

На правах рукописи



ЧЕРКАСОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 25.00.10.

Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского
РАН

Научный консультант: академик РАН Ю.Н. Малышев

Официальные оппоненты:

Академик РАН, д. ф.-м.н. С.В. Алексеенко

д.т.н. Н.М. Булаева

д.т.н. Р.И. Пашкевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего
образования Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д.
Миллионщикова

Защита состоится 09 июня 2021 г. на заседании объединенного диссертационного совета
Д 999.234.02 на базе ФГБУН Геологического института Российской академии наук,
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго
Орджоникидзе» по адресу: 117485, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Российского
государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета  К.С. Мальский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Тематика возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в последние десятилетия сформировала один из наиболее значимых трендов развития энергетики. В мировом объеме производства энергии в качестве первичных источников продолжают превалировать уголь и углеводороды, однако доля ВИЭ неуклонно растет.

Геотермальная энергетика основана на использовании глубинного тепла Земли на основе теплоотбора либо из сухих горных пород, либо из резервуаров теплоэнергетических вод и пароводяных смесей. Теплоотбор реализуется посредством транспорта теплоносителя по скважинам со съемом тепловой энергии на поверхности, для чего создаются сложные природно-техногенные системы. Традиционно под природно-техногенными системами понимается результат негативного воздействия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду, но в случае геотермальной энергетики взаимное воздействие природной и техногенной подсистем друг на друга требует оптимизации природно-техногенных систем теплоотбора на ранних стадиях реализации геотермальных проектов.

Актуальность данной работы заключается в разработке методологии создания природно-техногенных систем геотермальной энергетики с учетом способов оптимизации характеристик геотермальных природно-техногенных систем, с одной стороны, минимизации геоэкологических рисков – с другой, и современного состояния технологий бурения и теплоотбора – с третьей.

Состояние проблемы. На настоящий момент в геотермальной энергетике существуют технологии прямого использования геотермальных ресурсов (использование теплоэнергетических вод для получения тепловой энергии - гидротермальные системы), и технологии производства электроэнергии (искусственные геотермальные системы – EGS и геотермальные системы на природных пароводяных смесях, петро- и гидротермальные системы, соответственно). Многие исследователи относят к геотермальной энергетике технологии тепловых насосов, но эти технологии относятся, скорее, к энергосберегающим, поскольку не производят энергию как таковую, но повышают эффективность отопительных систем.

Использованию геотермальных ресурсов посвящены работы таких российских и советских геологов, геофизиков, и теплотехников, как Л.А. Ячевский, В.И. Белоусов, А.А. Гайворонский, М.В. Кирпичев, Ф.А. Макаренко, С.А. Джамалов, А.Н. Тихонов, Б.А.

Локшин, В.И. Кононов, О.А. Кремнев, Ю.Д. Дядькин, Э.И. Богуславский, О.А. Поваров, М.Д. Хуторской, Г.В. Томаров, В.А. Бутузов, Р.И. Пашкевич, А.Б. Алхасов, Ш.Ш. Заурбеков, М.Ш. Минцаев, и многих других. С распадом СССР темпы развития российской геотермальной энергетики значительно снизились, и на сегодняшний день очевидным является отставание Российской Федерации от мирового уровня. Отставание вызвано, с одной стороны, изобилием энергоресурсов, в первую очередь – углеводородного сырья, а с другой – мультидисциплинарностью отрасли, в которой геологические, гидрогеологические, геофизические, теплофизические и теплотехнические аспекты требуют согласованного анализа для минимизации рисков и повышения эффективности объектов геотермальной энергетики.

Тем не менее, общая тенденция ухода от углеводородной энергетики ведет к росту перспектив использования геотермальных ресурсов, что, в свою очередь, требует усиления методологического обеспечения.

Анализ активности участников Всемирного геотермального конгресса 2020 г. - наиболее значимого международного форума по геотермальной энергетике, - показывает рост интереса отраслевых специалистов к вопросам, связанным с реализацией геотермальных проектов в целом, а также - к геологическим и экологическим аспектам геотермальной энергетики.

Целью настоящей работы является решение важной научно-технической проблемы: разработка методологии эффективного экологически чистого использования геотермальной энергии. Для реализации этой цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ современного состояния геотермальной энергетики, включая:
 - а) вопросы классификации геотермальных ресурсов и способов их использования;
 - б) анализ современных технологий теплоотбора с учетом связанных с ними геоэкологических рисков;
 - в) определение наиболее эффективных и экологически чистых технологий на основе теоретического и практического исследования геотермальных природно-техногенных систем;
2. Разработка методологии создания природно-техногенных гидротермальных систем для целей теплоотбора из месторождений теплоэнергетических вод;

3. Научное обоснование эффекта остаточного дебита циркуляционной гидротермальной системы и определение перспектив использования эффекта для оптимизации природно-техногенных геотермальных систем;
4. Разработка и апробация метода геоэкологического мониторинга геотермальных природно-техногенных систем.

Исследование выполнено в соответствии со следующими разделами паспорта специальности 25.00.38 «Геофизика. Геофизические методы поисков полезных ископаемых»:

- применение геофизических методов при решении задач охраны окружающей среды,
- интегрированный анализ многомерной, многопараметровой и разнородной информации, включающей геофизические данные,
- мониторинг геологического строения и разработки месторождений геофизическими методами,
- использование геолого-геофизических данных для построения геологических, гидродинамических и геодинамических моделей месторождений.

Объект исследований. Объектом исследования являются геотермальные природно-техногенные системы.

Предмет исследований. Разработка методологии создания и эксплуатации геотермальных природно-техногенных систем.

Научная новизна.

1. Разработана генерализованная актуализированная классификация геотермальных ресурсов по способам их использования, определены наиболее перспективные на настоящий момент способы использования геотермальной энергии и систематизированы геоэкологические риски геотермальной энергетики.
2. На основе подхода к геотермальным системам теплоотбора как к природно-техногенным системам разработана методология создания и эксплуатации объектов геотермальной энергетики.

3. Научно обоснован эффект остаточного дебита гидротермальной циркуляционной системы и определены перспективы его использования для оптимизации взаимодействия природных и техногенных геотермальных подсистем.
4. Разработана программа исследований эффекта остаточного дебита циркуляционной системы теплоотбора.
5. Предложен способ интерпретации данных беспилотной инфракрасной съемки, обеспечивающий выделение тепловых аномалий, связанных с технологическими и аварийными разливами теплоносителя в процессе эксплуатации месторождений теплоэнергетических вод.

Теоретическая значимость.

Предложен подход к системам теплоотбора геотермальной энергетики как к природно-техногенным системам, и на основе этого подхода разработана методология создания геотермальных природно-техногенных систем.

Научно обоснован эффект остаточного дебита гидротермальной циркуляционной системы и определены перспективы его использования для повышения эффективности природно-техногенных геотермальных систем.

Практическая значимость.

Выполнена актуализация классификации геотермальных ресурсов на основе существующих российских и зарубежных классификаций с использованием в качестве основного классификационного критерия способа использования тепла Земли. На основе проведенного анализа актуализированной классификации доказаны преимущества использования месторождений теплоэнергетических вод перед технологиями теплоотбора из «сухих» горячих пород с точки зрения как геоэкологии, так и существующих технологий теплоотбора.

Разработанная методология создания природно-техногенных гидротермальных систем обеспечивает оптимизацию взаимодействия природной и техногенной подсистем, и, как следствие, – минимизацию геоэкологических рисков при создании и эксплуатации объектов геотермальной энергетики. В рамках применения методологии при создании Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции создана трехмерная модель Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод, разработан пакет программного обеспечения GEOTHERM для моделирования изменения полей давлений, скоростей

потока и температур в резервуаре, произведена оценка температурной деградации резервуара теплоэнергетических вод при эксплуатации циркуляционной системы.

Разработана программа исследований эффекта остаточного дебита и установлена возможность его использования для повышения эффективности циркуляционных систем теплоотбора.

Предложен и опробован способ интерпретации результатов беспилотной инфракрасной аэросъемки, обеспечивающий обнаружение утечек на скважинах и в системе трубопроводов.

Защищаемые положения.

1. Разработанная упрощенная генерализованная классификация энергетических геотермальных ресурсов на основе возможностей их использования при современном уровне развития технологий определяет три основных класса: ресурсы для прямого использования теплоэнергетических вод с целью получения тепловой энергии, пригодной для целей отопления (низкоэнтальпийные или низкотемпературные); ресурсы, позволяющие использовать бинарные технологии производства электроэнергии (среднеэнтальпийные или среднетемпературные); и ресурсы, обеспечивающие производство электроэнергии с использованием паровой турбины и электрогенератора (высокоэнтальпийные или высокотемпературные).
2. Анализ актуализированной классификации геотермальных ресурсов определяет преимущества гидротермальных природно-техногенных систем перед петротермальными при современном уровне развития технологий бурения и теплоотбора. Месторождения теплоэнергетических вод при полной обратной закачке отработанного флюида являются наиболее экологически чистым возобновляемым источником энергии, не зависящим от погодных условий, при этом основными рисками, характерными для гидротермальных природно-техногенных систем являются:
 - химическое загрязнение на поверхности;
 - коррозия оборудования и осаждение минералов;
 - истощение резервуара или понижение температуры теплоносителя.
3. Циркуляционная гидротермальная система представляет собой сложную природно-техногенную систему, в которую входят резервуар, собственно

теплоэнергетические воды (природная подсистема), продуктивные и нагнетательные скважины, насосное и теплообменное оборудование (техногенная подсистема). Разработанная методология создания циркуляционных систем теплоотбора для месторождений теплоэнергетических вод обеспечивает оптимизацию взаимодействия природной и техногенной подсистем.

4. На Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод резервуар, представленный XIII пластом миоценового гидротермического этажа, характеризуется высокой температурой теплоэнергетических вод при их низкой минерализации, что позволяет не предпринимать специальных мер, связанных с негативным влиянием минерализации на техногенную подсистему ЦС. Температурные характеристики теплоэнергетических вод и водообильность XIII пласта обеспечивают как производство тепловой энергии, так и возможность производства электроэнергии с использованием бинарных технологий.
5. В природно-техногенных гидротермальных системах присутствует эффект остаточного дебита, заключающийся в перетоке теплоносителя от забоя продуктивной к забою нагнетательной скважины после выключения насосного оборудования вследствие разницы давлений, возникающей из-за разницы плотностей горячего и охлажденного флюида при герметичности техногенной подсистемы. Ханкальская опытно-промышленная геотермальная тепловая станция представляет собой уникальную научную установку, обеспечивающую проведение широкого круга исследований эффекта остаточного дебита циркуляционных систем. Эксплуатация гидротермальных природно-техногенных систем на основе циркуляционной схемы теплоотбора с эффектом остаточного дебита повышает эффективность использования тепла Земли для энергетики, тепло- и хладоснабжения, теплично-парникового хозяйства и промышленных процессов.
6. Мониторинг геотермальных природно-техногенных систем с использованием беспилотной инфракрасной аэросъемки является эффективным средством контроля эксплуатации месторождений теплоэнергетических вод, обеспечивающим выявление территорий разлива термальных вод на земную поверхность на основе анализа морфологических характеристик тепловых аномалий.

Личный вклад. Все положения, выносимые на защиту, выполнены автором или при его непосредственном участии. С целью продвижения геотермальной тематики автором организовано более 10 семинаров по геотермальной энергетике (2007, 2008, 2011 – Москва; 2008, 2011 – Майкоп; 2011, 2012, 2013 – Орлеан, Франция; 2012, 2014 – Грозный; 2015 – Рейкьявик, Исландия), подготовлены и прочитаны лекции по использованию геотермальных ресурсов (2018 – Северный арктический федеральный университет, Архангельск, и Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград). В семинарах приняли участие представители РАН и профильных компаний, администрации Республики Адыгея и Чеченской Республики, сотрудники Французской геологической службы. В мае 2018 г. проведен телемост «Геотермальные ресурсы и перспективы их использования в России», в котором приняли участие 26 университетов Российской Федерации, Белоруссии, Казахстана, и Узбекистана. В мае 2020 г. в рамках дистанционных научно-просветительских программ ГГМ РАН автором подготовлена и прочитана on-line лекция «Что такое геотермальная энергетика?», в августе 2020 г. в рамках III Международной летней школы «Береговая зона моря: исследования, управление и перспективы» - лекция «Геотермальный потенциал Балтийского региона. Реализация с учетом геоэкологических аспектов». Также автор был ответственным исполнителем двух проектов, связанных с тематикой работы: «Разработка программного обеспечения для математического моделирования геотермальной станции на основе циркуляционной системы (ГСЦС). Разработка и анализ электронного макета ГСЦС» (2013-2015, заказчик - ФГБОУ Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, в рамках Государственного контракта 02.G25.31.0056 «Комплексный проект по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли» с Министерством образования и науки РФ) и «Разработка методов и создание экспериментального образца беспилотного комплекса дистанционного оптического и магнитометрического мониторинга природных и техногенных сред» (2014-2016, заказчик - Минобрнауки РФ, Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»).

