ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
ВЫСШАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА ПАРИЖА, ФРАНЦИЯ

На правах рукописи

ФАРХУТДИНОВ АНВАР МАНСУРОВИЧ

ТЕРМАЛЬНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ХАНКАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: ФОРМИРОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, ПРОГНОЗЫ

Специальность: 25.00.07 – Гидрогеология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.н., профессор Гареев А.М.
Научный консультант:
Ph.D. Патрик Гобле

Уфа, Фонтенбло–2016

Оглавление

Введение 4
1.1. Мировой опыт в использовании термальных вод 9
1.2. Развитие геотермальной энергетики в России 14
1.3. История исследований Ханкальского месторождения термальных подземных вод 18
Глава 2. Гидрогеологические и физико-географические условия изучаемой территории 27
2.2. Климат и гидрография 30
2.3. Стратиграфия 32
2.4. Тектонические условия 43
2.5. Гидрогеологическая характеристика территории и особенности формирования термальных вод 47
2.5.1. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн 47
2.5.2. Ханкальское месторождение термальных подземных вод 68
Глава 3. Применение геостатистики в изучении особенностей формирования термальных подземных вод 80
3.2. Оценка глубины кровли продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод 88
3.3. Моделирование распределения температуры в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод 96
Глава 4. Прогноз последствий использования термальных подземных вод 106
4.1. Региональная гидрогеологическая модель 108
4.2. Моделирование использования термальных подземных вод Ханкальского месторождения 113
Глава 5. Рекомендации по дальнейшей эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод 127
Глава 6. Эколого-экономические аспекты использования термальных подземных вод Ханкальского месторождения 133
6.1. Экологические аспекты 133

6.2. Экономические аспекты 137
Выводы 142
Список литературы 144
Приложения 160

Введение

Актуальность темы исследования

В последние годы в мире значительное внимание уделяется нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, среди которых важное значение принадлежит термальным подземным водам ввиду экологической безопасности и экономической рентабельности использования. Россия обладает большими геотермальными ресурсами, однако в промышленном масштабе они практически не применяются. К наиболее перспективным территориям по геотермии относится Чеченская Республика, занимающая 3-тье место среди регионов Российской Федерации по утвержденным эксплуатационным запасам месторождений термальных подземных вод, из которых наиболее крупным является Ханкальское месторождение.

Чеченская Республика расположена в пределах Восточно-Предкавказского артезианского бассейна, гидрогеологические, гидрогеохимические и геотермические условия которого отражены в трудах целого ряда исследователей: И.Г. Киссина, Б.Ф. Маврицкого, Ф.А. Макаренко, А.И. Хребтова, В.П. Крылова, Г.М. Сухарева, И.С. Зекцера, С.А. Шагоянца, М.К. Курбанова, А.Б. Алхасова и др. Вместе с тем вопросы использования термальных подземных вод изучены недостаточно, работы по исследованию и прогнозу эксплуатации термальных вод с применением современных компьютерных технологий единичны.

В связи с неуклонным ростом потребностей Чеченской Республики в электро- и теплоэнергии изучение термальных подземных вод региона с применением геостатистической оценки и математического моделирования своевременно и актуально.

Цель исследования

Цель настоящей работы – установить особенности формирования термальных подземных вод Ханкальского месторождения и выявить характер изменения температур при их использовании.

Задачи исследования

1. Провести анализ гидрогеологических условий территории юго-востока

Восточно-Предкавказского артезианского бассейна и фактов определяющих распространение термальных вод.

2. Построить карту распределения температур в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод и структурную карту основного продуктивного пласта.

3. Разработать математическую модель прогноза изменения температурного режима в процессе эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод.

4. Дать рекомендации по дальнейшей эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод.

Защищаемые положения

1. Основные тепловые ресурсы термальных подземных вод юго-востока Восточно-Предкавказского артезианского бассейна связаны с караган-чокракскими отложениями среднего миоцена. Гидрогеологические и геотермические особенности территории определили расположение и характеристики крупнейшего месторождения исследуемой области – Ханкальского, для которого уточнена структура основного продуктивного пласта.

2. На Ханкальском месторождении термальных подземных вод установлена вертикальная и латеральная зональности распределения температур, определяющими для которых являются глубина залегания водоносного комплекса, структурно-тектонический фактор и направление движения подземных вод.

3. Эксплуатация Ханкальского месторождения термальных подземных вод с применением дублетной циркуляционной системы обратной закачки приведет к постепенному снижению температурного фона. При разработке необходимо учитывать расстояние между забоями нагнетательной и продуктивной скважин, направление движения подземных вод и влияние тектонических нарушений. Рекомендуется установка и периодическая эксплуатация нескольких дублетных циркуляционных систем различных продуктивных пластов.

Научная новизна

Показано, что наиболее перспективными для использования термальных подземных вод в пределах Чеченской Республики являются караган-чокракские отложения среднего миоцена, для которых дана оценка тепловых ресурсов. Разработана структурная карта по кровле основного продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод с помощью методов геостатистики. Составлена карта распределения температур в пределах исследуемой области на основе компьютерного моделирования. Впервые для условий Ханкальского месторождения термальных подземных вод осуществлено моделирование эксплуатации с применением дублетной циркуляционной системы, оценено изменение температурного режима при обратной закачке использованных вод. Обоснованы рекомендации по проведению дальнейших гидрогеологических работ на Ханкальском месторождении термальных подземных вод.

Личный вклад

Сбор, анализ, интерпретация и обобщение использованных при работе над диссертацией материалов отчетов 1964–2009 гг. Оценка запасов и расчет тепловых ресурсов подземных вод среднемиоценовых караган-чокракских отложений исследуемой области, составление картографических построений, включая создание структурной карты основного продуктивного пласта и карты распределения температур в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод. Моделирование использования термальных подземных вод с оценкой изменения их температурного режима при осуществлении обратной закачки использованных вод и после завершения эксплуатации. Разработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод.

Фактический материал и методы исследования

В работе использованы фондовые материалы: отчеты за 1964–2009 гг. из архивов Федерального государственного унитарного научно-производственного предприятия «Российский Федеральный Геологический Фонд»; данные полевых

работ и геохимических анализов, проведенных в 2013 г. Грозненским государственным нефтяным техническим университетом им. акад. М.Д. Миллионщикова. Проанализированы результаты гидрогеологических и геохимических исследований по 15 скважинам, данные опытно-фильтрационных работ по 5 скважинам территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод. Обработка информации выполнялась в Microsoft Office Excel, картографические построения осуществлялись с помощью программ Isatis и CorelDRAW. Расчеты изменения температурного режима подземных вод в процессе их добычи и последующего нагнетания осуществлялись на основе математического моделирования с использованием программы Metis, разработанной Патриком Гобле [Goblet, 1980].

Научно-практическая значимость работы

В результате исследования выполнены расчеты и оценка тепловых ресурсов термальных подземных вод среднемиоценовых караган-чокракских отложений Чеченской Республики, подсчет эксплуатационных запасов Ханкальского месторождения термальных подземных вод. Выделены зоны повышенных температур на территории Ханкальского месторождения. Дан прогноз использования тепловых ресурсов при обратной закачке отработанных термальных вод, определена скорость восстановления температуры после завершения разработки, а также сформулированы рекомендации оптимального режима эксплуатации. Разработанные и адаптированные методы оценки температурного режима, создания структурной карты продуктивного пласта Ханкальского месторождения, а также математического моделирования обратной закачки могут быть использованы при обосновании условий эксплуатации месторождений термальных подземных вод Восточно-Предкавказского артезианского бассейна и других регионов России.

Апробация работы

По материалам диссертационного исследования опубликовано 20 научных работ, в том числе 9 – в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК. Полученные результаты использованы при составлении отчета Государственного геологического музея им. акад. В.И. Вернадского по теме «Разработка трехмерной цифровой модели резервуара

геотермальных вод. Разработка алгоритма математического моделирования распределения температуры в пределах резервуара геотермальных вод» (2013 г.).

Научные конференции, в которых принял участие диссертант: межвузовская научно-практическая конференция «Региональные проблемы водопользования в изменяющихся климатических условиях», Уфа, 11–12 ноября 2014 г.; международная научно-практическая конференция «GEOENERGY», Грозный, 19–21 июня 2015 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы естествознания», Уфа, 17 ноября 2015 г.; третий международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности», Крым, г. Ялта. 17–19 ноября 2015 г.

Большую помощь при проведении настоящего исследования оказали к.г.-м.н. С.В. Черкасов, Ph.D. Шанталь де Фуке, Ph.D. Эммануэль Леду. Выполнению диссертационной работы содействовали сотрудники Грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова д.т.н. М.Ш. Минцаев, д.г.н., профессор Ш.Ш. Заурбеков, к.г.-м.н. А.А. Шаипов, к.г.-м.н. М.М. Лабазанов. В ходе работы автор пользовался консультациями и всесторонней поддержкой д.г.-м.н., профессора М.А. Камалетдинова, главного геолога Центра МСНР ФГУГП «Гидроспецгеология» С.В. Святовца. Завершению диссертационного исследования способствовали постоянное внимание к работе научных руководителей д.г.н., профессора А.М. Гареева и Ph.D. Патрика Гобле. Всем названным ученым автор выражает глубокую признательность.

Глава 1. История исследований

1.1. Мировой опыт в использовании термальных вод

Термальные воды – природные подземные воды, имеющие температуру 20 °С и более. Использование их человеком имеет более чем вековую историю. Применение термальных подземных вод в качестве источника энергии началось в первой половине XIX века благодаря развитию термодинамики, что позволило эффективно использовать тепло горячих вод и пара, а затем и получать с его помощью электричество.

В энергетических целях одними из первых использовались термальные воды Лардерелло (провинция Тоскана, Италия), получаемые из скважин либо изливающиеся естественным путём. Богатая бором вода из подземных источников употреблялась для получения борной кислоты. Первоначально ее получали методом выпаривания в железных бойлерах, работавших на дровах. В 1827 г. Франческо Лардерел (Francesco Larderel), основатель индустрии по производству бора, построил первую станцию для получения тепла из геотермальной энергии и создал систему, работавшую на тепле самих вод. Конструкция представляла собой термальный источник, покрытый кирпичным куполом, где находился паровой котел низкого давления, подогреваемый теплом вод. Тепло было необходимо для выпаривания бора из минерализованных вод и дополнительно для работы насосов и другого оборудования. Немного позже, в 1904 г., там же в Лардерелло итальянский ученый Пьеро Джинори Конти (Piero Ginori Conti) изобрел прототип генератора, при работе которого термальный водяной пар стал источником получения электричества. В 1913 г. данная геотермальная станция начала работать и производила 250 кВт электричества, а к 2013 г. количество производимого электричества исчислялось 545 МВт, что составляло 1.6% от общего в Италии [Stober, Bucher, 2013].

Вместе с развитием технологий использования вод высоких температур для производства электричества расширялось применение вод средних и низких температур для получения тепловой энергии.

В 1890 г. первые систематические работы по использованию

геотермального тепла (68–80 °С) завершены в Боазе (штат Айдахо, США) созданием отопительной системы на основе термальных подземных вод. Позже, в 1900 г., подобная система была установлена в Кламат Фаллс (штат Орегон, США), где с 1926 г. она стала использоваться для обогрева теплиц [Stober, Bucher, 2013].

После Италии и США странами-первопроходцами в развитии геотермии стали Япония (1919 г.), Исландия (1928 г.), Новая Зеландия (1958 г.), Мексика (1959 г.). К примеру, в Исландии развитие геотермии среднепотенциальных вод достигло широких масштабов, по данным на 2011 г. за счет геотермальной энергии отапливается около 90% домов и производится 27.3% (4701 ГВт/ч) общего количества электричества [Ingimarsson, 2012].

С 1965 г. термальные воды средней температуры (66–90 °С) стали активно разрабатываться во Франции, Парижском артезианском бассейне, для получения тепловой энергии. Созданная технология циркуляционных дублетных систем теплоотбора – «дублетов» (нагнетательная и продуктивная скважины), позволила добиться устойчивости в дебитах, а также избежать вреда экологии (первичный план по сливу вод в р. Сену пришлось отменить из-за высокой минерализации вод – 2–35 г/л) [Lopez et al., 2010].

Применение термальных вод низких температур стало возможным благодаря изобретению в 1852 г. Уильямом Томсоном (лорд Кельвин) тепловых насосов. Позднее, в 1912 г., Генрих Зоелли (Heinrich Zoelly) запатентовал их применение для получения тепла приповерхностных вод (< 30 °С). Впервые они были успешно использованы в 1940-е годы, в Индианаполисе (штат Филадельфия, США) и в Торонто (Канада) [Stober, Bucher, 2013].

