массиве горных пород геотермальной системы;

- получены закономерности распределения температуры, давления, водонасыщенности и фазового состояния флюида в продуктивном коллекторе

перспективной циркуляционной системы при условиях, соответствующих начальным термодинамическим надкритическим условиям Авачинской геотермальной площади;

 оценены технико-экономические показатели перспективного проекта разработки тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади по циркуляционной технологии типа «дублет».

Основные защищаемые положения

1. Исследование процессов теплопереноса Авачинской геотермальной площади возможно на базе разработанной трехмерной термогидродинамической модели, включающей массив горных пород, вмещающих конвектирующий близповерхностный магматический очаг с постоянной температурой стенки.

2. При установленных размерах и глубине залегания очага область горных пород с температурой 200–400°С, достаточной для получения высокопотенциального теплоносителя, может находиться на удалении до 3-х км от стенки очага и на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности. Тепловое поле очага влияет на распределение температуры в породах системы на удалении до 6 км.

3. Эксплуатация перспективной циркуляционной системы типа «дублет», на базе тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади, возможна в течение 40 лет с дебитом скважин 20 кг/с, при этом, забой нагнетательной скважины в зоне естественной или искусственно созданной проницаемости следует располагать на расстоянии 800 м выше забоя добычной скважины с целью повышения эффективности работы системы и снижения капитальных затрат на бурение.

Практическая значимость работы

 результаты численного моделирования могут быть использованы при дальнейших исследованиях и освоении геотермальных ресурсов Авачинской площади;

- прогнозные параметры Авачинской геотермальной площади позволяют оценить энергетический потенциал объекта при его освоении в перспективе;

- установленные технологические параметры геотермальной циркуляционной системы типа «дублет» могут быть рекомендованы для проектирования опытной геотермальной циркуляционной системы при освоении ресурсов объекта;

- результаты диссертационной работы предложены в 2015 г. КГБУ «Региональный центр развития энергетики и энергосбережения» для внедрения, в ходе выполнения НИГТЦ ДВО РАН научно-исследовательской работы «Исследование геотермальных ресурсов Авачинской группы вулканов».

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается:

 использованием в численных экспериментах теплофизических свойств пород, полученных по результатам лабораторных исследований образцов горных пород Авачинской площади;

- комплексом накопленной геолого-геофизической информации об объекте исследования;

- значительным количеством выполненных вариантов численных экспериментов в широком диапазоне исходных параметров;

- использованием фундаментальных законов сохранения массы и энергии в основе численной модели теплопереноса.

Личный вклад автора заключается:

- в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследований, систематизации и обработке геофизических, геологических, гидрогеологических данных, а также данных по геотермическому режиму Авачинской геотермальной площади, разработке модели, выполнении численных экспериментов и интерпретации полученных результатов, а также обработке их на ЭВМ, разработке практических рекомендаций;

- в участии в проведении комплекса натурных исследований, включающих: режимные измерения геотемпературного поля, отбор проб воды и интерпретацию данных результатов химического анализа, отбор проб горных пород для

определения теплофизических свойств, площадное магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) и глубинное магнитотеллурическое зондирование (ГМТЗ).

Апробация диссертации

Содержание и основные положения диссертационной работы были доложены на: Ученых советах НИГТЦ ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский в 2012-2017 гг. и Института горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск в 2017 г.; 5-ой Международной молодежной научной конференции «Будущее науки – 2017», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, 2017 г.; Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена – 2017», Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, 2017 г.; 2-ом Международном научнопрактическом форуме «Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона», г. Хабаровск, 2017 г.

Публикации: Основное содержание диссертации изложено в 11 опубликованных работах, в том числе 9 в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ.

Благодарности

Автор благодарит Пашкевича Р.И. за научное руководство, постановку задач исследования, плодотворную критику, действенную поддержку и помощь на всех этапах работы.

Основное содержание работы

<u>В главе 1</u> приведен анализ результатов ранее выполненных исследований Авачинской геотермальной площади; установлены геолого-геофизические, гидрогеологические, геохимические условия системы; дана оценка тепловой мощности системы по результатам натурных исследований теплового режима Авачинского вулкана; сформулированы цель и задачи исследований;

<u>В главе 2</u> на основании накопленного комплекса геолого-геофизических данных построена концептуальная модель Авачинской геотермальной площади; оценены параметры магматического очага и вмещающих его горных пород;

установлены варианты реализации модели для двух доминирующих типов теплопереноса: кондуктивного и конвективного;

В главе 3 на основе принятой концептуальной модели разработана термогидродинамическая численная трехмерная модель Авачинской геотермальной площади; определены размеры моделируемой области и ее доменов; численно реализованы начальные и граничные условия в модели; на основе разработанной модели выполнен расчет И анализ параметров теплопереноса В горных породах Авачинской геотермальной площади; установлены зависимость конфигурации изотерм и границы области флюида в надкритическом состоянии от параметров очага и двух доминирующих типов теплопереноса; оценены тепловые ресурсы вмещающих очаг горных пород;

численное B главе 4 выполнено моделирование эксплуатации геотермальной циркуляционной системы типа «дублет» при начальных условиях, соответствующих сверхкритическим термодинамическим в породах Авачинской геотермальной площади; установлены рациональные технологические параметры циркуляционной системы с целью перспективного получения геотермальной энергии; выполнена технико-экономическая оценка перспективной разработки Авачинской геотермальной тепловых ресурсов площади ПО технологии геотермальных циркуляционных систем.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 153 наименований, содержит 123 страницы машинописного текста, 38 рисунков, 11 таблиц.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА И ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ АВАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

1.1. Исследования фумарольной активности системы

Авачинская геотермальная площадь приурочена к одноименному вулкану, расположенному на юго-востоке полуострова Камчатка в 25-30 км от г. Петропавловска-Камчатского (рисунок 1). Вулкан расположен в Восточно-Камчатском вулканическом поясе, является действующим с верхнего плейстоцена и относится к типу Сомма-Везувий (рисунок 2). Абсолютная высота постройки вулкана составляет 2751 м, высота соммы в восточной части – 2317 м.



Рисунок 1 – Обзорная карта расположения вулкана Авачинский



Рисунок 2 – Авачинский вулкан и формирующийся Молодой конус

На протяжении 60 тыс. лет существования на вулкане происходили крупные эруптивные события, приведшие к разрушению вершины древнего вулкана (Палео-Авача), а затем и позже сформированной на этом месте вершины Мезо-Авача [3,4,36,37]. Последние 3500 лет формируется Молодой конус вулкана (рисунок 2), имевший 15 извержений в историческое время (с 1737 г.) [36,37]. Последние события на Авачинском вулкане привели к заполнению 200 м кратера лавовой пробкой (1991 г.) и к образованию трещины в ней в результате парогазового взрыва в 2001 г.

После извержения 1945 г. Молодой конус вулкана находится в стадии фумарольной активности, изучением которой детально занимались И.Т. Кирсанов, Г.Г. Медведева и Е.К. Серафимова в августе и сентябре 1962 г. [31]. В ходе исследования кратера вулкана авторами было зафиксировано обрушение довольно большого участка шлаков в верхней части юго-восточной стенки, что также было отмечено А.М. Чирковым, при посещении вершины вулкана в марте 1962 г. В целом в морфологии кратера со времени посещения его в 1960 г. [31] и детального изучения в 1961 г. существенных изменений не произошло. На месте обрушения образовался парящий участок с температурой газов на кромках 65-75°С. Четко выраженных фумарол на участке не проявлялось, равномерно парила вся площадь. Наиболее активными фумаролами являлись: «Серный Гребень», «Уступ», «Восточная», «Четверка», «Малая Серная» и в особенности фумаролы дна [31]. Расположение фумарол показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема расположения фумарольных полей Авачинского вулкана в период август - сентябрь 1962 г. [31]. 1 – фумарольные поля; 2 – наиболее активные участки; 3 – активно действующие поля с постоянно видимыми парогазовыми струями; 4 – парящие площади с температурой 20–50°С; 5 – фумаролы, приуроченные к трещинам в лавах; 6 – место отбора газов; 7 – температура; 8 – площади, покрытые возгонами серы; 9 – площади с гипсом и другими сульфатами; 10 – участок вершины, залитый лавами; 11 – участок вершины, сложенный рыхлым пирокластическим материалом и агломератами; 12 – граница фумарольных полей

По сравнению с предыдущими годами в кратере авторами [31] наблюдалось общее повышение активности фумарол. Газы были обычно молочно-белого, иногда серого с желтоватым оттенком за счет присутствия взвешенной серы, которая наиболее часто содержится в газах фумарол «Уступ» и «Серный Гребень». Желтый и желтовато-оранжевый налет серы присутствовал на устьях большинства фумарол. На площади фумаролы «Четверка» возникли новые выходы газов, окружившие основные фумаролы на границе между прослоями лав.

В юго-западной части кратера, на месте открытой трещины северозападного простирания, авторами [31] отмечался довольно мощный выход газов, временами с длиной струи 30 м. Длина трещины составляла 25–30 м, ширина – 25–30 см. Выходы струи были покрыты довольно плотным слоем серы.

Фумаролы дна кратера были сконцентрированы в центральной части участка, образовав большое фумарольное поле с наиболее активными выходами по периферии — в южной части, восточной и северо-западной. В результате деятельности данного поля образовывался столб с поднятием на высоту 100–150 м. Температура газов на выходе в периферийной части южного участка колебалась в пределах 140–185°C, северо-западного – 115–125°C [31].

Довольно многочисленные газовые струи авторами [31] наблюдались в западной и частично северо-западной стенке выше фумарол «Уступ» и «Малая Серная».

В восточной и юго-восточной частях кратера авторами [31] отмечены небольшие группки фумарол, а также парящие площадки.

Менее активно по сравнению с фумаролами кратера проявлялись фумаролы на внешних склонах конуса и в верхней прикратерной части.

Авторами [31] наблюдалось полное отсутствие фумарол на северовосточном и частично северном и восточном склонах конуса. В остальных частях вершины, на удалении 20–150 м от кромок кратера, вниз по склону протягивались прогретые участки. Из наиболее активно действовавших фумарольных полей выделялись два: на юго-западном склоне – продолжении «Серного Гребня» и северо-западном, где они были приурочены к 10–12–метровому обрыву, сложенному, измененными андезитами.

Первое фумарольное поле юго-западного склона занимало площадь размером 50×80 м. На активных участках поля были довольно мощные отложения серы. Температура парогазовых струй на выходе колебалась в пределах 90–95°C, временами повышаясь до 120°C [31].

В 120–150 м выше первого фумарольного поля на этом же склоне отмечался еще один активный участок размером 25×40 м, вытянутый по склону в направлении «Серного Гребня». На выходе фумарол этого участка наблюдались довольно большие скопления серы. Температура газов на устья колебалась в пределах 35–90°С.

Фумарольное поле северо-западного склона конуса занимало участок в 130– 150 м ниже кромки кратера площадью 30×50 м. Наибольшее число фумарол концентрировалось на 12-метровом обрыве, особенно у подножия разрушенной части лавового потока. Температура парогазовых струй колебалась в пределах 50–90°С.

В остальных местах на внешних склонах кратера вулкана выходы парогазовых струй были приурочены к трещинам в лавовых потоках и парящим участкам в шлаках и агломератах. Температура газов на выходе из трещин колебалась в пределах 50–60°С, на парящих участках – 25–75°С.

Результаты температурной съемки всех фумарольных полей внешних склонов, проведенной Е. К. Серафимовой и В. А. Подтабачным в сентябре 1961 г. [31], показали одинаковые, по сравнению с августом, пределы колебания температуры: на активных фумаролах – 80–95°С, у газов трещин лавовых потоков – 50–75°С, парящих участков –20–75°С.

По данным результатов инфракрасной съемки 1988 г., приведенным в работе [21], было отмечено, что структура распределения температур на внутренних и внешних склонах кратера неизменна и соответствует данным наземных измерений, выполненных в 1964 г. Однако, в южной части днища кратера была зафиксирована новая термоаномалия в том месте, где впоследствии вскрылось эруптивное жерло извержения, начавшегося в 1991 г.

После извержения 1991 г. структура термоаномалий осталась также неизменной на участках, которые не были перекрыты лавой. Не изменилась и сохранялась в ходе извержения активность фумарол, в частности, наиболее мощной фумаролы «Уступ», по данным облета 14 января 1991 г., когда кратер начал заполняться лавой [21].

В 1993-1994 гг. авторами [144] отбирались образцы газа действующих фумарол. Было отмечено, что наибольшая газовая активность проявлялась в узкой трещине между лавовой пробкой и краем кратера. Расположение фумарольных площадок, а также измеренные температуры фумарол показаны на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема фумарол кратера вулкана после извержения 1991 г. [144]

По результатам анализов авторами [144] было установлено, что фумаролы с наибольшей температурой 473°С выбрасывают чистый магматический газ. В составе газов низкотемпературных фумарол отмечалось наличие сконденсировавшегося магматического газа с небольшой долей метеорных вод.

По данным инфракрасной съемки, выполненной в 2005 г., в структуре ИКизлучения поверхности авторы [21] выделили аномалии трех типов: фумарольные выходы – фумаролы «Западная» и «Группа Восточные», радиальные и концентрические трещины на лавовом поле, «парящий грунт» на внутренних и внешних склонах кратера, рисунок 5.



Рисунок 5 – Структура ИК-излучения поверхности [21]. 1, 2 – фумарольные выходы; 3 – линейная аномалия; 4 – трещина; * – режимная фумарола

Фумаролы «Группа Восточные» по данным [21] проектировались на расположение бывшей фумаролы «Восточная». Фумаролы «Уступ» и расположенная рядом «Малая Серная», перекрыты лавой и место выхода сместилось к фумароле «Западная». Прогретые площадки на внешней северо- и юго-западной стороне кратера, а также неперекрытые лавой на внутренней северной его кромке, сохранили свою конфигурацию (зоны оконтурены сплошной линией, рисунок 5). Конфигурация и интенсивность фумарольных выходов (1, 2), образовавшихся в 1991 г. на внешнем склоне на продолжении трещины, изменилась с образованием трещины. В период 1991–2001 гг. на западном гребне

функционировала режимная фумарола (*). Трещина (4) существовала раньше, аномалия (3) авторами [21] была отмечена впервые.

По данным авторов [21] контуры областей «парящего грунта» не изменились после извержения 1991 г. По линии контакта лавы с внутренней стенкой кратера термоаномалии существовали на прежних местах. Произошло усиление интенсивности выноса тепла и серы в западной части конуса, именно в районе бывшей термальной площадки, примыкавшей к фумароле «Уступ». Также авторами [21] отмечалось, что поверхность лавового поля, в основном, холодная, но с температурой выше фоновой для данной высоты. Наблюдалась повышенная температура в радиальных и концентрических глубоких трещинах лавового поля, свидетельствующая о выделении тепла при остывании лавового тела. Вынос тепла не сопровождался паром, как на «парящих грунтах». Трещина 2001 г. на инфракрасном снимке отображалась как холодная. Распределение фумарольных выходов изменилось. Основные фумаролы были перекрыты лавой. Вместо фумарол «Уступ» и «Восточные» начали действовать «Западная» и «Группа Восточные». Их расположение именно вблизи кромки старого кратера указывало, по мнению авторов [21], на то, что они скорее унаследованы, чем образованы вновь, причем «Группа Восточные» проектировалась непосредственно на места выхода бывших фумарол.

В 2012 г. авторами [44] были измерены температуры практически всех газовых выходов, расположенных по краям лавовой пробки, кроме юго-югозападных, рисунок 6. По результатам замеров температура всех фумарольных площадок не превышала 94°С, за исключением фумаролы «Западная», расположенной на пересечении трещины с кромкой кратера. Температура «Режимной» фумаролы находилась в пределах 91°С. Таким образом, температура фумаролы значительно снизилась по сравнению с результатами замеров 1994 и 2001 гг., когда составляла 470 и 500°С, соответственно, а также по данным 2005 г. – 130°С [44].



Рисунок 6 – Измеренные температуры фумарол кратера в 2012-2013 гг. [44]. Овалом обведена непромеренная площадка

Фумарола «Западная» образовалась в лавовой пробке на месте глубокой трещины 2001 г. шириной в верхней части 1–1,5 м, глубиной 10 м. По результатам замеров в 2012 г. температура составляла до 370°С, в 2013 г. – до 415°С. Температура снижалась до 85°С с уходом трещины вниз по склону конуса [44].

В августе и сентябре 2013 г. были замерены высокотемпературные выходы газов на фумарольной площадке «Восточная» в юго-восточной части лавовой пробки. Площадка представляла собой выходы газов размером 15×20 м. Максимальная температура фумаролы размером 1 м достигала 660°C. В 10 м севернее данной площадки авторами [44] была замерена фумарола с температурой 610°C в августе и 626°C в сентябре.

По результатам анализа состава газов авторами [44], как и по результатам исследований 1994 г. [144], было установлено, что высокотемпературные фумаролы представляют собой выходы магматических газов.

Таким образом, по результатам замеров температуры в 2012–2013 гг., впервые с 1991 г., были выявлены фумаролы с температурой более 660°С. До извержения 1991 г. максимальная температура на дне кратера составляла 700°С [71].

В сентябре 2015 г. сотрудниками ИВиС ДВО РАН были проведены визуальные исследования фумарольных площадок с измерением температур вулканических газов. Температуры «Западной» фумаролы, измерялись с помощью пирометра TemPro-1200 с расстояния нескольких метров и составили ~ 700°C, что на 150°C выше замеров температур в августе 2014 г. и апреле 2015 г. Температуры фумарольных газов «Восточного» поля в течение 2013–2015 гг. существенно не менялись и достигали 665°C.

В апреле и мае 2016 г. сотрудниками Камчатского научного центра были проведены работы на кратере вулкана. На «Восточном» фумарольном поле были измерены температуры «Режимной» и окружающих ее фумарол. Температура существенно не поменялась по сравнению с замерами предыдущих лет и составила 591°С. Впервые за последние годы (10 лет и более) исследователям удалось измерить температуру «Западной» фумаролы, которая составила максимально 777°С. Участок вдоль трещины, на котором удалось зафиксировать температуру более 700°С, имел протяженность 3–4 м. Таким образом, была зафиксирована самая высокая температура фумарольных газов за всю историю наблюдений за вулканом Авачинский.

1.2. Геолого-геофизические условия системы

Геолого-геофизические условия Авачинской геотермальной площади могут быть охарактеризованы по данным комплекса геолого-геофизических исследований, выполненных на Авачинском вулкане начиная с 1960-х гг. Вулкан образует группу из среднеплейстоцен-голоценовых вулканов (Ааг, Арик, Корякский, Козельский), протягивающихся с северо-запада на юго-восток полуострова, рисунок 7. В региональном плане Авачинский вулкан приурочен к системе северо-западных разломов, ограничивающих северо-востока С Малкинско-Петропавловскую зону поперечных дислокаций, разделяющую полуостров на южную И северную части. Вулкан располагается В вулканотектонической депрессии, выполненной палеоген-неогеновыми

вулканогенно-осадочными породами. Появление депрессии связано С проседанием земной коры вследствие извержения огромных количеств эффузивно-пирокластического материала, приведшего к перераспределению масс. Вулканическая постройка сложена четвертичными и современными эффузивнопирокластическими образованиями [16-19].



Рисунок 7 – Геолого-тектоническая схема Авачинской группы вулканов (по С.Е. Апрелкову) [16]. 1 – современные отложения; 2 – четвертичные отложения; 3 – палеогеновые и неогеновые отложения; 4 – мезозойские отложения; 5 – экструзивные и интрузивные отложения; 6 – сейсмический профиль КМПВ; 7 – вулканические постройки (действующие и потухшие вулканы, шлаковые конуса); 8 – разрывные нарушения (установленные и предполагаемые); 9 – контуры неотектонических образований

По данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [10,16,17,18] мощность земной коры под Авачинским вулканом уменьшена до 20–22 км по сравнению с прилегающими районами. Мощность «гранитного» слоя также сокращена до 6 км, а глубина «базальтового» слоя до 9–10 км [72]. Под постройкой вулкана обнаружена область с повышенными поглощающими свойствами и инверсией скоростей сейсмических волн, отождествляемая с

периферическим магматическим очагом, который располагается на границе верхнемелового фундамента и покрывающей его вулканогенной толщи, рисунок 8.



Рисунок 8 – Геолого-геофизический профиль района Авачинского вулкана [72]. 1 – вулканокластические образования; 2 – кристаллические породы верхнемелового фундамента; 3 – «гранитный» слой; 4 – «базальтовый» слой; 5 – глубинные разломы; 6 – сейсмические границы по данным глубинного сейсмического зондирования; 7 – границы магматического очага по сейсмическим данным и коровой части его питающего канала; 8 – центр тяжести аномальных масс; 9 – предполагаемая форма магматического очага; 10 – область питания Авачинского вулкана по сейсмологическим данным. V_{n} – скорость продольных сейсмических волн

В 2012–2013 гг. авторами [1,2] методом низкочастотного микросейсмического зондирования изучалась глубинная структура среды под вулканом вдоль профиля ГСЗ. По результатам работ построен вертикальный разрез до глубины 20 км, отражающий распределение вариаций (в дБ) скоростей поперечных сейсмических волн в земной коре, относительно средней скоростной модели, рисунок 9.