Автором разработана актуализированная генерализованная классификация геотермальных ресурсов, предложен новый подход к системам теплоотбора как к природно-техногенным геотермальным системам, разработана методология создания таких систем, определен и научно обоснован эффект остаточного дебита циркуляционной системы, предложен и опробован на Ханкальском месторождении теплоэнергетических

вод метод мониторинга эксплуатации природно-техногенных геотермальных систем с использованием беспилотной инфракрасной аэросъемки, разработана программа исследований эффекта остаточного дебита циркуляционной системы.

Апробация работы. Основные результаты исследований были опубликованы в российских и зарубежных журналах, были сделаны доклады на многочисленных конференциях, в т.ч. - на Совместной ассамблее IAG-IASPEI (2017, Кобе, Япония), Международной конференции «Новая энергетика: инвестиции и партнерства» (2017, Сколково), выставке Exro-2017 (2017, Астана, Казахстан, в рамках Российской бизнес-программы), Международной конференции «Науки о Земле - Geosciences» (2018, Ташкент, Узбекистан), IV Международном конгрессе REENCON-XXI (2018, Москва), и др. По теме диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 11 - в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 14 - в журналах, входящих в перечень ВАК. Также по тематике работы получены два патента РФ на полезную модель и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность бывшему директору по науке Французской геологической службы (BRGM) Кристиану Фуйяку, который более 10 лет назад познакомил автора с достижениями французских ученых и инженеров в области геотермальной энергетики; научному консультанту, академику РАН Малышеву Юрию Николаевичу за разностороннюю поддержку работ по направлению геотермии в течение многих лет; академику РАН Рундквисту Дмитрию Васильевичу за оказанное содействие в организации первых семинаров по геотермальной тематике в 2007-2008 г.г.; руководству Грозненского нефтяного технического университета им. Академика М.Д. Миллионщикова, и лично – Таймасханову Хасану Элимсултановичу, Заурбекову Шарпутди Шамсутдиновичу и Минцаеву Магомеду Шаваловичу за реализацию проекта по созданию опытно-промышленной тепловой геотермальной станции на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод; заместителю декана географического факультета Башкирского государственного университета Анвару Мансуровичу Фархутдинову за обстоятельную последовательную работу по прогнозу эксплуатационных характеристик Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции; сотрудникам ГГМ РАН и ГГНТУ, без которых создание этой станции было бы невозможно. Также автор благодарит группу компаний «Геоскан», и лично ее руководителя Алексея Евгеньевича Семенова за содействие в проведении экспериментальной инфракрасной съемки с использованием беспилотного летательного аппарата «Геоскан-201» на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод.

Фактический материал. Большой объем литературных данных, опыт Французской геологической службы (BRGM), ее дочерней компании CFG и исландской компании Verkis Ltd., а также личные наблюдения автора на геотермальных полях в Чеченской Республике, в Мексике и в Исландии являются основой первых глав работы. Основной объем фактической информации для создания трехмерной модели резервуара и математического моделирования процессов в геотермальной природно-техногенной системе получен при выполнении работ по «Комплексному проекту по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли». Именно в рамках данного проекта был обнаружен эффект остаточного дебита циркуляционной системы, проводились исследования по обратной закачке флюида в резервуар, проводилось математическое моделирование резервуара теплоэнергетических вод, результаты которого сопоставлялись с реальными данными, полученными в процессе строительства и эксплуатации Ханкальской опытно-промышленной тепловой геотермальной станции. Также на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод был опробован метод мониторинга эксплуатации месторождения с использованием беспилотной инфракрасной аэросъемки, проведенной ООО «Геоскан» по заказу ГГМ РАН, и предложен способ интерпретации ее результатов.

При выполнении работы использовался широкий спектр методов исследований. Актуализация классификации объектов геотермальной энергетики, оценка геоэкологических рисков геотермальных природно-техногенных систем и определение геоэкологических аспектов использования глубинного тепла Земли выполнены на основе анализа литературного материала. На стадии предпроектных исследований при создании Ханкальской опытно-промышленной тепловой геотермальной станции использовались методы трехмерного моделирования строения резервуара теплоэнергетических вод. Также математическое моделирование проводилось для прогноза температурного режима резервуара при водозаборе и обратной закачке в процессе эксплуатации станции и для сопоставления техногенного влияния на резервуар при принудительном теплоотборе и при теплоотборе с использованием эффекта остаточного дебита циркуляционной системы. Сам эффект остаточного дебита, обнаруженный при испытаниях циркуляционной системы, аналитически описан на основе гидростатических расчетов для несжимаемой жидкости. Для мониторинга эксплуатации месторождения теплоэнергетических вод использовался метод инфракрасной съемки поверхности Земли с применением беспилотного летательного аппарата и с последующей заверкой выявленных аномалий наземными полевыми наблюдениями.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, выводов, списка использованной литературы (149 источников, в т.ч. 30 - фондовых, и 4 – рукописных). Объем работы составляет 249 страниц, работа проиллюстрирована 62 рисунками, 12 таблицами, и 9-ю приложениями.

СОДЕРЖАНИЕ

Во введении приводится характеристика современного состояния объекта и предмета исследований, обосновывается необходимость актуализации и обобщения классификаций источников геотермальной энергии, реализации подхода к системам теплоотбора как к природно-техногенным системам, систематизации геоэкологических рисков, связанных с созданием и эксплуатацией природно-техногенных геотермальных систем и разработки методов мониторинга их эксплуатации.

При теоретически неограниченном потенциале и экологичности геотермальной энергетики ее доля в мировом энергобалансе незначительна, и по разным оценкам составляет от 0,5% до 0,67%, хотя в ряде стран этот показатель существенно превышает среднемировые значения. Так, на долю геотермальной энергии в Исландии приходится 70% энергобаланса страны, в Индонезии - 12%, на Филиппинах - 8%, в Турции – 3%. В таких штатах США как Калифорния и Невада доля геотермальной энергетики в производстве электроэнергии составляет, соответственно, 5,46% и 7,5%. В Парижском бассейне более 500000 жителей обеспечиваются теплом за счет геотермальных ресурсов. Считается, что на базе существующих технологий использование геотермальных ресурсов для генерации электричества экономически эффективно на 10-15% поверхности Земли и может достичь 80 GW (4% от мирового производства электроэнергии) к 2050 г.

Рассмотрение методологических аспектов создания и эксплуатации петро- и гидротермальных природно-техногенных систем в настоящей работе включает в себя следующие вопросы:

1. взаимодействие природной и техногенной подсистем;
2. применение методов и способов повышения эффективности и экологичности использования геотермальных ресурсов на разных стадиях создания объектов геотермальной энергетики;
3. оптимизация режима эксплуатации геотермальных природно-техногенных систем, в т.ч. – с использованием эффекта остаточного дебита;

4. дистанционный мониторинг эксплуатации месторождений теплоэнергетических вод.

В 1 главе рассматриваются данные современных научных исследований и результаты практического использования тепла Земли, характеризуется геотермальный потенциал России, и определяются основные проблемы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации.

Геотермальные ресурсы характеризуются рядом параметров, в число которых входят характеристики источника тепла и теплоносителя. Известно, что по источнику тепла ресурсы подразделяются на петротермальные (тепло сухих пород) и гидротермальные (резервуары термальных вод).

Последние исследования позволили в глобальном масштабе провести анализ перспективности территорий на прямое использование гидротермальных ресурсов. При анализе рассматривались: мощность осадочного чехла, как индикатор вероятности существования резервуара подземных вод; температурный градиент, определяющий глубину локализации гидротермальных ресурсов, и потенциальный спрос на обогрев или охлаждение жилых и производственных (в частности – тепличных) помещений. В результате исследований построены карты технической возможности прямого использования гидротермальных ресурсов в различных целях. Установлено, что в настоящий момент эти возможности используются менее чем на 0,1%.

Петротермальные ресурсы имеются в любой точке планеты, поскольку температура горных пород растет с глубиной, однако возможность их использования при существующих технологиях теплоотбора осложняется, во-первых, необходимостью глубокого бурения для достижения комплексов горных пород с температурой более 220-250 °С, во-вторых – сложностью прогноза свойств искусственного резервуара на этих глубинах, и, в-третьих – рисками создания искусственных землетрясений как при проведении гидроразрыва, так и при эксплуатации петротермальной циркуляционной системы. Так, петротермальный проект в Базеле, Швейцария, был закрыт после того, как при стимуляции резервуара на глубине около 5 км в период с декабря 2006 г. по март 2007 г. было зарегистрировано около 200 сейсмических колебаний с амплитудой от 0,7 до 3,4 балла, все – с эпицентрами в радиусе 1 км от забоя нагнетательной скважины.

Практически все существующие классификации геотермальных ресурсов основаны на температурных характеристиках источников тепла. Иногда в качестве основного показателя используется энтальпия (теплосодержание), но энтальпия для геотермальных ресурсов коррелирует с температурой, поэтому в данной работе для классификации

ресурсов используется температура. При этом петротермальные ресурсы целиком относятся к высокотемпературным (высокоэнтальпийным), а гидротермальные распределяются между высоко-, средне-, и низкотемпературными.

Согласно российской классификации, «месторождение подземных вод» – это пространственно ограниченная часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием комплекса геолого-экономических факторов создаются благоприятные условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для их целевого использования. Однако подземные воды распространены практически повсеместно, поэтому определение используется преимущественно в учётных целях для географической привязки участков оценки или эксплуатации подземных вод.

В российской системе недропользования рассматриваются промышленные и теплоэнергетические подземные воды. Подсчет и учет запасов месторождений теплоэнергетических вод производится так же, как и промышленных – в расходах подземных вод ($\text{м}^3/\text{сут}$ – для воды и $\text{т}/\text{сут}$ – для пароводяной смеси или пара).

В Российской Федерации разведано 66 гидротермальных месторождений, запасы термальных вод и пара которых оцениваются в 307 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. и 40,7 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$. соответственно.

Реальных работ по использованию петротермальных ресурсов в нашей стране не ведется, а за рубежом такие работы носят, в основном, экспериментальный и опытно-промышленный характер.

Практическое использование геотермальных ресурсов в России связано, в основном, с высокотемпературными геотермальными водами вулканических регионов, и вся геотемальная электрогенерация сосредоточена на Камчатке и на Курильских островах. Гидротермальные среднетемпературные и петротермальные ресурсы, составляющие около 99% энергии от общих ресурсов подземного тепла, пока остаются неиспользованными.

В некоторых регионах России (в т.ч. Республика Адыгея, Республика Дагестан, Чеченская Республика) среднеэнтальпийные геотермальные воды используются с 1970-ых годов для отопления помещений и сельскохозяйственных нужд. Но отработанные воды при этом, как правило, сливаются на рельеф, что пагубно влияет на окружающую среду, а долговременный отбор теплоэнергетических вод может снижать со временем дебиты эксплуатируемых скважин. Хорошей альтернативой в данном случае является использование современных технологий циркуляционных схем с обратной закачкой отработанного флюида.

Высокий интерес к развитию гидротермальной энергетики проявляют органы государственного управления, предприятия коммунального хозяйства и тепличные комплексы Республики Адыгея, Краснодарского края, Калининградской, Московской и Томской областей, Чеченской республики. В некоторых случаях использование геотермальных ресурсов является наиболее естественным путем развития топливно-энергетического комплекса. Это касается, в первую очередь, удаленных районов с неразвитой энергетической инфраструктурой.

В отношении петротермальной энергетики около 50 субъектов федерации одобрили проект «Развитие петротермальной энергетики в России», а также подписали обращение к президенту РФ о необходимости государственной поддержки и создания структуры для реализации проекта.

Развитие геотермальной энергетики на средне- и высокоэнтальпийных ресурсах требует повышенного внимания государства. На настоящий момент окупаемость геотермальной станции составляет 7-10 лет, в зависимости от используемых технологий и геологических особенностей региона. При этом существуют риски, особенно – при проведении буровых работ, на которые не готовы идти инвесторы. За рубежом бурение геотермальных скважин страхуется Всемирным банком, однако практики использования такого страхования в РФ нет.