На сегодняшний день 24 страны эксплуатируют термальные подземные воды для получения электричества и более 70 стран – для тепловой энергии, всего в мире используется 12635 МВт геотермальной энергии [Fridleifsson et al., 2008; Holm et al., 2010; Matek, 2013]. Потенциал изученных мировых геотермальных ресурсов составляет 4.4 ТВт тепловой и 0.2 ТВт электрической мощности, из них 70% относится к месторождениям с температурой вод менее 130 °С. При этом

только 3.5% мирового геотермального потенциала идет на выработку электроэнергии и 0.2% – на получение тепла [Алхасов, 2006]. Гигантский ресурсный потенциал подтверждают данные департамента ОНН по экономическим и социальным вопросам, Мирового энергетического совета и др. [Богуславский, 2013].

В последнее время в связи с расширением рынка использования в классификацию геотермальных ресурсов вносятся технологические параметры, необходимые для оценки возможности их практического применения [Williams et al., 2011]. Возможности использования геотермального тепла по температурным показателям обобщены О.В. Поваровым [2003] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1. Диаграмма использования геотермального тепла [Поваров, 2003]

Наблюдается также резкое увеличение объемов и расширение областей использования геотермальных ресурсов (таблица 1.1., 1.2).

За период с 2005 по 2010 г. производство электроэнергии на базе термальных вод в России возросло на 419% в результате развития данной области альтернативной энергетики на Камчатке и Курильских островах. В то же время с 2010 по 2015 г. производство электроэнергии из термальных вод и пара в России не увеличивалось.

Таблица 1.1. Установленная мощность и выработка энергии за счет геотермальных ресурсов [Bertani, 2015]

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

Таблица 1.2. Примеры стран использующих геотермальные ресурсы [Bertani, 2015]

Страна	Установленная мощность, МВт, 2010	Выработка энергии, ГВт/ч, 2010	Установленная мощность, МВт, 2015	Выработка энергии, ГВт/ч, 2015	Прогноз на 2020, МВт	Увеличение с 2010			
						МВт	ГВт/ч	Мощность, %	Энергия, %
Китай	24	150	27	150	100	3		12%	
Коста Рика	166	1131	207	1511	260	42	380	25%	34%
Франция	16	95	16	115	40		20		21%
Германия	6.6	50	27	35	60	20	-15	280%	-30%
Исландия	575	4597	665	5245	1300	90	648	16%	14%
Индонезия	1197	9600	1340	9600	3500	143		12%	
Италия	843	5520	916	5660	1000	74	140	9%	3%
Япония	536	3064	519	2687	570	-16	-377	-3%	-12%
Кения	202	1430	594	2848	1500	392	1418	194%	99%
Мексика	958	7047	1017	6071	1400	59	-976	6%	-14%
Новая Зеландия	762	4055	1005	7000	1350	243	2945	32%	73%
Филиппины	1904	10311	1870	9646	2500	-34	-665	-2%	-6%
Россия	82	441	82	441	190				
Турция	91	490	397	3127	600	306	2637	336%	539%
США	3098	16603	3450	16600	5600	352		11%	
Всего в мире	**10897**	**67246**	**12635**	**73549**	**21443**	**1738**	**6303**	**16%**	**9%**

Широкого применения термальные воды достигли и в прямом использовании, в основном в целях отопления (таблица 1.3).

Перспективность и целесообразность развития геотермии обоснованы следующими преимуществами геотермальных ресурсов при сопоставлении с традиционными источниками энергии: практически полная неисчерпаемость,

близость к потребителю, возможность полной автоматизации, безопасность добычи, экономическая конкурентоспособность, возможность строительства маломощных установок и экологическая чистота [Kagel et al., 2007].

Таблица 1.3. Прямое использование термальных вод по состоянию на 2010 г. Указаны первые 20 стран по количеству использованной энергии в год [Lund et al., 2010]

Страна	Мощность, МВт	Годовое использование (2010), ТДж/год	Годовое использование (2010), ГВтч/год
Китай	8898	75348.3	20931.8
США	12611.46	56551.8	15710.1
Швеция	4460	45301	12584.6
Турция	2084	36885.9	10246.9
Норвегия	3300	25200	7000.6
Исландия	1826	24361	6767.5
Япония	2099.53	15697.94	7138.9
Франция	1345	12929	3591.7
Германия	2485.4	12764.5	3546
Голландия	1410.26	10699.4	2972.3
Италия	867	9941	2761.6
Венгрия	654.6	9767	2713.3
Новая Зеландия	393.22	9552	2653.5
Канада	1126	8873	2464.9
Финляндия	857.9	8370	2325.2
Швейцария	1060.9	7714.6	2143.1
Бразилия	360.1	6622.4	1839.7
Россия	308.2	6143.5	1706.7
Мексика	155.82	4022.8	1117.5
Аргентина	307.47	3906.74	1085.3
Всего	**50583**	**438071**	**121696**

Однако специфика термальных вод включает и ряд недостатков: рассредоточенность источников, ограниченность опыта промышленного использования, низкий температурный потенциал теплоносителя, нетранспортабельность, трудности складирования, отсутствие специальной законодательной базы и систем страхования [Богуславский и др. 2000; Богуславский, 2004, 2010].

В 2012 г. Международное Агенство по Возобновляемой Энергии – МАВЭ (International Renewable Energy Agency – IRENA) и Международное

Энергетическое Агенство – МЭА (International Energy Agency – IEA) начали совместную разработку базы данных по возобновляемым источникам энергии, политике стран и мерам, направленным на развитие геотермальной энергии [Черкасов и др., 2015]. По оценкам исследователей, к концу XXI в. доля геотермальных ресурсов в энергобалансе мировой экономики составит от 30 до 80% [Huttrer, 2000; Lund, Freeston, 2000].

1.2. Развитие геотермальной энергетики в России

Несмотря на то, что в России доля геотермальной энергетики в общем энергобалансе мала, ее развитие имеет достаточно давнюю историю.

В СССР геотермальные ресурсы по использованию разделялись на 5 главных типов [Pryde, 1976]:

1. Бальнеология и санатории.
2. Извлечение химических элементов.
3. Отопление.
4. Агрикультура.
5. Производство электричества.

Первоначальное развитие геотермия получила в двух регионах – Камчатке и Северном Кавказе, в первом случае воды использовались для производства электричества, а во втором – для получения тепловой энергии термальной воды.

15 марта 1954 г. Президиумом Академии наук СССР принято постановление о создании Лаборатории по исследованию геотермальных ресурсов в Петропавловске-Камчатском. Позже, в 1964 г., решением Отделения наук о Земле АН СССР сформирован Научный совет по геотермическим исследованиям, впоследствии ставший Научным советом РАН по проблемам геотермии. В том же году организована Северокавказская разведочная экспедиция по бурению и реконструкции нефтегазовых скважин для геотермального теплоснабжения.

В 1965 г. советские ученые С.С. Кутателадзе и А.М. Розенфельд запатентовали геотермальную энергетическую установку для получения

электроэнергии из горячей воды с температурой более 80 °С [Кутателадзе, Розенфельд, 1965]. В 1966 г. на Камчатке (река Паужетка) запущена первая геотермальная станция мощностью 5 МВт с традиционным циклом. Мощность Паужетской ГеоЭС к 1980 г. достигала 11 МВт. В 1967 г. заработала Паратунская ГеоЭС, построенная на основе уникальной технологии С.С. Кутателадзе и А.М. Розенфельда по использованию бинарного цикла для получения электроэнергии. Патент впоследствии закуплен многими странами.

Верхне-Мутновская и Мутновская ГеоЭС (запущены в 1999 и 2002 г. соответственно) – уникальные объекты не только в России, но и в мире. Станции, расположенные у подножия вулкана Мутновский, на высоте 800 м над уровнем моря, работают в экстремальных климатических условиях. Оборудование станций является одним из самых современных в мире и полностью создано на отечественных предприятиях энергетического машиностроения. Данные станции обеспечивают 40% электричества в общей структуре Центрально-Камчатского энергетического узла [Дегтярев, 2013].

Теплоснабжение на базе термальных вод в СССР развивалось в основном путем создания мелких объектов отопления, горячего водоснабжения и бальнеологии.

В Северокавказском регионе получение энергии из термальных вод практиковалось еще до Великой Отечественной войны. В Махачкале в 1966 г. организовано Кавказское промысловое управление по использованию глубинного тепла Земли, в 1967 г. в Петропавловске-Камчатском – аналогичное Камчатское промысловое управление.

К сожалению, низкие цены на углеводородное сырье в 1970-е годы, кризис 90-х, а затем трагические события, связанные с войной в Чечне, надолго затормозили развитие геотермальной энергетики в России. Тем не менее, в настоящее время геотермальные исследования ведутся более чем в 60 научных учреждениях РФ. Геотермальные ресурсы нашей страны хорошо изучены [Вартанян и др., 1999; Кононов и др., 2005]. Теоретические вопросы формирования и распространения термальных подземных вод на территории

России отражены в трудах С.Л. Шварцева [2012], Е.В. Пиннекера [1980], А.Б. Алхасова [2010] и др. Еще в 1983 г. по итогам крупных работ, сотрудниками ВСЕГИНГЕО был составлен «Атлас ресурсов термальных вод СССР», в который входило 17 карт («Карта термальных вод СССР», «Карта потенциальных запасов термальных вод СССР», карты эксплуатационных запасов термальных вод основных водоносных комплексов наиболее перспективных районов (Западная Сибирь, Предкавказье, Камчатка, Курилы)). В 1991 г. создана карта петрогеотермальных ресурсов, залегающих на глубинах до 6 км в масштабе 1:10 млн., главный редактор Ю.Д. Дядькина. Практически на всей территории нашей страны возможно создание систем теплоснабжения с температурами 70 °С на входе и 20 °С на выходе и примерно на 70% территории – 90/40 °С [Свалова, 2009].

На сегодняшний день в РФ разведано 66 гидротермальных месторождений (таблица 1.4), запасы термальных вод и пара которых оцениваются в 307 тыс. $м^3$/сут и 40.7 тыс. $м^3$/сут соответственно, но только 50% из этих запасов используется для производства 1.5 млн. гигакалорий тепла, что эквивалентно сжиганию около 300 тыс. тонн условного топлива [Алхасов, 2011].

Таблица 1.4. Месторождения термальных вод и пара РФ [Алхасов, 2008]

Субъект РФ	Кол-во место Рождений	Температура, °С	Эксплуата-ционные запасы, тыс. $м^3$/сут	Добыча, тыс. $м^3$/сут	Объем замещаемого топлива, т.у.т./год
1	2	3	4	5	6
Республика Дагестан	12	40 – 104	86.2	10.4	71400
Чеченская республика	14	60 – 108	49.2	н/д	н/д
Краснодарский край	13	72 – 117	35.574	4.39	49400
Ставропольский край	4	55 – 119	12.2	1.0	2800
Республика Адыгея	3	70 – 91	8.98	2.1	13300
Карачаево-	1	50 – 75	6.8	0.4	2900

1	2	3	4	5	6
Черкесская Республика					
Кабардино-Балкарская Республика	2	56 – 67	5.3	0.05	н/д
Камчатская область	12	70 – 300	83.8 (32.5*)	34.3	151900
Сахалинская область	2	85 – 320	8.2*	н/д	н/д
Чукотский авт. окр. и Магаданская обл.	3	60 – 87	3.5	н/д	н/д

*Пароводяная смесь

Как можно видеть из представленной таблицы, наибольшее число месторождений располагается на территории Чеченской Республики, далее следуют Краснодарский край, Республика Дагестан и Камчатка. Из вышеперечисленных регионов Камчатская область выделяется высокой температурой термальных вод и пара, в то же время невысокая потребность в электроэнергии и отдаленность от потребителя существенно занижают перспективность разработки месторождений. Электричество создается некоторыми геотермальными электростанциями, расположенными на Камчатке и Курилах (таблица 1.5).

Таблица 1.5. Производство электроэнергии за счет термальных вод в России [Svalova, 2012]

Расположение	Название станции	Год ввода в эксплуатацию	Общая установленная мощность, МВт	Производство энергии за 2008 ГВтч/год
Камчатка	Паужетская	1966	14.5	59.5
Камчатка	Верхнее-Мутновская	1999	12	58.3
Камчатка	Мутновская	2002	50	322.93
Курилы	Менделеевская	2007	1.8	–
Курилы	Океанская	2007	3.6	–
Всего			**81.9**	**440.73**

В настоящее время геотермальные ресурсы России используются для

отопления домов с общей численностью населения 500 тыс. в нескольких городах и населенных пунктах Северного Кавказа и Камчатки. Планируется увеличение мощностей геотермальных электростанций [Svalova, 2012]. В некоторых регионах страны термальные подземные воды также применяются для обогрева теплиц общей площадью 465 тыс. м^2. Термальная вода используется также в 150 здравницах и на 40 заводах по розливу минеральной воды.