Рисунок 9 – Глубинный разрез распределения относительных скоростей сейсмических волн микросейсмического профиля [1,2]. *I*–*X* – выделенные аномалии (описание в тексте)

Авторами [1,2] выделено несколько контрастных зон и дается их следующая интерпретация: *I* – низкоскоростная неоднородность максимальной мощностью 4 км, соответствующая слабо-консолидированным породам палеоген-неогенового возраста, заполняющим вулкано-тектоническую депрессию; ІІ – обширная (протяженность по профилю около 8 км, мощность до 10 км) высокоскоростная зона, верхний край которой соответствует кровле кристаллического мелпалеогенового фундамента депрессии, нижняя часть зоны относится к подошве нижней коры; III – высокоскоростная область, состоящая из двух частей – верхней, относящейся, вероятно, по мнению авторов [1,2], к постройке древнего вулкана (Пра-Авача) и нижняя часть до глубин 1,5–2 км ниже уровня моря, вероятнее всего, представляющая собой приподнятый блок кристаллического фундамента; IV – низкоскоростная аномалия, соответствующая Авачинскому грабену, ранее выделенному в работе [39] и представляющего собой систему разломов, в которой в настоящее время протекают активные тектонические процессы, а также, вероятно, по мнению авторов [1,2], поступают гидротермальные растворы с глубин 25–35 км [18,39,43]. Авторами [116] данная зона интерпретируется как скрытая несимметричная палеокальдера; V, VI и VII – субвертикальные низкоскоростные аномалии, уходящие на большую глубину, связанные, по всей видимости, по мнению авторов [1,2], с тектоническими

нарушениями в этом районе и относящиеся к кольцевым разломам, наличие которых также подтверждается экструзиями И шлаковыми конусами, расположенными вокруг вулкана; VIII – низкоскоростная зона упругих волн максимальной мощностью 3 км, состоящая из пород четвертичных отложений пирокластических потоков андезито-базальтового и андезитового состава в верхней части и слабо-консолидированных пород неогенового возраста в нижней части; ІХ – обширная высокоскоростная область, представляющая собой северовосточный борт вулкано-тектонической депрессии, с наблюдаемым уменьшением толщи рыхлых отложений и неглубоким залеганием поверхности верхнемеловой толщи; Х – субвертикальная низкоскоростная неоднородность столбообразного вида, глубиной более 20 км, связанная, вероятно, по мнению авторов [1,2], с зоной магматического питания вулкана, которая представляет из себя систему магматических каналов и очагов. Зона периферического магматического очага по данным микросейсмического зондирования, в явном виде, авторами [1,2] не выделяется.

Таким образом, строение района Авачинского вулкана и приуроченной к нему Авачинской геотермальной площади характеризуется сложным и неоднородным строением, как по вертикали, так и по горизонтали, что также подтверждается результатами комплекса геофизических работ, выполненными различными методами в районе объекта исследования [5,17,27,42,43].

1.3. Гидрогеологические условия системы

Гидрогеологические условия района Авачинской геотермальной площади определяются такими факторами как климат, геоморфологическое и геотектоническое строение территории.

Климатические условия в сочетании с широко развитой проницаемостью горных пород создают благоприятные условия для подземного стока вод. Среднегодовое количество осадков составляет чуть больше 1000 мм в год. За вычетом испарения, которое в среднем составляет 200 мм. Количество осадков,

обеспечивающих поверхностный и подземный сток, равно 800 мм в год. Суммарный модуль поверхностного и подземного стока составляет 25,3 л/с·км² [45].

По условиям циркуляция подземные воды района подразделяется на порово-пластовые, циркулирующие поровые И В рыхлых четвертичных пластово-трещинные отложениях трещинные, И трещинно-жильные И дочетвертичных пород и четвертичных эффузивов. Глубина циркуляции поровых, порово-пластовых и трещинных вод колеблется в широких пределах – от нескольких метров до 1000 м, составляя, в основном, 150-200 м. Пластовотрещинные воды могут фильтроваться на глубину 1000 и более метров, а трещинно-жильные – порядка нескольких километров [45].

Питание подавляющего большинства водоносных горизонтов и комплексов территории осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков, талых вод, часто, по мнению авторов [45], за счёт поглощения поверхностного стока. Водоносные горизонты и комплексы, залегающие на нижних гипсометрических отметках, подпитываются путём перелива подземных снежных горизонтов и комплексов, имеющих зеркало с более высокими абсолютными отметками.

Гидрогеологические данные района Авачинской геотермальной площади изображены на рисунке 10. Ниже приводится краткая характеристика основных выделяемых водоносных горизонтов и комплексов по данным авторов [46].

Слабоводоносный горизонт голоценовых болотных, озёрно-болотных отложений (b, lbQ_{IV}) . Водовмещающие образования горизонта развиты на правобережье р. Авача и представлены различными типами торфов мощностью до 3,5 м.

Воды горизонта поровые, преимущественно безнапорные, редко слабонапорные.

Немногочисленные одиночные родники имеют дебиты 0,01-0,1 л/с.

Питание подземных вод горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, подземных вод сопряженных водоносных комплексов.



Рисунок 10 – Фрагмент гидрогеологической карты и разрез вдоль линии В-Г [34].

1 – водоносный комплекс верхнеплейстоцен-голоценовых вулканогенных образований стратовулканов и полей ареального вулканизма (vQ_{III-IV}); 2 – слабоводоносный горизонт голоценовых болотных, озёрно-болотных отложений (b,lbQ_{IV}); 3 – водоносный горизонт верхнеплейстоцен-голоценовых морских и дельтовых отложений (*m*,*amQ*_{III-IV}); 4 – водоносный горизонт голоценовых пролювиально-пирокластических и пролювиальных отложений (*р* π , *p Q*_{*IV*}); 5 – относительно водоносный комплекс верхнеплейстоценовых ледниковых отложений $(gQ_{III}^{2+4}); 6$ – относительно водоносный комплекс олигоценсреднемиоценовых осадочно-вулканогеных образований (P_3 - N_1^2); 7 – водоносные зоны верхнемеловых метаморфизованных образований (К₂); 8 – вулканогенные и интрузивные образования среднего состава, преимущественно лавы андезитов; 9 вулканогенные интрузивные образования И основного состава, преимущественно базальтов; 10 лавы _ вирокластические рыхлые плейстоценовые и голоценовые отложения преимущественно среднего состава; 11 пролювиальные плейстоценовые и голоценовые рыхлые отложения преимущественно среднего состава; 12 водно-ледниковые верхнеплейстоценовые рыхлые плейстоценовые и голоценовые отложения преимущественно среднего состава; 13 – границы фациальных и литологических подразделений одного и того же возраста; 14 - a) основное направление движения вод. направление снижения напоров, подземных б) сверху индекс гидрогеологического подразделения; 15 – участки самоизлива подземных вод и индекс гидрогеологического подразделения; 16 - участки поглощения подземного стока; 17 - участки интенсивной инфильтрации или инфлюации поверхностных вод через дно рек и ручьев; 18 - участки рек, в которые разгружаются подземные воды; 19 - линия уровня подземных вод со свободной поверхностью с индексом водоносного подразделения: *a*) установленная, δ) предполагаемая; 20 - линия пъезометрического уровня подземных вод, установленная С индексом водоносного подразделения.

Водоносный горизонт голоценовых пролювиально-пирокластических и пролювиальных отложений ($p\pi$, $p Q_{IV}$). Водовмещающие образования горизонта слагают предгорный шлейф у подножия Авачинско-Корякской группы вулканов. В их разрезе преобладает дресвяно-щебенистый и гравелисто-галечниковый материал с валунами и глыбами, с супесчаным, песчаным и гравийным заполнителем. Мощность отложений изменяется от 10 до 15 м до 80-130 м.

Коэффициенты фильтрации водовмещающих образований изменяются от 0,01-5 м/сут до 17-18 и даже 30 м/сут. Отложения, слагающие периферийные части шлейфа, характеризуются более низкими величинами водопроницаемости,

чем отложения центральной их части. Воды горизонта поровые и поровопластовые, безнапорные и напорные.

Преобладающие дебиты одиночных родников составляют 0,1-1,0 л/с. Реже встречаются водопроявления с дебитами от 5 до 20 л/с. Среди групповых родников чаще отмечаются водопроявления с суммарными дебитами от 0,1 до 1,0 л/с и от 4,0 до 5,0 л/с.

Дебиты скважин варьируют от сотых долей до 10-15 л/с и более, а удельные дебиты – от тысячных и сотых долей до 4-5 л/с м. Скважины, пройденные в присклоновой части вулканических построек, имели дебиты 3 и 4 л/с, удельные дебиты – 0,08 и 0,2 л/с м [46]. В центральной части шлейфов дебиты скважин изменяются, в среднем, от 7,3 до 10 л/с, удельные дебиты – от 1,3 до 3,3 л/с м.

Относительно водоносный комплекс верхнеплейстоценовых ледниковых отложений (gQ_{III}^{2+4}) . Отложения ледников первой и второй стадии верхнеплейстоценового оледенения формируют грядово-холмисто-западинный рельеф у подножия Авачинско-Корякской группы вулканов.

Разрез водовмещающих образований представлен валунно-галечным материалом с примесью глыб (до 2 м в поперечнике) и щебня, с песчаным и супесчаным, реже суглинистым заполнителем, галечниками и гравийниками с песком. Отложения, обычно, отличаются отсутствием слоистости и сортировки крупных обломков, невыдержанностью в разрезе и по простиранию прослоев различного состава. Мощность отложений составляет от 10 до 80 м.

В обводненных частях разреза формируются поровые и порово-пластовые безнапорные или слабонапорные воды. Появление последних обусловлено наличием в разрезе относительно непроницаемых суглинистых прослоев.

Глубина залегания грунтовых вод комплекса изменяется от 1,5 до 50 м, в среднем составляя 2-7 м.

Дебиты одиночных родников изменяются от 0,01 до 10 л/с, редко более. Групповые родники характеризуются дебитами 0,1-80 л/с. Дебиты скважин изменяются от 3,3-5 л/с до 7,5-10,0 л/с. Удельные дебиты колеблются от 0,33-0,66 л/с м до 13,3 л/с м.

Относительно водоносный комплекс олигоцен-среднемиоценовых осадочновулканогеных образований (P_3 - N_1^2). В пределах рассматриваемой территории водовмещающие образования комплекса вскрыты только в глубоких скважинах. Водовмещающие образования представлены переслаиванием туфоалевролитов, туфопесчаников, туфогравелитов и туффитов с прослоями туфов. Породы дислоцированы и, часто, смяты в пологие складки.

Обводненность пород комплекса интенсивностью связана С ИХ трещиноватости. Поровая пустотность развита слабо. Наибольшие значения общей пористости составляют: для туфов и туффитов – 10-40%; туфопесчаников - до 23%; туфоалевролитов - 13,3%; туфоконгломератов - 4,6-15% [46]. Среди преобладают литогенетические, трещин тектонические И расширенные процессами выветривания.

Основным типом циркуляции подземных вод комплекса является трещинный и, реже, пластово-трещинный. С зонами разломов связаны воды трещинно-жильного, а с верхней частью зоны выветривания – порово-трещинного типов циркуляции.

В целом породы комплекса характеризуются как относительно слабо водообильные. По данным бурения вне зоны выветривания водообильность пород заметно уменьшается с глубиной, что, вероятно, по мнению автора [46], связано с уменьшением степени их общей пористости и трещиноватости.

Питание комплекса осуществляется за счет вод смежных гидрогеологических подразделений. По зонам разломов возможно поступление на поверхность вод глубокой циркуляции в виде восходящих родников или, наоборот, поглощение поверхностного стока.

Водоносные зоны верхнемеловых метаморфизованных образований (K₂). Разрез водовмещающих образований представлен кремнистыми сланцами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, туфогенными алевролитами, туффитами и туфами, чередующимися с редкими прослоями метаморфизованных базальтов и андезитов. Мощность толщи не менее 3000 м.

В скважинах, пробуренных вне зон тектонических нарушений, породы на глубине оказались практически безводными [46]. В процессе бурения скважины Г-1 при вскрытой мощности 2434 м, в образованиях верхнемелового возраста выявлено всего три трещиноватых зоны с незначительными водопритоками в интервалах 1780-1800, 2412-2422 и 2500-2530 м. По данным опытных работ рассчитанные в этой скважине коэффициент водопроницаемости и коэффициент пьезопроводности составили 0,042 м²/сут и 501 м²/сут, соответственно [45].

В породах верхнемелового возраста циркулируют преимущественно трещинные и трещинно-жильные воды. Скважины с высокими дебитами, как правило, располагаются в пределах зон водовыводящих тектонических нарушений, трещинно-жильные воды которых интенсивно подпитывают воды зоны выветривания.

1.4. Геохимические условия системы

В 2015 г. в рамках научно-исследовательских работ НИГТЦ ДВО РАН выполнил рентгенофазовый анализ (метод корундового числа) образцов, отобранных из керна 10-метровых термометрических скважин, пробуренных на Авачинской геотермальной площади. По результатам анализа авторами [50] установлено, что петрографический состав пород представлен пористыми (от 1-2 до 25%) пироксен-плагиоклазовыми андезибазальтами, базальтами, андезитами, реже туфами. Подобные образования характерны для верхней части разреза. Они пестроокрашенные: преобладают темно-серые, серые, розовато-серые, бордовокрасные (за счет «ожелезнения») цвета; для андезибазальтов и андезитов характерна порфировая (от мелкокрупнопорфировой), ДО иногда псевдобрекчиевая структура, для базальтов –афировая. Основными минералами пород являются плагиоклаз, кварц, пироксены, магнетит. Плагиоклаз представлен, в основном, анортитом (Na_{0.5}Ca_{0.5}Al_{1.5}Si_{2.5}O₈). Из минералов, отвечающих по составу кремнезему (SiO₂), встречены α-кварц, β-кварц. Минералы группы магнетита входят в состав породы как в виде собственно магнетита (Fe₃O₄), так и

 $(Fe(Fe,Ti)_2O_4),$ магниеферрита $(MgFe_2O_4).$ титаномагнетита В породах минералы трехвалентного присутствуют также различные железа: гетит (FeO(OH)), гематит (Fe₂O₃), берналит (Fe(OH)₃; Fe(OH)₃ \cdot 0,25H₂O), лепидокрокит $(KFe_3(SO_4)_2(OH)_6).$ В $(Fe_2O_3 \cdot H_2O)$, ярозит незначительных количествах диагностируются оливин, слюды, эпидот, рутил, титанит, шпинель и др.

В работе [35] авторами были исследованы продукты последних извержений Авачинского вулкана, а также его конуса. Установлено, что породы представлены базальтами, андезибазальтами, андезитами и дацитами. Наиболее распространены андезибазальты (62%), андезиты (22,7%) и базальты (14%).

Среди базальтов авторами [35] были выделены высокомагнезиальные хромдиопсидовые базальты необычного состава, магнезиальные базальты, обычные известково-щелочные базальты и высокоглиноземистые базальты (таблица 1). Изменчивость состава базальтов не позволяла авторам [35] разделить их на толеитовую и известково-щелочную серии, так как только один базальт по всем критериям отвечал содержанию известково-щелочной серии, остальные имели признаки, свойственные обеим сериям.

Также, авторами [35] установлено и разнообразие минералогического состава пород, в целом с преобладанием плагиоклаза. Отмечена значительная неоднородность плагиоклаза по составу от оликоглаза до анортита, что особенно свойственно для андезито-базальтов и андезитов. В ядрах кристаллов часто присутствуют анортиты. Их происхождение авторами [35] связывается с реакционным преобразованием пород субстрата при его плавлении и удалении альбитовой составляющей.

Окноли	Вулканиты						Ксенолиты					
Окислы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	50,77	50,80	51,50	52,21	54,84	58,80	65,12	43,82	43,12	50,40	53,89	59,10
TiO ₂	0,62	0,82	1,32	0,95	0,75	0,65	0,37	0,04	1,25	0,50	0,95	0,60
Al_2O_3	9,19	16,21	17,50	19,15	18,97	18,47	17,11	0,97	7,83	4,67	18,10	16,88
Fe ₂ O ₃	2,82	2,44	3,25	3,40	3,20	3,47	2,54	1,48	2,88	1,41	3,39	2,77
FeO	5,82	6,62	5,73	5,52	4,40	3,13	1,54	7,10	9,25	4,51	5,05	3,78
MnO	0,15	0,14	0,20	0,15	0,14	0,17	0,15	0,30	0,06	0,06	0,14	0,14
MgO	15,89	9,04	6,25	4,87	3,98	2,84	1,24	46,00	22,25	18,59	4,28	4,09
CaO	11,94	10,14	9,48	9,14	8,31	6,96	5,28	0,49	11,56	18,62	9,40	7,58
Na ₂ O	1,62	2,43	2,61	2,97	3,20	3,65	3,91	0,13	1,22	0,68	3,69	3,94
K ₂ O	0,29	0,59	0,54	0,69	0,74	0,86	1,17	0,08	0,17	0,06	0,66	0,85
H ₂ O-	0,12	0,18	0,49	0,26	0,39	0,39	0,21		0,60	0,39	0,27	0,33
H ₂ O+	0,17	0,44	1,12	0,45	0,78	0,45	1,20		0,00	0,00	0,01	_
P_2O_5	0,08	0,16	0,03	0,15	0,17	0,17	0,07		0,01	0,02	0,22	0,20
Сумма	99,48	100,06	100,02	99,91	99,87	100,01	99,91	100,41	100,20	99,91	100,05	100,26

Химический состав пород Авачинского вулкана, % массы [35]

Примечание. 1 – хромдиопсидовые базальты (3. ан.); 2 – магнезиальные базальты (5 ан.); 3 – известково-щелочные базальты (7 ан.); 4 – высокоглиноземистые базальты (12 ан.); 5 – андезито-базальты (123 ан.); 6 – андезиты (45 ан.); 7 – дациты (3 ан.); 8 – перидотит (10 ан.); 9 – пироксенит (1 ан.); 10 – пироксенит (1 ан.); 11 – габбро-диорит (2 ан.); 12 – кварцевый диорит (1 ан.)

1.5. Оценка тепловых ресурсов системы

В работе [99] авторами выполнена оценка мощности тепловой разгрузки Авачинского вулкана на основании геотермического опробования парящих площадок и фумарол кратера, а также вершины Молодого конуса (таблица 2). Максимальная температура газов на дне кратера достигала 700°С. Полученное значение тепловой мощности составило $5 \cdot 10^4$ ккал/с. Мощность тепловой разгрузки за счет теплопроводности пород, определенная с помощью плоских тепломеров, размещенных на западном склоне вулкана, превышала фоновое значение не более чем на $1 \cdot 10^3$ ккал/сек.

Таблица 2

Участки	Площадь, м ²	Температура, °С	Расход пара, м ³ /сек	Удельный вынос тепла, ккал/м ² ·час	Вынос тепла, 10 ⁷ ккал/час	Способ измерения
Северо-западные парящие площадки	$1 \cdot 10^{4}$	85	_	1000	1	Конус
«Красный Гребень»	$0,72 \cdot 10^4$	70	_	800	0,56	Конус
«Уступ»	0,1	160-170	4	_	0,5	Трубка Пито
«Северный Гребень»	0,05	100	0,1	_	0,09	Трубка Пито
«Восточные»	0,1	120	3	—	0,36	
Дно	1	700	60	—	3,6	_
Дно парящей площадки	0,4·10 ⁴	90	_	1200	0,49	_
Вынос тепла теплопроводностью	1,5·10 ⁵	_	_	2	0,03	Тепломер
Итого $6,86 \cdot 10^7$ ккал/час = $1,8 \cdot 10^7$ кал/сек						

Мощность естественных выходов тепла в кратере Авачинского вулкана [99]

Также в работе [99] на сеточном электроинтеграторе было получено распределение температуры вокруг эллипсоида вращения с полуосями 5,2 и 2,5 км и центром на глубине 4 км ниже уровня моря. Температура на поверхности эллипсоида принималась равной 1000°С. Результаты выполненного моделирования представлены на рисунке 11. По результатам моделирования

авторами [99] было установлено, что для бесконечно большого времени существования очага (стационарный режим) на расстоянии 20 км тепловое поле очага не создает геотемпературной аномалии.



Рисунок 11 – Распределение температуры под Авачинским вулканом после 20 тыс. лет образования магматического очага [99]. Сплошные геоизотермы – при стационарном режиме, пунктирная линия – геоизотерма 250°С после 20 тыс. лет образования магматического очага

Авторами [99] дана оценка тепловых запасов пород, вмещающих магматический очаг, в зависимости от глубины очага и удаленности от него. Количество теплоты магматического очага составило $2 \cdot 10^{17}$ ккал, за 20 тысячелетний период существования очага, количество теплоты во вмещающих очаг породах увеличится на $5 \cdot 10^{16}$ ккал. Таким образом, авторами [99] было установлено, что блок пород объемом 1 км³, с количеством тепловой энергии $2 \cdot 10^{14}$ ккал может находиться на глубине до 5 км и на удалении 6–8 км от вулкана.

В работе [72] авторами оценены запасы тепла горных пород, нагретых магматическим очагом, с момента его возникновения и до настоящего времени с учётом переменных размеров очага в процессе эволюции и накопления им тепла. При оценке запасов тепла форма очага аппроксимировалась сферой радиусом 2 км и эллипсоидами с большой и малой полуосями 4,6 и 3 км, соответственно, а

также 2,25 и 1,5 км. Исходные данные и результаты расчетов сведены в таблице 3. По результатам расчетов оценивался объем тороида, образованного массивом горных пород с температурой 200–350°С и ограниченного горизонтальными плоскостями на глубине 0,9 и 4 км от уровня моря. Оценки тепла, накопленного в тороиде объемом 154–266,5 км³ с температурой пород 200–350°С, составили от 0,86 до $1.48 \cdot 10^{20}$ Дж.