В целом, состояние геотермальной энергетики в России отстает от мирового опыта в связи с доминированием других видов энергетики, в первую очередь - углеводородной энергетики, а также – в связи с несовершенством законодательной и нормативной базы в отношении возобновляемых источников энергии в целом, и особенно – в отношении геотермальной энергетики. Одним из серьезных последствий несовершенства законодательной базы в геотермальной энергетике является кадровая проблема, решение которой требует организации программ обучения, отвечающих современным требованиям отрасли.

Вторая глава посвящена актуализации и генерализации классификации геотермальных ресурсов.

Одна из первых классификаций была разработана в Исландии более 50 лет назад. После этого появился целый ряд классификаций, обусловленных развитием технологий и/или использованием определенных технологий в конкретных регионах. Высокотемпературными в первых классификациях считались системы, в которых на глубине 1 км температура достигала 150-200°C, при этом высокотемпературные поля связывались с активным вулканизмом, а низкотемпературные – с аномалиями

температурного градиента в верхней части земной коры. В более поздних вариантах исчезали и добавлялись промежуточные категории, менялись температурные границы (рис. 1).

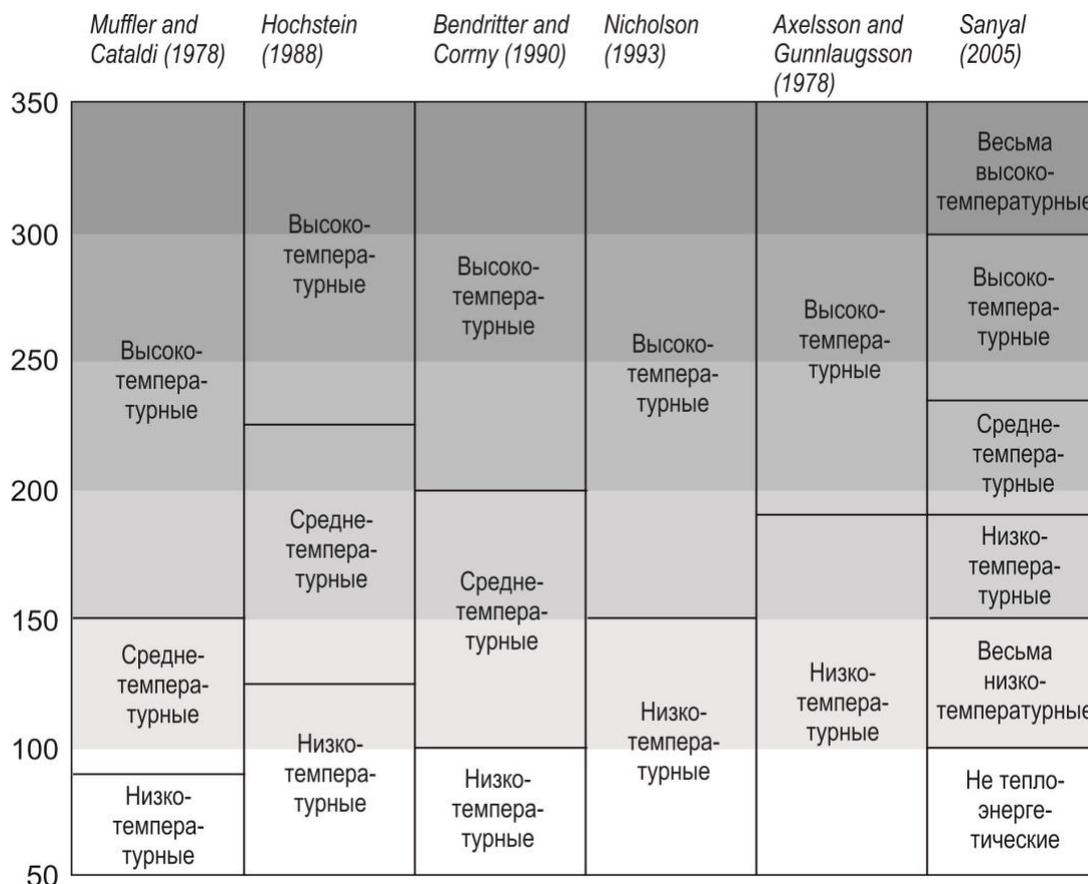


Рис. 1. Классификации гидротермальных ресурсов

Сводная характеристика существующих классификаций геотермальных (гидро- и петротермальных) ресурсов приведена в таблице 1.

Термальные подземные воды в существующих классификациях присутствуют во всех трех температурных классах, и классифицируются еще и по химическому составу. С точки зрения химизма классификации термальных вод соответствуют классификациям обычных подземных вод.

Из рис. 1 и таблицы 1 очевидно, что температурные классификации геотермальных ресурсов противоречат друг другу в части диапазонов температур, определяющих отнесение ресурса к низко-, средне-, или высокотемпературному классу. Также из таблицы 1 понятно, что такие критерии, как источник тепловой энергии, геотермический градиент, основная продукция и области применения не дают основы для

классификации, поскольку значения этих критериев совпадают для разных температурных диапазонов.

В то же время возможность использования разных технологий получения тепловой или электрической энергии достаточно четко определяется температурой теплоносителя, и может служить критерием отнесения ресурса к низко-, средне-, или высокотемпературному классу.

Таблица 1. Сводная характеристика существующих классификаций геотермальных ресурсов

Тип ресурсов	Источник тепловой энергии	Теплоноситель в циркуляционной системе	Геотермальный градиент, °С/100м	Температура резервуара, °С	Наземное оборудование	Основная продукция	Основные области применения	Страны активного использования	Использование в РФ
Низкотемпературные	Водонасыщенные слои осадочных бассейнов и артезианских впадин	Теплоэнергетические воды	2-10	40-150	ТНО*	Горячая вода	Теплоснабжение и горячее водоснабжение (ЖКХ, тепличное хозяйство), бальнеология, и др.	Турция, Франция, Исландия, Италия	Северный Кавказ
					ТНО с системой Калины или органическим циклом Ренкина, турбина, генератор	Горячая вода, электроэнергия	Теплоснабжение и горячее водоснабжение (ЖКХ, тепличное хозяйство), производство электроэнергии	Германия, Исландия, Китай, США, Япония	Нет
Среднетемпературные	Горячие горные породы**	Теплоэнергетические воды и пароводяная смесь	>10	От 90-125 до 150-225	ТНО, турбина, генератор			Горячая вода, электроэнергия	Теплоснабжение и горячее водоснабжение (ЖКХ, тепличное хозяйство), производство электроэнергии
Высокотемпературные						Пар	>(125-225)		

* - теплообменное и насосное оборудование
 ** - опытно-промышленные установки (EGS)

Автором предлагается упрощенная генерализованная классификация геотермальных ресурсов на основе возможностей их использования, содержащая три основных класса: ресурсы для прямого использования теплоэнергетических вод с целью получения тепловой энергии, пригодной для целей отопления; ресурсы, позволяющие использовать бинарные технологии производства электроэнергии (система Калины и органический цикл Ренкина); и ресурсы, обеспечивающие производство электроэнергии с использованием паровой турбины и электрогенератора (таблица 2).

На основе предложенной классификации формулируется первое защищаемое положение работы.

Таблица 2. Классификация геотермальных ресурсов по способам использования

Использование	Вид ресурсов	Теплоноситель	Температура теплоносителя, °С
Прямое	Гидротермальные	Вода	50-95
Бинарные технологии		Пароводяная смесь	95-150
Производство электроэнергии	Гидро- и петротермальные	Пар	Более 150

В третьей главе определяются основные геоэкологические аспекты геотермальной энергетики и обосновывается преимущество гидротермальных систем перед петротермальными при современном уровне развития технологий бурения и теплоотбора в Российской Федерации.

С точки зрения геоэкологии любое производство энергии воздействует на окружающую среду (таблица 3). При производстве энергии используются три основные схемы: получение тепловой энергии (реакции окисления, ядерные реакции, нагревание теплоносителя за счет солнечного или геотермального тепла), преобразование тепловой энергии в электрическую с применением турбинного и генераторного оборудования, и прямое получение электрической энергии (гидроэлектростанции и ветрогенераторы – посредством преобразования кинетической энергии в электрическую, солнечные панели – посредством фотоэлектрического преобразования энергии фотонов).

При этом возникающие геоэкологические аспекты связаны со следующими процессами:

- 1) получение энергетического сырья и производство оборудования (добыча и переработка углеводородов и радиоактивного сырья, получение чистого водорода, производство солнечных панелей);
- 2) получение и преобразования энергии (химические и ядерные реакции, изменение физико-химических характеристик природных объектов и процессов, в т.ч. - водных потоков, ландшафта, массивов горных пород);
- 3) образование отходов производства энергии (например, продукты сжигания горючих материалов, в т.ч. – золошлаковые отходы и углекислый газ, отработанное оборудование, включая солнечные панели).

Таблица 3. Геоэкологические аспекты энергетики (по источникам энергии)

Источник энергии		Горючие материалы			Атом	Солнце	Вода		Ветер	Геотермы	
		Водород	Углеродороды	Другие			Поток	Прилив		Теплоэнергетические воды	Тепло горных пород
Преобразование	1) в утилизируемое тепло	Реакции окисления			Ядерные реакции	Нагревание теплоносителя	-		-	Прямое использование	Прокатка теплоносителя через искусственный резервуар
	2) в электроэнергию	Паровая турбина и электрогенератор				Фотоэлектрическое преобразование	Кинетическая энергия потока, турбина, электрогенератор	Кинетическая энергия ветра, электрогенератор	Паровая турбина или турбина бинарной системы и электрогенератор	Паровая турбина и электрогенератор	
Геоэкологические аспекты		Аспекты, связанные с производством водорода	Выделение CO ₂ и других продуктов горения, воздействие добычи углеводородов и угля на окружающую среду	Воздействие на окружающую среду добычи и обогащения радиоактивного сырья, и утилизации отходов, риски	Утилизация панелей	Изменение естественных потоков	Изменение ландшафта	-	Негативные последствия гидроразрыва		

Как видно из таблицы 3, только гидротермальная энергетика характеризуется отсутствием явного негативного воздействия на окружающую среду (при полной обратной закачке теплоносителя). Тем не менее, и в гидротермальной, и, в большей степени – в петротермальной энергетике существуют геоэкологические риски, которыми нельзя пренебрегать. Эти риски связаны с возможным химическим загрязнением в результате разлива подземных вод, часто – минерализованных, на поверхности, с техногенным изменением гидродинамического равновесия как в резервуаре подземных вод, так и в массиве сухих горячих пород при прокачке через них теплоносителя, с понижением температуры подземных вод в результате обратной закачки охлажденного теплоносителя. На эффективность гидротермальных природно-техногенных систем также могут воздействовать вызванные минерализацией подземных вод процессы коррозии оборудования.

Минимизация рисков осуществляется посредством мониторинга утечек теплоносителя, микросейсмической активности в районе эксплуатации петротермальных ресурсов, и прогнозирования негативных процессов методами математического моделирования. Воздействие минерализованных вод на элементы ГЦС может регулироваться посредством ввода ингибиторов, замедляющих коррозию, и препятствующих процессам осаждения минералов, в ГЦС. При эксплуатации гидротермальных систем встречаются проблемы эмиссии сероводорода и углекислого газа при дегазации теплоносителя на поверхности, однако эти проблемы полностью решаются при обеспечении герметичности наземного оборудования первичного контура.

Таблица 4. Геоэкологические аспекты геотермальной энергетики

Ресурсы Риски	Гидротермальные		Петротер- мальные	Способы минимизации рисков
	Без обратной закачки	С обратной закачкой		
Химическое загрязнение на поверхности	средняя	низкая	низкая	Теплоотбор с полной обратной закачкой теплоносителя, мониторинг исправности оборудования
Коррозия оборудования и осаждение минералов	высокая	средняя	низкая	Ввод ингибиторов, замедляющих коррозию и осаждение минералов
Выбросы CO ₂	средняя	низкая	низкая	Герметичность первичного контура при полной обратной закачке теплоносителя
Загрязнение радиоактивными газами термальных вод	низкая	низкая	низкая	-
Истощение резервуара или понижение температуры теплоносителя	средняя	низкая	низкая	Математическое моделирование изменения свойств резервуара и оптимизация режима работы циркуляционной системы
Наведенная сейсмичность	низкая	низкая	высокая	Мониторинг наведенной сейсмической активности и оптимизация режима работы циркуляционной системы

В мировой практике исследовались риски, связанные с присутствием радиоактивных газов в природных термальных водах и в теплоносителе петротермальных систем, но на настоящий момент примеры сколько-нибудь опасного содержания неизвестны.