1.3. История исследований Ханкальского месторождения термальных подземных вод

Первые геологические исследования Северного Кавказа (рисунок 1.2) относятся к XVIII веку и связаны с началом изучения минеральных вод [Сидоренко, 1968]. По поручению Петра I в 1717 г. лейб-медик, доктор медицины Г. Шобер описал минеральные источники. В 1771 г. И.А. Гильденштедтом обследованы Горячеводские источники, в 1828 г. Г. Германом выполнены химические анализы минеральных вод, в 1852 г. Н.Н. Зимин определил состав растворенного газа в воде [Керимов, 2012].



Рисунок 1.2. Расположение Чеченской Республики и Ханкальского месторождения термальных подземных вод на карте Кавказа. Источник: Википедия

С развитием буровых работ начинается качественно новый этап в изучении

подземных вод. До этих пор геологические и гидрогеологические исследования не являлись систематическими, носили описательный характер.

В 1860–70-е годы Г.В. Абихом, Ф.Г. Кошкулем и А.М. Коншиным исследованы породы, из которых вытекают минеральные источники, определены температура, дебиты и химический состав вод. Впервые высказано предположение о взаимосвязи минеральных источников с нефтяными месторождениями и установлено антиклинальное строение Терского и Сунженского хребтов.

В 1880-е годы по результатам исследования геологии и геоморфологии района И.В. Мушкетовым выделены две большие тектонические зоны – Большой Кавказ и Ставропольский выступ, предложен проект разработки минеральных вод с описанием водоносных горизонтов.

В начале XX в. с увеличением объема буровых работ накопилось много фактического материала по литологии, нефтеносности и водам караган-чокракских отложений, к которым приурочены термальные воды Ханкальского месторождения. В 1904 г. И.Н. Стрижовым детализировано геологическое и гидрогеологическое строение отдельных площадей Передовых хребтов. Он впервые указал на наличие в Октябрьском районе антиклинальной структуры.

В последующие годы геологами Эрни и Л.И. Баскаковым предложено начать бурение в этом районе, но оно было отложено в связи с отсутствием поверхностных признаков нефти. Только в 1911 г. английским обществом «Брей», промышленником-инженером Маканаки была заложена скважина 1-16, ставшая первооткрывательницей Октябрьского нефтяного месторождения, из которой 6 февраля 1913 г. с глубины 560 м получен нефтяной фонтан дебитом около 20 тонн в сутки [Шпак, 1968ф].

История геологической и гидрогеологической изученности Ханкальского месторождения термальных вод неразрывно связана с разведкой и разработкой Октябрьского нефтяного месторождения, к юго-восточной части которого первое приурочено. Еще в 20-е годы прошлого столетия получены мощные фонтаны термальной воды на 28-32 промысловых участках Октябрьского месторождения.

Наиболее мощный фонтан дебитом 2500 м^3/сут при устьевой температуре 96 °С был получен в 1928 г. из скважины 1-28 [Шпак, 1968ф].

В первые годы разработки района на нефть (1913–1914 гг.) начато изучение и подземных вод. Результаты бурения использованы К.А. Прокоповым для составления структурной карты Октябрьской антиклинали и проведения детальных исследований района на его нефтеносность. Однако из-за гражданской войны собранный большой фактический материал оказался почти полностью утерян.

В 1920-е годы организованы комплексные региональные гидрогеологические и геологические исследования, в результате которых воды классифицированы по химическому составу и обобщены материалы по подземным водам.

В 1925 г. пробурен XXII пласт Октябрьского месторождения глубиной 1600 м. К этому времени Н.Т. Линдтропом проведен гидродинамический анализ разработки нефтяных месторождений [1925]. Он пришел к заключению о существовании в карагано-чокракских отложениях региона водонапорного режима. Инженерами И.Н. Стрижовым и Н.Т. Линдтропом установлено, что при увеличении добычи нефти из XIV и XVI пластов Октябрьского месторождения иссякали водяные ключи, находившиеся на расстоянии нескольких десятков километров и, наоборот, при уменьшении добычи дебит источников восстанавливался. В Горячеводске находится приуроченный к XIII пласту Восточный термальный источник. В начале эксплуатации данного горизонта, в 1916 г., дебит источника равнялся 1220 м^3/сут, а в 1932 г., когда уровень жидкости в скважинах снизился до уровня расположения этого источника, он иссяк. Этим фактом подтверждается, что нефть в пластах включена в одну гидравлическую систему с водой [Карцев, 1977].

В этом же году вышла в свет работа Н.А. Кудрявцева «К строению Ново-Грозненского нефтеносного района» [1928], подробно описывающая геологическое строение и тектонику исследуемой области.

В 1928–1929 гг. вступили в разработку XIX, XX, XXI пласты. В 1930-е годы

в результате детального изучения состава подземных вод появились данные по радиоактивности вод и присутствию в них редких элементов. К этому периоду относятся труды А.Д. Архангельского и Э.С. Залманзон, посвященные литологии и подземным водам Грозненского района [Архангельский, Залмазон, 1931, 1932].

Первые упоминания об использовании термальных вод в данном районе связаны с нефтяной скважиной № 10-28 Октябрьского месторождения, из которой был получен приток термальной воды, использовавшейся для отопления теплиц и бани [Шпак, 1968ф].

В 1934–35 гг. на северном крыле Октябрьской антиклинали К.К. Коровиным проведены радиоразведочные работы, построены поперечные профили и структурная карта, выявившая некоторые тектонические особенности района: погружение складки на восток и присутствие разрыва, протягивающегося вдоль северного крыла.

Большой вклад в изучение геологического строения, гидрогеологии, гидрохимии и геотермии области внес Г.М. Сухарев [1947, 1948, 1954, 1963]. В своих работах он обобщил большой фактический материал по водам нефтяных и газовых месторождений, поднял проблему использования термальных вод Северного Кавказа. Г.М. Сухарев вошел в состав редакционной коллегии опубликованного позже (в 1968 г.) IX тома «Гидрогеологии СССР» (Северный Кавказ). В эти же годы вышли в свет труды В.М. Николаева [1960, 1963], С.А. Шагоянца [1959] по гидрологии Северного Кавказа и Предкавказья.

В 1962 г. Тематической экспедицией Севкавгеолуправления составлены гидрогеологические карты всей территории Чечни (K-38-III, IV, IX, X). По листу K-38-III проведена гидрогеологическая съемка масштаба 1:200 000 и в 1965 г. издана гидрогеологическая карта (Т.М. Ламанова). В результате поисково-разведочного бурения Т.В. Лоскутовым (1964 г.) и А.И. Кашиным (1965 г.) составлены гидрогеологические карты по листам K-38-IV и K-38-IX. Н.А. Григорьевым, Е.Т. Мельниковой и др. выполнен большой объем региональных тематических исследований, изданы специализированные карты Северного Кавказа масштаба 1:500 000 (1973 г.).

В 1963 г. опубликована монография Г.М. Сухарева и М.В. Мирошникова «Подземные воды нефтяных и газовых месторождений Кавказа» с детальным анализом гидрогеологических, гидрохимических и геотермических условий. В следующем году под руководством К.И. Шейпака был составлен региональный отчет «Ревизионное обследование разведочных и эксплуатационных скважин Северного Кавказа, перспективных на термальные воды», особо выделяющий территорию Чечено-Ингушской АССР и содержащий каталог буровых скважин Северного Предкавказья, как потенциальных источников получения термальных вод.

В 1964–66 гг. в Севкавгеолуправлении под руководством А.И. Хребтова составлены гидротермальные карты наиболее перспективных районов Северного Кавказа (масштаб 1:500 000) и более общие карты по термальным водам Северного Кавказа (масштаб 1:200 000), к ним сделаны объяснительные записки. В это же время опубликована книга И.Г. Киссина «Восточно-Предкавказский артезианский бассейн» [1964].

Начало промышленного освоения геотермальных ресурсов стало возможным благодаря накопленным фактическим и теоретическим материалам. В соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 19 апреля 1963 г. № 445 «О развитии работ по использованию в народном хозяйстве глубинного тепла Земли» Мингазпром СССР возглавил деятельность по освоению и использованию данного вида энергии. С этого времени работы по развитию геотермальной энергетики стали объектом постоянного внимания со стороны планирующих и директивных органов. Научно-исследовательские и производственные работы по расширению использования термальных вод в народном хозяйстве определены «Мероприятиями по увеличению использования в 1987–1990 гг. нетрадиционных источников энергии в народном хозяйстве». Планы развития геотермальной энергетики сформулированы в «Энергетической программе СССР».

В этот период начаты специальные исследования по геотермии Северного Кавказа, выполнявшиеся А.И. Хребтовым [1965], И.Ю. Коцаревым и С.П. Власовой [1963], С.А. Джамаловым [1959].

В марте 1964 г. в Москве проведено Второе Всесоюзное совещание по

проблемам геотермии. 25 мая 1964 г. Бюро Обкома КПСС и Советом Министров Чечено-Ингушской АССР принято Постановление № 1296 «О мерах по развитию тепличного парникового хозяйства и увеличению производства овощей гидропонным способом на базе использования термальных вод и тепловых отходов промышленных предприятий республики». В соответствии с постановлением намечено строительство крупного хозрасчетного тепличного-парникового комбината площадью 100 тыс. м^2 на базе термальных вод в Ханкальской долине.

Постановка разведочных работ на термальные воды в Ханкальской долине обоснована благоприятными гидрогеотермическими условиями участка и близостью его к потребителю. Имеется ряд исследований по оценке и перспективам использования в этом районе геотермальной энергии, среди них особо выделяются труды В.Б. Крылова [1983ф, 1984ф, 1986ф, 1987ф, 1988ф] и А.А. Шпака [1968ф].

В семидесятые годы XX века институтом ВНИПИгаздобыча проведена детальная разведка Ханкальского месторождения, расположенного в 10 км к юго-востоку от г. Грозного, рассчитаны фильтрационные параметры пластов, оценены и утверждены ГКЗ СССР эксплуатационные запасы термальных вод по состоянию на 01.01.1968 г. Регулярные отборы воды начаты лишь в 1974 г., когда полностью ввелось в эксплуатацию теплично-парниковое хозяйство. Были пробурены скважины 2-Т, 1-Т, 3-Т, 13-Т, 14-Т, 6-Т, 5-Т, 4-Т и др., а также восстановлены из ликвидированного нефтяного фонда скважины 8/32, 27/32, 33/28 и 10/28.

Эксплуатацию термальных вод Ханкальского месторождения осуществляло Северо-Кавказское управление по использованию глубинного тепла Земли. Основными эксплуатационными объектами на Ханкальском термоводозаборе являлись IV–VII и XIII песчаные пласты карагана и XXII пласт чокрака, средняя мощность которых 43, 47 и 28 м, соответственно. В последующем добыча воды из XXII пласта была запрещена Госгортехнадзором с целью охраны серноводских источников от истощения, хотя по результатам работ установлена возможность

отбора из этого пласта 3000 м^3/сут.

На начальном этапе разработки месторождения уровни по эксплуатационным пластам за время прекращения добычи в летний период успевали почти полностью восстановиться [Крылов, 1987ф].

Но с начала 1978 г. на Октябрьском нефтяном месторождении уменьшился, а затем и почти полностью прекратился сброс вод в карагано-чокракские отложения, попутно добываемых с нефтью. В то же время, в связи с ростом плана добычи зачастую производился форсированный отбор термальной воды. Перечисленные факторы привели к постепенному прогрессирующему снижению пьезометрических уровней по продуктивным пластам. За три года пьезометрические уровни по основным термоводоносным горизонтам снизились более чем на 20 м [Минцаев, 2013].

Анализ разработки Ханкальского месторождения термальных вод показал невозможность прироста разведанных запасов за счет расширения существующего термоводозабора без искусственного их восполнения. В связи с этим в Грозненском нефтяном институте (1978–79 гг.) Г.М. Сухаревым, С.П. Власовой, Ю.К. Таранухой и Е.В. Ковальским составлено технико-экономическое обоснование возможности восстановления ресурсов термальных вод путем создания геотермальной циркуляционной системы (ГЦС).

В 1981–1982 гг. произведена опытно-промышленная эксплуатация самого продуктивного XIII пласта карагана с обратной закачкой отработанных термальных вод для поддержания пластового давления – использование метода искусственного восполнения запасов (рисунок 1.3). Результаты опытно-промышленной разработки XIII пласта с поддержанием пластового давления выявили принципиальную возможность использования данного метода для увеличения производительности Ханкальского термоводозабора с целью покрытия дефицита, а также перспективной потребности в тепле. В процессе этих работ проведен большой комплекс гидродинамических исследований, продолженных в 1982 г., результаты которых легли в основу расчетов по созданию подземной циркуляционной системы.