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчетов тепла, накопленного горными породами,

Глубина		Touronoruma	Объем зоны пород	Запасы тепла	
залегания очага	Размеры и форма	температура	с температурой	накопленного	
от уровня моря,	магматического очага		200-350 °С	очагом в тороиде,	
КМ		C	(тороид)	10 ²⁰ Дж	
2,0	Сфера, средний радиус 2 км	900	154,0	0,86	
1,5	Эллипсоид, большая полуось – 2,3 км, малая полуось – 1,53 км	900	177,6	0,99	
3,0	Эллипсоид, большая полуось – 4,5 км, малая полуось – 3 км	700	266,5	1,48	

вмещающими магматический очаг [72]

Также, авторами [72] даны оценки запасов тепла собственно магматического очага. Для малого эллипсоида с полуосями 2,3 и 1,53 км запасы составили $0,7 \cdot 10^{20}$ Дж при снижении температуры от 900 до 150°С, для большого эллипсоида с полуосями 4,5 и 3 км – $4,1 \cdot 10^{20}$ Дж при снижении температуры от 700 до 150°С.

В работе [28] автором выполнена оценка тепловой мощности фумарол Авачинского вулкана по высоте подъема шлейфа над кратером за период ноябрь 2008 г. по январь 2009 г. Расчетная средняя тепловая мощность и расход водного флюида за данный период составили 12 МВт и 4,5 кг/с, соответственно, а годовой вынос флюида составил 0,15 млн.т.
1.6. Выводы по главе 1 и постановка задач исследования

1. Проводимые с 1960-х гг. исследования и наблюдения за Авачинским вулканом свидетельствуют о его постоянной фумарольной активности. Максимальные температуры фумарол, измеренные в разные годы, составляют более 700°С.

2. По геолого-геофизическим данным установлено, что Авачинский вулкан располагается в вулканотектонической депрессии, выполненной палеогеннеогеновыми вулканогенно-осадочными породами. В основании вулкана выявлен глубокий грабен северо-западного простирания. Непосредственно под конусом располагается периферический магматический очаг.

3. Общая тепловая мощность объекта исследования по результатам измерений в кратере вулкана в 1977 г. оценивается в 75 МВт. По данным дистанционных измерений в 2008–2009 гг. средняя мощность действующих фумарол составляет 12 МВт.

Цель работы состоит в установлении рациональных схем извлечения теплового потенциала Авачинской геотермальной площади на основе исследования теплофизических процессов в массиве горных пород методом численного моделирования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка концептуальной модели Авачинской геотермальной площади;

- разработка трехмерной численной термогидродинамической модели Авачинской геотермальной площади;

- установление на базе численных экспериментов распределения температуры и фазового состояния флюида в горных породах системы в принятом и обоснованном диапазоне параметров;

- выполнение численных экспериментов по исследованию теплофизических и гидродинамических параметров надкритического теплового коллектора при его разработке по циркуляционной скважинной технологии типа «дублет» (одна нагнетательная и одна добычная скважины);

- установление рациональных технологических параметров циркуляционной системы типа «дублет» с целью освоения тепловых ресурсов Авачинской геотермальной площади.

2. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АВАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

2.1. Экспериментальное исследование тепловых свойств горных пород

Определение значений тепловых свойств горных пород необходимо для получения достоверных результатов термогидродинамического моделирования Авачинской геотермальной площади, а также для оценки тепловых ресурсов системы. В 2015 г. в Сколковском институте науки и технологий и в Технологической компании Шлюмберже были выполнены измерения комплекса тепловых свойств образцов пород, отобранных на Авачинской площади и из керна термометрических скважин, пробуренных в южной части исследуемого объекта [46,48].

Измерения тепловых свойств образцов проводились для сухого и водонасыщенного состояния, при атмосферных термобарических условиях. Для измерений теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости пород применялся неразрушающий, бесконтактный, прецизионный метод оптического сканирования [49].

В ходе теплофизических измерений для каждого образца стандартного керна определялись:

- теплопроводность λ_{//} вдоль линии параллельной направлению выбуривания керна (линия 1);
- теплопроводность λ_⊥ в направлении перпендикулярном направлению выбуривания керна (линия 2);
- объемная теплоемкость C;
- коэффициент тепловой неоднородности β_{//} вдоль линии 1;
- коэффициент тепловой неоднородности β_{\perp} вдоль линии 2;
- коэффициент тепловой анизотропии К.

Измерения тепловых свойств были проведены на коллекции из 57 образцов. Коллекция представлена, в основном, андезито-базальтами, редко базальтами и андезитами [49].

По результатам измерений было установлено, что исследованные породы характеризуются широкими вариациями тепловых свойств (таблица 4), что, в основном, обусловлено широким диапазоном пористости (1,88-29,7%). Об этом свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции между теплопроводностью и теплоемкостью пород в сухом состоянии и, с другой стороны, пористостью [49], а также степень изменения тепловых свойств образцов. Так, пород при водонасыщении среднее значение теплопроводности пород при водоносыщении увеличивалось на 50%, теплоемкости на 29%, коэффициента тепловой неоднородности на 30-50% [49]. Подобная зависимость теплопроводности и теплоемкости пород от их пористости была ранее также установлена для пород геотермальных месторождений Камчатки [47].

Таблица 4

	Сухие					Водонасыщенные							
Параметры	λ, Βτ/(м·К) <i>K</i>		K	β		С, МДж/ (м ³ ·К)	λ, Вт/(м·К)		K	β		С, МДж/ (м ³ ·К)	ористость, %
	λ_{\parallel}	λ_{\perp}			\perp		$\lambda_{/\!/}$	λ_{\perp}			\perp		Ш
Максимальное	1,75	1,65	1,13	0,57	0,29	2,32	2,08	1,93	1,11	0,18	0,25	2,68	29,7
Минимальное	0,49	0,82	1,00	0,05	0,11	1,08	1,11	1,32	1,00	0,04	0,06	2,04	1,88
Среднее	1,08	1,20	1,01	0,16	0,19	1,85	1,62	1,65	1,00	0,08	0,12	2,38	11,2
Среднеквадра-													
тическое	0,24	0,27	0,02	0,07	0,05	0,21	0,17	0,17	0,01	0,02	0,06	0,13	5,51
отклонение													

Статистические характеристики тепловых свойств пород [49]

2.2. Оценка параметров магматического очага и окружающих его горных пород

Впервые предположение существовании периферического 0 очага под Авачинским вулканом было сделано по магматического результатам рекогносцировочной гравиметрической съемки, выполненной в 1960-1962 гг. [76,77]. На вулкане была зафиксирована положительная гравитационная аномалия. Глубина залегания и форма аномального тела авторами [76,77] были определены методом подбора. Глубина залегания верхней кромки была определена в 1,5–2 км ниже уровня моря. В расчетах тело аппроксимировалось двухосным эллипсоидом. Размеры полуосей составили при плотности тела 2,85 г/см³ соответственно 5,2 и 2,5 км, а для плотности 3,15 г/см³ – 3,5 и 1,5 км [76]. Расчет, выполненный для тела в виде шара, дал глубину залегания центра 4 км. Для указанных плотностей гравитирующее тело отвечало базальтам или ультраосновным породам [76].

Авторами [76] было высказано предположение, что выделенное тело является магматическим очагом, питающим Авачинский вулкан. Вместе с тем, по результатам детальной аэромагнитной съемки и модельных расчетов распределения магнитного поля над Авачинским и Корякским вулканами было установлено, что гравитирующий объект, залегающий под Авачинским вулканом, магнитной аномалии не создает. В работах [76,77] отсутствие магнитной аномалии авторами было объяснено высокой температурой тела – выше точки Кюри для магнетита (>600°С).

Позднее, предположение о существовании магматического очага Авачинского вулкана было подтверждено сейсморазведочными работами методом КМПВ [10]. Было установлено, что аномальное тело пересекает границу фундамент – пирокластическая толща. Радиус сферического очага по расчетам для продольного профиля (кратер вулкана – р. Мутная на расстоянии 17,1 км от кратера) составил 5,2 км. Расчет для непродольного профиля дал меньшее значение радиуса – 3,6 км, что было объяснено авторами [10] несимметричностью тела относительно центра вулкана и вытянутостью его в северо-западном направлении – в направлении предполагаемого глубинного разлома, контролирующего положение Авачинско-Корякской группы вулканов.

В работе [99] на основании комплексного анализа результатов исследований, проведенных до 1976 г., были сделаны следующие выводы.

1. Периферический магматический очаг располагается на границе мелового фундамента и покрывающей вулканогенной толщи.

2. Глубина залегания по сейсмическим данным – 1,5 км от уровня моря, по гравиметрическим данным центр аномальных масс залегает на глубине 4 км.

 По данным сейсморазведки оценочный радиус в плоскости фундамента очага – 5,2±0,9 км, радиус наиболее «разогретой» части очага – 3,6 км.

4. По гравиметрическим данным при плотности пород очага 2,85−3,1 г/см³ его размеры – 5,2×2,6 км.

В 1979–1983 гг. была выполнена гравиметрическая съемка на площади 600 км² с максимально возможным сгущением сети наблюдений на постройках вулканов Авачинский и Корякский [27]. В районе вулканов были получены локальные аномалии гравитационного поля, характеризующиеся преимущественно северо-западным простиранием. Было выполнено трехмерное моделирование гравитационного поля под вулканом Авачинский. Полного совпадения с наблюденным полем авторами [27] достигнуто не было, однако удовлетворительное соответствие дала модель в соответствии с которой, очаг расположен на глубине 2–6 км ниже уровня моря, с поперечником 10 км и кровлей поднимающейся до уровня моря.

Также авторами [27] с помощью сопоставления гравиметрических и сейсморазведочных данных была построена гравитационная модель сейсмического разреза. В соответствии с моделью, максимальный радиус

очага был оценен в 5 км, радиус «разогретой» части – 2,5 км, глубина залегания – от 0 до 6 км ниже уровня моря.

В работе [39] на основе имеющихся гравиметрических, сейсмических и электромагнитных исследований создана комплексная геолого-геофизическая модель земной коры под Авачинским вулканом (рисунок 12). Модель включает коровую зону повышенной трещиноватости с наличием гидротермальных растворов. На глубине 15–25 км располагается магматический очаг (D), в который, вероятно, по мнению авторов [39], поступает магма из верхней мантии. Выше, на глубине 6–10 км располагается интрузия (C). В верхних слоях земной коры выделяется Авачинский грабен (B). В интервале глубин 0–2 км под постройкой вулкана располагается периферический магматический очаг (A).



Рисунок 12 – Глубинная модель Авачинского вулкана [39]. 1 – границы мелового фундамента (*a*) и Авачинского грабена (*b*); 2 – зона повышенной трещиноватости с наличием жидких флюидов по электромагнитным данным; 3 – по сейсмическим данным: *A* – периферический магматический очаг; *B* – то же, что в п. 2; *E* – предполагаемая зона глубинного разлома; *C* – интрузия; *D* – предполагаемый коровый магматический очаг; 4 – пути движения жидких флюидов; 5 – предполагаемое поступление магмы из мантийного источника

В работе [72] авторами выполнено моделирование роста и развития магматического очага Авачинского вулкана при сферической аппроксимации его формы. При расчетах принимались следующие исходные данные: глубина залегания очага – 2 км от уровня моря, температура вмещающих

пород – 150°С, температура поступающей в очаг магмы – 1250°С, вытекающей из очага магмы – 900°С, температура плавления вмещающих пород – 900°С. Зависимость радиуса очага рассчитана при суммарном расходе магмы 380 км³ за все время существования вулкана. Расчетное значение среднего радиуса сферического очага составило 2 км.

На основании вышеизложенного, по комплексу накопленных геологогеофизических данных по объекту исследования, в том числе по данным сейсмического разреза [39], представленного на рисунке 13, автором совместно С Пашкевичем Р.И. разработана концептуальная модель Авачинской геотермальной площади, рисунок 14. В соответствии со скоростными границами продольных волн и зонами сейсмических аномалий в модели выделены 8 слоев горных пород (доменов). В том числе, область повышенной проницаемости горных пород, выделенная на основании данных эпицентров землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г. (домены 3 и 5). Также, вследствие постоянной фумарольной деятельности вулкана в пределах его постройки выделена флюидопроводящая зона, образованная системой контракционных трещин и связывающая магматический очаг с дневной поверхностью вулкана (домен 9).



Рисунок 13 – Сейсмический разрез вдоль профиля ГСЗ [39]. 1 скоростные границы (*a*) и выделенная граница мелового фундамента (*b*); 2 – отражающие площадки; 3 – эпицентры землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г.; 4 – точки дифракции; 5 – зоны сейсмических аномалий скорости (*B*, *C*, *D*) и поглощения (*A*); 6 –скорости V_p волн, определенные способом сейсмической томографии



Рисунок 14 – Разрез концептуальной модели с изображениями пород и магматическим очагом. Кругами показаны эпицентры землетрясений по данным сейсмического разреза

Геологические характеристики горных пород, слагающих домены модели, определены по данным геологического разреза по С.Е. Апрелкову [45] (рисунок 15) и сведены в таблице 5. Значения теплофизических свойств приняты по результатам измерений на образцах, отобранных в пределах [46,48]. Измерения свойств Авачинской площади проводились В Сколковском институте науки и технологий и в Технологической компании Шлюмберже. Также использовались данные прошлых лет, в том числе гидрогеологические, полученные по образцам керна скважин, пробуренных за границей моделируемой области. Гидрогеологические и теплофизические свойства горных пород, слагающих домены модели, сведены в таблице 5.



Рисунок 15 – Фрагмент схематической геологической карты района Авачинского вулкана, составленной по материалам С.Е. Апрелкова [45].

45

Четвертичная система: 1 - Современный отдел. Андезиты, базальты и их туфы. 2 - Верхний и современный отделы. Делювиально-пролювиальные отложения. 3 - Верхний и современный отделы. Андезиты, базальты и их туфы. 4 - Верхний отдел. Туфы андезитов и базальтов. 5 - Средний и верхний отделы. Туфы базальтов и андезитов, реже дацитов.

Палеогеновая и неогеновая системы: 6 - Верхний миоцен-плиоцен. Алнейская серия. Андезиты, базальты, их туфы и туффиты.

Меловая система: 7 - Ирунейская. Кремнистые сланцы, алевропелитовые, псаммитовые туффиты, туфы, порфириты. 8 - Хозгонская свита. Рассланцованные песчаники, филлиты.

9 - Разломы предполагаемые. 10 - Магматический очаг

2.3. Оценка начальных и граничных термогидродинамических условий

Геотермические условия района Авачинской площади можно оценить по шести скважинам: ГК-1, ГК-2, ГК-2а, Г-1, Р-2, Р-3, находящимся в 15-25 км от объекта исследования. По скважинам наблюдаются некоторые вариации значений геотермического градиента в пределах одних и тех же отложений, что может указывать на некоторое уплотнение пород вниз по разрезу [45]. В среднем геотермический градиент колеблется в пределах 1,6–2,6°С/100 м.

В работах [52-54] автор для района Корякско-Авачинской группы вулканов определил средний геотермический градиент равный 3,75°С/100 м, а также оценил плотность регионального теплового потока в 105 мВт/м² в вулканической зоне Камчатки, основанную на оценках объема вулканических изверженных материалов.

Ввиду отсутствия буровых работ непосредственно на исследуемом объекте, уровень подземных вод и реальное распределение давления флюида в горных породах неизвестны. В работе [32] выполненное моделирование гидродинамических процессов в Авачинско-Корякском вулканогенном бассейне дало значение уровня подземных вод под постройками вулканов Авачинский и Корякский равное + 900 м абс. Также авторами [32] установлено, что областью водного питания Корякских Нарзанов, Изотовс-

Гидрогеологические и теплофизические характеристики доменов модели Авачинской геотермальной площади

No		Геологические хара	ктеристики		Плотиоот	Таннанрараниаати	Теплоемкость, кДж/кг·К	
домена модели	Система	Название отдела, серия	Породы	Пористость	кг/м ³	Вт/м·К		
1	Четвертичная	Современный средний и верхний	Андезиты, базальты и их туфы	0,07 [33]	2600 [33]	1,6 [46,48]	1 [47,49]	
2	Палеогеновая и неогеновая	Верхний миоцен- плиоцен. Алнейская серия	Андезиты, базальты их туфы и туффиты	0,01 [33]	2500 [75]	2,7 [45]	1 [47,49]	
	Палеогеновая и неогеновая	Верхний миоцен- плиоцен Алнейская серия	Андезиты, базальты их туфы и туффиты		2600 [75]			
3*	Меловая	Ирунейская свита	Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты	0,05 [33]		2,0 [81]	0,9 [11,75]	
4 Мело	Меловая	Ирунейская свита	Кремнистые сланцы алевропелитовые, псаммитовые, туффиты, туфы, порфириты	0,01 [75]	2650 [75]	2,7 [81]	0,9 [11]	
		Хозгонская свита	Рассланцованные песчаники, филлиты					
5**				0,07 [45]	2650 [75]	2,7 [81]	0,9 [11]	
6	Меловая	Хозгонская свита	Рассланцованные песчаники, филлиты	0,01 [75]	2700 [75]	2,7 [81]	0,9 [11]	
7			-«-	0,07 [45]	2700 [75]	2,7 [81]	0,9 [11]	
8			-{<-	0,01 [75]	2700 [75]	2,7 [81]	0,9 [11]	
9	Іетвертичная Современный средний и верхний		Андезиты, базальты и их туфы	0,05 [33]	2600 [75]	2,0 [81]	0,9 [11]	

* - зона с эпицентрами землетрясений за периоды 1994 г. и 1997 г.
 ** - зона сейсмических аномалий скорости и поглощения

кого и Пиначевского источников, а также скважин Быстринского месторождения пресных подземных вод являются склоны вышеуказанных вулканов, за счет таяния ледников на отметках 1800–2500 м абс.

2.4. Установление вариантов реализации модели для двух случаев доминирующего теплопереноса в горных породах: кондуктивного и конвективного

Гидрогеологические параметры Авачинской геотермальной площади известны небольшого участка, находящегося только для на границе моделируемой области – по данным скважины ГК-2а, ликвидированной в настоящее время. Теплоперенос в горных породах Авачинской площади может происходить как конвекцией, так И теплопроводностью (кондукцией). Кондуктивный тип преобладает при проницаемости горных пород менее 10⁻³ мД. На основе анализа данных сейсмического разреза вдоль профиля ГСЗ (рисунок 13) области горных пород с наибольшей плотностью эпицентров землетрясений за периоды 1994 г и 1997 г. автором совместно с Пашкевичем Р.И. были интерпретированы как области повышенной проницаемости, в которых происходит конвективный теплоперенос (домены 3 и 5), рисунок 14. Доминирующий кондуктивный тип теплопереноса реализовывался заданием проницаемости горных пород равной 10⁻³ мД. В случае доминирующего теплопереноса проницаемость горных пород конвективного постройки увеличивалась до 1 мД, а области повышенной проницаемости до 5 мД. Последнее значение принято по установленным значениям коэффициента фильтрации по результатам пробных откачек в скважине ГК-2а [45].

2.5. Выводы по главе 2

1. По комплексу накопленной геолого-геофизической информации концептуальная модель Авачинской геотермальной площади включает: 8 доменов

(слоев горных пород), выделенных по скоростным границам продольных сейсмических волн, в том числе область повышенной проницаемости горных пород, выделенная по данным распределения эпицентров землетрясений; магматический очаг, расположенный под конусом вулкана; флюидопроводящую зону, образованную системой контракционных трещин.

2. Действительная форма и размеры магматического очага неизвестны. Наиболее вероятными являются размеры 5,2 км для большой и 2,5 км для малой полуоси, либо 3,5 и 1,5 км, соответственно. Предположительная форма очага – эллипсоид.

3. Теплоперенос горных Авачинской В породах площади может происходить конвекцией, так И теплопроводностью (кондукцией). как Кондуктивный тип теплопереноса преобладает при проницаемости горных пород менее 10⁻³ мД.

3. ТРЕХМЕРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ПЛОЩАДИ

3.1. Разработка численной модели системы

3.1.1. Программные комплексы для моделирования тепломассопереноса

В настоящее время существует ограниченное количество программных комплексов (ПК) для моделирования процессов теплопереноса в породах геотермальных систем, учитывающих свойства воды в надкритической области, таблица 6, в том числе свободно распространяемый ПК HYDROTHERM, разработанный в Геологической службе США в период 1970–2008 гг. [104,110]. ПК специально был разработан для трехмерного моделирования многофазного потока воды и тепла в проницаемых средах в диапазоне температуры и давления соответственно 0-1200°С и 0,05-1000 МПа, включающей область существования воды В надкритическом состоянии И поэтому адекватном условиям, встречающимся в задачах остывания интрузий, теплопереноса в масштабе земной коры и глубоких зон больших гидротермальных систем, а также магма- и вулканогеотермальных систем. ПК использовался для моделирования: магмагидротермальных систем вулканов Каскадных гор, США; взрывов постройки вулкана Майон, Филлипины, за счет нагрева от удаленной магматической интрузии; вулканомагнитных эффектов, наблюдавшихся на вулканах Асо, Япония и Вулькано, Италия, вызываемых гидротермальной деятельностью; магмагидротермальной системы вулкана Унзен, Япония; изменения режима магмагидротермальной системы вулкана Куджу, Япония, после фреатического извержения 1995 г.; теплопереноса в породах Мутновской магмагеотермальной системы на Камчатке, РФ; Эвганийского геотермального поля с целью верификации Северная концептуальной модели, Италия: возможного возникновения и развития гидротермальной системы в Чесапикском ударном кратере, США.