Сводная характеристика геоэкологических аспектов геотермальной энергетики приведена в таблице 4.

Таким образом, основные геоэкологические риски для гидротермальных природно-технических систем связаны с минерализацией теплоэнергетических вод, как с точки зрения загрязнения окружающей среды при разливе на поверхности, так и с точки зрения воздействия на оборудование геотермальной станции. При этом загрязнение практически исключается в случае обратной закачки отработанного флюида, а воздействие на оборудование может уменьшаться с помощью ингибиторов, нейтрализующих активные компоненты флюида.

Для петротермальной энергетики основным геозкологическим риском является возникновение наведенной сейсмичности при стимуляции и эксплуатации искусственного резервуара. На настоящий момент этот риск минимизируется только путем сложного математического моделирования и мониторингом сейсмичности в процессе создания и эксплуатации резервуара.

Третьей главе соответствует второе защищаемое положение.

В четвертой главе представлены результаты разработки методологии создания геотермальных природно-техногенных систем.

В отличие от бальнеологии, которая может использовать термальные воды непосредственно из источников на земной поверхности, объекты геотермальной энергетики требуют значительного стабильного дебита теплоносителя. Такой дебит может быть обеспечен только скважинным водозабором из подземного резервуара. Подземный естественный резервуар, или массив горных пород, в котором создается искусственный резервуар, парк водозаборных (продуктивных) и нагнетательных скважин, насосное и теплообменное оборудование в комплексе представляют собой сложную гидротермальную природно-техногенную систему, обеспечивающую теплоотбор из недр Земли. При этом природная и техногенная подсистемы взаимодействуют между собой, и это взаимодействие выражается в перераспределении физического вещества (теплоносителя, содержащего различные примеси), давлений и температур в системе.

Как правило, природно-техногенные системы рассматриваются с точки зрения уже произошедшего негативного антропогенного воздействия на природную подсистему. Предлагаемый подход к созданию систем теплоотбора для объектов гидротермальной энергетики заключается в обеспечении оптимального взаимодействия природной и техногенной подсистем циркуляционной системы на ранних стадиях создания гидротермальных природно-техногенных систем, в основном – на предпроектной стадии. Методология работ основана на анализе влияния параметров природной подсистемы на концептуальные и технические решения циркуляционной системы в целом.

Основными параметрами природной подсистемы гидротермальной природно-техногенной системы являются:

- Глубина локализации и мощность природного резервуара теплоэнергетических вод;
- Гидродинамические, гидростатические и емкостно-фильтрационные характеристики резервуара, в т.ч. коэффициент пористости, коэффициент

фильтрации, коэффициент пьезопроводности, проницаемость, водообильность;

- Температура и минерализация теплоэнергетических вод.

Эти параметры непосредственно определяют такие характеристики техногенной подсистемы, как локализация точек водозабора и нагнетания (забои продуктивной и нагнетательной скважины, соответственно), необходимость принятия специальных мер для обработки теплоэнергетических вод, и оптимальные параметры режима работы циркуляционной системы.

При этом локализация забоев скважин определяется по вертикали минимально возможной глубиной с целью минимизации капитальных затрат на буровые работы и обустройство скважин, а по латерали – комплексом факторов, обеспечивающих достаточную продолжительность жизни природно-техногенной системы. Последнее зависит от расстояния между забоями, естественного потока флюида в резервуаре, температуры и дебита нагнетания отработанного теплоносителя в резервуар. Здесь необходимо отметить тот факт, что оптимальное расстояние между забоями скважин является функцией не только изменения параметров гидротермальной природно-техногенной системы, но и финансовых потерь, связанных с этим изменением. Поэтому результаты математического моделирования температурной деградации резервуара необходимо рассматривать с точки зрения минимально допустимой для потребителя температуры теплоносителя на устье продуктивной скважины, а оптимизация расстояния между забоями должна учитывать такие экономические факторы как увеличение расходов на буровые работы при увеличении расстояния, и недополученный доход при снижении температуры.

Гидрогеохимические характеристики теплоэнергетических вод определяют необходимость принятия специальных мер для предотвращения коррозии оборудования и осаждения минералов на его внутренних поверхностях. При этом основными катализаторами коррозионных процессов являются кислотность флюида и его температура. При $\text{pH} < 4,3$ скорость коррозии резко возрастает, поэтому для кислых флюидов абсолютно необходимо предусматривать ингибирование компонентами с щелочными свойствами. Однако понижение кислотности стимулирует процессы осадкообразования на стенках оборудования, и, поскольку вторым основным фактором, влияющим на коррозию и осадкообразование является температура, различающаяся для восходящего и нисходящего потоков (осадкообразование более характерно в нисходящем охлажденном потоке), в общем случае на забой нагнетательной скважины закачиваются ингибиторы,

понижающие кислотность и нейтрализующие агрессивные компоненты, а после прохождения флюидом теплообменника – повышающие кислотность и способствующие растворению осаждающихся соединений.

Таблица 5. Характеристики природной гидротермальной подсистемы и их значение для проектирования ЦС

	Характеристика (параметр)	Источник информации	Пункты технического задания на проектирование
1	Глубина залегания, мощность, и геологическое строение резервуара теплоэнергетических вод	Геотермический градиент, геофизические данные, данные бурения и скважинных исследований	Глубина расположения забоев скважин
2	Пластовое давление в резервуаре	Измерения глубинным манометром, или расчет по статическому уровню	Определение требований к насосному оборудованию
3	Статический и динамический уровень теплоэнергетических вод	Статический уровень - определение уровня воды в скважине, динамический уровень определяется в ходе опытной откачки после бурения скважины	Определение заглубления насоса в продуктивной скважине
4	Гидродинамические и емкостно-фильтрационные характеристики резервуара	Маркерные исследования в резервуаре, лабораторные исследования пород, слагающих резервуар, экспериментальная откачка и закачка подземных вод	Расстояние между забоями нагнетательной и продуктивной скважин в резервуаре Проектный режим работы ЦС
5	Температура теплоносителя	Скважинная термометрия	Определение способа использования энергии теплоносителя и параметров теплообменного оборудования
6	Химический состав теплоносителя	Гидрогеохимические исследования	Определение необходимости принятия специальных мер для предотвращения коррозии оборудования и осаждения минералов и целесообразности извлечения полезных компонентов из теплоэнергетических вод

В соответствии с Правилами разработки месторождений теплоэнергетических вод ПБ 07-599-03, по минерализации месторождения подразделяются на пресные (до 1 г/л), солоноватые (1-10 г/л), соленые (10-35 г/л) и рассольные (>35 г/л). При этом принятие специальных мер, обеспечивающих отсутствие влияния минерализации, на практике в обязательном порядке производится для рассольных вод, как правило – для соленых, и в редких случаях – для солоноватых.

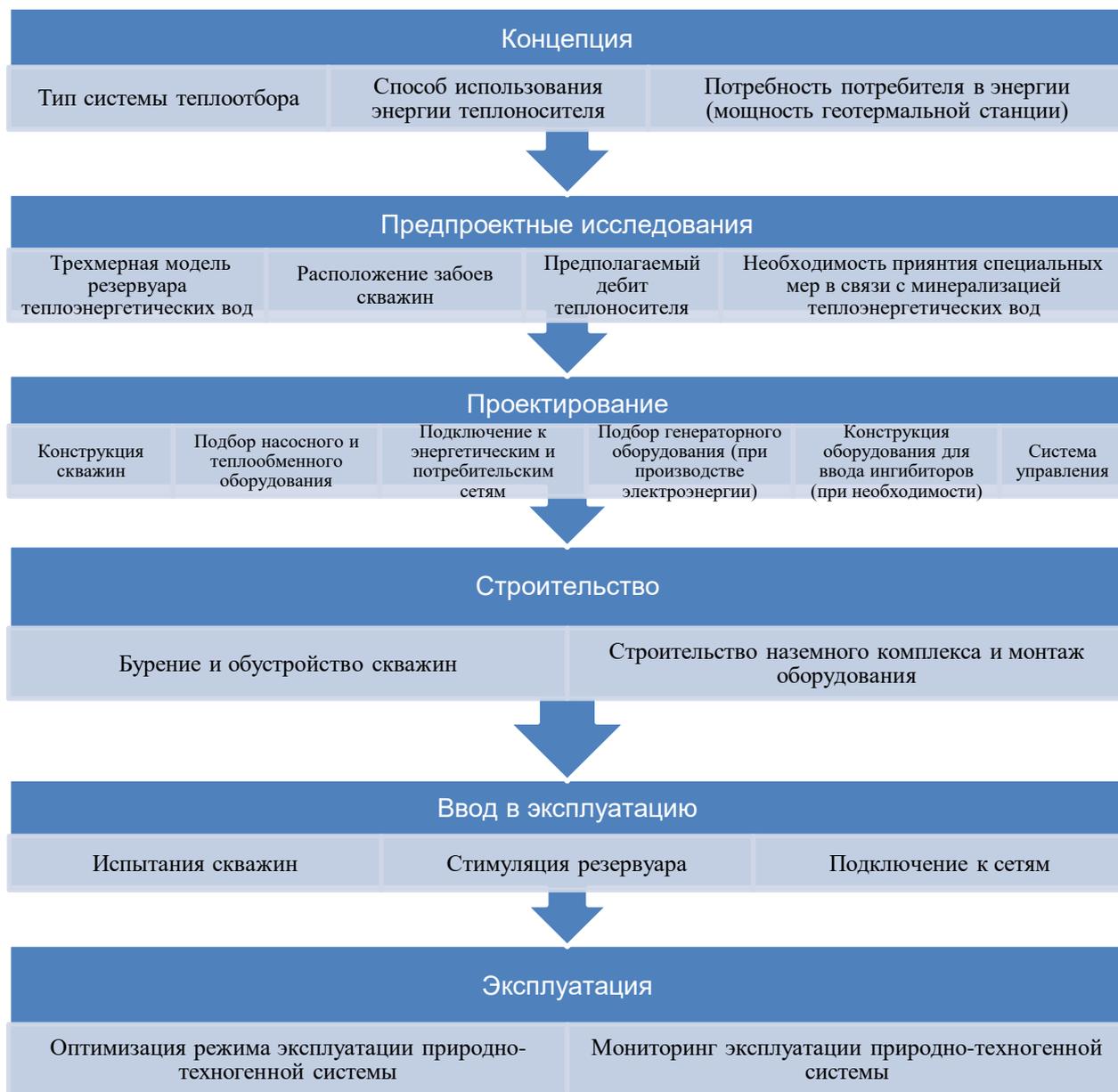


Рис. 2. Стадийность создания объекта гидротермальной энергетики

Здесь же следует отметить, что наличие примесей в теплоносителе может иметь не только негативный эффект. Иногда теплоэнергетические воды содержат редкие металлы и другие полезные компоненты в содержаниях, делающих их извлечение экономически целесообразным.

Характеристики природной подсистемы и их значение для проектирования циркуляционной системы сведены в таблице 5.

Блок-схема, демонстрирующая стадийность и последовательность действий по созданию объектов гидротермальной энергетики приведена на рис. 2. В рамках данной работы рассматриваются методы и способы создания и оптимизации гидротермальных природно-техногенных систем на стадиях разработки концепции, предпроектных исследований, ввода в эксплуатацию, и собственно эксплуатации объекта гидротермальной энергетики. На стадиях проектирования и строительства объекта решаются инженерные задачи по выполнению технического задания, формулируемого на стадии предпроектных исследований.

Вопросы, связанные с эксплуатационной стадией создания объекта гидротермальной энергетики, более подробно рассматриваются в главах 6 и 7.

По результатам исследований, рассматриваемых в четвертой главе, формулируется 3-е защищаемое положение.

Пятая глава посвящена реализации методологии создания гидротермальных природно-технических систем при выполнении "Комплексного проекта по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли". В рамках этого проекта создана первая и единственная в Российской Федерации дублетная циркуляционная система.