Нагнетание позволило остановить падение добычи термальных вод и существенно ее увеличить. В то же время обратная закачка отработанных термальных вод в эксплуатационные горизонты является весьма эффективным средством борьбы с загрязнением окружающей среды. Выполненными работами была доказана перспектива дальнейшего расширения термоводозабора путем внедрения системы поддержания пластового давления по всем основным эксплуатационным объектам и возможность увеличения объемов добычи термальных вод.

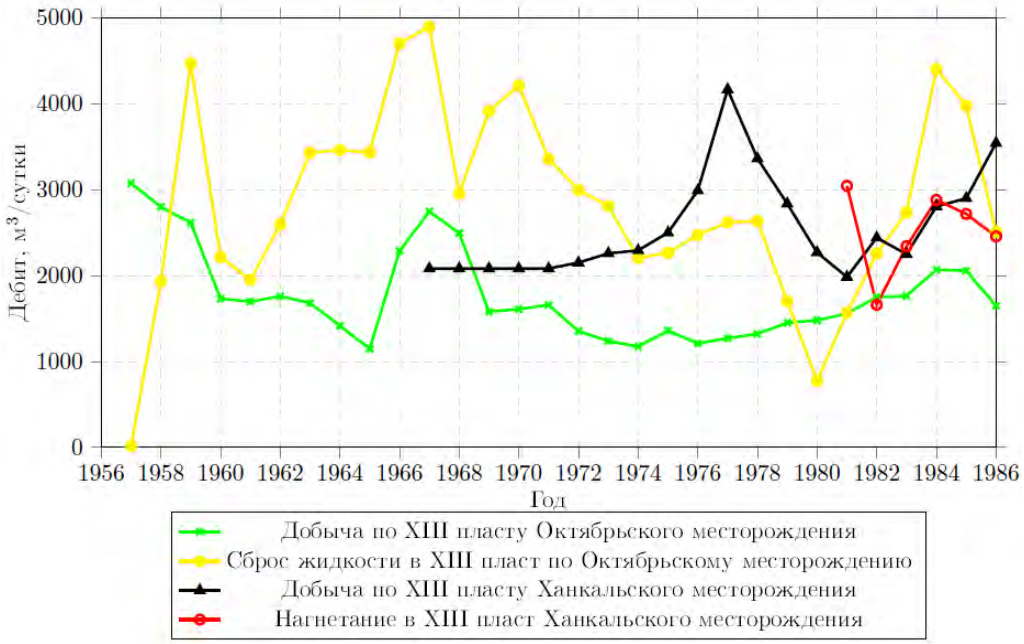


Рисунок 1.3. График добычи и закачки жидкости по XIII пласту [Крылов, 1987ф]

В СССР это была первая геотермальная циркуляционная система (5 добывающих и 4 нагнетательных скважины). В качестве нагнетательных на XIII пласт использовались восстановленные нефтяные скважины 31/25, 29/25, 33/25, 52/25.

Воды Ханкальского термоводозабора в подавляющем большинстве применялись для теплоснабжения объектов совхоза «Тепличный». Термальные воды непосредственно с насосной станции подавались в систему отопления, после чего частично сбрасывались на рельеф, частично транспортировались на насосную станцию поддержания пластового давления. Объем закачиваемых вод

по сравнению с добычей составлял 50–60% [Крылов, 1984ф].

Обратная закачка впоследствии использовалась при эксплуатации IV-VII и XXII пластов. В 1981 г. составлен «Технико-экономический доклад о возможности теплоснабжения г. Грозного и его пригородов термальными водами» в объеме 70 тыс. $м^3$/сут с последующим возвратом отработанных вод обратно в недра. Работы в этом направлении планировалось продолжить. Но с 1994 г. из-за начала вооруженного конфликта эксплуатация Ханкальского месторождения прекратилась. В настоящее время его воды используются местным населением кустарным способом и после сливаются на поверхность [Фархутдинов и др., 2014]. При этом сброс термальной воды представляет собой источник химического и теплового загрязнения.

В 2013 г. Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, ООО «АрэнСтройцентр» и Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН) в составе консорциума «Геотермальные ресурсы» при поддержке Минобрнауки и научном сопровождении BRGM («Бюро геологических и горных исследований», Франция) начали проект по строительству пилотной геотермальной станции, использующей воды XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения Чеченской республики. Тепловая мощность станции – 5.45 Гкал/час, с тепличным комплексов в качестве потребителя. Геотермальная станция работает по технологии циркуляционной схемы теплоотбора или «дублета» – одной продуктивной и нагнетательной скважины.

Зарубежный опыт строительства геотермальных станций с циркуляционными системами показывает, что наиболее эффективными являются технические решения, состоящие из дублетов скважин – водозаборной и нагнетательной. При этом в России, кроме Ханкальской, не функционирует ни одна геотермальная станция с применением циркуляционной схемы – все известные в условиях осадочных бассейнов примеры использования термальных вод используют артезианские скважины с последующим полным или частичным сливом на рельеф или в водоемы [Малышев и др., 2015].

Глава 2. Гидрогеологические и физико-географические условия изучаемой территории

В административном отношении к рассматриваемой территории относится Чеченская Республика. Чечня входит в состав Южного Федерального округа и Северо-Кавказского экономического района России. Площадь составляет 16000 км^2, численность населения – 1370268 человек. Протяженность территории с севера на юг – 170 км, с запада на восток – 110 км. На западе Чеченская Республика граничит с Республикой Ингушетия, на северо-западе – с Республикой Северная Осетия-Алания, на севере – со Ставропольским краем, на северо-востоке и востоке – с Дагестаном, на юге – с Грузией. Южная граница республики, совпадающая с государственной границей Российской Федерации, проходит по гребням хребтов.

Физико-географические условия изучаемой территории описаны по данным работ Гвоздецкого [1958], Герасимова [1966], Гордеевой [2001ф].

2.1. Географическое положение и рельеф

Чечня расположена на Северном Кавказе, в долинах рек Терек и Сунжа, ее территория занимает северные склоны Большого Кавказа, а также прилегающие степи и равнины. Около 35% территории Чеченской Республики занимают горные хребты, межгорные долины и котловины. Остальная территория – равнины, большей частью сильно пересеченные возвышенностями (рисунок 2.1).

В физико-географическом отношении Чечня делится на четыре зоны: высокогорную, горную, предгорную и равнинную. На территории Чеченской республики с севера на юг выделяются крупные геоморфологические элементы: Затеречная равнина, Притеречная равнина, Терский хребет, Сунженский хребет, Алханчуртская долина, Сунженская долина, Гудермесский хребет, Гудермесская плоскость, Северный склон Кавказского хребта [Гордеева, 2001ф].

Затеречная равнина расположена в северной части республики за рекой Терек, на востоке она переходит в Прикаспийскую низменность. Абсолютные

высотные отметки уменьшаются с запада на восток от +120 м до +50 м. Поверхность равнины покрыта закрепленными и незакрепленными песками, образующими сплошной бугристый рельеф.



Рисунок 2.1. Физико-географическая карта Чеченской Республики

Между р. Терек и Терским хребтом расположена *Притеречная равнина*, поверхность которой наклонена на северо-восток. Основная площадь сложена лессовидными суглинками и супесями. На юге эта терраса переходит в пологий склон Терского хребта, а на севере уступами обрывается к надпойменным террасам и пойме Терека.

Терский хребет представляет собой систему антиклинальных складок, сложенных породами неогенового возраста и осложненных вторичными складками, разрывами и надвигами. Он имеет почти широтное направление и

протягивается, пересекая западную границу Чечни, на восток. Северный склон его пологий, южный – более крутой.

Между Терским и Сунженским хребтами расположена *Алханчуртская долина.* Ширина ее варьирует от 10 до 15 км. На востоке долина разделяется на две ветви антиклиналью Грозненского хребта.

Следующий *Сунженский хребет* расположен параллельно Терскому и имеет такую же систему складок. Складки здесь наклонены к югу, а водораздельная линия смещена к северному крылу складки. Вершины хребта в пределах изучаемой территории имеют высотные отметки, превышающие 500 м. Южный склон Сунженского хребта, как и Терского, более крутой. Система двух хребтов имеет общее название Передовые.

Между Передовыми хребтами и Черными горами расположена *Сунженская долина*. Равнина понижается к северу от 300 м до 150 м над уровнем моря. Она представляет синклинальную складку, ось которой смещена к северу.

Восточным продолжением Терского хребта, изолированным долинами рек Сунжи и Белки, является *Гудермесский хребет*. Протяженность его 32 км, ориентировка с северо-запада на юго-восток, ширина 4–4.5 км, с относительным превышением над подножием на 320–450 м. В восточном направлении Гудермесский хребет постепенно приближается к Черным горам и у реки Аксай соединяется с ними.

Гудермесская плоскость является плоской равниной, слабо наклоненной на север, северо-восток. Ее северная граница проводится по р. Терек. На юге она постепенно переходит в склон Гудермесского хребта, на западе замыкается Брагунским хребтом, на севере она сливается с Терско-Кумской низменностью.

Северный склон Кавказского хребта на территории Чеченской республики представлен двумя хребтами – Боковым и Скалистым. Наиболее высокие точки хребтов с запада на восток: г. Цузункорт (3438 м), г. Маистисмта (4081 м), г. Шаихкорт (3942 м), г. Доносмта (4174 м), г. Диклосмта (4285 м) и др. На высоте 3400 м над уровнем моря проходит снеговая граница. Севернее расположены горы, разделяющие Боковой и Скалистый хребты, сложно расчлененные

притоками рек Аргуна и Ассы.

Эксплуатационный участок Ханкальского месторождения термальных вод расположен в пределах Ханкальской долины. Она представляет собой древнюю долину р. Аргун и имеет близкое к меридиональному простирание. Северо-западным бортом долины являются крутые, изрезанные балками склоны возвышенности Сюир-Корт. Наивысшая точка указанной возвышенности (г. Белик-Барц) имеет абсолютную отметку +396 м. На юге возвышенность выполаживается и переходит в вышеуказанную Сунженскую долину, простирающуюся до Черных Гор. Восточнее Ханкальской долины расположена возвышенность Сюиль-Корт. Эта возвышенность имеет резко понижающийся рельеф в западном и особенно в восточном направлениях, где она омывается рекой Аргун, современное русло которой отклонилось к востоку в результате продолжающего воздымания Октябрьской антиклинальной структуры [Шпак, 1968ф]. Наивысшая точка (г. Джеми-Барц) достигает абсолютной высоты +435 м. Далее к юго-востоку возвышенность круто обрывается современной долиной р. Аргун. Все перечисленные возвышенности представляют собой остатки когда-то существовавшего единого хребта. Абсолютные отметки поверхности земли в пределах участка Ханкальской долины составляют от +170 до +180 м. Ширина Ханкальской долины в пределах эксплуатационного участка не превышает 2–2.5 км.

2.2. Климат и гидрография

Климат Чеченской республики преимущественно умеренно-континентальный. В северной части территории климат сухой, континентальный. В южной части республики климат умеренно-теплый, засушливый, континентального типа в равнинной части и более мягкий умеренно-влажный в предгорных и горных районах. Лето жаркое (средняя температура июля составляет +24.5 °С), зима умеренно-холодная (средняя температура января равна –3,4 °С), среднегодовая температура +11 °С. Максимальная температура воздуха летом +42 °С, абсолютный минимум зимой –32 °С.

Распределение осадков неравномерное как по территории республики, так и в разрезе года. Среднегодовое количество осадков изменяется в широком диапазоне в зависимости от того, в какой природной зоне располагается район. Наибольшее количество их выпадает в июне, наименьшее – в январе и феврале, причем в северных районах их гораздо меньше (300–400 мм), а в горной части они достигают 500–800 мм.

Снеговой покров неустойчив, достигает 8–10 см, очень редко 35–87 см и держится иногда до марта месяца. Максимальная глубина промерзания грунта достигает 0.6–0.7 м, средняя – 0.1–0.2 м.

Зимой преобладают холодные сухие восточные ветры, которые приносят с Каспия низкие туманы, оседающие в предгорной полосе. Весной эти ветры превращаются в суховеи. В начале лета юго-западные ветры приносят влажные и теплые массы воздуха с Черного и Средиземного морей, поэтому максимум осадков приходится на первую половину лета.