Характеристики современных программных комплексов, используемых для моделирования теплопереноса

	Диапазон і	параметров	Объект приложения при надкритических параметрах			
Паименование (разработчик)	Давление, МПа	Температура, °С	(источник)			
HYDROTHERM [104,110]	0,05–1000 0–1200		Магмагеотермальные системы вулканов Куджу, Япония [97], Унзен, Япония [100], Каскадных гор, США [107], Мерапи, Индонезия [103], Майон, Филлипины [134], Мутновский, Россия [126], Унгаран, Индонезия [140], нефтяные месторождения [129], Чесапикский ударный кратер, США [136], Гидротермальная система Лассена, Калифорния, США [108] Эвганийское геотермальное поле. Северная Италия [128]			
STAR, расширение HOTH20 [131]	0,1–100	0-800	Вулкан Усу, Япония [121]			
TOUGH2, сверхкритическая версия Кислинга [112]	0–200	0–2000	Вулканическая зона Таупо, Новая Зеландия [113]			
TOUGH2, блок свойств воды EOS1SC, расширение Бриковского [92]	0–100	0–1000	Надкритический вариант тестовой задачи Пруесса RFP [92,132]			
TOUGH2, сверхкритическая версия Кроучера и Сулливана [95]	0–100 0–800 H		Надкритический вариант тестовой задачи RFP [95]			

в породах магмагеотермальных систем

Математическая модель в ПК HYDROTHERM основывается на системе уравнений сохранения массы и энергии, выраженных через величины давления и энтальпии. Использование давления и энтальпии в качестве зависимых переменных однозначно определяет термодинамическое состояние флюида и в одно- и в двухфазном состоянии и, кроме того, позволяет избежать вычислительные трудности в окрестности критической точки воды, включая сингулярность теплоемкости и расхождение частных производных плотности [104].

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\rho_w S_w + \rho_s S_s \right) \right] - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{k} k_{rw} \rho_w}{\mu_w} \left(\nabla p - \rho_w \mathbf{g} \right) - \frac{\mathbf{k} k_{rs} \rho_s}{\mu_s} \left(\nabla p + \rho_s \mathbf{g} \right) \right] - q_{sf} = 0$$
(1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \phi) \rho_r h_r + \phi (s_w \rho_w h_w + s_s \rho_s h_w) \right] - \nabla \cdot \left[\frac{\mathbf{k} k_{rw} \rho_w h_w}{\mu_w} (\nabla p + \rho_w \mathbf{g}) - \frac{\mathbf{k} k_{rs} \rho_s h_s}{\mu_s} (\nabla p - \rho_s \mathbf{g}) \right] - \nabla \cdot \mathbf{K}_a \mathbf{I} \nabla T - q_{sh} = 0$$
(2)

где ϕ – пористость; ρ_w , ρ_s , ρ_r – плотность жидкости, пара и пород; k_{rw} , k_{rs} – соответственно относительные фазовые проницаемости; μ_w , μ_s – динамические вязкости жидкости и пара; K_a – эффективная теплопроводность насыщенной жидкостью и паром среды; h_w , h_s , h_r – энтальпии жидкости, пара и пород; **I** – единичный тензор, q_{sf} и q_{sh} – расходы массы и тепла источников и стоков.

В модели приняты следующие упрощения: флюид является чистой водой; справедлив обобщенный закон Дарси; капиллярными эффектами можно пренебречь; относительные проницаемости являются функциями насыщения водой, не имеющими гистерезиса; порода и вода находятся в локальном термодинамическом равновесии; теплопередачей, дисперсией и излучением можно пренебречь; пористость линейно зависит от давления; энтальпия породы линейно зависит от температуры; пористость, абсолютная проницаемость и теплопроводность могут изменяться во времени и пространстве; плотность и теплоемкость пород являются постоянными величинами.

3.1.2. Определение размеров моделируемой области и свойств ее доменов

На основе принятой во 2 главе концептуальной модели Авачинской геотермальной площади, автором совместно с Пашкевичем Р.И. разработана трехмерная численная термогидродинамическая модель системы.

Модель Авачинской геотермальной площади можно представить как массив горных пород вмещающих магматический очаг. Область моделирования вытянута в плане в северо-восточном направлении и симметричная относительно осевой линии очага, находящегося под конусом Авачинского вулкана, рисунок 16. Размер области моделирования в плане составляет 9×26 км. Боковые и нижняя границы модели приняты плоскими, глубина модели ниже уровня моря – 5 км, с учетом постройки вулкана – 8 км. Верхняя граница задавалась с учетом фактического рельефа вулкана.



Рисунок 16 – Область моделирования с координатной сеткой (вид сверху) и проекцией магматического очага (окружность). *i*=21, *i*=24, *j*=13 – вертикальные разрезы модели; ГК-2а – скважина

Магматический очаг принят по комплексу геолого-геофизических данных в виде эллипсоида вертикального вращения с размером большой полуоси 2,25 км и малой – 1,5 км [5-10,16-19,27,39,40,65-71,76,77]. Положение верхней кромки магматического очага принято на уровне моря согласно данным [39,40]. Расчеты производились для трех вариантов температуры стенки очага: 700, 900 и 1000°С.

В постройке вулкана задана флюидопроводящая зона размером 900×900 м в горизонтальном сечении, гидравлически связывающая дневную поверхность и магматический очаг. Зона образована системой контракционных трещин, возникших в результате остывания жерла.

На рисунке 17 изображен центральный разрез численной модели с изображением доменов, а также начальных и граничных условий. В модели принято начальное распределение температуры, соответствующее среднему геотермическому градиенту в 30°С/км, и давление равное гидростатическому. На верхней границе модели приняты постоянная температура 10°С и атмосферное давление 0,1МПа, на нижней границе – постоянный тепловой поток 120 мВт/м². На боковых границах области моделирования задавалось отсутствие потока флюидов.



Рисунок 17 – Центральный разрез численной модели с изображением доменов, начальных и граничных условий. Эллипс – магматический очаг; цифры в кружках – номера доменов (слоев пород); q – региональный тепловой поток; Q – массовый расход на границах модели; T, P – температура и давление; P_{amm} , P_{ccm} – атмосферное и гидростатическое давление; k=12, k=14 – горизонтальные разрезы модели

Плотность, теплоемкость, теплопроводность и пористость пород приняты различными для каждого домена, таблица 5. Значения входных параметров для моделирования приведены в таблице 7.

Таблица 7

Тип модели	А	В		
Способ теплопереноса	кондуктивный	конвективный		
Форма оцага	горизонтальный	горизонтальный		
Форма очага	эллипсоид	эллипсоид		
Размеры большой и малой полуосей	2 25.1 5	2,25;1,5		
очага, км	2,23,1,5			
Глубина залегания центра очага ниже	15	1,5		
уровня моря, км	1,5			
Температура стенки очага, °С	700; 900; 1000	700; 900; 1000		
Региональный тепловой поток, мВт/м ²	120	120		
Плотность пород, кг/м ³	25002700	25002700		
Проницаемость пород, мД	0,001	0,0015		
Пористость пород	0,010,07	0,010,07		
Теплопроводность пород, Вт/м К	1,62,7	1,62,7		
Теплоемкость пород, кДж/кг К	0,91	0,91		

Параметры, варьируемые в численных экспериментах

3.1.3. Дискретизация доменов системы и параметров вычислительной сетки

Вычислительная сетка модели сгенерирована в препроцессоре ПК HYDROTHERM [104,110]. Для дискретизации фактического рельефа Авачинской площади в ПО Global Mapper автором строились разрезы вдоль моделируемой области (рисунок 18) с последующим наложением сгенерированной в препроцессоре численной сетки. Всего было построено более 100 разрезов (профилей) с шагом 50 м.



Рисунок 18 – Центральный разрез модели, полученный из ПО Global Mapper

Скорость численных расчетов определяется количеством блоков численной модели. Для получения возможности анализа большего количества вариантов расчета, необходимо упрощать вычислительную сетку модели, оставляя ее существенные стороны. Исходя ИЗ вышесказанного, полученная сетка разрежалась в областях, не подверженных влиянию температурного поля, создаваемого очагом. Таким образом, исходная численная сетка была упрощена до нерегулярных размеров с наиболее мелкими блоками размером 300×300 м в области непосредственной близости к очагу и наиболее крупными размером 900×900 м у боковых границ модели. В результате получившаяся сетка состоит из 52, 25 и 26 узлов по осям x, y, z соответственно, и общего количества блоков – 33800 шт. Боковые границы модели заданы непроницаемыми толщиной по 50 м. Координатная сетка модели вдоль плоскости ху изображена на рисунке 16. Полученные разрезы модели в плоскости *xz* с дискретизацией рельефа и доменов модели изображены на рисунке 19. Блоки модели, выделенные белым цветом – неактивные, по терминологии, принятой в руководстве ПК HYDROTHERM [104,110].



Рисунок 19 – Вертикальные разрезы через модель по оси у с изображением доменов. Порядковая нумерация разрезов от восточной границы модели (рисунок 16)





Окончание рисунка 19

3.2. Результаты и анализ численных экспериментов по исследованию теплопереноса в горных породах системы

Для исследования процессов теплопереноса в горных породах Авачинской геотермальной площади автором совместно с Пашкевичем Р.И. выполнена серия численных экспериментов по двум типам моделей A и B. Модели включают магматический очаг с постоянной температурой на поверхности и окружающие его горные породы. По двум моделям была произведена серия расчетов для значений температуры стенки очага равной 700, 900 и 1000°С. В модели A для окружающих очаг горных пород задавался кондуктивный способ теплопереноса, для модели B – конвективный. Форма очага – горизонтальный эллипсоид с вертикальной осью вращения с большой и малой полуосями 2,25 и 1,5 км, соответственно. Моделирование проводилось до времени 60 тыс. лет, что соответствует возрасту Авачинского вулкана [69].

По результатам численных экспериментов на разработанной термогидродинамической модели получены распределения температуры и фазового состояния флюида.

На рисунках 20 и 21 представлено распределение параметров для случаев доминирующего кондуктивного и конвективного теплопереноса, соответственно.

На рисунке 22 дополнительно представлены вертикальный и горизонтальный разрезы через область горных пород с температурой 200–400°С в зоне повышенной проницаемости (домен 3 и 5) при температуре стенки очага равной 1000°С.



Рисунок 20 – Распределение температуры и фазового состояния флюида на момент времени 60 тыс. лет в варианте с доминирующим кондуктивном теплопереносом при различных температурах стенки очага: *a* – 700°C, *б* – 900°C, *в* – 1000°C. На вертикальных разрезах (*j*=13 и *i*=24) по вертикальной оси – глубина (км), по горизонтальной – ширина (км), на горизонтальном разрезе (*k*=12) по вертикальной оси – ширина (км), по горизонтальной – длина (км)



^а *Рисунок 21* – Распределение температуры и фазового состояния флюида на момент времени 60 тыс. лет в варианте с доминирующим конвективным теплопереносом при различных температурах стенки очага: *a* – 700°C, *b* – 900°C, *b* – 1000°C



Рисунок 22 – Распределение температуры в вертикальном сечении модели (разрез *i*=21, рисунок 16) и горизонтальном (разрез *k*=14, рисунок 17)

3.2.1. Вариант доминирующего кондуктивного теплопереноса

По результатам численных экспериментов установлено, что вокруг очага, за исключением верхней его части, на расстоянии 1–1,5 км от стенки, развивается зона конвекции надкритического флюида (рисунок 20). Вблизи поверхности очага образуется область перегретого пара шириной около 1 км. В результате высокого гидрогазодинамического сопротивления пород постройки периферийная область влажного пара отсутствует.

С ростом принимаемой в расчетах температуры стенки очага происходит расширение областей конвекции надкритического флюида и перегретого пара.

Наблюдается более интенсивный прогрев окружающих очаг пород, возрастает геотермический градиент в породах постройки. Также установлено, что значительное влияние на температуру окружающих пород магматический очаг оказывает на расстоянии 6 км от своей оси, а на удалении более 12-14 км, не воздействует на геотемпературный фон, что согласуется с результатами замеров температур в скважине ГК-2а, находящейся на границе моделируемой области [45].

3.2.2. Вариант доминирующего конвективного теплопереноса

По результатам численных экспериментов установлено, что вблизи поверхности очага формируется зона перегретого пара (рисунок 21), как и в случае доминирующего кондуктивного теплопереноса. За счет более высокой проницаемости пород постройки перегретый пар на верхней границе частично формируя двухфазную область. Вследствие конденсируется, конвекции, происходит интенсивный прогрев горных пород в области повышенной проницаемости. Повышенная проницаемость пород постройки вулкана оказывает охлаждающий эффект, что обуславливает «придавливание» изотерм над очагом. По результатам численных экспериментов, область горных пород с температурой 200-400°С может располагаться на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности и на удалении до 3-х км от стенки очага.

Влияние изменения температуры стенки очага на процесс теплопереноса в породах аналогично влиянию в варианте при доминирующем кондуктивном теплопереносе. С увеличением температуры стенки очага расширяется зона конвекции надкритического флюида вблизи стенок очага. На верхней границе распространяется двухфазная область. В проницаемой области растет объем пород с температурой 200–400°С. Геотермический градиент в породах постройки и на удалении более 12 км от очага остается равным среднему региональному.

63

3.3. Оценка тепловых ресурсов вмещающих магматический очаг пород

Для оценки количества тепла, накопленного вмещающими магматический очаг горными породами, за период существования очага использовались результаты моделирования, полученные при доминирующем кондуктивном теплопереносе и температуре стенки очага равной 1000°С. Оценивался объем тороида размер которого ограничен сверху и снизу плоскостями на глубине 0 и 4 км, соответственно, а также боковыми поверхностями изотерм 200 и 400°С, рисунок 23. Тороид образован вращением криволинейной трапеции площадью 5 км² вдоль вертикальной оси. Таким образом, объем тороида составил 110 км³. Количество теплоты Q в тороиде горных пород с температурой 200–400°С рассчитывалось по формуле:

$$Q = \rho_{\pi} \cdot c_{\pi} \cdot V_{\pi} \cdot (T_{cp} - T_{\kappa o \kappa})$$
(3)

где $\rho_{\rm n}$ плотность горных пород, кг/м³; $c_{\rm n}$ – теплоемкость пород Дж/кг·К; $V_{\rm n}$ – оцениваемый объем горных пород, м³; $T_{\rm cp}$ и $T_{\rm кон}$ – средняя температура пород в блоке (300°С) и конечная температура пород до которой происходит отбор теплоты, соответственно. Для расчетов количества теплоты плотность и теплоемкость приняты 2600 кг/м³ и 1 кДж/кг·К, соответственно. Конечная температура пород принята 75°С, т.е. принимается понижение температуры на 225°С.



Рисунок 23 – Расчетное расположение высокотемпературной области горных пород, перспективной для освоения, при доминирующем кондуктивном теплопереносе

По результатам расчетов, количество теплоты, сосредоточенное во вмещающих магматический очаг горных породах с температурой 200–400°С и объемом 110 км³, составило $0,65 \cdot 10^{20}$ Дж. В работе [72] авторами дана оценка в $0,99 \cdot 10^{20}$ Дж при таких же принятых размерах магматического очага, но с принятой для расчетов объема тороида площадью криволинейной трапеции равной 6 км².

Следует отметить, что реальное распределение температур в породах вмещающих магматический очаг и как следствие количество накопленной ими теплоты могут существенно отличаться от результатов моделирования. Наличие конвективных флюидных потоков вокруг очага может интенсифицировать процессы теплообмена. Таким образом, рассматривая кондуктивный характер переноса тепла от очага к вмещающим магматический очаг породам, дается нижняя грань оценки количества накопленной теплоты.

На рисунке 24 показано расположение области горных пород с температурой 200–400°С, полученное по результатам численного моделирования при доминирующем кондуктивном и конвективном теплопереносе. Проекция области показана на глубине 1 км ниже уровня моря. Область является 90° сектором тороида, построенного вокруг очага. Расчетные площади данных областей составляют около 5,8 и 7,2 км² в случае доминирующего кондуктивного и конвективного теплопереноса, соответственно. Тепловые ресурсы данных высокотемпературных областей пород оцениваются в $3,4\cdot10^{18}$ и $4,2\cdot10^{18}$ Дж, соответственно. Освоение ресурсов данных областей предлагается по технологии геотермальных циркуляционных систем, успешно применяемой во многих странах мира [82,91].



Рисунок 24 – Карта района Авачинской геотермальной площади с проекцией области высокотемпературных пород на глубине 1 км

3.4. Выводы по главе 3

По результатам численных экспериментов получены следующие выводы.

1. Величина температуры стенки очага определяет следующие параметры теплопереноса в Авачинской геотермальной площади: ширину области надкритического флюида вблизи очага; глубину границы области перегретого пара; ширину зоны пород, прогретых до 400°С.

2. Проницаемость горных пород системы определяет ширину и глубину границ существования областей надкритического флюида и перегретого пара. В

66

случае высокой проницаемости происходит формирование двухфазной области. За счет конвективного теплопереноса в зоне повышенной проницаемости увеличивается область прогрева горных пород до 200°С.

3. При установленных размерах и глубине залегания очага область горных пород с температурой 200–400°С может находиться на удалении до 3-х км от стенки очага и на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности. Тепловое поле очага влияет на распределение температуры в породах системы на удалении до 6 км. Таким образом, объект может быть рекомендован для практического использования с целью получения геотермальной энергии по технологии геотермальных циркуляционных систем.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕПЛОВЫХ РЕСУРСОВ АВАЧИНСКОЙ ПЛОЩАДИ

4.1. Добыча тепловой энергии горных пород по технологии циркуляционных систем для тепло- и электроснабжения

Наряду с классической технологией освоения геотермальных ресурсов (система добычных и нагнетательных скважин на паро- или гидротермальном месторождении), в последние три десятилетия значительное внимание уделяется так называемым технологиям EGS (Enhanced/Engineered Geothermal System, улучшенная или искусственная геотермальная система). Технология EGS получила свое развитие в начале 1970-х гг. в ходе проекта Fenton Hill по извлечению тепла «сухих» горных пород (Hot Dry Rock), проводимом Национальной лабораторией Лос-Аламоса. Термин EGS обозначает глубинные геотермальные системы, К которым применены различные методы создания искусственной области стимулирования С целью циркуляции теплоносителя, либо для увеличения размеров и продуктивности уже имеющегося естественного коллектора, с дополнительным нагнетанием в него теплоносителя [47,89,149]. В отечественной литературе чаще используется термин ГЦС (геотермальная циркуляционная система), введенный советскими горными теплофизиками О.А. Кремневым, Ю.Д. Дядькиным и А.Н. Щербанем в 70-е годы прошлого века [24-26,47].

Со времен первых испытаний, проводимых в Fenton Hill, накоплен большой мировой опыт по созданию и успешному функционированию ГЦС, доказывающий перспективность данной технологии. На данный момент по всему миру функционирует более 20 проектов [91], находящихся на различных этапах разработки. В таблице 8 сведены действующие в настоящее время проекты EGS

Мировые проекты EGS, вырабатывающие электро- и/или тепловую энергию

Проект	Год начала	Страна	Глубина скважин, м	Температура резервуара, °С	Расстояние м/у забоями нагнетательной и добычной скважин, м	Метод стимуляции резервуара	Тип ГеоЭС	Расход скважин, л/с	Установленная электрическая (тепловая) мощность, МВт
Bouillante	1963/ 1996	Франция	1000-2500	250-260	500	Термический	Прямая подача пара	150	15,75
Larderello	1970	Италия	2500-4000	300-350	Среднее >500	Гидравлический, химический	Прямая подача пара	100	700
Bruchal	1983	Германия	1874-2542	124	1400	Гидравлический	Бинарный	28,5	0,55 (5,5)
Neustadt- Glewe	1984	Германия	2320	99	1500	Нет данных	Бинарный	35	0,23 (17)
Hijiori	1985	Япония	1805-1910	190	40-130	Гидравлический	Бинарный	17	0,13 (8)
Soultz	1987	Франция	5093	165	600	Гидравлический, химический	Бинарный	30	0,6 (1,5)
Altheim	1989	Австрия	2165-2306	106	1700	Гидравлический, химический	Бинарный	86	1 (12,4)
Berlin	1992	Сальвадор	2000-2380	260-300	1000-2000	Химический	Прямая подача пара, бинарный	870	109,4
Coso	2002	США	2430-2956	<300	1400	Гидравлический, термический, химический	Прямая подача пара	>1700	240
Desert Peak	2002	США	1372	179-196	400-2000	Гидравлический, химический	Бинарный	100	1,7
Landau	2003	Германия	3000-3300	160	1200	Гидравлический, химический	Бинарный	50-80	3 (4)
Unterhaching	2004	Германия	3350-3580	133	4500	Химический	Бинарный	150	3,36 (40)
Insheim	2007	Германия	3600-3800	165	Нет данных	Гидравлический	Бинарный	65-85	4,8 (6-10)

с выработкой электро- и/или тепловой энергии, а также их техникоэкономические показатели. Ниже приводится краткое описание некоторых из них.