Гидрогеологические и структурно-тектонические особенности территории Чеченской Республики определяются ее расположением в юго-восточной части Восточно-Предкавказского артезианского бассейна, на стыке горно-складчатой области большого Кавказа и Предкавказского передового прогиба. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн является гидрогеологической структурой II-го порядка, площадь которого вместе с субмаринной частью составляет 250 тыс. км². В пределах бассейна на территории Ханкальского месторождения выделяются три гидротермических этажа, изолированных друг от друга мощными водонепроницаемыми толщами сарматских и майкопских глин: плиоценовый, миоценовый и мезозойский. Основные ресурсы термальных подземных вод Чеченской Республики связаны с миоценовым гидротермическим этажом, представленным серией караган-чокракских продуктивных пластов. Водоносный комплекс развит на большой площади от предгорий до северных границ республики. Всего в пределах района в разрезе среднемиоценовых отложений выделяется 23 песчаных

пласта, из которых 10 приурочены к отложениям чокракского возраста, 13 – караганского. С участием автора были проведены детальные геохимические исследования подземных вод Ханкальского месторождения проведены в ходе выполнения НИР по теме «Геохимические исследования и разработка практических рекомендаций по геотермальным месторождениям Северного Кавказа для снижения агрессии при строительстве геотермальных станций».

Для выбора продуктивного ресурса дублетной ГЦС на Ханкальском месторождении рассматривались несколько вариантов. Наиболее благоприятными для реализации циркуляционной схемы теплоотбора являются имевшие максимальный дебит при самоизливе и наилучшие фильтрационные параметры продуктивные пласты IV-VII, XIII, XVI и XXII. Поскольку добыча воды из XXII пласта запрещена Госгортехнадзором для защиты Серноводских источников от истощения, при выборе продуктивного пласта рассматривались только пласты IV-VII, XIII и XVI. Наряду с гидрогеологическими характеристиками выбор XIII пласта обусловлен наличием сравнительно большого количества данных, позволивших включить его в 3D геологическую модель Ханкальского месторождения, а также положительным опытом обратной закачки вод в пласт. Кроме этого, XIII пласт караганского горизонта является одним из самых продуктивных на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод с довольно выдержанной по площади мощностью (в среднем 47 м). Фильтрационные параметры XIII и других продуктивных пластов изучались в 1968 и 1987 годах. Химизм теплоэнергетических вод XIII пласта, которые являются практически пресными, не требует принятия специальных мер для предупреждения негативного воздействия на оборудование геотермальной станции, но при разработке других водоносных пластов Ханкальского месторождения необходимы исследования такого воздействия.

Выбор XIII пласта в качестве продуктивного горизонта обусловлен низкой минерализацией теплоэнергетических вод и расположением пласта на глубине 750-900 м благодаря антиклинальной складке, погружающейся в юго-восточном направлении и двум взбросам, формирующим дислокацию типа горст, севернее и южнее которых продуктивные пласты погружаются на большие глубины. XIII пласт представлен крупнозернистым, кварцевым песчаником, имеет включения глины, в виде комочков очень незначительной величины встречаются зерна глауконита. Мощность пласта 40-50 м. Пласт хорошо прослеживается на каротажных диаграммах. XIII пласт является одним из самых водообильных пластов, поэтому является ведущим по добыче термальных вод на Ханкальском месторождении. Коллекторские свойства песчаника характеризуются

следующими показателями: коэффициент пористости 24,1%, коэффициент фильтрации по данным определения в Ханкальской долине изменяется от 1,41 до 2,3 м/сут, коэффициент пьезопроводности – $(2,5 - 4,75) \times 10^5$ м²/сут, проницаемость до $2,8 \times 10^{-12}$ м². Водообильность горизонта характеризуется удельными дебитами скважин до 1 л/сек. Воды пласта относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу с минерализацией 0,98-1,5 г/л, жесткость вод низкая 1,48-3,7 мг-экв/л. Гидростатические уровни XIII пласта в Ханкальской долине составляют около +210м. Температура в пласте до 100 и более °С.

Для создания опытно-промышленной станции были проанализированы имеющиеся данные о геологическом строении Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод, построена трехмерная геологическая модель месторождения (рис. 3). Выбор положения скважин циркуляционной системы производился на основе сбора и анализа всей имеющейся информации по Ханкальскому месторождению теплоэнергетических вод, для чего были разработаны и созданы единая база данных, объединяющая текстовую и графическую информацию, и трехмерная модель XIII пласта. При разработке технического задания на проектирование скважин кроме геологического строения и гидрогеологических характеристик месторождения использовались результаты прогноза температурной деградации резервуара в результате эксплуатации ЦС, осуществленного с помощью методов математического моделирования.

С использованием построенных моделей оптимальное проектное положение устьев и забоев водозаборной и нагнетательной скважин было определено исходя из трех основных критериев:

- минимальная глубина залегания продуктивного слоя;
- достаточное расстояние забоев скважин от разломов, которые могут негативно влиять на гидродинамические и температурные характеристики ЦС;
- расстояние между забоями должно обеспечивать ограниченное влияние закачки охлажденного теплоносителя на температуру на забое продуктивной скважины.

Полученное в результате анализа результатов моделирования проектное положение скважин легло в основу технического задания на производство буровых работ.

В отношении минерализации теплоэнергетических вод как литературные данные, так и специально проведенные гидрогеохимические исследования показали отсутствие

необходимости проведения специальных мероприятий для предупреждения негативного воздействия теплоносителя на оборудование геотермальной станции.

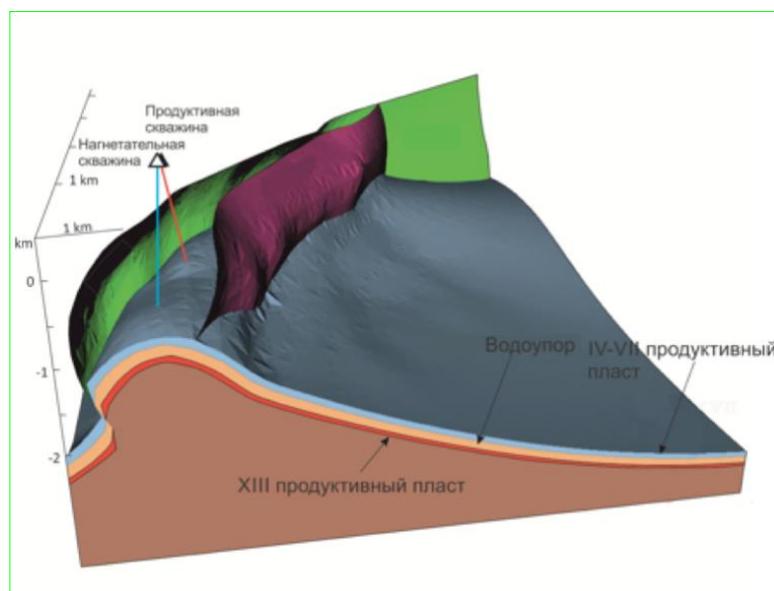


Рис. 3. Выбор положения скважин с использованием трехмерной геологической модели Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод

В соответствии с техническим заданием были пробурены водозаборная вертикальная скважина глубиной 904,5 м, и наклонная нагнетательная скважина глубиной 975 м. Расстояние между устьями скважин на поверхности составляет 10 м, а между забоями скважин в резервуаре - 442 м. Последнее значение не соответствует требованиям технического задания, поскольку по техническим причинам наклонную скважину не удалось увести на проектное расстояние (800 м). Следует отметить, что разница в изменениях температуры на забое водозаборной скважины для разносов 800 м и 442 м является более чем существенной (рис. 4). В практическом приложении это означает, что для увеличения срока службы станции необходимо уделить особое внимание оптимизации режима работы ЦС, и этот вопрос рассматривается в главе 6.

Пробуренные скважины являются артезианскими с самоизливом в объеме 60-70 куб.м в час. Насосное оборудование обеспечивает максимальный дебит ГЦС 200 куб. м в час при 100%-ной обратной закачке охлажденного флюида в резервуар. Водозабор обеспечивается скважинным насосом мощностью 34 кВт, а обратная закачка - насосом мощностью 250 кВт. Флюид представлен практически пресной до солоноватой (минерализация в резервуаре – от 0,7 г/л до 1,9 г/л) водой с температурой 96°C. После

теплообменника температура флюида снижается до 60°C, при этом его плотность возрастает с 961.9 до 983.2 кг/м³.

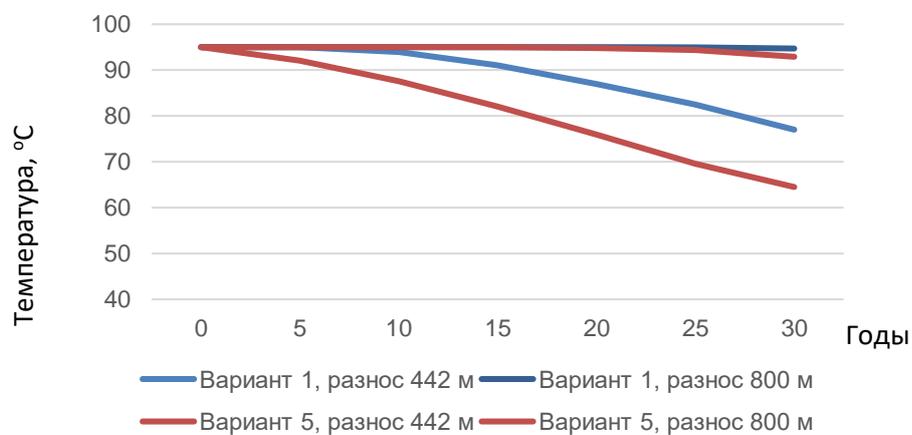


Рис. 4. Сравнение температурной деградации резервуара для режимов с минимальным (вариант 1) и максимальным (вариант 5) дебитом при расстоянии между забоями водозаборной и нагнетательной скважин 442 м и 800 м.

По результатам исследований, рассматриваемых в пятой главе, формулируется 4-е защищаемое положение.

В шестой главе приведены технические характеристики Ханкальской опытно-промышленной геотермальной станции, проанализировано ее значение для развития геотермальной энергетики в Российской Федерации, определен и научно обоснован эффект остаточного дебита циркуляционной системы, рассмотрены направления его дальнейшего исследования и возможности использования для повышения эффективности циркуляционной системы.

В ходе испытаний циркуляционной системы Ханкальской опытно-промышленной станции обнаружен эффект остаточного дебита, заключающийся в продолжении циркуляции теплоносителя после выключения насосного оборудования.

Ханкальская опытно-промышленная геотермальная станция – первая в России станция «дублетного» типа со 100%-ной обратной закачкой, оснащенная контрольно-измерительным оборудованием и системой управления, обеспечивающими работу станции в разных режимах с автоматической регистрацией.

Опытно-промышленная станция оснащена контрольно-измерительным оборудованием и программируемым контроллером Siemens серии Simatic S7-1500, позволяющим в автоматическом режиме регистрировать практически любые параметры

ЦС и реагировать на отклонения от нормального режима работы. Насосы станции оснащены частотными конвертерами, обеспечивающими управление дебитом ЦС.

Станция оборудована датчиками, передающими на диспетчерский пульт 82 параметра, включая значения расходов, давлений и температур в трубопроводах, перед теплообменниками, и после них. Также на станции предусмотрена возможность реализации бинарной схемы для производства электроэнергии. Для установки теплообменника бинарной схемы имеются отводы, позволяющие включить такой теплообменник параллельно действующему.

Такие возможности позволяют проводить широкий спектр экспериментов по производству электроэнергии, по гидродинамической стимуляции резервуара, и по оптимизации режима работы циркуляционной системы, в том числе – с использованием эффекта остаточного дебита. Для использования эффекта в геотермальной энергетике необходимы его детальные исследования, в рамках которых необходимо, в первую очередь, обратить внимание на такие факторы, как сопротивление элементов циркуляционной системы движению флюида, режимы работы насосного оборудования, степень понижения температуры флюида в теплообменнике, возможные изменения приемистости нагнетательной скважины в зависимости от режима работы.

Феномен эффекта остаточного дебита упоминается в литературе, но природа эффекта не анализируется.

В ходе испытаний циркуляционной системы после отключения насосов наблюдался дебит на уровне 25 куб.м/час. Программа испытаний не включала в себя исследования остаточного дебита ГЦС, но предусматривала перерыв в работе насосного оборудования продолжительностью 2 часа, в течение которых дебит не понижался.