Наиболее крупными реками исследуемой территории являются Терек, Сунжа, Аргун, Гудермес. Гидрографическая сеть наиболее развита в области питания карагано-чокракского водоносного комплекса – в Черных горах. Гидрографическая сеть полностью относится к бассейну реки Терека, берущего начало на Главном Кавказском хребте и протекающего через всю территорию республики с северо-запада на юго-восток. Глубина реки достигает 3–6 м, ширина изменяется от 190 м до 580 м. Средняя скорость течения равна 0.8 м/с, среднегодовой расход – 305 $м^3$/с, максимальный расход – 816 $м^3$/с. По типу водного режима Терек относится к рекам с ледниковым питанием.

Единственным на территории республики притоком реки Терека является р. Сунжа, берущая начало из родников, расположенных в районе Черных гор. Река пересекает всю территорию Чечни с запада на восток. Длина реки около 200 км, ширина русла в районе г. Грозного до 50 м, средняя глубина – 0.6 м. Средняя скорость течения – 0.8 м/с, средний многолетний расход – 31.9 $м^3$/с. В питании реки принимают участие ледники и высокогорные снега.

Река Сунжа, в свою очередь, имеет ряд притоков: Хулхулау, Аргун, Асса и

несколько более мелких, текущих в основном с юга на север. Наиболее крупный из них – р. Аргун. Амплитуда колебания уровня воды в среднем составляет 1.1 м. Глубина реки – до 1.3 м, ширина русла – от 40 м до 350 м (у селения Комсомольское), скорость течения – 1.7 м/с. Средний многолетний расход р. Аргун у с. Дуба-Юрт составляет 43.3 $м^3$/с, максимальный – 280 $м^3$/с, минимальный – 11 $м^3$/с.

В целом климатические условия, обильные осадки и густо развитая гидрографическая сеть в полосе выходов караган-чокракских отложений в Черных горах благоприятны для питания водоносных горизонтов этих отложений и создания в них значительных естественных ресурсов подземных вод. Климатические особенности также определили необходимость в отоплении лишь 7 месяцев в году (15 октября – 15 апреля) – период, в течение которого используются термальные подземные воды Хакальского месторождения для обогрева теплиц.

2.3. Стратиграфия

Рассмотрение условий формирования ресурсов термальных вод требует детального анализа стратиграфии изучаемой территории. Ханкальское месторождение термальных подземных вод относится к Октябрьской антиклинали наряду с одноименным нефтяным месторождением, благодаря чему здесь имеется множество пробуренных скважин и тематических отчетов по исследуемой территории. Стратиграфия детально представлена в работах А.А. Шпака [1968ф] и В.Б. Крылова [1987ф, 1988ф].

Геологический разрез исследуемой территории описывается, начиная с неогеновых отложений, так как в нижележащих отложениях не выделены продуктивные водоносные пласты (Приложение А, Б).

Неогеновая система (N)

Миоценовый отдел (N_1)

Миоценовый отдел подразделяется на три подотдела: нижний, средний и верхний. К нижнему миоцену относится майкопская свита, представленная

глинами. Свита является региональным водоупором, отделяющим мезозойский гидрогеологический этаж от вышележащих. Мощность ее в пределах Октябрьской структуры меняется от 1100 до 1800 м.

Среднемиоценовый подотдел (N_1^2)

К среднемиоценовому подотделу относятся тортонский ярус, представленный четырьмя горизонтами: тарханским, чокракским, конским и караганским. Вследствие незначительной толщины тарханского и конского горизонтов, они объединяются при описании с чокракским и караганским соответственно. Месторождения термальных вод Чеченской Республики приурочены именно к отложениям данных горизонтов, в связи с чем приводится их послойное описание (рисунок 2.2).

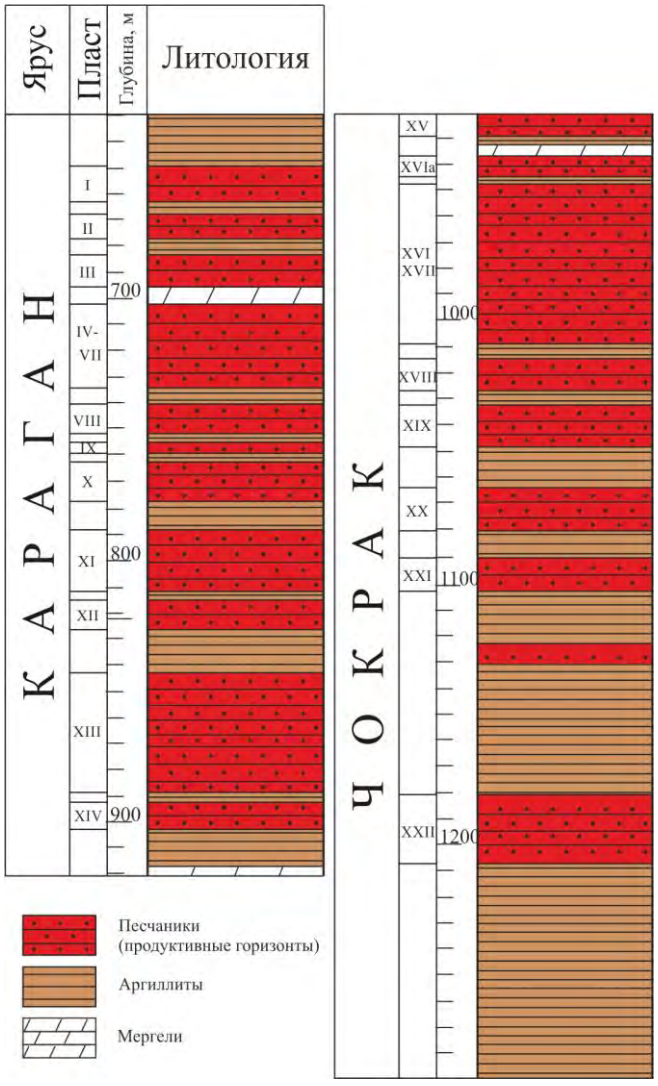


Рисунок 2.2. Средненормальный разрез продуктивной толщи юго-восточного погружения Октябрьской структуры по А.А. Шпаку с изменениями [1968ф]

Тортонский ярус (N_1^2t)

В литологическом отношении отложения яруса представлены чередованием глин и песчаников.

Отложения тортонского яруса выходят на дневную поверхность широкой полосой на северном склоне Большого Кавказа в зоне Черногорской моноклинали, а также в антиклинальных ядрах Передовых хребтов. В синклинальном прогибе между моноклиналью Черных гор и Сунженским хребтом, а также между Сунженским и Терским хребтами и к северу от Терского хребта отложения тортонского яруса погружаются под более молодые образования на глубину свыше 3-х км [Крылов, 1988ф].

Впервые систематизированное промысловое деление описываемых отложений было дано еще в 1913 г. на съезде промышленников в начале эксплуатации Октябрьского нефтяного месторождения. В основу этой схемы деления были положены литологические признаки. Большая работа по межрайонной и внутрирайонной корреляции среднемиоценовых отложений Восточного Предкавказья проведена Комплексной Северо-Кавказской нефтяной экспедицией АН СССР. В основу корреляции были положены стратиграфические схемы Н.Б. Вассоевича [1959], для чокракских отложений Дагестана – И.О. Брода [1958].

А.А. Хуциевым [1960] установлено, что общая песчанистость отложений уменьшается с юга на север и с востока на запад. В этих же направлениях песчаники обогащаются глинисто-алевролитовым материалом и становятся более мелкозернистыми.

Тарханский и чокракский горизонты ($N_1^2tr+čk$)

Отложения горизонтов обнажаются в сводовых частях антиклинальных складок Терско-Сунженской области, а также протягиваются вдоль Черногорской моноклинали. Тарханский и чокракский горизонты отличаются друг от друга фаунистически и литологически.

На границе майкопской свиты и чокракских слоев залегает характерная глинисто-мергельная толща тарханского горизонта, содержащая обильную фауну.

Чокракские отложения представлены переслаиванием толщ песчаников и глин с глинисто-карбонатными прослоями. Данные прослои сложены глинистыми известняками, доломитами, анкеритами, сидеритами и мергелями, хорошо выдержаны по площади.

Снизу вверх разрез чокракских отложений делится на две части по изменению литологического состава: нижнюю глинистую и верхнюю песчано-глинистую. В качестве коллекторов в разрезе выделены толщи песчаников от XXIV до XV пластов, на территории Ханкальского месторождения вскрыты пласты чокрака от XXII до XV. Песчаники кварцевого состава (85–90%) – мелкозернистой, реже мелкосреднезернистой структуры с поровым глинисто-карбонатным цементом. Глинистые породы чокрака имеют серую, темно-серую и коричневую окраску. По результатам изучения глинистых пород методом окрашивания и данным термических и рентгеноскопических анализов, установлен гидрослюдистый иллитовый тип минералогического состава коллоидной части глины чокрака, иногда с примесью каолинита и бейделлита [Крылов, 1988ф].

Наиболее выдержанными по площади является пласт XXII. XXIII и XXIV пласты песчаников замещаются глинами на площадях Сюиль-Корт и Сюир-Корт.

Толщина отложений чокракской свиты в пределах района с востока на запад изменяется от 600 до 450 м.

В районе Октябрьской площади толща начинается спириалисовым мергелем мощностью 7–10 м, светло-серого цвета. Фауна представлена тонкостенными раковинами:

Syndesmia alba Urod vor,

Syethica Sokol,

Spirialis tarchanesis Rittl,

Spirialis volvatica Reuss,

Spirialis nucleates Zhizh.

Следующим залегает продуктивный слой XV, представленный темно-серым мелкозернистым кварцевым песчаником с глауконитом. Толщина пласта 10–12 м.

Между пластом XV и XVI расположен глинистый слой буровато-серого

цвета толщиной 5–7 м.

На Октябрьской структуре XVI пласт хорошо прослеживается по каротажным диаграммам и сливается в единый с XVII. В верхней части залегает серый мелкозернистый кварцевый песчаник с прослоями слоистых глин темно-серого цвета. Нижняя часть представлена рыхлым кварцевым песчаником серого цвета с прослоями крупнозернистого песчаника. Толщина – 35–60 м.

Пласты XVII и XVIII разделены прослоем темно-серых слоистых оскольчатых глин. В глинах встречается фауна:

Syndesmia alba Wood,

Spaniodontella intermedia Andr.,

Zeda sp.,

Mactra sp.

Толщина раздела – 3–6 м.

XVIII пласт сложен зеленовато-серым кварцевым песчаником с глауконитом с прослойками глин. Толщина пласта – 10–20 м.

Далее залегает глинистый раздел темно-серого цвета с включениями пирита. Толщина раздела – 15–18 м. Фауна представлена:

Mactra sp.,

Syndesmia alba Wood.

Следующий продуктивный XIX пласт имеет непостоянный характер. В центральной части Октябрьской структуры он сложен мелкозернистым кварцевым песчаником с прослойками бурой слюдистой глины, которые разделяют пласт на несколько частей. На восточном погружении антиклинали песчаник становится более рыхлым и глинистым. Далее на восток XIX пласт сливается с XX пластом. Толщина пласта составляет 6 м на западе и к востоку увеличивается до 54 м.

Далее залегает среднезернистый кварцевый песчаник XX пласта с прослоями бурой слюдистой глины. Пласт толщиной 6 м на западе Октябрьской структуры возрастает до 42 м на востоке, где сливается с XXI пластом.

Подстилающими отложениями является песчано-глинистая пестроцветная

толща и глинистый раздел. Далее по разрезу залегает XXII продуктивный пласт, в кровле которого расположен прослой известняка серого цвета, крепкого, неслоистого, являющегося маркирующим горизонтом. В кровле XXII пласт представлен грубозернистым песчаником. Зернистость песчаника вниз по разрезу уменьшается. Средняя мощность пласта в пределах исследуемой территории – 28 м.

Следующий продуктивный XXIII пласт встречается только на площади Гойтен-Корт, замещаясь глинами на соседних площадях. Сложен кварцевым песчаником темно-серого цвета. Толщина составляет 70–80 м.

XXIV пласт также не был вскрыт на территории Ханкальского месторождения. Представлен плотным кварцевым песчаником. Толщина пласта достигает 70 м.

Общая толщина чокракских отложений изменяется от 500 до 600 м на исследуемой территории.

Караганский горизонт ($N_1^2 kg$)

Отложения караганского горизонта выходят на поверхность в сводовых частях и на крыльях антиклинальных зон Терско-Сунженской области, узкой полосой протягиваются вдоль Черногорской моноклинали. В отличие от чокракских слоев песчаные пласты карагана более выдержанные.