Геотермальное месторождение Bouillante – ЭТО высокоэнтальпийное геотермальное поле, располагающееся на вулканических островах Гваделупы (Франция). Разработка месторождения была начата еще в 1970-х гг., в то время были пробурены 4 скважины (ВО-1 – ВО-4) глубиной от 350 до 2400 м. Скважинами была вскрыта высокотемпературная зона 240–250°С уже на глубине 320 м, однако лишь одна из 4-х скважин (ВО-2) оказалась продуктивной для добычи пара. Добываемый объем пара, позволял вырабатывать 4,7 МВт электроэнергии [85]. Весь отработанный теплоноситель сбрасывался в море. В 1998 были работы термическому стимулированию Г. начаты по низкопродуктивной скважины ВО-4. Было закачено 8000 м³ холодной морской воды в смеси с химическим ингибитором для предотвращения выпадения ангидрита. В результате работ были улучшены приемистость резервуара на 50% и продуктивность скважины ВО-4, что позволило получать дополнительные 2 МВт. В 2000–2001 гг. были пробурены еще 3 направленных скважины, 2 из которых позволили вырабатывать еще 11 МВт электроэнергии. Таким образом, суммарная мощность ГеоЭС, работающей от двух добычных скважин, выросла до 15,75 МВт, вырабатывая около 8% всей потребляемой электроэнергии в регионе [146]. В 2014 г. для предотвращения падения давления и распространения фронта охлаждения пород в резервуаре была принята схема с возвратной закачкой отработанного теплоносителя. Частичный объема раствора с температурой 163°С начали закачивать через бывшую продуктивную скважину ВО-2. В настоящее время планируется бурение новых скважин для наращивания мощности геотермального поля [137].

Отличительной особенностью австрийского проекта Altheim является использование низкоэнтальпийного теплоносителя с температурой 106°С. Продуктивная скважина Altheim 1 была пробурена в 1989 г. до глубины 2400 м. Первоначальный расход скважины составлял 11 л/с и после непродолжительной эксплуатации значительно снизился, вследствие засорения зоны притока смесью

бетонита и каменного материала. Для восстановления дебита были проведены буровые работы с отклонением ствола скважины в сторону с глубины 1800 м, а также стимуляция продуктивной зоны. В результате проведенных работ, дебит скважины составил 46 л/с. В 1997 г. для поддержания баланса водоносного пласта была пробурена нагнетательная скважина. Циркуляционные испытания системы установили возможность получения дебита до 100 л/с. Для компенсации затрат на бурение было принято решение о выработке электроэнергии. В 2000 г. была запущена бинарная установка со специально адаптированной рабочей жидкостью на основе фтороуглерода, что позволило получать 1 МВт электроэнергии [87]. Данный проект EGS стал первым в своем классе в Центральной Европе и показал возможность и перспективность технологии получения электроэнергии из низкоэнтальпийного теплоносителя [127].

Геотермальное поле Berlin (Сальвадор) располагается в северном секторе вулканического комплекса Текапа, приуроченного к Южной зоне разломов. Промышленная эксплуатация месторождения началась в 1992 г. с запуском двух энергоблоков суммарной электрической мощностью 10 МВт. В 1999 г. бурение новых 18 скважин позволило нарастить мощность до 56 МВт. Однако вскоре, выпадение в осадок кремнезема привело к частичному закупориванию призабойной зоны и к снижению приемистости нагнетательных скважин [83]. Начиная с 2000 г., были выполнены работы по химическому стимулированию 3-х нагнетательных и 2-х добычных скважин. В результате работ приемистость нагнетательных скважин увеличилась на 80-144%, дебит пара добычных скважин удвоился, что позволило увеличить мощность ГеоЭС еще на 16 МВт [122]. Таким образом, использование специального химического раствора на основе HCl эффективность удаления бурового шлама, а также отложения показало кремнезема в вулканических породах андезитового состава. Позже были введены в эксплуатацию еще один модуль мощностью 44 МВт и бинарная установка мощностью 9,2 МВт, использующая остаточную энтальпию отработанного с 2-х модулей теплоносителя [124].

71

В 2002 г. компанией ORMAT после коммерциализации одной из непродуктивных скважин, находящейся на территории эксплуатируемого геотермального месторождения Desert Peak (США), были инициированы работы по разработке проекта EGS. В качестве объекта для стимулирования была выбрана «горячая», но «сухая» геотермальная скважина DP27-15. Целью намеченных работ была разработка и применение уникальных и финансовоэффективных методик стимулирования, с возможным применением в идентичных проектах. Результатом работ должно было стать улучшение гидравлической связи между скважиной DP27-15 и эксплуатируемым резервуаром, что позволит дебит промышленного Работы увеличить скважины ДО уровня. по 3 Первый стимулированию проводились В этапа. этап состоял ИЗ продолжительного стимулирования. Ha гидравлического данном этапе скважины была увеличена на порядок. На втором приемистость этапе применялось химическое стимулирование для растворения минеральных отложений из закупоренных трещин, которое привело к неустойчивости ствола скважины. Заключительный этап гидравлического стимулирования длился более 23 дней. По окончанию данного этапа был получен 60-ти кратный прирост приемистости стимулируемой скважины. Результаты микросейсмического мониторинга и трасерных тестов установили гидравлическую связь данной скважины с другими продуктивными скважинами геотермального резервуара, находящимися на расстоянии 0,4–2 км. Проведенные работы позволили увеличить мощность ГеоЭС на 1,7 МВт [94].

В 2003 г. успешное введение в эксплуатацию первого в Германии проекта EGS в одноименном г. Neustadt-Glewe, электрической мощностью 230 кВт, показало практическую осуществимость и перспективность данной технологии, которая позже применялась и развивалась в ходе других германских проектов: Bruchal, Insheim, Landau и Unterhaching [115,135].

Проекты Bruchal, Insheim и Landau приурочены к Верхнерейской низменности – области повышенного геотермального градиента и гидравлически связанных систем трещиноватости горных пород. Разработка проекта Landau

72
началась с 2003 г. и к концу 2006 г. было пробурено две скважины глубиной 3300 м. Начиная с глубины 2400 м скважинами были вскрыты гранитные породы с геотермальным градиентом 4,7°С/100 м. Температура на забое равнялась 160°С. После промывки скважин и гидравлических тестов было установлено, что одна из скважин имеет низкую продуктивность. Работы по улучшению продуктивности методом стимулирования проводились в несколько этапов. Сначала выполнялось поэтапное гидравлическое стимулирование: с малым (10-86 л/с), а затем с большим (4–190 л/с) расходом воды. В дальнейшем следовал этап химического стимулирования. На данном этапе в скважину было закачано 95 м³ 33% раствора ингибированной соляной кислоты. В целом, по итогам работ по стимулированию гидравлические показатели проекта были улучшены в 5 раз. В 2007 г. был закончен монтаж бинарной установки, которая позволила вырабатывать с температурой 160°С электроэнергию мощностью 3 MBt. теплоносителем Отработанный теплоноситель, с температурой 70-80°C. подается B централизованную систему отопления, отапливая около 8000 зданий. После системы отопления вторичный отработанный теплоноситель с температурой 50°С закачивается обратно в резервуар [141,142].

Аналогичный проект, расположенный в одноименном городе Insheim, с 2008 г. разрабатывается собственниками проекта Landau. Как и в предыдущем проекте, после циркуляционных тестов выявилась проблема недостаточной приемистости нагнетательной скважины. Микросейсмический мониторинг, проведенных работ по стимулированию, показал недостаточную проницаемость призабойной зоны. Для решения поставленных задач была применена новая концепция «side-leg». Суть ее заключалась в отклонении ствола скважины с глубины 2500 м. Таким образом, нагнетание теплоносителя в резервуар осуществлялось по двум «веткам» ствола скважины. Данная концепция позволила получить требуемые объемы нагнетания и, что не менее важно, значительно снизить микросейсмическую активность, вызываемую большими давлениями нагнетания [84].

В целом, для Германии, вследствие относительно низких температур извлекаемого теплоносителя, для получения электроэнергии характерно

применение бинарных технологий. Вследствие небольшой удаленности ГеоТЭС от населения, применяется вторичное использование отработанного теплоносителя для подачи в системы теплоснабжения.

Помимо рассмотренных, уже действующих проектов EGS, в мире, на различных этапах разработки, находятся еще около 10 проектов: St. Gallen (Швейцария), Genesys и Hannover (Германия), Newberry (США), Paralana (Австралия) и др. [91].

Несмотря на успешное функционирование рассмотренных проектов по извлечению тепла горных пород, технология EGS, до настоящего времени, не считается полностью разработанной и находится на этапе изучения, что приводит финансовым разработчиков. К значительным рискам для Об этом свидетельствуют несколько проектов закрытых или «замороженных» ПО различным причинам (Bad Urach в Германии, Habanero в Австралии и др.) [91,96]. Среди основных проблем, выявляющихся при разработке и эксплуатации, солеотложение В стволе выделяют: скважины И на технологическом оборудовании, контактирующем с агрессивным теплоносителем (теплообменники чрезмерная сейсмическая др.); активность, вызванная гидравлическим И стимулированием (максимальная 3,0–3,7 балла по шкале Рихтера) [120]; трудности при бурении в сложных геологических условиях. Кроме того, требуются большие финансовые инвестиции на начальном этапе разработки, связанные с высокой стоимостью бурения скважин. Затраты на бурение могут составлять до 80% от общей стоимости проекта. Однако, несмотря на вышеуказанные проблемы, технология EGS активно развивается и происходит мощности [101]. ежегодный прирост проектов По оценкам доклада Международного Энергетического Агентства, выпущенного в 2011 г., суммарная мощность проектов EGS к 2050 г. будет достигать 100 ГВт электрической энергии [86].

4.2. Численное моделирование эксплуатации и установление рациональных технологических параметров циркуляционной системы типа «дублет»

На стадии разработки системы разработки геотермального коллектора важным условием, определяющим эффективность теплоотбора, является определение рациональных геометрических параметров системы, т.е. расстояния между забоями добычной и нагнетательной скважин, а также их взаимное расположение в продуктивной зоне геотермального коллектора [47]. В технической литературе встречаются единичные расчеты режимов ГЦС в надкритических условиях, без обоснования вышеуказанных геометрических параметров.

В проводимых в недавнем времени исследовательском Сульц-Су-Форе (Франция) и коммерческом Купер Бэзин (Австралия) проектах EGS принята схема с одинаковой глубиной забоев нагнетательной и добычных скважин [47]. В проекте Фентон-Хилл (США), в котором использовался коллектор, образованный субвертикальными трещинами гидроразрыва, забой нагнетательной скважины был на 100 м глубже добычной [47]. В расчетах гидродинамического и теплового режимов этой системы, выполненных Р. Макфэрландом, забой нагнетательной скважины был также принят глубже добычной. В теоретических анализах и расчетах ГЦС при докритических термодинамических параметрах, выполненных отечественными исследователями, была принята схема с одинаковой глубиной забоев [47], аналогично авторам [138]. Авторами [47] изучено влияние относительного расположения забоя нагнетательной скважины над забоями добычных показано существенное влияние данного параметра И на эффективность работы надкритической ГЦС.

При определении рационального расстояния между забоями добычной и нагнетательной скважин очевидно, что при большей взаимной удаленности, теоретически, возможно извлечение большего количества тепловой энергии. Однако, на практике, значительная взаимная удаленность между забоями может

привести к неэффективному теплоотбору и снижению параметров скважин раньше проектного срока эксплуатации.

Для установления рациональных технологических параметров ГЦС, при разработке тепловых ресурсов Авачинской площади, автором совместно с Пашкевичем Р.И. выполнены численные эксперименты базе ΠК на HYDROTHERM, моделирующие эксплуатацию геотермального коллектора по циркуляционной технологии типа «дублет» – одна нагнетательная и одна добычная скважины, рисунок 25. Разработана модель циркуляционной системы, включающая продуктивную зону (зону повышенной относительно окружающих пород проницаемости) и 2 скважины – нагнетательная и добычная, рисунок 26. Теплофизические и гидрогеологические характеристики пород коллектора соответствуют средним значениям, полученным по результатам измерений на образцах, отобранных в пределах Авачинской площади. Начальные условия в породах коллектора соответствуют надкритическим термодинамическим, полученным на разработанной численной модели Авачинской геотермальной площади.



Рисунок 25 – Принципиальная схема ГЦС типа «дублет»

Для изучения влияния эффективности теплоотбора от геометрических параметров в численных экспериментах рассматривались три технологических схемы, рисунок 26: *H1* – расположение забоя добычной скважины над забоем нагнетательной, *H2* – забой добычной скважины под забоем нагнетательной и *L* – расположение забоев в ряд по-горизонтали. Во всех схемах расстояние между забоями скважин варьировалось в пределах 300–800 м.



Рисунок 26 – Численная модель геотермального коллектора и схемы расположения забоев скважин. *Р_{гст}* – начальное гидростатическое давление; *Q* – тепловой поток на нижней границе модели; *А*-*А* – горизонтальное сечение модели

Область моделирования включает продуктивную проницаемую зону и малопроницаемые породы (10⁻³ мД). Начальное распределение давления – гидростатическое. На верхней границе модели задавались постоянные атмосферное давление 0,1 МПа и температура 10°С, на нижней – 420°С. Начальный геотермический градиент принят равным расчетному по результатам численных экспериментов в горных породах Авачинской площади – 137°С/км. Тепловой поток на нижней границе равен 120 мВт/м². Границы модели заданы непроницаемыми, т.е. потери теплоносителя во время эксплуатации отсутствуют. Продуктивная зона считается изотропной с постоянной проницаемостью равной 5

и 10 мД, и 10%-ной пористостью. Значения 5 и 10 мД для проницаемости продуктивной зоны в разработанной модели были приняты на основании того, что проницаемость пород, установленная по результатам пробных откачек в скважине ГК-2а, находящейся на границе моделируемой области, составила 6 мД. Значения исходных параметров, принятых при моделировании, сведены в таблице 9.

На рисунке 26 изображена численная сетка, используемая в расчетах. Поскольку в продуктивной зоне процессы движения жидкости и ее теплообмена с окружающими породами происходят наиболее интенсивно, для повышения точности результатов моделирования численная сетка в области продуктивной зоны учащена до размеров ячеек равных 50 м. В остальных областях с целью экономии вычислительных ресурсов размер ячейки увеличивался до 200 м. Таким образом, общее количество блоков составило 24770 штук, в том числе 13000 блоков по 50 м.

Теплоперенос в горных породах ГЦС определяет важный технологический параметр – ее срок службы, от которого зависит эффективность излечения тепловой энергии [47]. Необходимым сроком эксплуатации ГЦС для рентабельности проекта считается период 20–30 лет, либо больший, в течение которого снижение температуры извлекаемого теплоносителя достигнет 10% [83].

Таблица 9

Параметр	Значение
Размер области моделирования (Д×Ш×В)	1950×1005×3000 м
Размер продуктивной зоны (Д×Ш×В)	950×350×1800 м
Теплопроводность пород	2 Вт/м·К
Теплоемкость пород	1 кДж/кг
Плотность пород	2500 кг/м ³
Пористость вмещающих пород	1%
Пористость продуктивной зоны	10%
Проницаемость вмещающих пород	10 ⁻³ мД
Проницаемость продуктивной зоны	5; 10 мД
Дебит скважин	10; 20 кг/с
Температура нагнетаемого теплоносителя	80°C
Диапазон глубин скважин	1876-2676 м

Значения исходных параметров в модели

Для исследования поставленной задачи автором совместно с Р.И. Пашкевичем было выполнено порядка 100 численных экспериментов. По результатам численных экспериментов получено распределение температуры, давления и водонасыщенности в продуктивной зоне коллектора, а также динамика данных параметров на забоях скважин, по которой проводилась оценка эффективности схем.

4.2.1. Влияние геометрии системы скважин на динамику параметров продуктивной зоны и технологические параметры скважин

На рисунках 27–29 показана динамика параметров продуктивной зоны в ходе эксплуатации геотермального коллектора при расстоянии между забоями скважин 600 м, проницаемости продуктивной зоны – 10 мД, а также дебита скважин – 20 кг/с.

В ходе численных экспериментов установлено, что с началом процесса теплоотбора при всех схемах расположения забоев скважин наблюдается общее падение давления в продуктивной зоне, а также в нижней малопроницаемой зоне. В призабойной части нагнетательной скважины формируются области локального повышения давления, а в добычной – области понижения давления. В окрестности нагнетательной скважины формируется фронт охлаждения пород с температурой, соответствующей температуре нагнетаемого теплоносителя (80°С). В ходе эксплуатации происходит расширение данного фронта к границам продуктивной зоны и к забою добычной скважины. Скорость продвижения фронта охлаждения по направлению к забою различная при каждой схеме. В случае схемы *H1* скорость продвижения минимальная, где на протяжении всего периода эксплуатации температура теплоносителя увеличивается (рисунок 30*a*).



Рисунок 27 – Изменение параметров продуктивной зоны в ходе эксплуатации при схеме расположения забоев *H1*. *T* – температура (°С); *P* – давление (бар); *S* – водонасыщенность; в верхнем левом углу указано время с начала моделирования. По вертикальной оси – высота (м) от нижнего основания модели (*H*=3 км), по горизонтальной – значения *x* (м). Проницаемость продуктивной зоны – 10 мД, дебит скважин – 20кг/с



Рисунок 28 – Изменение параметров продуктивной зоны в ходе эксплуатации при схеме расположения забоев Н2



Рисунок 29 – Изменение параметров продуктивной зоны в ходе эксплуатации при схеме расположения забоев L



Рисунок 30 – Изменение температуры на забое добычной скважины в ходе эксплуатации при различных схемах системы разработки, расстояниях между забоями и проницаемости продуктивной зоны: *a* – схема *H1*; *б* – *H2*; *в* – *L*. Серые маркеры – проницаемость продуктивной зоны 5 мД, черные – 10 мД



Рисунок 31 – Изменение водонасыщенности на забое добычной скважины в ходе эксплуатации при различных схемах системы разработки, расстояниях между забоями и проницаемости продуктивной зоны: *a* – схема *H1*; *б* – *H2*; *в* – *L*. Серые маркеры – проницаемость продуктивной зоны 5 мД, черные – 10 мД



Рисунок 32 – Изменение давления на забое добычной скважины в ходе эксплуатации при различных схемах системы разработки, расстояниях между забоями и проницаемости продуктивной зоны: *а* – схема *H1*; *б* – *H2*; *в* – *L*. Серые маркеры – проницаемость продуктивной зоны 5 мД, черные – 10 мД



Рисунок 33 – Изменение давления на забое нагнетательной скважины в ходе эксплуатации при различных схемах системы разработки, расстояниях между забоями и проницаемости продуктивной зоны: *а* – схема *H1*; *б* – *H2*; *в* – *L*. Серые маркеры – проницаемость продуктивной зоны 5 мД, черные – 10 мД

Вследствие падения давления в продуктивной зоне коллектора происходит смена фазового состояния теплоносителя при всех схемах. Вдоль боковых границ формироваться области влажного пара с продуктивной зоны начинают постепенным поднятием (рисунки 27-29). При схеме Н1 процесс поднятия данных областей протекает интенсивнее и к концу срока эксплуатации двухфазная область распространяется на большую часть коллектора, но не достигает забоя добычной скважины, поэтому теплоноситель на протяжении всего периода эксплуатации остается в состоянии жидкости (рисунок 31а). При схемах H2 и L на забое добычной скважины и в его окрестностях из начального надкритического состояния теплоноситель переходит в двухфазное состояние, увеличивая водонасыщенность в ходе эксплуатации, и к определенному сроку, полностью конденсируясь, переходит в состояние жидкости (рисунок 316, в). Для данных двух схем период полной конденсации теплоносителя зависит от удаленности между забоями скважин, уменьшаясь при большей взаимной близости забоев.

По результатам численных экспериментов установлено, ЧТО схемы расположения, а также расстояния между забоями нагнетательной и добычной скважин существенно влияют на интенсивность процессов теплопереноса в продуктивной зоне геотермального коллектора. При схеме *H1* удаленность забоев скважин в диапазоне 400-800 м дает практически линейный прирост температуры теплоносителя на 10–20°С в течение всего срока эксплуатации (рисунок 30*a*). При расстоянии 300 м температура теплоносителя практически стабильна на протяжении всего срока эксплуатации, имея незначительный прирост в периоде 0-15 лет. Вследствие заданного геотермического градиента, с увеличением глубины забоя добычной скважины, увеличивается начальная температура теплоносителя. Анализируя значения давлений на забоях скважин (рисунки 32а и 33а), можно сделать вывод, что большая близость забоев скважин рациональнее, т. к. давление на забое добычной скважины имеет более высокие значения при наименьших на забое нагнетания, что снижает затраты энергии на циркуляцию теплоносителя в системе.

При схеме *H2*, в отличие от *H1*, требуется максимальная удаленность забоев в 800 м. Температура извлекаемого теплоносителя имеет максимальные начальные значения и снижение на конец срока эксплуатации в пределах 10% (рисунок 30*б*), что является установленным в общемировой практике пределом для циркуляционных систем [83]. По значениям давлений на забоях скважин система более эффективна, чем при схеме *H1*, т.к. имеет более высокие значения на забое добычной скважины и меньшие на забое нагнетательной.