При работе ЦС в штатном режиме циркуляция флюида обеспечивается двумя насосами, один из которых расположен в водозаборной скважине, а второй, нагнетательный, – на поверхности (рис. 5). В единичной скважине при неработающих насосах на флюид на забое скважины действуют две основные силы: сила

$$F_1 = P_{пл} S, \quad (1)$$

где $P_{пл}$ - пластовое давление, а S – площадь горизонтального сечения (диаметр) скважины, и сила

$$F_2 = \rho g h S, \quad (2)$$

где ρ – плотность флюида, g – ускорение свободного падения, и h – высота столба флюида в скважине, ρgh – давление на забое. При этом первая сила направлена вверх, а вторая – вниз по скважине. При $F_1 > F_2$, и при условии, что h в (2) равно расстоянию от устья до забоя скважины, происходит самоизлив флюида на поверхность, и скважина является артезианской.

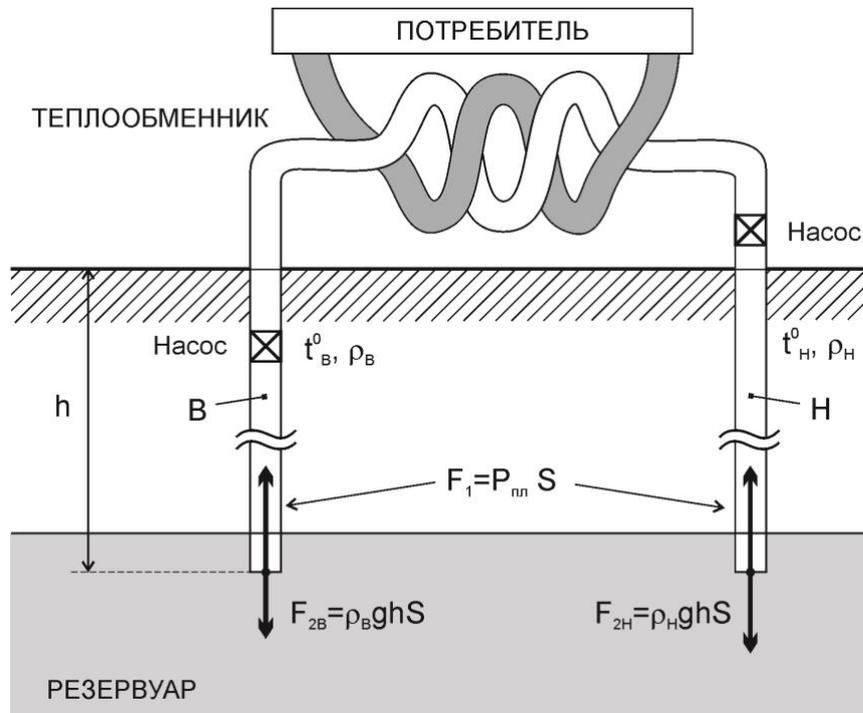


Рис. 5. Схема циркуляционной системы теплоотбора. В – водозаборная, Н – нагнетательная скважины. Остальные обозначения см. в тексте.

В системе из двух скважин насосы «запускают» циркуляционную систему и поддерживают требуемый режим работы. При этом флюид в теплообменнике охлаждается и в нагнетательной скважине температура флюида становится ниже, чем в водозаборной. При выключении насосов, постоянном пластовом давлении в резервуаре, и при одинаковой глубине скважин система из двух скважин, герметично соединенных первичным контуром теплообменника, находилась бы в гидростатическом равновесии, если бы не разница в температуре, создающая разницу в плотности флюида. Температура флюида в водозаборной скважине соответствует температуре на забое $t_{В}^0$, а плотность флюида составляет ρ_B . После теплообменника, где флюид охлаждается до температуры $t_{Н}^0$, в нагнетательной скважине плотность флюида составляет ρ_H . Разница гидростатических давлений на забоях водозаборной ($\rho_B gh$) и нагнетательной ($\rho_H gh$) скважин является причиной перетока флюида из резервуара через водозаборную скважину, теплообменник,

и нагнетательную скважину обратно в резервуар, продолжающегося с некоторой скоростью потока v и при остановке насосов. Следует подчеркнуть, что эффект остаточного дебита, строго говоря, не представляет собой циркуляцию в полном смысле этого слова, поскольку в самом резервуаре мы имеем точку водозабора и точку нагнетания флюида, которые не обязательно гидродинамически связаны. Фактически резервуар при рассмотрении эффекта остаточного дебита играет роль источника горячего флюида, перетекающего от забоя водозаборной к забою нагнетательной скважины за счет разницы гидростатических давлений на забоях скважин. При этом чем больше тепла снимается с теплоносителя в теплообменнике, т.е. чем больше разница температур в водозаборной и нагнетательной скважинах, тем больше разница давлений, и, соответственно, дебит системы при неработающих насосах.

Теоретически из формулы (2) видно, что разница давлений может зависеть не только от плотности (температуры) флюида, но и от высоты столба флюида (глубины скважины). Т.е., если форма резервуара разрешает конфигурацию циркуляционной системы, в которой забой нагнетательной скважины расположен глубже, чем забой водозаборной, в системе со скважинами разной глубины также возможен самопроизвольный переток флюида.

Наблюдаемый эффект может использоваться для повышения эффективности геотермальных тепловых и электростанций, на которых производится обратная закачка флюида.

При принудительной циркуляции за 15 лет тепловая мощность Ханкальской станции понизится на 16-18%. Сравнение температурной деградации резервуара при принудительной циркуляции и при циркуляции с использованием только эффекта остаточного дебита приводится на рис. 6.

Тепловая мощность станции составляет до 10 МВт и до 1,3 МВт для принудительной и самопроизвольной (при дебите 25 куб. м/час) циркуляции, соответственно. При этом для принудительной циркуляции необходима работа нагнетательного насоса мощностью 250 Вт, что эквивалентно примерно 3 МВт тепловой мощности, если производить электроэнергию с использованием бинарной установки на флюиде Ханкальской станции. Таким образом, эффективная тепловая мощность (за вычетом мощности, расходуемой на принудительную циркуляцию) изменяется от 7 до 1,3 МВт в зависимости от режима работы ГЦС, и управление режимом может осуществляться в соответствии с потребностью в тепловой энергии.

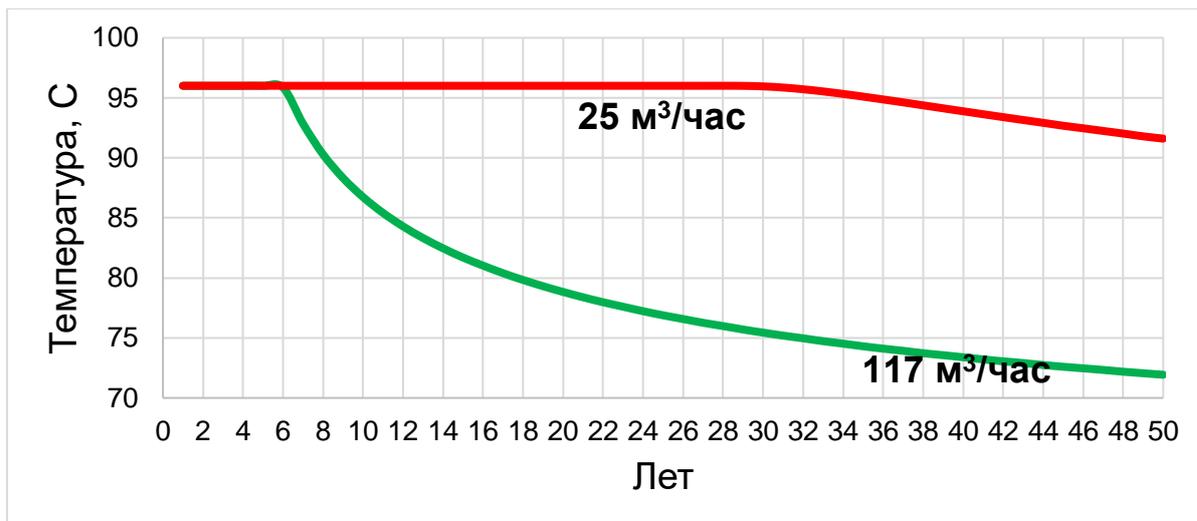


Рис. 6. Изменение температуры на забое продуктивной скважины для принудительной (зеленая линия) и самопроизвольной (красная линия) циркуляции

Следует отметить, что эффект остаточного дебита может наблюдаться только в «замкнутых» ГЦС без выхода теплоносителя первичного контура на поверхность, поскольку в случае нарушения герметичности техногенной подсистемы ЦС при отключении насосного оборудования обе скважины будут функционировать как артезианские.

Предлагается программа исследований эффекта остаточного дебита циркуляционной системы, рассматриваются возможные результаты исследования и их потенциальное значение для повышения эффективности «дублетных» систем теплоотбора. Основной целью исследований является обоснование возможности и разработка технологий использования эффекта остаточного дебита для повышения эффективности гидротермальных природно-техногенных систем.

Для исследований эффекта остаточного дебита необходимо обеспечить управление температурой в нагнетательной скважине при герметичности первичного контура ЦС. При испытаниях ЦС в процессе создания станции в качестве имитатора нагрузки использовался расположенный в 110 м от станции дренажный канал. Для проведения исследований эффекта остаточного дебита дренажный канал может использоваться как источник холодной воды, подаваемой во вторичный контур теплообменника (рис. 7а), либо, как и в процессе испытаний, в качестве имитатора нагрузки (рис. 7б).

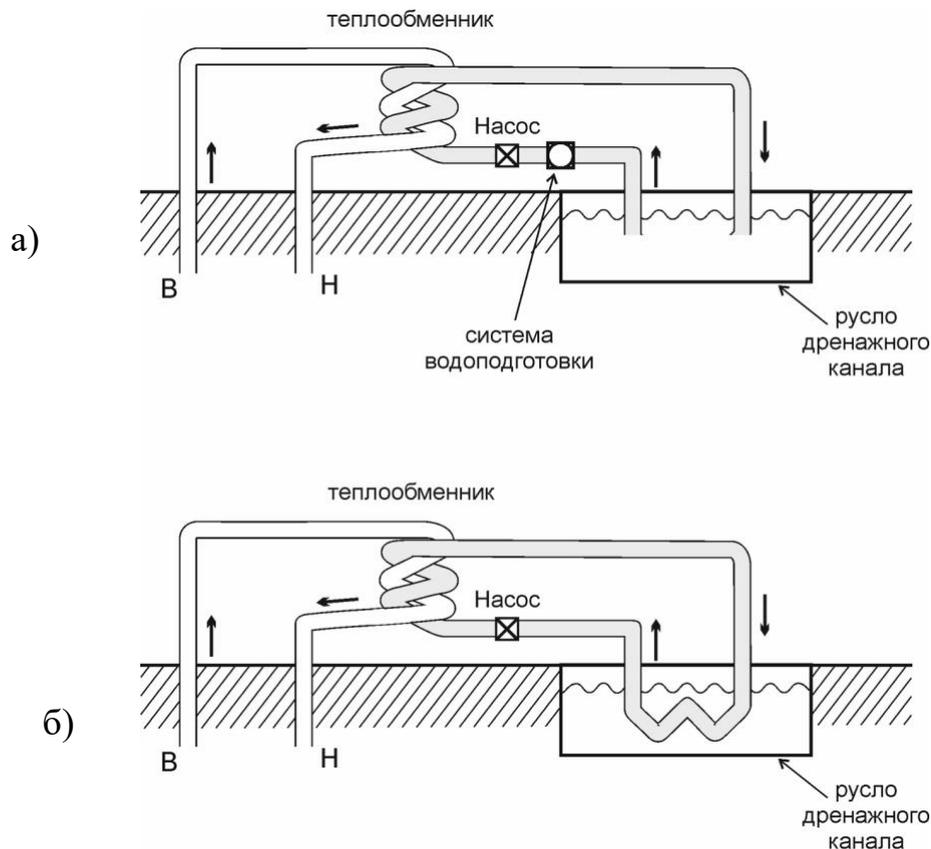


Рис. 7. Использование дренажного канала в качестве имитатора нагрузки геотермальной станции.
В – водозаборная, Н – нагнетательная скважины.

Полученные для гидротермальных природно-технических систем результаты в дальнейшем могут быть использованы и на объектах петротермальной энергетики.

В целом 6-я глава обосновывает 5-е защищаемое положение.