Для отдельных районов Восточного Предкавказья составлены различные стратиграфические схемы карагана. Сопоставление этих схем было сделано Н.Б. Вассоевичем [1959], подразделяющим караганский горизонт на две свиты: нижнюю и верхнюю. Граница между ними условно проведена по песчано-алевролитовой пачке.

В пределах изучаемой территории отложения караганского горизонта представлены чередующимися толщами песчаников и глин. Всего выделяется 14 продуктивных пластов, обозначенных римскими цифрами от XIV до I. Они имеют темно-серую, серую, иногда коричневую окраску, представлены песчаниками кварцевыми мелкозернистыми с глауконитом и глинами гидрослюдистыми, иллитовыми.

Толщина караганских отложений в Терско-Сунженской области, как и чокракских, увеличивается с запада на восток. На Терском хребте она колеблется от 200 до 270 м, на Сунженском хребте возрастает от 240 до 320 м.

Начинаются отложения карагана пачкой темносерых почти черных глин, песчанистых, оскольчатых. В глинах встречаются фауна *Spaniodontella pulchella Baily*.

I продуктивный пласт вверху представлен известняком зеленовато-серого цвета. Ниже залегает мелкозернистый кварцевый темно-серый песчаник с глауконитом и прослойками глин. Толщина – 10–15 м. Увеличение глинистости и уменьшение толщины происходит с запада на восток.

Далее залегает глинистый раздел между I и II пластом. II слой представлен песчаником сходного с I пластом состава. Толщина изменяется с запада на восток от 6 до 10 м.

III пласт сложен зеленовато-серым кварцевым песчаником, мелкозернистым, глауконитовым. Толщина пласта в пределах Октябрьской структуры уменьшается с запада на восток с 14 до 8 м.

Пласты IV и VII сливаются вместе, поэтому отдельно не выделяются, обозначаясь как единый продуктивный термоводоносный слой кварцевого мелкозернистого песчаника. Толщина – от 24 до 34 м.

Следующий VIII пласт представлен схожими отложениями. Толщина западной части – в пределах 4–9 м, а восточной части возрастает до 6–14 м.

Толщина IX пласта, сложенного песчанистой глиной с прослоями мергелей, составляет 8–9 м.

X продуктивный пласт представлен кварцевым среднезернистым песчаником, с толщиной от 15 до 20 м.

В кровле следующего XI пласта залегает плотный ожелезненный мергель. Ниже пласт сложен кварцевым мелкозернистым песчаником с прослоями глауконита. Толщина пласта – 20–24 м.

XII пласт также представлен известковым мергелем в кровле, далее залегает мелкозернистый кварцевый глинистый песчаник с глауконитом. Ниже по разрезу

возрастает глинистость пласта. Толщина – 14–17 м.

XIII продуктивный пласт, на базе ресурсов которого работает геотермальная станция, имеет толщину 40–50 м и является хорошо выдержанным по мощности на всей площади Ханкальского месторождения. Сложен пласт песчаником крупнозернистым, кварцевым, глауконитовым и почти лишен пропластков глин.

Следующий XIV пласт сложен мелкозернистым светло-серым песчаником с прослоями бурой глины. Толщина пласта – 6–8 м.

Таким образом, отложения караганского горизонта на Октябрьской площади представлены чередованием пачек песчаников и глин. Песчаники темно-серые, глауконитовые, толщина их колеблется от 4 до 50 м. В направлении с запада на восток возрастает глинистость и сокращается толщина песчаников. Песчаники разделены пластами бурых и темно-серых глин.

Мощность караганских отложений на исследуемой территории изменяется от 260 до 300 м.

Верхнемиоценовый подотдел (N_1^3)

Конкский горизонт ($N_1^3 kn$)

Горизонт представлен серыми глинами сланцевыми с прослоями плотных мергелей, стратиграфически выделен по фауне спириалисов. На Октябрьской площади конский горизонт самостоятельно не выделяется и относится к нижнему сармату. Мощность – 30–40 м.

Сарматский ярус ($N_1^3 s$)

На всей рассматриваемой территории отложения данного яруса получили широкое распространение. В Терско-Сунженской области данные отложения слагают крылья и периклинальные погружения антиклинальных складок, а также протягиваются узкой полосой вдоль моноклинали Черных гор. Породы сармата относятся к самым древним, обнажающимся в своде Октябрьской структуры. Всего выделяются три подъяруса: нижний, средний и верхний.

Нижнесарматский подъярус ($N_1^3 s_1$)

В отложениях подъяруса выделяются два горизонта: нижний – слои с *Syndesmia reflexa Eichw,* и верхний – слои с *Mactra eichwaldi Lask*.

Нижний горизонт сложен темно-серыми глинами известковистыми, слоистыми, с прослойками мергелей серого и коричневато-серого цвета. Толщина – 40 м.

Переход в верхний горизонт с *Mactra eichwaldi Lask* постепенный. Литологически он проявляется в уменьшении количества мергельных прослоев. Толщина составляет 25–30 м.

С запада на восток общая толщина нижнесарматских отложений увеличивается до 60 м.

Среднесарматский подъярус ($N_1^3 s_2$)

В пределах Терско-Сунженской области выделяются две фации среднего сармата: глубоководные криптомактровые слои и мелководные слои с фауной. В западной части области криптомактровые слои сложены глинами и пластами мергелей в верхней части, в нижней – пластами глинистых песчаников. Характерно уменьшение толщины подъяруса с юга (район Черных гор) на север (Затеречная долина) с 450 до 70 м.

На Октябрьской площади выделяется лишь одна фация криптомактровых слоев с фауной *Cryptomactra pesanseris Andr* и *Articulina sp*. Представлены отложения карбонатными глинами с прослоями плитчатых серых мергелей, в верхней части с тонкими (1–20 см) прослоями светло-серого мелкозернистого слюдистого песчаника. Общая толщина слоев – в пределах 120–140 м.

Верхнесарматский подъярус ($N_1^3 s_3$)

Толщина подъяруса в Терско-Сунженской области варьирует от 400 до 800 м.

На территории Ханкальского месторождения верхний сармат по литологии и фауне подразделяется на грозненские слои, слои с *Mactra caspia Eichw* и переходную толщу.

Грозненские слои сложены листоватыми глинами темно-серыми с прослоями желтовато-серых, пелитоморфных мергелей и большим количеством рыбных остатков и раковин *Mactra sp*.

Переходная толща представлена серыми глинами, часто песчанистыми,

слюдистыми, карбонатными, слоистыми, с присыпками песка по плоскостям напластования.

Слои с *Mactra caspia Eichw* сложены глинами темно-серыми, с зеленоватым оттенком и прослоями серого мелкозернистого песка.

Максимальная толщина подъяруса достигает 700 м.

Мэотический ярус (N_1^3m)

Мэотические отложения слагают крылья Сунженского и Терского антиклинориев и участвуют в строении Черногорской моноклинали. Также отложения яруса приурочены к погруженным частям Октябрьской антиклинали и к ее крыльям.

Литологически подразделяются на три части: нижнюю – глинистую, среднюю – в основном песчанистую, и верхнюю – глинистую.

Нижняя часть сложена глинами темно-серыми, известковистыми, слоистыми с редкими прослоями песчаников серых, иногда глинистых в верхней половине.

Средняя часть представлена темно-серыми глинами и светлыми, плотными, известковистыми, слоистыми песчаниками, с преобладающим значением последних.

В верхней части мэотис представлен чередованием глин и песчаников светлых оттенков, плотных, известковистых, слоистых, с прослоями оолитовых известняков.

Максимальная толщина яруса – 800 м.

Плиоценовый отдел (N_2)

Отложения плиоцена повсеместно с угловым несогласием залегают на отложениях миоцена, слагают периферии антиклинальных структур Терско-Сунженской области. Отдел подразделяется на три яруса: понтический, акчагыльский и апшеронский.

Понтический ярус (N_2^3pt)

На исследуемой территории отложения яруса вскрыты скважинами лишь на далеком восточном погружении Октябрьской антиклинальной складки.

В верхней части залегают глины желтовато и голубовато-серые, песчанистые, плотные и песчаники того же цвета, тонкозернистые. Отложения нижней части представлены глинами темно-серыми, песчанистыми, плотными. В понтическом ярусе найдена фауна:

Parvivenus widhalmi Barb,

Monodacna pseudocatillus Barb,

Congeria novorossica Sinz,

Syndesmia tellinoidez Sinz.

Общая толщина – 0–275 м.

Акчагыльский ярус (N_2^3ak)

Отложения яруса трансгрессивно и с угловым несогласием залегают на различных более древних отложениях. Акчагыльский ярус представлен чередованием глин зеленовато-серых, слоистых, песчанистых и известковистых, и песчаников схожего цвета, разнозернистых, зачастую глинистых. В подошве яруса залегает галечник, толщина которого колеблется от 12 до 40 м.

В Терско-Сунженской области отложения развиты практически повсеместно. Акчагыльские отложения окаймляют эллипсовидным кольцом Октябрьскую антиклиналь.

Фауна: *Mactra subcaspia Andr, Cardium dombra Andr, Mactra sp.*

Толщина яруса – 0–300 м.

Апшеронский ярус (N_2^3ap)

На исследуемой территории Октябрьской структуры апшеронские отложения развиты лишь на ее погружении, залегая с небольшим угловым несогласием на породах акчагыльского яруса.

Отложения апшерона представлены переслаиванием песчаников серых, желтовато-серых, полимиктовых, разнозернистых, глин голубовато-серых, песчанистых, неслоистых и галечников, состоящих из галек довольно крупных размеров с песчано-глинистым цементом. Фауна: *Helix sp*., *Spirorbis sp*., *Dreissinsia sp*. Общая мощность яруса – 0–200 м.

Четвертичная система (Q)

Четвертичные отложения в Терско-Сунженской области развиты на пологих склонах Передовых хребтов, в балках и речных долинах, сочленяющих эти склоны.

Четвертичные отложения на Октябрьской площади встречаются повсеместно, покрывая ее сплошным чехлом. Представлены они лессовидными суглинками и галечниками.

Вскрытая толщина колеблется от 70 до 300 м на погружении южного крыла восточной периклинали.

Особенности стратиграфии, литологический состав и изменение песчанистости и мощности пластов с юга на север и с востока на запад предопределили перспективность разработки территории Ханкальского месторождения термальных вод, а мощность и выдержанность XIII продуктивного пласта выделяют его среди водоносных караган-чокракских горизонтов, являясь одним из главных факторов выбора в качестве теплового источника для пилотной геотермальной станции.

2.4. Тектонические условия

Тектонические особенности и строение изучаемой территории освещаются в работах И.О. Брода [1958], Н.С. Шатского [1956], Е.Е. Милановского [1963], В.Е. Хаина [1950] и др.

Наиболее характерной чертой тектонического строения восточной части северного склона Кавказского складчатого сооружения является линейное, зональное расположение складок, в общем параллельное современному простиранию Кавказа (рисунок 2.3).

В Терско-Сунженской области развиты многочисленные антиклинальные и синклинальные складки, объединяемые в структурные зоны. Эти зоны хорошо выражены в рельефе в виде двух цепей невысоких хребтов от западной границы Чеченской республики до р. Аксай (на востоке) и выделяются на геологической карте двумя полосами выходов миоценовых отложений, обрамленных отложениями плиоценового возраста.