Расположение забоев скважин по схеме L дает самые низкие и нестабильные значения температуры теплоносителя (рисунок 30e). При всех расстояниях между забоями скважин уровень снижения температуры превышает 10% предел. Наиболее рационально расстояние в 600 м, при котором максимальное падение температуры находится на уровне 15%. Значения давлений на забоях скважин (рисунки 32e и 33e) практически аналогичны результатам при схеме *H1*.

4.2.2. Влияние проницаемости продуктивной зоны на технологические параметры скважин

На рисунках 30–33 показано изменение технологических параметров скважин в ходе эксплуатации при уменьшении проницаемости продуктивной зоны до 5 мД.

По результатам численных экспериментов установлено, что при схеме *H1* понижение проницаемости практически не оказывает влияния на температуру теплоносителя (рисунок 30*a*). При схеме *H2* температура теплоносителя имеет более низкие значения в периоде эксплуатации 0–30 лет при расстоянии 600 и 800 м между забоями (рисунок 30*b*). Наиболее чувствительна к проницаемости схема *L* (рисунок 30*b*). При меньшей проницаемости необходима минимальная удаленность между забоями в 400 м.

Из рисунка 31*а* видно, что в случае схемы *H1* уменьшение проницаемости оказывает влияние только при расстоянии 400 м, при котором испарение

теплоносителя начинается после 31 года эксплуатации. При всех остальных расстояниях теплоноситель находится в состоянии жидкости. При схемах *H2* и *L* уменьшение проницаемости приводит к более длительному периоду конденсации и перехода теплоносителя в состояние жидкости (рисунки 31*б*, 31*в*).

Из рисунков 32, 33 видно, что снижение проницаемости продуктивной зоны приводит к более низким значениям давления на забое добычной скважины и более высоким на забое нагнетательной, что увеличивает затраты энергии на циркуляцию теплоносителя в системе.

По результатам численного моделирования эксплуатации геотермального коллектора по циркуляционной системе типа «дублет» с различным расположением забоев добычной и нагнетательной скважин в продуктивной зоне коллектора можно сделать следующие выводы.

1. Схемы расположения забоев нагнетательной и добычной скважин в продуктивной зоне геотермального коллектора существенным образом определяют интенсивность процессов теплопереноса и тем самым влияют на эффективность работы системы.

2. Расположение забоя нагнетательной скважины под забоем добычной целесообразно при взаимной удаленности 300–400 м, т.е. на практике, схема может быть применена при малой мощности продуктивной зоны. Данная схема дает стабильные значения температуры извлекаемого теплоносителя на протяжении 40 лет эксплуатации. Кроме того, схема наименее чувствительна к изменению проницаемости продуктивной зоны в диапазоне 5–10 мД.

3. Расположение забоя нагнетательной скважины над забоем добычной рационально при удаленности между забоями 800 м. При данной схеме снижение температуры в течение 40 лет эксплуатации возможно в пределах 10%, а также снижаются затраты энергии на циркуляцию теплоносителя в системе. Кроме того, при уменьшении глубины забоя нагнетательной скважины снижаются капитальные затраты на ее бурение.

4. Наименьшую эффективность работы имеет система при расположении забоев нагнетательной и добычной скважин на одной глубине по-горизонтали. Падение температуры извлекаемого теплоносителя составляет более 10%.

Таким образом, приняв за основной критерий эффективности работы системы стабильность и снижение температуры теплоносителя в пределах 10% в ходе 40 лет эксплуатации, что отвечает требованиям к коммерческим ГЦС, установленным в [83], наиболее эффективными являются схемы *H1* с расстоянием между забоями скважин 300 м и *H2* с расстоянием 800 м. Дальнейшая оценка эффективности проводилась для указанных двух схем.

4.2.3. Влияние схем расположения забоев скважин на выработку тепловой и электрической энергии

В целях установления рациональных технологических параметров циркуляционной схемы типа «дублет», соответствующих максимальному теплоотбору из продуктивной зоны, вычислялось количество теплоты ($Q_{om\delta}$), отобранной из продуктивной зоны геотермального коллектора, по формуле:

$$Q_{om\delta} = q \sum_{i=1}^{n} (h_{go\delta} - h_{har}) \Delta t_i \tag{4}$$

где q – дебит добычной скважины; h_{doo} , h_{hae} – средняя удельная энтальпия добываемого и нагнетаемого теплоносителя в интервале периода эксплуатации Δt_i ; n(t) – количество расчетных временных интервалов к концу периода эксплуатации t.

На рисунке 34 показано количество отобранной теплоты из продуктивной зоны при схемах H1 и H2 с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно, а также при различных проницаемостях продуктивной зоны. Из рисунка 34 видно, что при схеме H2 из продуктивной зоны отбирается большее количество теплоты (около 10%), чем при H1, кроме того, данное количество теплоты увеличивается с повышением проницаемости продуктивной зоны. В

случае *H1* проницаемость практически не влияет на количество отобранной теплоты.



Рисунок 34 – Количество теплоты отобранной из продуктивной зоны при схемах *H1* и *H2* с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно, и проницаемости продуктивной зоны равной 5 мД (серые маркеры) и 10 мД (черные маркеры)

Для оценки потенциала геотермальной циркуляционной системы, как источника выработки тепловой и электрической энергии, была рассчитана мощность системы при эксплуатации по схемам *H1* и *H2* с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно.

Мощность системы. Для геотермальной циркуляционной системы, состоящей из двух скважин, тепловая мощность (W_T) рассчитывается по формуле:

$$W_{\rm T} = q(h_{\rm mob} - h_{\rm Har}) \tag{5}$$

где $h_{\text{наг,}}$ $h_{\partial o \delta}$ – удельная энтальпия нагнетаемого и добываемого теплоносителя, соответственно; q – дебит добычной скважины. В модели температура нагнетаемого теплоносителя принята равной 80°С, энтальпия равна 335 кДж/кг. Энтальпия добываемого теплоносителя рассчитывается как функция температуры и давления жидкости на забое добычной скважины. При длительном процессе циркуляции теплообменом между жидкостью и стволом скважины можно

пренебречь т.е. считать поток теплоносителя в стволе скважины изоэнтальпийным процессом [133]. Принимая, что вся извлекаемая тепловая энергия используется для выработки электрической энергии и основываясь на 2-м законе термодинамики, электрическая мощность (W_3) системы рассчитывается по формуле [151]:

$$W_{a} = 0.45q \left(h_{\rm gob} - h_{\rm Har} \right) \left(1 - \frac{T_{\rm OKP}}{T_{\rm gob}} \right) \tag{6}$$

где $(1-T_{o\kappa p}/T_{\partial o\delta})$ доля всей тепловой энергии преобразуемой в полезную работу; 0,45 – коэффициент преобразования данной полезной работы в электрическую энергию [138]; $T_{o\kappa p}$ – средняя температура окружающей среды в районе технологического комплекса (принята равной 10°C); $T_{\partial o\delta}$ – температура добываемого теплоносителя. Отношение $T_{o\kappa p}/T_{\partial o\delta}$ рассчитывается в абсолютном значении температур.

Значения давлений на забоях скважин при эксплуатации коллектора определяют такой важный параметр как импеданс т.е. сопротивление коллектора потоку жидкости. В общемировой практике для коммерческих проектов импеданс установлен в пределах 0,1 МПа/кг/с [83].

Импеданс резервуара. В работе [133] установлено, что на практике общий импеданс складывается из трех составляющих: сопротивление на забоях нагнетательной и добычной скважин, а также сопротивления самого резервуара. Кроме того, возможные потери жидкости внутри проницаемой зоны вызывают разности между расходом нагнетания и добычи, что приводит к трудностям при определении импеданса резервуара [145]. В настоящей работе автором принято, что в процессе эксплуатации потери теплоносителя отсутствуют, т.е. расход нагнетания равен расходу добычи и импеданс (*I_к*) рассчитывается по формуле:

$$I_{\kappa} = (P_{Ha2} - P_{\partial o \delta})/q \tag{7}$$

где *P_{наг}*, *P_{доб}* – давления на забое нагнетательной и добычной скважин, соответственно.

Энергопотребление циркуляционных насосов. Внутренними потребителями энергии на геотермальных электростанциях (ГеоЭС) является различное вспомогательное оборудование, главным образом, это циркуляционные (нагнетательные и добычные) насосы. Таким образом, общее энергопотребление (*W*_{общ}) циркуляционных насосов рассчитывается по формуле:

где W_{Har} и $W_{\partial o \delta}$ – мощность нагнетательного и добычного насоса, соответственно.

Мощность насосов зависит от давления на забое и от величины необходимого расхода. Пренебрегая внутренним трением в жидкости, а также силами трения в стволе скважин [133] количество затрачиваемой энергии нагнетательным насосом рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{Har}} = \frac{q(\rho_{\text{Har}} - \rho g H_{\text{Har}})}{\rho \eta_{\text{H}}} \tag{9}$$

затраты энергии добычным насосом:

$$W_{\text{go6}} = \frac{q(\rho g H_{\text{go6}} - P_{\text{go6}})}{\rho \eta_{\text{H}}} \tag{10}$$

где $\eta_{\rm H}$ – энергоэффективность насоса, принята 80% [145]; ρ – плотность воды; q – расход теплоносителя; $P_{\mu a z}$, $P_{\partial o \delta}$ – давление на забоях нагнетательной и добычной скважин, соответственно; $H_{\mu a z}$, $H_{\partial o \delta}$ – глубина забоев нагнетательной и добычной скважин, соответственно; g – гравитационная постоянная. В расчетах требуемой мощности нагнетательных насосов, при схемах эксплуатации H1 и H2, плотность воды на забое нагнетательной скважины принята равной 970 кг/м³, что соответствует температуре теплоносителя 80°С. При схеме H1 плотность теплоносителя на забое добычной скважины варьирует в диапазоне 630–670 кг/м³, при схеме H2 плотность изменяется от 530 до 630 кг/см³. В расчетах требуемой мощности добычных насосов значения плотности теплоносителя приняты равными 670 кг/м³ – при схеме H1, 630 кг/м³ – при схеме H2. Таким образом, изменением плотности от температуры и давления в течение периода эксплуатации пренебрегается.

На рисунках 35–37 показаны динамика мощности ГеоЭС, импеданса резервуара и энергопотребления циркуляционных насосов, рассчитанные по вышеуказанным формулам.



Рисунок 35 – Динамика мощности ГеоЭС при схемах H1 и H2 с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно, и проницаемости продуктивной зоны равной 5 мД (серые маркеры) и 10 мД (черные маркеры)



Рисунок 36 – Изменение импеданса резервуара в ходе эксплуатации при схемах *H1* и *H2* с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно, и проницаемости продуктивной зоны равной 5 мД (серые маркеры) и 10 мД (черные маркеры)



Рисунок 37 – Динамика требуемой мощности циркуляционных насосов системы при схемах *H1* и *H2* с расстоянием между забоями скважин 300 и 800 м, соответственно, и проницаемости продуктивной зоны равной 5 мД (серые маркеры) и 10 мД (черные маркеры)

По результатам расчетов установлено, что из двух рассматриваемых схем наиболее эффективна схема *H2*. ГЦС, функционирующая по данной схеме, обладает потенциалом для выработки электроэнергии на уровне 5,5–8 МВт в течение 40 лет эксплуатации. Увеличение проницаемости продуктивной зоны до 10 мД дает прирост мощности до 8% в периоде эксплуатации 0–30 лет, но меньшее значение (на 5%), чем при проницаемости 5 мД, на конец срока эксплуатации. В целом, падение мощности в течение всего срока эксплуатации составляет около 20%, рисунок 35.

При схеме *H1* система обладает потенциалом для выработки электроэнергии на уровне 5,3–5,9 МВт. В течение периода эксплуатации 0–20 лет наблюдается рост мощности в пределах 5–6%, затем снижение до значений равных начальным. Увеличение проницаемости продуктивной зоны до 10 мД дает незначительный прирост мощности (до 5%) после 10-го года эксплуатации, рисунок 35.

По рассчитанному значению импеданса установлено, что схема *H1* характеризуется более высокими значениями, постепенно возрастающими в течение срока эксплуатации до значений 0,51 и 0,35 МПа/кг/с, при проницаемости продуктивной зоны равной 5 мД и 10 мД, соответственно, рисунок 36.

Схема *H2* дает снижение импеданса резервуара более чем в 2 раза, по сравнению со схемой *H1*, рисунок 36. При увеличение проницаемости до 10 мД значение импеданса резервуара находится значительно ниже предела в 0,1 МПа/кг/с, установленного в [138] для коммерческих ГЦС.

По рассчитанному значению энергопотребления циркуляционных насосов установлено, что при схеме *H1* энергопотребление циркуляционных насосов минимально и близко к нулю в течение первых 15 лет, затем по мере снижения давления на забое добычной скважины энергопотребление насосов увеличивается до уровня 120–140 кВт, рисунок 37. Проницаемость продуктивной зоны не оказывает существенного влияния на данный параметр.

Самым низким уровнем энергопотребления после 15-го года эксплуатации обладает схема *H2* при проницаемости продуктивной зоны равной 10 мД. Уменьшение проницаемости приводит к значительному росту энергопотребления до максимального значения 170 кВт к середине срока эксплуатации и дальнейшему спаду до значений равных схеме *H1*, рисунок 37.

Таким образом, по расчетным значениям энергопотребления циркуляционных насосов установлено, что при схемах *H1* и *H2* данный параметр находится в пределах 170 кВт, что говорит о высокой энергоэффективности ГЦС с вырабатываемой мощностью более 5 МВт.

По результатам оценки эффективности извлечения тепловой энергии из геотермального коллектора можно сделать следующие выводы.

1. При заданных условиях и схемах расположения забоев скважин циркуляционная система типа «дублет» с дебитом 20 кг/с обладает потенциалом для выработки электрической энергии мощностью 5,5–8 МВт, что значительно выше значения 3,5 МВт, установленного в [138] для коммерческой двухскважинной циркуляционной системы.

2. Расположение забоев скважин по схеме *H2* дает более высокое значение вырабатываемой мощности, при схеме *H1* система функционирует с более стабильными значениями на протяжении 40 лет эксплуатации.

3. При схеме *H2* значение импеданса резервуара имеет низкие значения и при определенной проницаемости продуктивной зоны может находиться в пределах значения 0,1 МПа/кг/с, установленного в [138] в качестве одного из основных критериев рентабельности и успешного функционирования циркуляционных систем.

4. Схемы *H1* и *H2* обладают высокой энергоэффективностью, потребление энергии на циркуляцию теплоносителя составляет максимум 3% от вырабатываемой энергии.

4.3. Технико-экономическая оценка эффективности разработки тепловых ресурсов Авачинской площади

Освоение тепловых ресурсов Авачинской площади предлагается по технологии ГЦС, состоящей из 4-х «дублетов» суммарной мощностью 25 МВт. Для расчета рентабельности проекта оценены капитальные затраты (таблица 10) при следующих исходных параметрах:

• система разработки – 4 «дублета» (4 нагнетательные и 4 добычные скважины) суммарной мощностью 25 МВт;

- средняя глубина скважин 2200 м;
- суммарный расход теплоносителя 80 кг/с;
- температура реинжекции 80°С;
- длительность работы ГеоЭС за годовой период 8000 часов в год;
- расходы электричества на собственные нужды 8%;
- расчетный период работы ГеоЭС 40 лет.

4.3.1. Оценка капитальных затрат

Геотермальный промысел. Стоимость бурения одной эксплуатационной аналогии принимается co на Мутновском скважины по скважинами месторождении парогидротерм. По данным AO «Геотерм», стоимость строительства одной эксплуатационной скважины глубиной 2200 м (Гео-5) составляет около 230 млн. руб. (конкурс июля 2015 г.).

Стоимость сооружения устьевой обвязки одной эксплуатационной (или нагнетательной) скважины принята по фактическим затратам (информация АО «Геотерм») и составляет включая материалы 2,5 млн. руб.

При разведке и освоении месторождения потребуется пробурить как минимум 4 поисково-разведочных, 4 добычных и 4 нагнетательных скважин. Стоимость бурения поисково-разведочной скважины составляет 60% OT стоимости бурения эксплуатационной скважины. Таким образом, общая стоимость бурения составит около 2,392 млрд. руб. Общая стоимость работ на геофизические исследования составит (по аналогии с Мутновским месторождением парогидротерм) 30 млн. руб. Ориентировочная стоимость технологических трубопроводов транспорта теплоносителя от геотермального поля до ГеоЭС, общей протяженностью 5 км составит 106 млн. руб.

Эксплуатационные затраты на геотермальном промысле включая ремонт скважин, мониторинг и геофизические исследования в скважинах составят 10 млн. руб/год. Численность персонала на геотермальном промысле составит 10 человек, годовой бюджет добывающего подразделения предприятия – 9 млн. руб.

Электрические сети. По данным ПАО «Южные электрические сети» стоимость линии ВЛ 110кВ составляет 12,5 млн. руб/км, трансформаторной подстанции 110/35/10 кВ – 150 млн. руб. Всего требуется строительство ВЛ 110кВ 25 км и одной трансформаторной подстанции.

ГеоЭС. Уровень отечественных геотермальных технологий позволяет реализовывать современные ГеоЭС в модульном контейнерном исполнении в высокой степени заводской готовности, что позволяет значительно снизить

затраты при строительно-монтажных и пуско-наладочных работах. По аналогии с Мутновским месторождением парогидротерм, в качестве энергогенерирующей установки планируется использование турбогенератора К-25-0,6 Гео. Активнореактивная, двухпоточная паровая турбина, изготовленная ОАО «Калужский турбинный завод», обеспечивает номинальную мощность 25 МВт.

Вместе с паровой турбиной работает генератор типа Т-25-243-ПН с гарантированной мощностью 24,54 МВт. Генератор, изготовленный ОАО «Привод» (г. Лысьва), имеет коэффициент мощности 0,85, воздушное охлаждение по замкнутому циклу вентиляции и бесщеточную систему возбуждения.

Система подготовки пара. Для обеспечения необходимого качества пара перед подачей на турбоагрегат пароводяная смесь (ПВС) нуждается в предварительной сепарации. По аналогии с Мутновским месторождением парогидротерм планируется 2-х ступенчатая сепарация ПВС, где гравитационный сепаратор горизонтального типа, изготовленный ОАО машиностроительный завод «Зио-Подольск», обеспечивает на выходе степень сухости пара более 0,9998 и общее солесодержание в паре менее 0,5 мг/л. Для обеспечения этих параметров пара сепаратор имеет промывочное устройство, в которое подается чистый конденсат.

Основные объекты строительства. На площадке Авачинской ГеоЭС планируется размещение следующих объектов строительства:

• главный корпус с машинным залом и помещением для вахтового персонала;

- здание КРУЭ;
- объединенно-вспомогательный корпус;
- вентиляторные градирни;
- сепараторная с насосной станцией;
- хозяйство ГСМ;
- общежитие вахтового персонала.

Таким образом, общий объем капитальных затрат составит 5,01 млрд. руб., таблица 10.

Расчетные технико-экономические показатели перспективного проекта

Наименование показателя	Значение	
Капитальные затраты, млн. руб.		
Геофизические исследования	30	
Бурение 12 скважин глубиной 2200 м	2392	
Устьевая обвязка 8 скважин	20	
Система транспорта пароводяной смеси	106	
Оборудование ГеоЭС установленной мощностью 25 МВт	1000	
Линия ВЛ 110 кВ (25 км)	312,5	
Трансформаторная подстанция 110/35/10 кВ	150	
Основные объекты строительства	1000	
Суммарные капзатраты		
Эксплуатационные затраты, млн. руб./год		
Годовой бюджет предприятия	9	
Система скважин, ГеоЭС, подстанция и линии, и др.	10	
Суммарные эксплуатационные затраты		
Расчетная себестоимость электроэнергии, руб./кВт·ч		
Отпускной тариф ПАО «Камчатскэнерго» Центрального энергоузла во 2-м полугодии 2016 г., руб./кВт·ч	4,7	

Авачинской ГеоЭС мощностью 25 МВт (в ценах 2016 г.)

4.3.2. Финансово-экономическая эффективность

При разработке финансовой модели были использованы следующие исходные данные и принятые допущения.

1. Прогноз инфляции (индекс потребительских цен) и роста цен на электрическую энергию принят в соответствии с базовым вариантом «Сценарных условий, основных параметров прогноза социально-экономического развития Российской Федерации и предельных уровней цен (тарифов) на услуги компаний инфраструктурного сектора на 2016 год и на плановый период 2017 и 2018 годов» Министерства экономического развития РФ от мая 2015 г. Принятая инфляция составляет 5,1%, рост цен на электрическую энергию – 8,3%.

2. Реализация проекта ГеоЭС будет происходить в течение 5 лет. Общий срок жизни проекта составит 45 лет.

3. Полезный отпуск электрической энергии составит 184 млн. кВт·ч/год.

4. Общая численность персонала составляет 10 человек. Годовой ФОТ в ценах 2015 года равен 79 000 тыс. руб., в дальнейшем ФОТ индексируется согласно прогнозу индекса потребительских цен (ИПЦ).

5. Частичное финансирование проекта ГеоЭС (2 млрд. рублей) планируется за счет средств потенциального инвестора, который получает 100% долю в уставном капитале. Остальное финансирование будет осуществляться за счет привлечения банковского кредита на условиях возврата в течении 3-х лет каждого полученного транша под 14,87% годовых (процентная ставка принята исходя из информации Центрального банка РФ о средневзвешенной стоимости кредита коммерческим организациям в июле 2015 г.).