7-я глава посвящена предложенному автором методу дистанционного мониторинга геотермальных природно-техногенных систем, которые могут быть распространены по площади до нескольких квадратных километров, как в случае Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод. Метод основан на использовании беспилотного летательного аппарата (БПЛА), оснащенного инфракрасной камерой, и реализован на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод. Для проведения инфракрасной съемки использовался беспилотный летательный аппарат Геоскан 201, разработанный для съемки площадных и линейно-протяженных объектов (рис. 8). В воздухе БПЛА может находиться в течение 3 часов, что при скорости полета 80 км/час позволяет исследовать большие по площади территории. Запуск БПЛА осуществляется с помощью катапульты, посадка – на парашюте. Комплекс работает полностью автоматически, наземная станция управления даёт возможность контролировать все этапы полёта.



Рис. 8. Беспилотный летательный аппарат Геоскан-201

Беспилотный летательный аппарат способен нести до 1 кг полезной нагрузки, в ходе эксперимента - тепловизор Thermophrame-M и камера видимого диапазона, съёмка которыми производилась синхронно.

Маршрут рассчитывался автоматически, исходя из параметров матрицы и оптики тепловизора (фокусное расстояние 25 мм, разрешение 640x480). Съёмки проводились в соответствии с алгоритмами программы GeoScan Planner, являющейся частью наземной станции управления БПЛА, исходя из необходимости 70% перекрытия между соседними кадрами. Сшивка снимков осуществлялась с применением программы Agisoft PhotoScan по алгоритму накидного монтажа. Параметры ориентации изображений для накидного монтажа были получены в процессе сшивки кадров видимого диапазона (фотокамеры).

На рисунке 9 представлены географически привязанные карты территории исследования, полученные в результате фото- и теплосъёмки с помощью БПЛА.

Общая площадь участка составила 3.71 км². Для охвата всей территории было произведено 2 полета продолжительностью 3 часа 20 минут, обработка полученных данных проводилась в течение 2 рабочих дней.

По итогам обработки результатов теплосъёмки Ханкальского месторождения термальных подземных вод и прилегающей территории было выделено 13 тепловых аномалий (рис. 10). Анализ формы и температуры выявленных аномалий позволил предположить их источники: костер, скважины, системы отопления и др. (таблица 6).

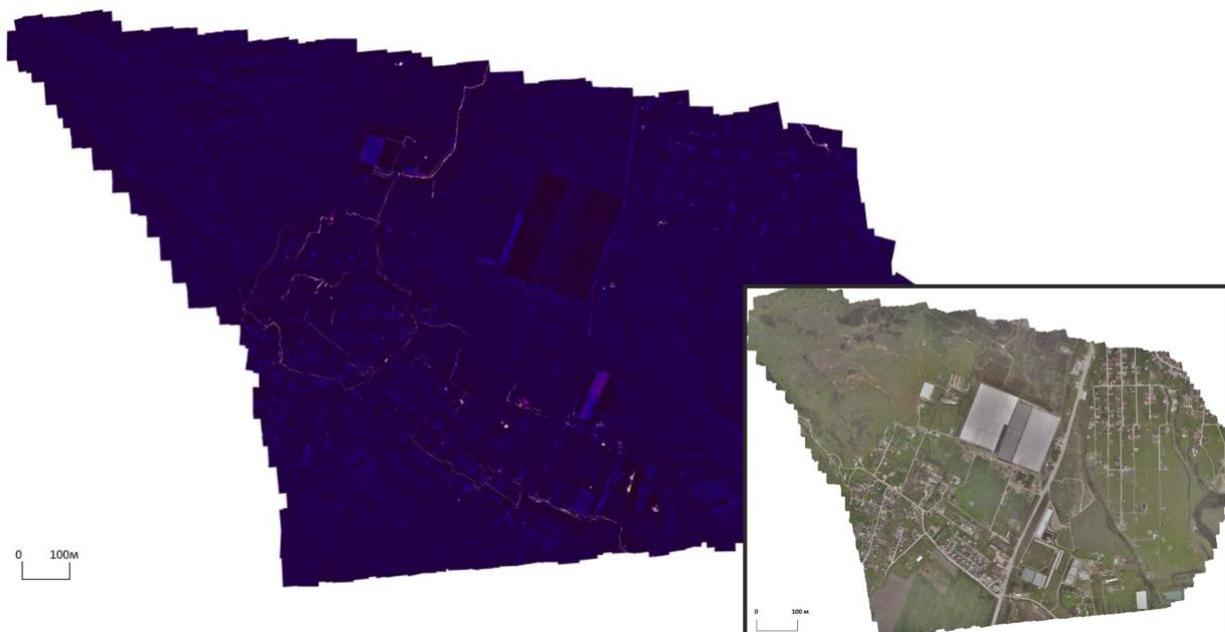


Рис. 9. Тепло- и фотосъемка Ханкальского месторождения и прилегающей территории

Впоследствии проведена наземная рекогносцировка исследуемой территории для уточнения источников выделенных аномалий (рис. 11). Координаты при проведении рекогносцировки определялись с помощью GPS навигатора.

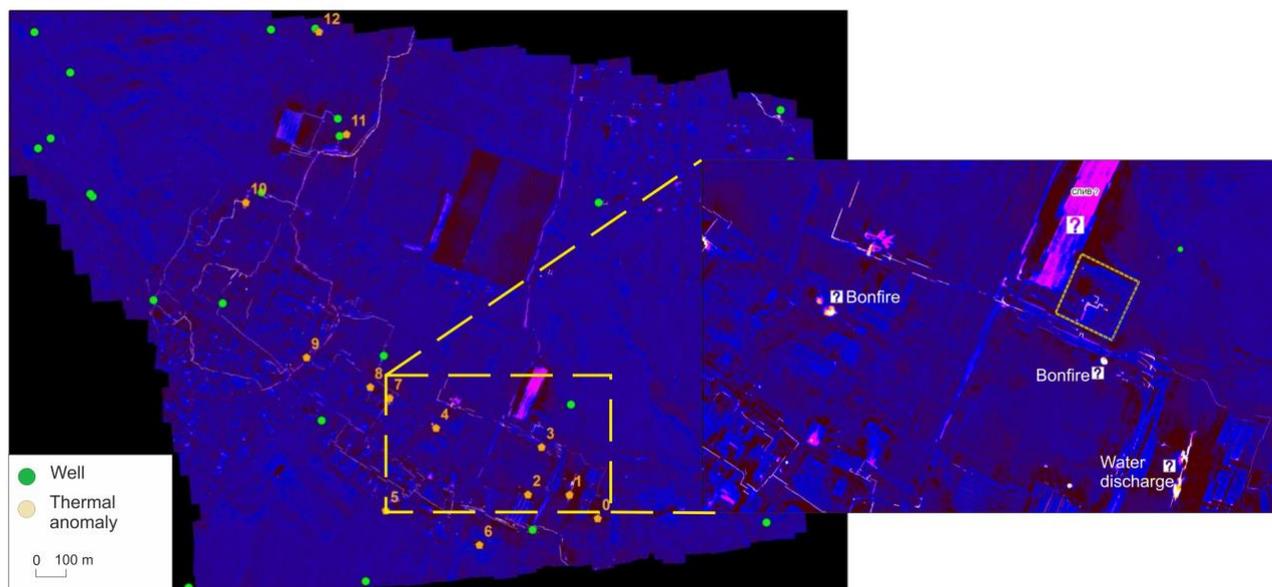


Рис. 10. Аномалии тепловой аэросъемки п. Гикало

Таблица 6. Температурные аномалии исследуемой области

Источник аномалии	Температура (условные температурные единицы)	Форма аномалии
Костер	60-70	Изометричная
Система отопления (теплица)	50-65	Сложная, изометричная
Скважина	40-55	Изометричная
Разлив теплоносителя из трубопроводов системы отопления или на устье скважины	45-55	Сложная, коррелирует с рельефом
Слив отработанного теплоносителя на рельеф	50-60	Сложная, коррелирует с рельефом
Колодец для слива из системы отопления (дом)	20-25	Изометричная форма

Результаты наземной проверки подтвердили все ранее предположенные источники аномалий по анализу тепловой съемки. При сливе горячей воды на поверхность форма аномалии существенно зависела от рельефа. Температурные характеристики аномалий неинформативны вследствие их изменений со временем.

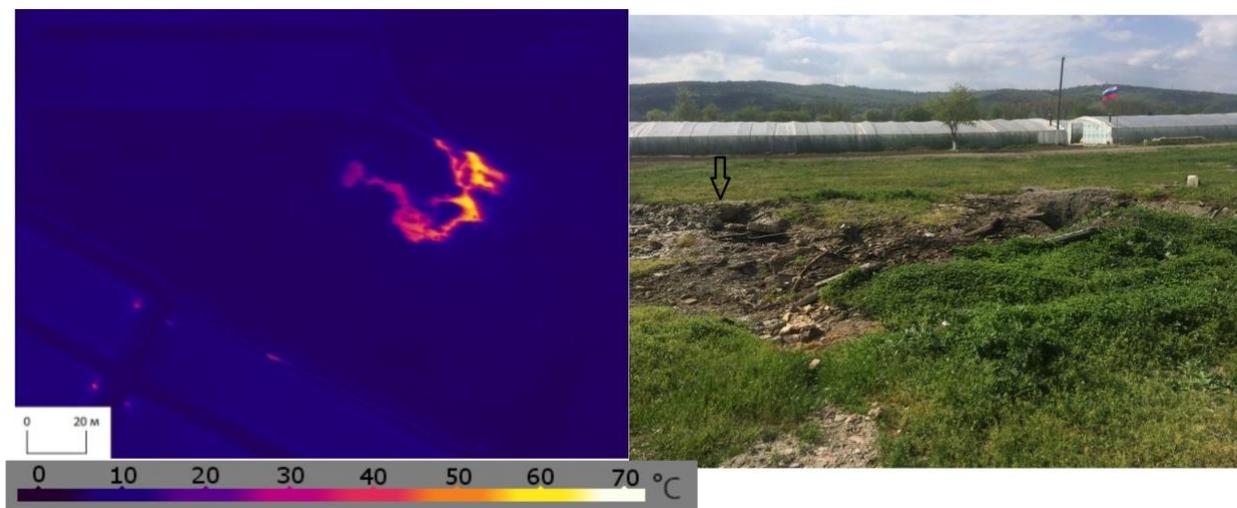


Рис. 11. Аномалия тепловой съемки №1 – слив воды из системы отопления теплиц

Отдельно рассматривалась возможность определения режимов работы геотермальной станции по результатам инфракрасной съемки. Для этого один полет проведен при работе станции без обратной закачки флюида (производится слив отработанного флюида на рельеф), а второй – при работе станции в штатном режиме. Результаты мониторинга демонстрируют применимость метода для дистанционного контроля режима работы станции и картирования как разливов отработанного теплоносителя из первичного, так и утечек из вторичного (потребительского) контуров.

По приведенным результатам исследований формулируется 6-е защищаемое положение.

В **заключении** и в **выводах** резюмируется содержание работы и на основе защищаемых положений формулируются выводы, наиболее актуальные для дальнейшего использования в научной и практической деятельности в области геотермальной энергетики:

1. Геотермальные ресурсы представляют собой неисчерпаемый запас экологически чистой энергии, причем большая часть этого запаса представлена петротермальными ресурсами, локализованные на достаточно больших (более 3,5 км) глубинах, и их использование сопряжено с геоэкологическими рисками, связанными с наведенной сейсмичностью, возникающей при создании, стимуляции, и эксплуатации искусственного петротермального резервуара. По этим причинам на настоящий момент практически все действующие за рубежом петротермальные проекты являются опытно-промышленными, а в Российской Федерации не было даже попыток использования петротермальных ресурсов. Соответственно, отсутствует опыт создания петротермальных объектов, и кадры, готовые к реализации петротермальных проектов.
2. Достаточно часто объекты геотермальной энергетики рассматриваются в большей степени с инженерной точки зрения, но первичным источником энергии для таких объектов являются системы теплоотбора, представляющие собой сложные геотермальные природно-техногенные системы. В общем случае такие системы состоят из природного или искусственного резервуара подземных вод, системы водозаборных и нагнетательных скважин, и комплекса насосного и теплообменного оборудования, расположенного на поверхности и/или в скважинах. В геотермальных, и, в частности, – в гидротермальных природно-техногенных системах природная и техногенная подсистемы взаимодействуют друг с другом, и основы эффективности

этого взаимодействия закладываются на самых ранних стадиях развития геотермальных проектов. При этом решаются не только задачи эффективности геотермальных природно-техногенных систем, но и вопросы геоэкологических рисков, связанных с созданием и эксплуатацией объектов геотермальной энергетики.