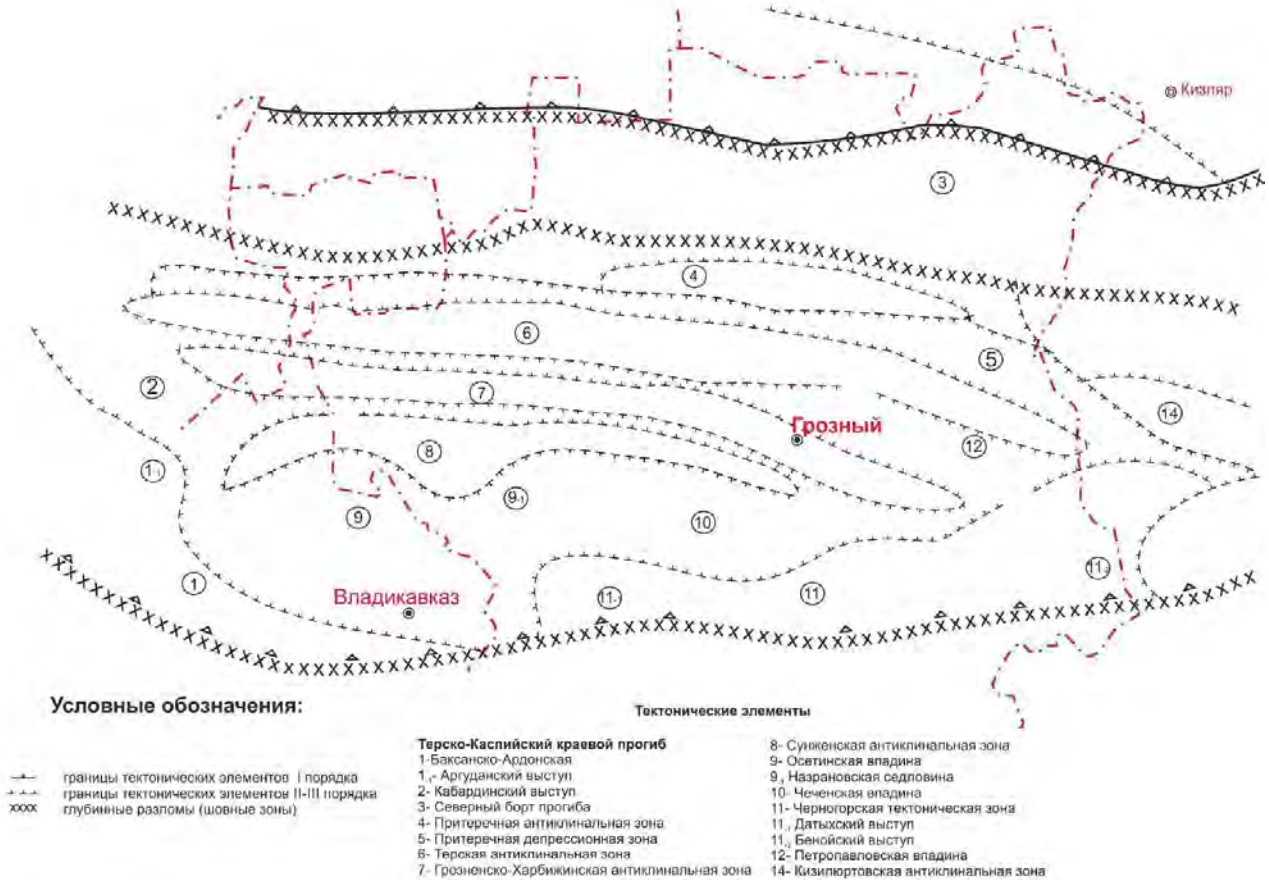


Рисунок 2.3. Тектоническая схема исследуемой области [Крылов, 1988ф]

В тектоническом отношении Ханкальское месторождение термальных вод находится на юго-восточном погружении осевой части Октябрьской антиклинальной структуры, являющейся восточным обрамлением Сунженской антиклинальной зоны.

Октябрьская брахиантиклиналь имеет пологий, довольно узкий свод и крутые крылья, что относится к коробчатому строению. В целом Октябрьское поднятие представляет собой изоклинальную складку, вытянутую в юго-восточном направлении. Размер складки – 25х3 км, ширина на своде по кровле караганских отложений – 1.25–1.5 км, по чокракским – 600–700 м [Шпак, 1968ф].

В строении Октябрьской складки участвует верхний антропоген-плиоценовый комплекс, представленный пологой брахиантиклиналью, почти полностью денудированной в своде, и миоцен-олигоценовый комплекс, который характеризуется сложной складчатостью и криптодиапировым строением [Крылов, 1988ф]. По отложениям миоцена Октябрьская структура представляет собой брахиантиклинальную складку. Складка протягивается с северо-запада

сначала на юго-восток, затем на восток-юго-восток.

Октябрьская брахиантиклиналь осложнена серией продольных и диагональных разломов (рисунок 2.4), разделяющих ее на 6 тектонических блоков [Ермолаев и др., 1953ф]:

I - Западное переклинальное окончание антиклинали;

II - Западный «клин»;

III - Западная часть антиклинали;

IV - Северный «клин»;

V- Южный «клин»;

VI - Восточная часть антиклинали.

По наиболее крупному из нарушений сводовая часть надвинута на южное крыло. Все разрывные нарушения затухают в отложениях верхнего майкопа [Крылов, 1987ф].

По строению вышеуказанные тектонические блоки отличаются друг от друга:

I – Западное переклинальное окончание Октябрьской антиклинали нарушено разрывом типа надвиг, ориентированным с северо-запада на юго-восток. Амплитуда надвига – от 50 до 700 м.

II – Западный «клин» находится в северной части западной переклинали. Образуется сочленением вышеописанного северо-западного разрыва со сбросовым нарушением почти меридионального направления.

III – Западная часть складки. Углы падения крыльев увеличиваются с запада на восток с 35–50° до 70°. После коробчатого строения начинается зона, сильно осложненная разрывными нарушениями – центральный тектонический узел [Крылов, 1987ф]. Она представлена серией надвигов с крутыми поверхностями, образовавших два отдельных блока на территории Октябрьской структуры: северный «клин» и южный «клин».

IV – Северный «клин» примыкает к северному крылу восточной части антиклинали и отделен от нее дополнительным сбросом амплитудой 40–45 м. Вся площадь северного «клина» имеет несколько почти параллельных нарушений.

V – Южный «клин» отделяет восточную часть антиклинали от западной и с востока ограничен центральным сбросо-сдвигом.

VI – Восточная часть антиклинали, где расположено Ханкальское месторождение термальных вод, отделена от западной основным диагональным разрывом примерно параллельным диагональному западному разрыву. Затем диагональный разрыв поворачивает на восток, юго-восток. Основной надвиг сдвигает складку несколько в юго-восточном направлении с надвиганием на юго-запад.

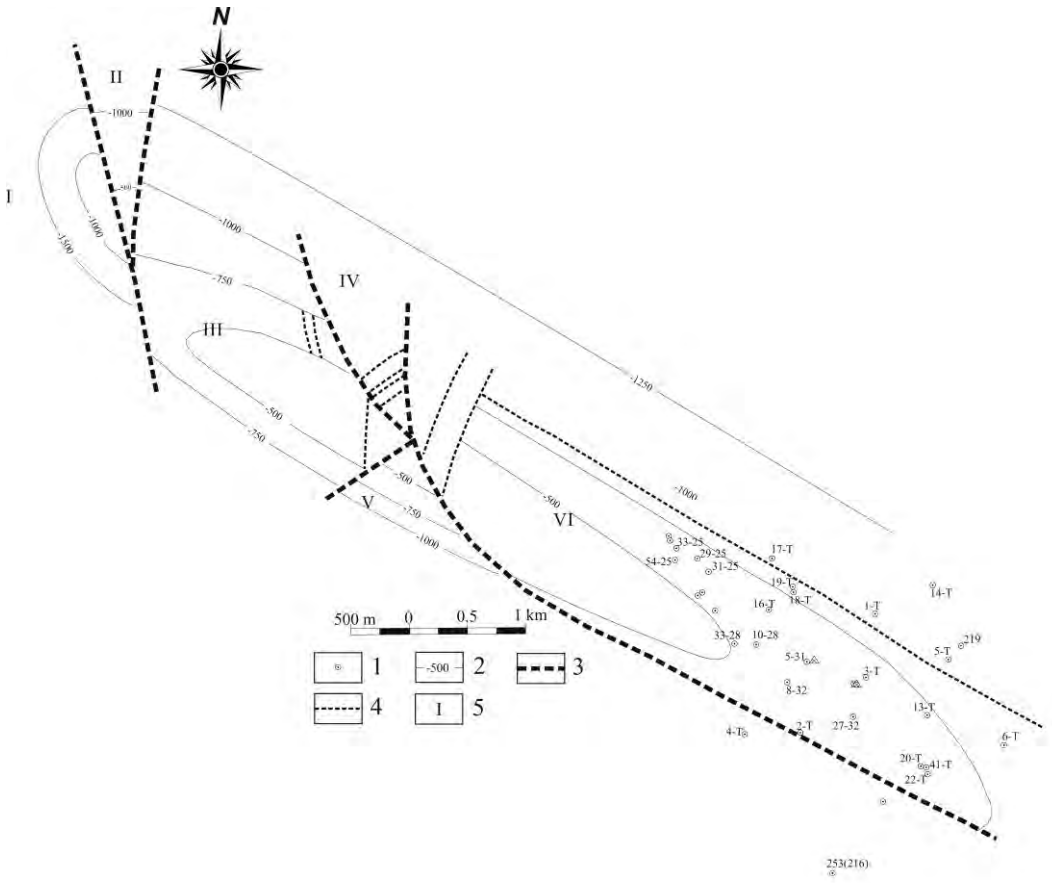


Рисунок 2.4. Тектоническая схема Октябрьской антиклинальной структуры по В.П. Крылову с изменениями [1984ф]

Условные обозначения: 1 – Скважины Ханкальского месторождения, 2 – Изолинии по кровле XIII пласта, 3 – Главные разрывные нарушения, 4 – Второстепенные разрывные нарушения, 5 – Номер тектонического блока.

Рядом авторов [Ермолаев и др., 1954ф, Назаретов, Меркулов, 1956ф] предполагалось наличие на южном крыле восточной части складки надвига, образованного центральным сбросо-сдвигом. Ширина сводовой части по кровле

карагана изменяется к юго-востоку от 1160 до 1400 м, а по кровле чокрака – от 1000 до 1130 м. Нарушение на южном крыле проходит на всем протяжении почти параллельно оси складки.

В целом Октябрьская складка на восточной части антиклинали имеет коробчатое строение – широкий свод и крутые крылья в присводовой части. Углы падения северного крыла в направлении с запада на восток изменяются от 83° до 73°, а южного крыла – от 78° до 84°. Плоскость нарушения на южном крыле имеет северо-восточное падение под углом 26–30° от вертикали. Амплитуда сброса уменьшается в юго-восточном направлении от 200 до 90 м. Ханкальское месторождение термальных вод относится к юго-восточному погружению антиклинальной структуры, осевая часть которой ограничена двумя разрывными нарушениями. Простирание данной структуры – северо-западное, азимут простирания изменяется от 275° на юге до 295° на севере. Южный разлом имеет азимут падения равный примерно 45°, и угол падения изменяется от 35 до 45°. Северный разлом падает под углом 20–30° с азимутом падения около 235°. Система двух разломов образует горст, в пределах которого свод складки приподнят относительно её крыльев. Вертикальное смещение непостоянно и в среднем составляет 100 м.

По тектоническим условиям наиболее благоприятной территорией для расположения скважин является участок осевой зоны антиклинальной структуры. Устья скважин в таком случае будут расположены в непосредственной близости от оси структуры, определяемой минимальной глубиной подошвы пласта XIII, а также на максимальных расстояниях от северного и южного разрывных нарушений.

2.5. Гидрогеологическая характеристика территории и особенности формирования термальных вод

2.5.1. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн

Гидрогеологические, гидрогеохимические и геотермические условия Северного Кавказа отражены в работах И.Г. Киссина, Б.Ф. Маврицкого,

Ф.А. Макаренко, А.И. Хребтова, В.П. Крылова, С.А. Джамалова, С.П. Власовой, А.А. Шпака, Н.А. Григорьева, Г.М. Сухарева, В.М. Николаева, И.С. Зекцера, М.К. Курбанова, А.Б. Алхасова, С.В. Алибекова, О.А. Маммаева, Г.В. Гордеевой, Д.Г. Гонсировского, А.С. Джамаловой и др.

По платформенной части Северного Кавказа в гидрогеологическом регионе Скифской плиты выделяется Предкавказский сложный артезианский бассейн I порядка (провинция), включающий артезианские бассейны II порядка: Восточно-Предкавказский артезианский бассейн (ВПАБ), Азово-Кубанский артезианский бассейн, Ергенинский артезианский бассейн [Тимохин, Алибекова, 2009ф]. Геолого-гидрологические и структурно-тектонические особенности изучаемой территории, в административном отношении приуроченной к Чеченской Республике, обуславливаются местоположением ее в южной части ВПАБ (рисунок 2.5).