Расчет обоснованного 6. экономически тарифа на отпускаемую электрическую энергию произведен исходя из минимально необходимых для погашения привлеченных кредитов денежных средств И осуществления производственной деятельности. Тариф ежегодно индексируется согласно темпу роста ИПЦ. По итогам моделирования проводится сравнение тарифа ГеоЭС с экономически обоснованным тарифом ПАО «Камчатскэнерго», который рассчитан, исходя из установленного Региональной службой по тарифам и ценам Камчатского экономически обоснованного тарифа на края отпускаемую потребителям Петропавловск-Камчатского городского округа электрическую энергию в 2016 г., (постановление от 16.06.2015 №119) проиндексированного по годам, в соответствии с прогнозом роста стоимости электрической энергии Минэкономразвития РФ.

В таблице 11 сведены показатели финансово-экономической эффективности перспективного проекта. На рисунке 38 приведено сопоставление прогнозного тарифа на электроэнергию, поставляемую ПАО «Камчатскэнерго», и расчетного тарифа перспективного проекта Авачинской ГеоЭС. Установлено, что разница в тарифах составляет 15%.

Показатель	Значение
Чистая приведенная стоимость (NPV), тыс. руб.	4 291 031
Дисконтированный срок окупаемости (PBP), лет	14
Простой срок окупаемости, лет	9
Внутренняя норма рентабельности (IRR), %	21

Финансово-экономическая эффективность проекта



Рисунок 38 – Сопоставление прогнозного тарифа ПАО «Камчатскэнерго» и расчетного тарифа перспективного проекта Авачинской ГеоЭС

По результатам финансово-экономических расчетов установлено, что средняя расчётная себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла ГеоЭС, при заданных капитальных и эксплуатационных затратах, составит 2,87 рублей. Для сравнения, среднегодовая стоимость 1 кВт·ч, вырабатываемого на Мутновской ГеоЭС, составляет 2,55 рублей. Отпускной тариф ПАО «Камчатскэнерго» для населения г. Петропавловска-Камчатского во втором полугодии 2016 г. составил 4,7 рублей за 1 кВт·ч.

Итоги произведенного финансово-экономического анализа указывают на эффективность проекта и его потенциальную конкурентоспособность на рынке энергоснабжения потребителей Петропавловск-Камчатского городского округа.

4.4. Выводы по главе 4

1. Схема расположения забоев продуктивной скважин зоне В геотермального коллектора существенным образом влияет на динамику параметров продуктивной зоны и, как следствие, на технологические параметры скважин.

2. При размещении в продуктивной зоне геотермального коллектора забоя добычной скважины над забоем нагнетательной рациональнее их малая взаимная удаленность (300–400 м), что обеспечивает стабильность температуры извлекаемого теплоносителя в течение 40 лет эксплуатации. Кроме того, данная схема практически нечувствительна к изменению проницаемости продуктивной зоны в диапазоне 5–10 мД.

3. При размещении в продуктивной зоне геотермального коллектора забоя добычной скважины под забоем нагнетательной рациональнее их удаленность не менее 800 м, что позволяет вовлечь в процессы теплообмена больший объем горных пород и, соответственно, извлечь большее количество теплоты. При данных условиях возможно функционирование системы в течение 40 лет с падением температуры извлекаемого теплоносителя в пределах 10%. Данная схема значительно снижает импеданс резервуара и, как следствие, затраты энергии циркуляционными насосами.

4. Установлено, что при заданных условиях эксплуатация надкритического геотермального коллектора возможна по технологии циркуляционной системы типа «дублет» с дебитом скважин 20 кг/с и получением электроэнергии в объеме 5,5–8 МВт в течение 40 лет эксплуатации.

5. По предварительным расчетам финансово-экономической эффективности перспективного проекта освоения тепловых ресурсов Авачинской площади

себестоимость производимой электроэнергии составит 2,87 руб. за 1 кВт·ч, что указывает на потенциальную конкурентоспособность проекта на рынке энергоснабжения потребителей Петропавловск-Камчатского городского округа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой содержится решение актуальной задачи количественной оценки термогидродинамических условий в породах Авачинской геотермальной площади и установления рациональных параметров освоения ее тепловых ресурсов по технологии геотермальных циркуляционных систем.

Основные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. На базе всей имеющейся геолого-геофизической информации разработана концептуальная модель Авачинской геотермальной площади.

2. На основе принятой концептуальной модели разработана трехмерная численная термогидродинамическая модель Авачинской геотермальной площади.

3. Оценены тепловые ресурсы горных пород Авачинской площади. При установленных размерах и глубине залегания ее очага область высокотемпературных пород, перспективных для разработки, может находиться на удалении до 3-х км от стенки очага и на глубине от 1,5 км ниже дневной поверхности.

4. Установлено, что при освоении тепловых ресурсов Авачинской площади по технологии циркуляционной системы типа «дублет» забой нагнетательной скважины следует размещать на расстоянии 800 м над забоем добычной при дебите скважин 20 кг/с.

5. Установлено, что эксплуатация циркуляционной системы типа «дублет», с вырабатываемой электрической мощностью 5,5–8 МВт, в условиях Авачинской геотермальной площади, возможна в течение 40 лет.

Список использованных источников

1. Абкадыров, И.Ф. Скоростные неоднородности под юго-западным сектором Авачинского вулкана [Текст] / И.Ф. Абкадыров, Ю.Ю. Букатов, К.О. Геранин // Материалы XI региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. – 162 с.

2. Абкадыров, И.Ф. Результаты микросейсмического зондирования в районе Авачинского вулкана [Текст] / И.Ф. Абкадыров, Ю.Ю. Букатов, К.О. Геранин // Материалы XIII региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2014. – 157 с.

3. Базанова, Л.И. Катастрофические плинианские извержения начальной фазы формирования молодого конуса вулкана Авачинский (Камчатка) [Текст] / Л.И. Базанова, О.А. Брайцева, М.Ю. Пузанков, Л.Д. Сулержицкий //Вулканология и сейсмология. - 2003. - №5. - С.20-40.

4. Базанова, Л.И. Катастрофические извержения Авачинского вулкана (Камчатка) в голоцене: хронология, динамика, геолого-геоморфологический и экологический эффекты, долгосрочный прогноз [Текст] / Л.И. Базанова, О.А. Брайцева, И.В. Мелекесцев, Л.Д. Сулержицкий // Вулканология и сейсмология. - 2004. - № 6. - С. 15-20.

5. Балеста, С.Т. Возможности сейсмического метода изучения зон питания современных вулканов [Текст] / С.Т. Балеста, Л.И.Гонтовая, Н.Е. Гринь, С.Л. Сенюков, Л.Я. Гордиенко //Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 6. – С.42-53.

6. Балеста, С.Т. Дифракция сейсмических волн на очаге строение и состояние вещества магматического очага Авачинского вулкана [Текст] / С.Т. Балеста // Бюллетень вулканол. станций. – 1970. – №46. – С. 3–8.

7. Балеста, С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма [Текст] / С.Т. Балеста. – М.: Наука. – 1981. – 134 с.

8. Балеста, С.Т. Методика «просвечивания» глубинных частей вулканических аппаратов сейсмическими волнами [Текст] / С.Т. Балеста //Вулканизм и глубины Земли. - М.: Наука. – 1971. С. 98–102.

9. Балеста, С.Т. О скоростном разрезе вулканогенных образований Авачинского вулкана [Текст] / С.Т. Балеста // Вулканизм и геохимия его продуктов. - М. – 1967. – С. 112-115.

10. Балеста, С.Т. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) [Текст] / С.Т. Балеста, Л.И. Гонтовая, А.А. Каргопольцев, В.Г. Пушкарев, С.Л. Сенюков // Вулканология и сейсмология. – 1988. – № 2. – С. 43–55.

Берч, Фр. Справочник для геологов по физическим константам [Текст] / Фр.
Берч, Дж. Шерер, Г. Спайсер. – М.: Издательство иностранной литературы. –
1949. – 303 с.

12. Богоявленская, Г.Е. Составы расплавов и условия кристаллизации андезитов вулканов Авачинский, Безымянный, Шивелуч и Карымский (по данным изучения расплавных включений) [Текст] / Г.Е. Богоявленская, В.Б. Наумов, М.Л. Толстых и др. //Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 6. – С. 35–48.

 Богуславский, Э.И. Добыча и использование тепла Земли. Физикохимическая геотехнология [Текст] / Э.И. Богуславский, В.Ж. Аренс, Ю.Д. Дядькин. – М.: Изд-во МГГУ. – 2001. – С. 583–628.

14. Богуславский, Э.И. Технико-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр [Текст] / Э.И. Богуславский. – Л.: Изд-во ЛГИ, – 1984. – 168 с.

15. Богуславский, Э.И. Экономико-математическое моделирование геотермальных циркульных систем [Текст] / Э.И. Богуславский. – Л.: Изд-во ЛГИ. – 1981. – 104 с.

16. Гонтовая, Л.И. Авачинская группа вулканов: глубинное строение и особенности сейсмичности [Текст] / Л.И. Гонтовая, О.Ю. Ризниченко, И.Н. Нуждина, И.А. Федорченко // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский. – 2010. С.50-58.

17. Гонтовая, Л.И. О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке [Текст] / Л.И. Гонтовая, С.Л. Сенюков // Вулканология и сейсмология. – 2000. – № 3. – С.57-62.

 Гонтовая, Л.И. Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным КМПВ-ГСЗ [Текст] / Л.И. Гонтовая, Е.А. Ефимова, С.А. Костюкевич, В.Б. Пийп // Физика Земли. – 1990. – №3. – С. 73–82.

 Гонтовая, Л.И. Об упругих свойствах земной коры в районе Авачинского вулкана на Камчатке [Текст] / Л.И. Гонтовая, О.Ю. Ризниченко, С.Л. Сенюков, М.Ю. Степанова, В.В. Ящук // Вулканология и сейсмология. – 1998. – № 4–5. – С. 79–87.

20. Горельчик, В.И. Режимные наблюдения на Авачинском вулкане в 1970 г. [Текст] / В.И. Горельчик, Л.А. Башарина, Л.Б. Дмитриев // Бюллетень вулканологических станций. – 1972. – № 48. – С. 21–28.

21. Дрознин, В.А. Фумарольная активность вулкана Авачинский в 2004-2005 гг. (дистанционные измерения) [Текст] / В.А. Дрознин, И.К. Дубровская // Проблемы эксплозивного вулканизма. – Петропавловск-Камчатский, 2006. - С. 120-126.

 Дрознин, В.А. Энергетический и экологический аспекты извержения вулкана Авачинский на Камчатке (январь 1991 г.) [Текст] / В.А. Дрознин, Я.Д. Муравьев // Вулканология и сейсмология. – 1994. – № 3. – С. 3–19.

23. Дрознин, В.А. Фумарольная активность вулкана Авачинский в 2004-2005 гг. (дистанционные измерения) [Текст] / В. А. Дрознин, И. К. Дубровская // Проблемы эксплозивного вулканизма. – Петропавловск-Камчатский, 2006. – С. 120–126.

24. Дядькин, Ю.Д. Геотермальная теплофизика [Текст] / Ю.Д. Дядькин, С.Г. Гендлер, Н.Н. Смирнова. – Санкт-Петербург: Наука, –1993. – 255 с.

25. Дядькин Ю.Д. Основы геотермальной технологии [Текст] / Ю.Д. Дядькин. – Ленинград, 1985. – 176 с.

26. Дядькин, Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений [Текст] / Ю.Д. Дядькин. – М: Недра, –1989. –228 с.

27. Зубин, М.И. Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) [Текст] / М.И. Зубин, А.И. Козырев // Вулканология и сейсмология. – 1989. – №1. – С. 81–94.
28. Иванов, В.В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) В конце 2008 – начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации [Текст] / В.В. Иванов // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню Вулканолога 30-31 марта 2009 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2010.– С. 24–38.

29. Иванов, В.В. Динамика и состав продуктов извержения Авачинского вулкана в 1991 г. [Текст] / В.В. Иванов, Г.Б. Флеров, Ю.П. Масуренков, В.Ю. Кирьянов, И.В. Мелекесцев, Ю.А. Таран, А.А. Овсянников // Вулканология и сейсмология. – 1995. – № 4-5. – С. 5-27.

30. Кирсанов, И.Т. Деятельность Авачинского и Корякского вулканов за период с октября 1959 г. по июнь 1961 г. [Текст] / И.Т. Кирсанов // Бюл. вулканол. ст. – 1964. – № 35. – С. 22-33.

31. Кирсанов, И.Т. Фумарольная деятельность Авачинского и Корякского вулканов [Текст] / И.Т. Кирсанов, Г.Г. Медведева, Е.К. Серафимова // Бюллетень вулканологических станций. – 1964. – № 38. – С. 5–19.

32. Кирюхин, А.В. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка [Текст] / А. В. Кирюхин, Ю. Ф. Манухин, С. А. Федотов, В. Ю. Лаврушин, Т. В. Рычкова, Г. В. Рябинин, А. Ю. Поляков, П. О. Воронин [Текст] // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 5. С. 400-414.

 Козырев, А.И. Физические свойства эффузивных и субвулканических пород Авачинского и Корякского вулканов [Текст] / А.И. Козырев, А.И. Фарберов, Ю.В. Ванде-Кирков // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 6. –С. 54–72.

34. Лазарев, В.А. (отв. исполнитель). Государственная гидрогеологическая карта Российской федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Лист N-57-XXVII Петропавловск-Камчатский. ОАО «Камчатгеология», Камчатский региональный центр мониторинга состояния недр (Росгеофонд, Филиал по Камчатскому краю ФГУ «ТФИ по Дальневосточному федеральному округу», фонды Камчатского регионального центра мониторинга состояния недр). Петропавловск-Камчатский, 2008 г. 34. Масуренков, Ю.П. Состав и состояние вещества в магматической камере Авачинского вулкана (Камчатка) [Текст] / Ю.П Масуренков // Магма малоглубинных камер. М.: Наука. – 1970. – С. 79–89.

35. Масуренков, Ю.П. Вулкан Авачинский [Текст] / Ю.П. Масуренков, И.А. Егоров, М.Ю. Пузанков, С.Т. Балеста, М.И. Зубин // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. – М.: Наука. – 1991. – С. 246–273.

36. Мелекесцев, И.В. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке. Часть I [Текст] / И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.Н. Двигало, Л.И. Базанова //Вулканология и сейсмология. – 1993. – № 6. – С. 13–27.

 Мелекесцев, И.В. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке. Часть II [Текст] / И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.Н. Двигало, Л.И.
 Базанова // Вулканология и сейсмология. – 1994. – № 2. – С. 3-24.

Моисеенко, У.И. Температура земных недр [Текст] / У.И. Моисеенко, А.А.
 Смыслов. – Л.: Недра. – 1986.– 180 с.

39. Мороз, Ю.Ф. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке [Текст] / Ю.Ф. Мороз, Л.И. Гонтовая // Вулканология и сейсмология. – 2003. – № 4. – С. 3–10.

40. Мороз, Ю.Ф. Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным [Текст] / Ю.Ф. Мороз, Л.И. Гонтовая // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск– Камчатский. – 2001. – 428 с.

41. Мороз, Ю.Ф. Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке [Текст] / Ю.Ф. Мороз, А.Г. Нурмухамедов //Вулканология и сейсмология. – 1998. – №2. – С. 77–84.

42. Мороз, Ю.Ф. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки [Текст] / Ю.Ф. Мороз, А.Г. Нурмухамедов, Т.А. Лощинская // Вулканология и сейсмология.– 1995. – № 4-5. – С.127-139.

43. Мороз, Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки [Текст] / Ю.Ф. Мороз. – М.: Наука. – 1991.– 181 с.

44. Округин, В.М. Малик Н.А., Плутахина Е.Ю., Назарова М.А., Козлов В.В., С.В. Москалева, Чубаров М.В. Новые данные о возгонах и сублиматах Авачинского вулкана (2014-2015 гг.) [Текст] / В.М. Округин, Н.А. Малик, Е.Ю. Плутахина, М.А. Назарова, В.В. Козлов, С.В. Москалева, М.В. Чубаров // Научная конференция, посвящённая дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». – ИВиС ДВО РАН. – 2016.

45. Отчет о результатах поисковых работ, проведенных в 1968–1970 гг. в южной части Корякско-Авачинской вулкано-тектонической депрессии с целью оценки перспектив получения термальных вод [Текст] / В.В. Овчеренко, Л.Т. Наумов, Н.Ф. Смирнова. – Корякско-Авачинская гидрогеологическая партия, пос. Термальный, Камчатская область. – 1970. – 162 с.

46. Отчёт о результатах гидрогеологического доизучения с инженерногеологическими и геоэкологическими исследованиями и картографированием масштаба 1:200 000, проведённого на территории листа N-57-XXVII в 1991-1996 гг. [Текст] / А.И. Серёжников, В.А. Лазарев. – ФГУ ТФИ. – 2000.

47. Пашкевич, Р.И. Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки [Текст] / Р.И. Пашкевич, Е.Ю. Попов, Е.Г. Тарелко, Н.Ф. Чернев И.И., К.А. Павлов, Муратов П.В. // ГИАБ. ОВ 2 «Камчатка» (специальный выпуск). – 2014. – С. 36-46.

48. Пашкевич, Р.И. Термогидродинамическое моделирование теплопереноса в породах Мутновской магмагеотермальной системы [Текст] / Р.И. Пашкевич, В.В. Таскин. – Владивосток: Дальнаука, 2009. 209 с.

49. Пашкевич, Р.И. Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы, Камчатка [Текст] / Р.И. Пашкевич, Е.Ю. Попов, Е.Г. Савельев, Р.А. Ромушкевич, К.А. Павлов // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. С. 7-23.

50. Пашкевич, Р.И. Состав пород участка Авачинской геотермальной системы [Текст] / Р.И. Пашкевич, С.Р. Таранов, В.Е. Кунгурова // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». – 2015. С. 86-107.

51. Поваров, О.А. Изучение возможности извлечения тепловой энергии магматического очага Авачинского вулкана с помощью бурения глубоких скважин: научное издание [Текст] / О.А. Поваров, В. М. Сугробов и др. //Проект научного бурения на Мутновском вулкане - исследование связи магматической и гидротермальных систем. – Петропавловск- Камчатский: Камчатский печатный двор. – 2006. - С. 79-82.

52. Поляк, Б.Г. Геотермические особенности области современного вулканизма [Текст] / Б.Г. Поляк. – М.: Наука. – 1966. – 180 с.

53. Поляк, Б.Г. Гидрогеотермические условия вулканического района Камчатки [Текст] / Б.Г. Поляк, Е.А. Вакин, Е.Н. Овчинникова. – М.: Наука. – 1965. – 95 с.

54. Поляк, Б.Г. О характере геотемпературного поля в районе Авачинского вулкана [Текст] / Б.Г. Поляк // Докл. АН СССР. – 1964. – Т.154. – № 2. – С. 329-332.

55. Поляк, Б.Г. Продуктивность вулканических аппаратов [Текст] / Б.Г. Поляк,
И.В. Мелекесцев // Вулканология и сейсмология. – 1981. – № 5. –С. 22–37.

56. Попруженко, С.В. Строение фундамента Авачинской депрессии [Текст] /
С.В Попруженко, С.Е. Апрелков // Вулканология и сейсмология. – 1997. – №6. –
С.15–24.

57. Сенюков, С. Л. Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994-2005 гг. [Текст] / С.Л. Сенюков, И. Н. Нуждина, С. Я. Дрознина, Т. Ю. Кожевникова // Геофизический мониторинг Камчатки. - Петропавловск-Камчатский, 2006. - С. 101-105.

58. Сенюков, С.Л. Исследования вулканов Камчатки дистанционными методами в 2005 году [Текст] / С.Л. Сенюков, С.Я. Дрознина, И.Н. Нуждина, В.Т. Гарбузова, Т.Ю. Кожевникова // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Материалы первого международного симпозиума. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. – С. 64-75.

59. Смирнов, Я.Б. Земной тепловой поток Камчатки [Текст] / Я.Б. Смирнов,
В.М. Сугробов, Ф.А. Яновский // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 2. – С.
41-65.

60. Смыслов, А.А. Тепловой режим и радиоактивность Земли [Текст] / А.А.

Смыслов, У.И. Моисеенко, Т.З. Чадович – Л.: Недра. – 1979. – 191 с.

61. Справочник физических констант горных пород [Текст] / под ред. Кларка С.
мл. – М.: Мир. – 1969. – 543 с.

62. Сугробов, В.М. Прогнозные геотермальные ресурсы областей современного вулканизма Камчатки и Курильских островов: научные и прикладные аспекты [Текст] / В.М. Сугробов, В.И. Кононов, А.И. Постников // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля-6 августа 2005 г.) // гл. ред. д.г.-м.н. С.Н.Рычагов. – Петропавловск-Камчатский: ОТТИСК. – 2005. 460 с.

63. Таскин, В.В. Теплоперенос в горном массиве при эксплуатации геотермальной циркуляционной системы / В.В. Таскин, Р.И. Пашкевич [Текст] // Горный журнал. – 2008. – № 11. – С. 32–34.

64. Трухин, Ю.П. Моделирование магматогенно-гидротермальной системы вулкана Мутновский и его магматического очага [Текст] / Ю.П. Трухин, Р.И. Пашкевич, В.В. Таскин // Сб. тез. докл. региональной научно-практической конф. «Минерально-сырьевые ресурсы как фактор развития промышленной и социальной инфраструктуры Камчатского края» Петропавловск-Камчатский. – 2007. – С. 41–43.