3. Наиболее значимыми геоэкологическими рисками при развитии геотермальных природно-техногенных систем являются:

- Химическое загрязнение на поверхности, вызванное разливом минерализованных термальных вод;
- Коррозия оборудования и осаждение минералов;
- Истощение резервуара или понижение температуры теплоносителя;
- Наведенная сейсмичность в результате воздействия на глубинные горные породы при создании и эксплуатации искусственного резервуара (для петротермальных природно-техногенных систем).

Анализ геоэкологических рисков геотермальной энергетики позволяет утверждать следующее:

- Геотермальная энергетика является наиболее «чистой», с точки зрения геоэкологии, отраслью энергетики, не зависящей от климатических факторов;
 - При существующих технологиях геотермальной энергетики развитие гидротермальных природно-техногенных систем с обратной закачкой (ЦС) представляются более безопасным и эффективным по сравнению с петротермальными системами.
4. Эффективность гидротермальных природно-техногенных систем зависит как от характеристик резервуара теплоэнергетических вод, так и от реализации схемы теплоотбора. В последнем случае особенно существенной является гармонизация взаимодействия природных и техногенных подсистем. Такую гармонизацию обеспечивает предлагаемая методология, представляющая собой комплекс целей, задач, методов их решения, и инструментария для разных стадий создания и эксплуатации объектов геотермальной энергетики. Методология реализована при создании Ханкальской опытно-промышленной гидротермальной станции.
5. При испытаниях циркуляционной системы Ханкальской станции наблюдался эффект остаточного дебита циркуляционной системы, заключающийся в продолжении циркуляции после выключения насосного оборудования. Использование этого

эффекта может играть немаловажную роль в повышении эффективности гидротермальных, а, возможно, и петротермальных природно-техногенных систем.

6. Ханкальская опытно-промышленная геотермальная станция может использоваться для дальнейших исследований эффекта остаточного дебита, а также – для изучения других аспектов природно-техногенных систем геотермальной энергетики.
7. Реализованный на Ханкальском месторождении теплоэнергетических вод метод дистанционного мониторинга эксплуатации месторождения с использованием беспилотной инфракрасной съемки показал свою применимость для обнаружения как преднамеренных, так и аварийных сбросов теплоносителя на рельеф. Интерпретация результатов съемки для решения этой задачи основана на сопоставлении морфологии аномалий с морфологией рельефа местности.

Стратегически, при современном уровне развития технологий бурения и при имеющемся состоянии геотермальной энергетики в Российской Федерации целесообразно использовать предлагаемую методологию для развития гидротермальной энергетики как в направлении практических реализаций, так и, в первую очередь, – в направлении теоретических и экспериментальных исследований коэволюции природных и техногенных гидротермальных подсистем, включая исследования эффекта остаточного дебита ЦС, разработку бинарных технологий получения электроэнергии, развитие технологий моделирования и стимуляции резервуара (в т.ч. – с использованием опыта нефтегазовой отрасли), извлечения полезных компонентов из теплоэнергетических вод, и др. Работа в этих направлениях позволит сформировать и кадровый потенциал отрасли, и технологический задел, вместе создающие основу для развития как гидротермальной, так и петротермальной энергетики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, включенные в международные базы Scopus и Web Of Science

1. Cherkasov S.V., Churikova O.G., Gordeichik B.N., Bekmurzaeva L.R., Farkhutdinov A.I. The state and prospects for the utilization of geothermal resources in the Russian Federation // *Ecology, Environment and Conservation*. 2015. Т. 21. № November. pp. 67-77.
2. Cherkasov S.V., Farkhutdinov A.M., Rykovanov D.P., Shaipov A.A. The use of unmanned aerial vehicle for geothermal exploitation monitoring: Khankala field example // *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2018. Т. 6. № 2. pp. 351-362.
3. Cherkasov, S.V., Farkhutdinov, A.M. & Shaipov, A.A. The residual flow effect in a geothermal loop. *Dokl. Phys.* 2020. №65. pp.128–130.
4. Farkhutdinov A., Goblet P., de Fouquet C., Cherkasov S.V. A case study of the modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters // *Geothermics*. 2016. Т. 59. pp. 56-66.
5. Farkhutdinov A., Goblet P., De Fouquet C., Ismagilov R., Farkhutdinov I., Cherkasov S. The use of computer modelling to forecast the sustainability in the development of geothermal waters resource: Khankala deposit example // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2015. Т. 5. № 4. pp. 1062-1068.
6. Farkhutdinov A.M., Goblet P., Cherkasov S.V. Computer modelling in geothermal waters reservoirs exploitation on the example of the Khankala deposit // *Ecology, Environment and Conservation*. 2015. Т. 21. № November. pp. S87-S91.
7. Mintshev M.Sh., Machigova F.I., Khadasheva Z.S., Cherkasov S.V., Churikova T. Mineral resources of the geothermal sources of the North Caucasus // *International Journal of Environmental and Science Education*. 2016. Т. 11. № 18. pp. 12973-12984.
8. Sterligov B.V., Cherkasov S.V. UAV monitoring of a geothermal field in operation: Khankala reservoir, Northern Caucasus // *Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН*. 2016. Т. 4. № 2. pp. 114.
9. Zaurbekov S.S., Mintshev M.S., Labazanov M.M., Cherkasov S.V., Butuzov V.V. Results of design development for the pilot geothermal plant at the Khankala deposit in Chechen Republic // *Ecology, Environment and Conservation*. 2015. Т. 21. pp. S134-139.
10. Zaurbekov S.S., Mintshev M.S., Shaipov A.A., Labazanov M.M., Cherkasov S.V. The results of the construction project design of a pilot geothermal station with a circulation loop of heat extraction at the Khankala deposit of the Chechen Republic // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. Т. 6. № 3. pp. 1941-1949.
11. Zaurbekov Sh.Sh., Mintshev M.Sh., Shaipov A.A., Machigova F.I., Churikova T.G., Cherkasov S.V., Gairabekov I.G. Prospects of multilevel use of geothermal resources of the Khankala deposit of the Chechen Republic // *Information*. 2016. Т. 19. № 2. pp. 437-443.

12. Гареев А.М., Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В. Современное состояние и перспективы использования теплоэнергетических вод Российской Федерации (на примере Ханкальского месторождения) // Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19. № 3. С. 887-892.
13. Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А., Лабазанов М.М., Черкасов С.В. Пилотная геотермальная станция: возможности получения экологически чистой энергии // Экология производства, 2016. № 2. С. 63-67.
14. Малышев Ю.Н., Титова А.В., Черкасов С.В., Булов С.В., Чесалова Е.В. Сравнительный анализ современных методов мониторинга техногенных объектов // Горная промышленность. 2017. № 6 (136). С. 46-49.
15. Мачигова Ф.И., Бекмурзаева Л.Р., Шаипов А.А., Черкасов С.В. Геохимические исследования термальных вод Ханкальского месторождения Чеченской Республики // Устойчивое развитие горных территорий. 2014. Т. 6. № 2. С. 61-64.
16. Фархутдинов А.М., Исмагилов Р.А., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш. Перспективы использования теплоэнергетических вод Чеченской Республики на базе опыта аналогичных работ во Франции (Парижский бассейн) // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 398. С. 257-264.
17. Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Исмагилов Р.А., Черкасов С.В. Перспективы использования геотермальных вод в Предкавказской предгорной зоне (Ханкальское месторождение) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2014. Т. 19. № 4. С. 34-43.
18. Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М., Черкасов С.В., Исмагилов Р.А., Хайрулина Л.А. Применение компьютерного моделирования для устойчивой эксплуатации термальных подземных вод Ханкальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 12. С. 7-17.
19. Фархутдинов А.М., Хамитов И.Ш., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Заурбеков Ш.Ш., Шаипов А.А., Лабазанов М.М. Термальные подземные воды восточно-предкавказского артезианского бассейна: экономические аспекты использования на примере Ханкальского месторождения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 50-61.
20. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Гучигов И.Х., Шаипов А.А., Рыкованов Д.П. Мониторинг эксплуатации термальных подземных вод с помощью беспилотного летательного аппарата на примере Ханкальского месторождения // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2017. Т. 23. № 2 (86). С. 75-82.
21. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А. Термальные подземные воды Чеченской Республики: новый этап использования // Природа. 2017. № 3 (1219). С. 28-35.
22. Черкасов С.В., Фархутдинов А.М. Ресурсы термальных подземных вод: геологические факторы оценки и освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 6. С. 21-26.
23. Черкасов С.В., Фархутдинов А.М., Фархутдинов И.М. Интерпретация данных беспилотной инфракрасной съемки при геоэкологическом мониторинге эксплуатации гидротермальных природно-технических систем // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 4(46). С. 32-37.
24. Черкасов С.В., Фархутдинов А.М., Шаипов А.А. Об эффекте остаточного дебита геотермальной циркуляционной системы теплоотбора // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2020, том 491, с. 90–92.

25. Ваганова Н.А., Филимонов М.Ю., Черкасов С.В., Минцаев М.Ш. Программа для термодинамического моделирования резервуара теплоэнергетических вод "GEO THERM". Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014616264 10.02.2014
26. Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Лабазанов М.М., Черкасов С.В., Бутузов В.В. Результаты разработки технического проекта для пилотной геотермальной станции на Ханкальском месторождении Чеченской Республики // В сборнике: GEOENERGY Материалы Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Таймасханов Х.Э., Малышев Ю.Н., Минцаев М.Ш. 2015. С. 68-77.
27. Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Черкасов С.В., Шаипов А.А., Лабазанов М.М., Фархутдинов А.М., Пашаев В.В., Дамзаев З.М.Э. Геотермальная установка. Патент на полезную модель RUS 163498 01.12.2015
28. Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А., Мачигова Ф.И., Черкасов С.В. Термальные воды Чеченской Республики и перспективы их использования // В сборнике: Актуальные проблемы защиты окружающей среды и техносферной безопасности в меняющихся антропогенных условиях – Белые ночи-2014 // Материалы Международной научно-практической конференции. Ответственные редакторы: О.Н. Русак, И.Д. Алборов, Д.К-С. Батаев. 2014. С. 253-259.
29. Малышев Ю.Н., Таймасханов Х.Э., Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Черкасов С.В., Терещенко Е.О., Соловьев Ю.А. Геотермальная установка // Патент на полезную модель RUS 150989 03.09.2014
30. Малышев Ю.Н., Черкасов С.В., Стерлигов Б.В., Вишневская Н.А., Чесалова Е.И. Перспективы сотрудничества // В сборнике: Россия - Франция: Геология без границ Москва, 2015. С. 88-102.
31. Фархутдинов А.М., Гоблет П., Черкасов С.В. Компьютерное моделирование в освоении резервуаров теплоэнергетических вод на примере Ханкальского месторождения // В сборнике: GEOENERGY Материалы Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Таймасханов Х.Э., Малышев Ю.Н., Минцаев М.Ш.. 2015. С. 224-233.
32. Фархутдинов А.М., де Фуке Ш., Минцаев М.Ш., Черкасов С.В. Применение геостатистики для анализа перспектив эксплуатации Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 60-68.
33. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Фархутдинов И.М., Гареев А.М. Эксплуатация Ханкальского месторождения теплоэнергетических вод // В сборнике: Геосфера Сборник научных работ студентов, магистрантов и аспирантов географического факультета. Уфа, 2015. С. 7-8.
34. Черкасов С.В., Минцаев М.Ш., Шаипов А.А., Фархутдинов А.М. Ханкальская опытно-промышленная геотермальная тепловая станция как уникальная научная установка // В сборнике: Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность. Материалы IV Международного конгресса REENCON-XXI. Под редакцией Д.О. Дуникова, О.С. Попеля. 2018. С. 234-235.
35. Черкасов С.В., Чурикова Т.Г., Бекмурзаева Л.Р., Гордейчик Б.Н., Фархутдинов А.М. Состояние и перспективы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации // В сборнике: GEOENERGY Материалы Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Таймасханов Х.Э., Малышев Ю.Н., Минцаев М.Ш.. 2015. С. 303-322.

36. Черненко В.В., Черкасов С.В. Практическая реализация онтологического подхода на примере создания базы знаний по геологии // В сборнике: Актуальные вопросы деятельности академических естественнонаучных музеев. Материалы Международной научной конференции: Российская академия наук, Сибирское отделение, Иркутский научный центр, Байкальский музей. 2010, с. 181-185.