65. Уткин, И.С. Об эволюции и размерах магматических очагов вулканов
[Текст] / И.С. Уткин, С.А. Федотов, Л.И. Уткина //Вулканология и сейсмология. –
1999. – № 3. – С. 7–18.

66. Фарберов, А.И. Магматические очаги вулканов Восточной Камчатки по сейсмологическим данным [Текст] / А.И. Фарберов. – Новосибирск: Наука, – 1974. – 88 с.

67. Федотов, С.А. О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов [Текст] / С.А. Федотов //Вулканология и сейсмология. – 1980. – № 4. – С 3-39.

68. Федотов, С.А. Расчёт питающих каналов и магматических очагов вулканов, имеющих устойчивые размеры и температуру [Текст] / С.А. Федотов //Вулканология и сейсмология. – 1982. – № 3. – С 3–17.

69. Федотов, С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов [Текст] / С.А. Федотов. – М.: Наука. – 2006. – 456 с.

70. Федотов, С.А. Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменения их размеров во времени по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага [Текст] / С.А. Федотов, И.С. Уткин, Л.И. Уткина // Вулканология и сейсмология. – 2000. – № 3. – С. 3-13.

71. Федотов, С.А. О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана [Текст] / С.А. Федотов, С.Т. Балеста, В.А. Дрознин, Ю.П. Масуренков, В.М. Сугробов // Бюллетень вулканологических станций. – 1977. – №53. – С. 27–37.

72. Федотов, С.А. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло и электроснабжения [Текст] / С.А. Федотов, В.М. Сугробов, И.С. Уткин, Л.И. Уткина // Вулканология и сейсмология. – 2007. – №1. – С. 32–46.

73. Федотов, С.А. Об экранировании поперечных сейсмических волн и о магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов [Текст] / С.А. Федотов, А.И. Фарберов // Вулканизм и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 1966. – С. 43–48.

74. Федотов, С.А. Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков [Текст] / С.А. Федотов // Вулканология и сейсмология. – 1982. – № 4. – С. 3-27.

75. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых [Текст] / под ред. Дортман Н.Б. – М.: Недра. – 1976. – 455 с.

76. Штейнберг, Г.С. Геологическое строение Авачинского вулкана по геофизическим данным [Текст] / Г.С. Штейнберг, С.Т. Балеста, М.И. Зубин, А.А. Таракановский // Вулканизм и глубинное строение Земли. – М.: Наука. – 1966. – С. 49–56.

77. Штейнберг, Г.С. О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом [Текст] / Г.С. Штейнберг, М.И. Зубин //Докл. АН СССР. – 1963. – Т.152. – №4. – С. 25-33.

78. Шулюпин, А.Н. Проблемы и перспективы освоения геотермальных ресурсов Камчатки [Текст] / А.Н. Шулюпин, И.И. Чернев // Георесурсы. – 2012. – № 1. – С. 19-21.

79. Щербань, А.Н. Системы извлечения тепла земной коры и методы их расчета
[Текст] / А.Н. Щербань, А.С. Цырульников, Э.И. Мерзляков, И.А. Рыженко. – Киев: Наукова думка. – 1986. – 236 с.

80. Яновский, Ф.А. О кондуктивном тепловом потоке в районах активного вулканизма [Текст] / Ф.А. Яновский // Вулканология и сейсмология. – 1993. –№4. – С. 79–85.

 Яновский, Ф.А. О теплопроводности вулканогенно-осадочных пород Камчатки [Текст] / Ф.А. Яновский // Вулканология и сейсмология. – 1989. – №5. – С. 77–84.

82. Abe, H. Present status and remaining problems of HDR/HWR system design [Teκct] / H. Abe, D.V. Duchane, R.H. Parker, M. Kuriyagawa // Geothermics. – V. 28. – 1999. – P. 573–590.

Baria, R. HDR/HWR reservoir: concepts, understanding and creation [Teκcτ] / R.
Baria, J. Baumgärtner, F. Rummel, RJ. Pine, Y. Sato // Geothermics. – 1999. № 28. P.
533-552.

84. Baumgärtner, J. Geothermal 2.0: The Insheim Geothermal Power Plant. The second generation of geothermal power plants in the Upper Rhine Graben [Teκct] / J. Baumgärtner, C. Lerch // Third European geothermal review – Geothermal Energy for Power Production, Mainz, Germany. – 2013.

85. Bertini, G. Geological structure of a long-living geothermal system, Lardarello,
Italy [Текст] / G. Bertini, M. Casini, G. Gianelli, E. Pandeli // Terra Nova 18. – 2006. –
P. 163-169.

86. Beerepoot, M. Technology roadmap: geothermal heat and power [Электронный pecypc] / M. Beerepoot // Renewable Energy Division, International Energy Agency, OECD/IEA, Paris ed. – 2011.–http://

www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3988,en.html

87. Bloomquist, R. Integrating small power plants into agricultural projects [Электронный ресурс] – 2012.

http://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/szeged/I-8-01.pdf.

88. Blöcher, G. Evaluation of three exploitation concepts for a deep geothermal system in the North German Basin [Teκct] / G. Blöcher, M. Cacacea, T. Reinscha, N. Watanabe // Computers & Geosciences. – V. 82. – 2015. – P. 120–129.

89. BMU: Tiefe Geothermie – Nutzungsmoglichkeiten in Deutschland [Электронный ресурс]. Berlin, 2011. http://www.tiger-geothermie.de/wpcontent/uploads/2013/09/Tiefe-

Geothermie_Nutzungsm%C3%B6glichkeiten_BMU_2011.pdf

90. Bodvarsson, G.S. Injection and thermal breakthrough in fractured geothermal reservoirs [Текст] / G.S. Bodvarsson, C.F. Tsang // Journal of Geophysical Research. – V. 87. – № B2. – 1982. – P. 1031-1048.

91. Breede, K. A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future [Teκct] / K. Breede, K. Dzebisashvili, X. Liu, G. Falcone // Geothermal Energy. – 2013.

92. Brikowski, T.H. Modeling supercritical Systems with TOUGH2: The EOS1sc Equation of State Module and a Basin and Range Example [Teκcτ] / T.H. Brikowski // Geothermal Resources Council Transactions. V. 25. – 2001. – P. 285–289.

93. Brown, D. Fluid circulation and heat extraction from engineered geothermal reservoirs [Tekct] / D. Brown, R. DuTeaux, P. Kruger, D. Swenson, T. Yamaguchi // Geothermics.– V. 28. – 1999. – P. 553–572. 94. Chabora, E. Hydraulic stimulation of well 27-15, Desert Peak geothermal field, Nevada, USA Ethan [Tekct] / E. Chabora, E. Zemach, P. Spielman, P. Drakos, S. Hickman, S. Lutz, K. Boyle, A. Falconer, A. Robertson-Tait, N. Davatzes, P. Rose, E. Majer, S. Jarpe // Proceedings 37 Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. – 2012.

95. Croucher, A.E. Application of the computer code TOUGH2 to the simulation of supercritical conditions in geothermal systems [Teκcτ] / A.E. Croucher, M.J. O'Sullivan // Geothermics. – V. 37. – 2008.– P. 622–634.

96. DiPippo, R. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact (3rd edition) [Текст] / R. DiPippo // Butterworth-Heinemann. – 2012. – 624 p.

97. Ehara, S. Change in the thermal state in a volcanic geothermal reservoir beneath an active fumaroles field after the 1995 phreatic eruption of Kuju volcano, Japan [Tekct] / S. Ehara, Y. Fujimitsu, J. Nishijima, K. Fukuoka, M. Ozawa // Proceedings of the World Geothermal Congress – Turkey. 2005.

98. Ekneligoda, T.C. Determination of optimum parameters of doublet system in a horizontally fractured geothermal reservoir [Teκcτ] / T.C. Ekneligoda, K-B. Min // Renewable Energy. – V. 65. – 2014. – P. 152–160.

99. Fedotov, S.A. On a Possibility of Heat Utilization of the Avachinsky volcanic Chamber [Teκct] / S.A. Fedotov, S.T. Balesta, V.A. Droznin, Yu.P. Masurenkov, V.M. Sugrobov //Proceedings Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Reseources. – 1976. – P. 363-369.

100. Fujimitsu, Y. Hydrothermal system after the 1990-95 eruption near the lava dome of Unzen volkano, Japan [Teκct] / Y. Fujimitsu, R. Kanou, J. Nishijima, S. Ehara // Proceedings of the World Geothermal Congress – Turkey. – 2005.

101. Geothermal power: international market overview [Электронный ресурс]. – 2013. – http://geo-energy.org/events/2013%20International%20Report%20Final.pdf

102. Gurgenci, H. Challenges for Geothermal Energy Utilization [Текст] / H. Gurgenci, V. Rudolph, T. Saha, M. Lu // Proceedings Thirty-Third Workshop on

Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 28-30. – 2008. – SGP-TR-185, – P.283–289.

103. Harmako, Y. Shallow ground temperature anomaly and thermal structure of Merapi volcano, central Java, Indonesia [Текст] / Y. Harmako, Y. Fujimitsu, S. Ehara // Journal of the Geothermal Resources Society of Japan. – V. 29. –2007. – P. 25–37.

104. Hayba, D.O. The computer model Hydrotherm, a three-dimensional finitedifference model to simulate ground-water flow and heat transport in the temperature range of 0 to 1200°C [Текст] / D.O. Hayba, S.E. Ingebritsen // U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep. 94–4045. – 1994. – P. 85.

105. Huang, X. Heat extraction and power production forecast of a prospective Enhanced Geothermal System site in Songliao Basin, China [Текст] / X. Huang, J. Zhu, C. Niu, J. Li, X. Hu, X. Jin // Energy. – V. 75. – Is. 1 – 2014. – P. 360–370.

106. Huang, X. Parametric study of an enhanced geothermal system based on thermohydro-mechanical modeling of a prospective site in Songliao Basin [TekcT] / X. Huang, J. Zhu, J. Li, C. Lan, X. Jin // Applied Thermal Engineering. – V. 105. – 2016. – P. 1-7. 107. Hurwitz, S. Groundwater flow, heat transport, and water-table position within volcanic edifices: Implications for volcanic processes in the Cascade Range [TekcT] / S. Hurwitz, K.L. Kipp, S.E. Ingebritsen, M.E. Reid // J. Geophys. Res. – V. 108. – 2003. – N_{2} B12. – P.1–1 – 1–19.

108. Ingebritsen, S.E. Hydrothermal response to a volcano-tectonic earthquake swarm, Lassen, California [Teκcτ] / S.E. Ingebritsen, D.R. Shelly, P.A. Hsieh, L.E. Clor, P.H. Seward, W.C. Evans // Geophysical Research Letters. – V. 42. – 2015. – P. 9223-9230.

109. Kalinina, E.A. Thermal performance of directional wells for EGS heat extraction [Текст] / E.A. Kalinina, T. Hadgu, K.A. Klise, T.S. Lowry // Proceedings, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. – 2014.

110. Kipp, K.L. Guide to the revised ground-water flow and heat transport simulator: HYDROTHERM - Version 3 [Teκct] / K.L. Kipp, P.A. Hsieh, S.R. Charlton // U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A25. – 2008. 111. Kiryukhin, A.V. Modeling study of the Avachinsky volcano cone hydrothermal eruption conditions [Текст] / A.V. Kiryukhin, I.K. Dubrovskaya, N.I. Kiryukhina //Abstracts Week A, XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, Sapporo, Japan. – 2003. – 564 p.

112. Kissling, W.M. Deep hydrology of the geothermal systems in the Taupo volcanic zone, new Zeland [Teκcτ] / W.M. Kissling // University of Aucklend. PhD thesis. – 2004. 318 p.

113. Kissling, W.M. The spatial distribution of the geothermal fields in the Taupo Volcanic Zone, new Zeland [Teκct] / W.M. Kissling, G.J. Weir // J. Volcanol. Res. –V. 145. – 2005. P. 136–150.

114. Kitsou, O.I. Economic modeling of HDR enhanced geothermal systems [Текст] / O.I. Kitsou, J. Howard, H.J. Herzog, J.W. Tester // Proceedings World Geothermal Congress. Japan. – 2000. – Р. 3779-3784.

115. Knapek, E. Unterhaching power plant and overall system [Текст] / Е. Knapek, G.Kittle // Proceedings European Geothermal Congress Unterhaching, Germany. – 2007.

116. Koulakov, I. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding [Tekct] / I. Koulakov, K. Jaxybulatov, N. Shapiro, I. Abkadyrov, E. Deev, A. Jakovlev, P. Kuznetsov, E. Gordeev, V. Chebrov // Journal of Volcanology and Geothermal Research. –V. 285. – 2014. –P. 36 - 46.

117. Ledru, P. Enhanced geothermal innovative network for Europe [Текст] / P. Ledru, A. Genter //Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007.

118. Lowry, T.S. Economic valuation of directional wells for EGS heat extraction [Текст] / T.S. Lowry, E. Kalinina, T. Hadgu, K.A. Klise, L.A. Malczynski // Proceedings, Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. – 2014. – P. 1-11.

119. Luo, F. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer in a doublet enhanced geothermal system with CO_2 as the working fluid (CO_2 -EGS) [Tekct] / F. Luo, R-N. Xu, P-X. Jiang // Energy. – V. 64. – 2014. – P. 307–322

Majer E, Baria R, Stark M, Oates S, Bommer J, Smith B, Asanuma H. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems [Tekct] / E. Majer, R. Baria, M. Stark, S. Oates, J. Bommer, B. Smith, H. Asanuma // Geothermics. – V. 36. – 2007. – P. 185–222.

121. Matsushima, N. Mathematical simulation of magma-hydrothermal activity associated with the 1977 eruption of Usu volcano [Tekct] / N.Matsushima // Earth Planets Space.– V. 55. – 2003. – P. 559–568.

122. Mayorga, H. Geothermal reinjection systems in El Salvador [Текст] / H. Mayorga // Short Course on Geothermal Development and Geothermal Well, organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador. – 2012.

123. Mendrinos, D. Assessment of geothermal resources for power generation [Tekct] / D. Mendrinos, C. Karytsas, P.S. Georgilakis // Journal of optoelectronics and advanced materials. – V. $10. - N_{\odot} 5. - 2008$. P. 1262 - 1267.

124. Monterrosa, M. Geothermal reservoir management in El Salvador case histories of Ahuachapan and Berlin [Текст] / M. Monterrosa, F. Montalvo // Workshop for Decision Makers on Geothermal Projects in Central America, organized by UNU-GTP and LaGeo in San Salvador, El Salvador. – 2006.

125. Pashkevich, R.I. On possibility of HDR project in near-by region of Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia [Текст] / R.I. Pashkevich // Proceedings 3rd International HDR Forum, May 13-16, 1996, Santa Fe, New Mexico, USA, – P.144–145.

126. Pashkevich, R.I. Heat transfer in geothermal system of Mutnovsky volcano: the influence of the form, discharge of magma chamber degassing and rocks permeability [Текст] / R.I. Pashkevich, V.V. Taskin // Proc. Stanford Geothermal Workshop **34**, Stanford University, Stanford, California, USA. – 2009. – P. 88-93.

127. Pernecker, G. Low enthalpy power generation with ORC Turbogenerator The Altheim Project, Upper Austria [Teκcτ] / G. Pernecker, S. Uhlig // International Workshop on hot dry rock technology. – 2003.

128. Pola, M., Fabbri, P., Piccinini, L., and Zampieri, D. Conceptual and numerical models of a tectonically-controlled geothermal system: A case study of the Euganean

Geothermal System, northern Italy [Текст] / М. Pola, P. Fabbri, L. Piccinini, D. Zampieri // Central European Geology. – V. 58. – 2015. P. 129-151.

129. Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Khomenko A.V., Sverdlova V.G. Convection of two-phase fluid in a layered porous medium driven by the heat of magmatic dikes and sills [Teκct] / O.P. Polyansky, V.V. Reverdatto, A.V. Khomenko. V.G. Sverdlova // Geochemistry International. – V. 40. – Suppl. 1. – 2002.– P. 569–581.

130. Povarov, O.A. Heat and electricity from Hot Dry Rocks of Avachinsky Volcano for the Center of Kamchatka [Tekct] / O.A. Povarov, V.M. Sugrobov //Newsletter of the International Geothermal Association, IGA NEWS. – N_{2} 63. – 2006. – P. 6-7.

131. Pritchett, J.W. STAR: Age of thermal reservoir simulation system / J.W. Pritchett
// Proceedings of the World Geothermal Congress. Florence. 1995. Florence. Italy. May
18-31. –1995. – P. 2959–2963.

132. Pruess, K. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 [Текст] / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis // Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, November 1999.

133. Pruess, K. Enhanced geothermal systems (EGS) using CO2 as working fluid-A novel approach for generating renewable energy with simultaneous sequestration of carbon [Tekct] / K. Pruess // Geothermics. – V. 35. – Is. 4. - 2006. - P. 351-367.

134. Reid, M.E. Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization [Текст] / M.E. Reid // Geology. –V. 32. – no. 5. –2004. P. 373–376.

135. Quick, H. History of International Geothermal Power Plants and Geothermal Projects in Germany [Текст] / H. Quick, J. Michael, H. Huber, U. Arslan // Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia. – 2010.

136. Sanford, W.E. A simulation of the hydrothermal response to the Chesapeake Bay bolide impact [Текст] / W.E. Sanford // Geofluids. – V. 5. – 2005. – Р. 185-201.

137. Sanjuan, B. Monitoring of the Bouillante Geothermal Exploitation (Guadeloupe, French West Indies) and the Impact on Its Immediate Environment [Текст] / B. Sanjuan, P. Jousset, G. Pajot, N. Debeglia, M. De Michele, M. Brach, F. Dupont, G. Braibant, E. Lasne, F. Dure // Proceedings World Geothermal Congress. – Bali, Indonesia. – 2010. 138. Sanyal, S.K. An analysis of power generation prospects from Enhanced Geothermal Systems [Текст] / S.K. Sanyal, S.J. Butler // Transactions, Geothermal Resources Council. – V. 29. –2005. P. 131-137.

139. Sanyal, S.K. Cost of electricity from enhanced geothermal systems [Текст] / S.K. Sanyal, J.W. Morrow, S.J. Butler, A. Robertson-Tait // Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California. – 2007.

140. Setyawan, A. An estimate of the resources potential of Ungaran geothermal prospect for Indonesia power generation [Текст] / A. Setyawan, S. Ehara, Y. Fujimitsu, J. Nishijima // Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April. – 2010.

141. Schellschmidt, R. Geothermal Energy Use in Germany [Текст] / R. Schellschmidt, B. Sanner, S. Pester // Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia. – 2010.

142. Schindler, M. Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe [Tekct] / M. Schindler, J. Baumgärtner, T. Gandy, P. Hauffe, T. Hettkamp, H. Menzel, P. Penzkofer, D. Teza, T. Tischner, G. Wahl // Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia. – 2010.

143. Sudarmadi, E. Modelling production from supercritical geothermal reservoirs [Текст] / E. Sudarmadi, S.J Zarrouk, A. Croucher, E.A. Bramantyo // Proceedings of the 34th New Zealand Geothermal Workshop. – 2012. Р. 1-10.

144. Taran, Y. A. Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes,
Kamchatka, from 1993 to 1994 [Teκcτ] / Y. A. Taran, C. B. Connor, V. N. Shapar, A.
A. Ovsyannikov, A. A. Bilichenko // Bull Volcanol. – №58. – 1997. P. 441–448.

145. The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century [Teκcτ] // MIT-led interdisciplinary panel, Massachusetts Institute of Technology. – 2006.

146. Traineau, H. Main results of a long-term monitoring of the Bouillante geothermal reservoir during its exploitation [Текст] / H. Traineau, E. Lasne, B. Sanjuan // Proceedings of World Geothermal Congress 2015. – Melbourne, Australia. – 2015.

147. Varney, J. Performance measures in geothermal power developments [Текст] / J. Varney, S.J. Zarrouk, N. Bean, B. Bendall // Renewable Energy. – V. 101. – 2017. P. 835–844.

148. Watanabe, K. Numerical study on heat extraction from supercritical geothermal reservoir [Teκct] / K. Watanabe, Y. Niibori, T. Hashida // Proceedings World Geothermal Congress. Japan. – 2000. – P. 3957-3961.

149. Williams C. F. Updating the classification of geothermal resources [Текст] / С.F. Williams, J.J. Reed, A.F. Anderson // Proceedings of the 36 Workshop on geothermal reservoir engineering. – Stanford University, Stanford. – 2011.

150. Xing H. Recent development in numerical simulation of enhanced geothermal reservoirs [Текст] / H. Xing, Y. Liu, J. Gao, S. Chen // Journal of Earth Science. – V. 26. – Is. 1. – 2015. – Р. 28–36.

151. Zeng Y-C. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through a novel single vertical fracture at Desert Peak geothermal field [Текст] / Y-C. Zeng, N-Y. Wu, Z. Su, X-X. Wang, J. Hu // Energy. – V. 63. – 2013. – P. 268–282.

152. Zeng, Y-C. Numerical simulation of electricity generation potential from fractured granite reservoir through a single horizontal well at Yangbajing geothermal field [Teκct] / Y-C. Zeng, N-Y. Wu, Z. Su, J. Hu // Energy. – V. 65. – 2014. P. 472-487. 153. Zeng, Y-C. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through two horizontal wells at Desert Peak geothermal field [Teκct] / Y-C. Zeng, Z. Su, N-Y. Wu // Energy. – V. 56. – 2013. P. 92-107.