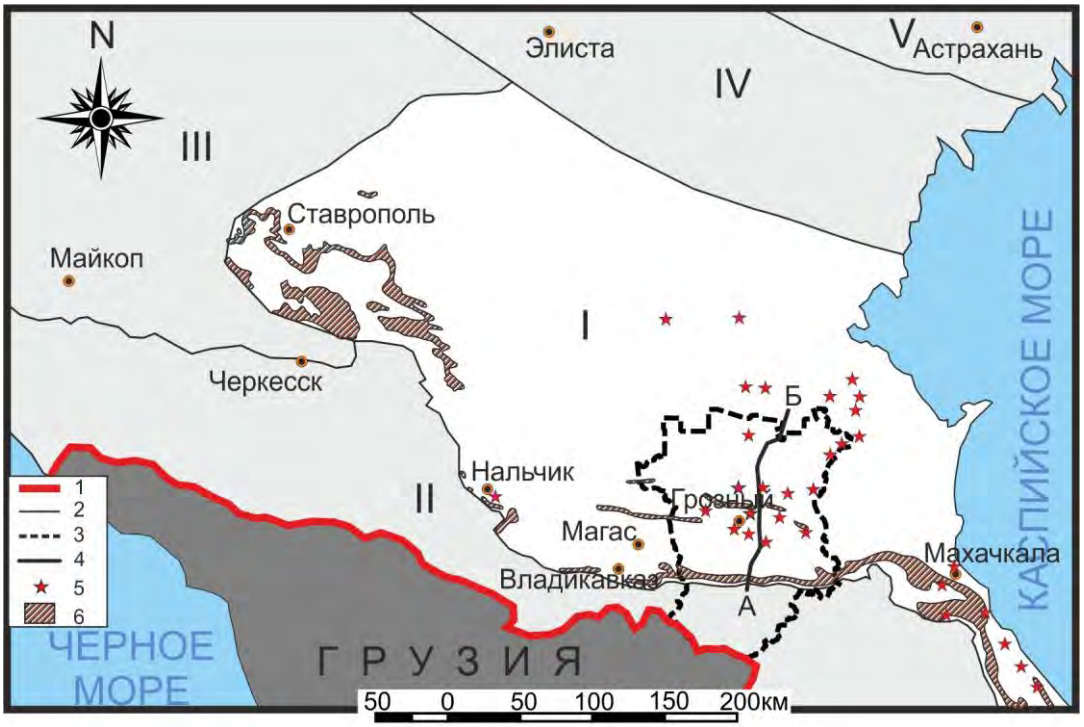


Рисунок 2.5. Схематическая карта Восточно-Предкавказского артезианского бассейна по И.Ю. Дежниковой с изменениями [2015]

Условные обозначения: 1 – государственная граница, 2 – границы гидрогеологических структур, 3 – граница Чеченской Республики, 4 – гидрогеологический разрез А-Б, 5 – месторождения термальных подземных вод, 6 – выходы караган-чокракских отложений на поверхность; I – Восточно-Предкавказский артезианский бассейн, II – Кавказская гидрогеологическая складчатая область, III – Азово-Кубанский артезианский бассейн, IV – Ергенинский артезианский бассейн, V – Прикаспийский артезианский бассейн.

ВПАБ на юге граничит с горно-складчатой системой Большого Кавказа, на востоке уходит в Каспийское море, на севере граница с Прикаспийским бассейном идет по погребенному кряжу Карпинского (включает южную часть кряжа Карпинского – полосу шириной 30–60 км), который является подземным водоразделом, западная граница – район Ставропольского поднятия [Киссин, 1964]. Вместе с субмаринной частью, которая входит в Каспийское море, площадь ВПАБ составляет около 250 тыс. км^2 [Курбанов, 2001].

Для месторождений подземных вод ВПАБ, характерны поровые и порово-трещинные коллекторы, их эксплуатационные запасы обеспечиваются упругими запасами, естественными ресурсами эксплуатируемого водоносного горизонта, а также водами, привлекаемыми из других водоносных горизонтов [Алхасов, 2012].

Тепловой режим ВПАБ формируется за счет теплового потока, литологического состава пород, геолого-структурных особенностей и движения подземных вод. Преобладающее влияние на геотермический режим имеет глубинный тепловой поток. Литологические, структурные и гидрогеологические условия относятся к факторам второго порядка, играющим важную роль в перераспределении глубинного тепла [Алхасов, 2012]. Согласно современным представлениям, одним из главных источников глубинного тепла Земли является распад долгоживущих тяжелых радиоактивных элементов: урана, тория и калия. Общий эффект радиогенной теплогенерации в тепловом потоке исследуемой области достигает 20% [Джамалова, 1969]. Наряду с теплогенерацией значительную роль в формировании теплового поля земной коры играет массопоток из мантии. Поступление тепла из мантии в кору осуществляется не только кондуктивной теплопередачей, но и конвективным тепломассопотоком. Кроме того, значительное количество энергии выделяется при геолого-тектонических, физико-химических, метаморфических процессах. Особенностью ВПАБ является сочетание контрастных геолого-тектонических обстановок – зоны альпийского тектогенеза и эпигерцинской Скифской плиты. Сейсмичность Восточного Кавказа тесно связана с шарьяжно-надвиговым строением коры и неотектоникой [Камалетдинов и др., 1991]. Сейсмические события оказывают

существенное влияние на сложные процессы формирования и размещения подземных вод. По величине магнитуды М, которая характеризует землетрясения с энергетической точки зрения, в Кавказском регионе наиболее сильными были Шемахинское в 1902 г. (М = 6.3), Дагестанское в 1970 г. (М = 6.6) и Спитакское в 1988 г. (М = 7). Согласно сейсмическому районированию большая часть региона относится к зоне с 6 < М < 8 и глубиной залегания очагов землетрясений 10–20 км и менее [Курбанов, 2001]. Результатом движения шарьяжных пластин объясняется генезис термоаномалии горы Янгантау в Республике Башкортостан, где на глубине всего 90 м пластовая температура достигает 400 °С [Нигматулин и др., 1998]. Тектонический фактор играет не только механическую роль в образовании тепла, но и создает условия для вертикальной миграции флюидов, чем выше мобильность геотектонических структур, тем интенсивнее геотермальная, сейсмотектоническая активность и выше конвективный тепломассоперенос из глубин. По зонам тектонических нарушений поступают высоконагретые флюиды, прогревающие породы и воды в осадочном чехле, создавая температурные аномалии [Маврицкий, 1971]. В целом по оценкам исследователей в пределах исследуемой области тепловой поток варьирует от <30 до 90 мВт/м^2 (рисунок 2.6) [Kutas et al., 1979; Курбанов, 2001].

Дифференциация поля теплового потока отражает неоднородность геолого-тектонических и гидрогеологических условий разных частей территории ВПАБ. Также общей чертой, заметной по термограммам ряда скважин исследуемой территории является замедление нарастания температуры с глубиной, что описано в главе 3. Причиной, кроме роста кондуктивной теплопроводности вниз по разрезу, является изменение плотности кондуктивного теплопотока под влиянием конвективного (адвективного) теплопереноса [Курбанов, 2001].

В разрезе ВПАБ выделяется несколько отличающихся друг от друга по своей геотермической характеристике толщ: теплопроводная толща четвертичных и плиоценовых отложений, теплоизолирующая толща сарматских образований, теплопроводная толща среднемиоценовых отложений, теплоизолирующая толща майкопских глин.

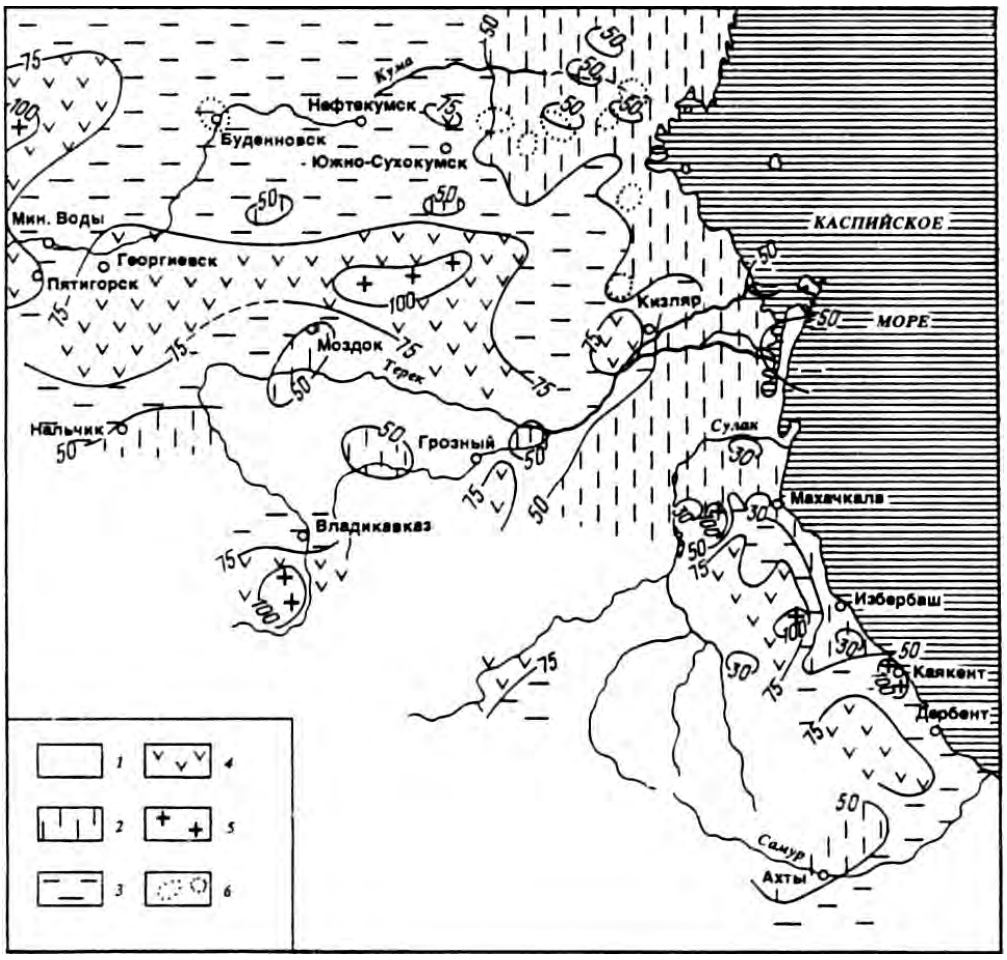


Рисунок 2.6. Карта теплового потока территории юго-востока Восточно-Предкавказского артезианского бассейна [Курбанов, 2001]

Условные обозначения: величины теплового потока, мВт/м^2: 1 – <30 – отрицательные аномалии по тепловому потоку; 2 – 30–50; 3 – 50–75; 4 – 75–100; 5 – >100; 6 – термоаномалии фундамента.

Коэффициент теплопроводности песчаников толщи четвертичного и плиоценового возраста 1.9–2.4 Вт/м·С, глин 0.6–1.3 Вт/м·°С. Коэффициент теплопроводности глин сармата 1.2–1.7 Вт/м·°С. Для среднемиоценовых отложений коэффициент теплопроводности песчаников 2–2.6 Вт/м·°С. Ниже в теплоизолирующих образованиях майкопа коэффициент теплопроводности – 1.2–1.5 Вт/м·°С) [Сухарев, 1948]. Майкопские и сарматские глины играют роль теплоизолирующих покрышек, способствующих сохранению тепла. При погружении водоносных комплексов и увеличении мощности теплоизолирующей покрышки абсолютные величины температур возрастают при постоянном сокращении темпа их приращения. В тоже время различие в теплопроводности пород с глубиной несколько сглаживается, и как следствие этого роль литологического фактора в распределении температур в глубоких горизонтах

должна уменьшаться, а роль глубинного теплового потока увеличиваться [Киссин, 1964].

Связь температур и подземного рельефа имеется в исследуемой области. Глубина геоизотермической поверхности обычно уменьшается в сводовых частях антиклиналей и увеличивается на синклинальных структурах. Данная зависимость объясняется облегченными условиями выноса тепла с глубин в антиклинальных складках, благодаря повышенной теплопроводности пород по напластованию, конвекции в водоносных горизонтах и движению прогретых вод из синклинальных прогибов [Дьяконов, 1958].

Вопрос о переносе тепла подземными водами исследовали многие авторы. Динамика подземных вод оказывает большое влияние на геотермическую обстановку среднемиоценового комплекса исследуемой области [Сухарев, 1948]. Следующие условия определяют высокое значение переноса тепла подземными водами: высокие температуры в депрессиях, благоприятной структурной обстановке и достаточно активном гидродинамическом режиме [Макаренко, 1963]. В пределах Чеченской Республики особенно интенсивен вынос тепла водами из депрессии в Октябрьской и Гудермесской антиклиналях. Такая обстановка также присуща в региональном плане – вследствие субширотного простирания складок Предкавказья, с наиболее глубокими прогибами на юге и субмеридиональном направлении движения подземных вод [Курбанов, 2001].

Другие факторы, кроме теплового потока, структурно-тектонических, литологических особенностей и движения подземных вод не могут иметь существенного значения в формировании геотермического режима исследуемой территории [Алхасов, 2012].

В пределах ВПАБ выделяется 8 гидрогеологических структур третьего порядка и ряд структур четвертого и пятого порядков, хотя области питания их совпадают [Курбанов, 2001]. Эти артезианские бассейны являются «наложенными» [Овчинников, 1959], в более крупной гидрогеологической структуре, которой является ВПАБ, по этой причине в данной работе отдельно они не рассматриваются (рисунок 2.7).

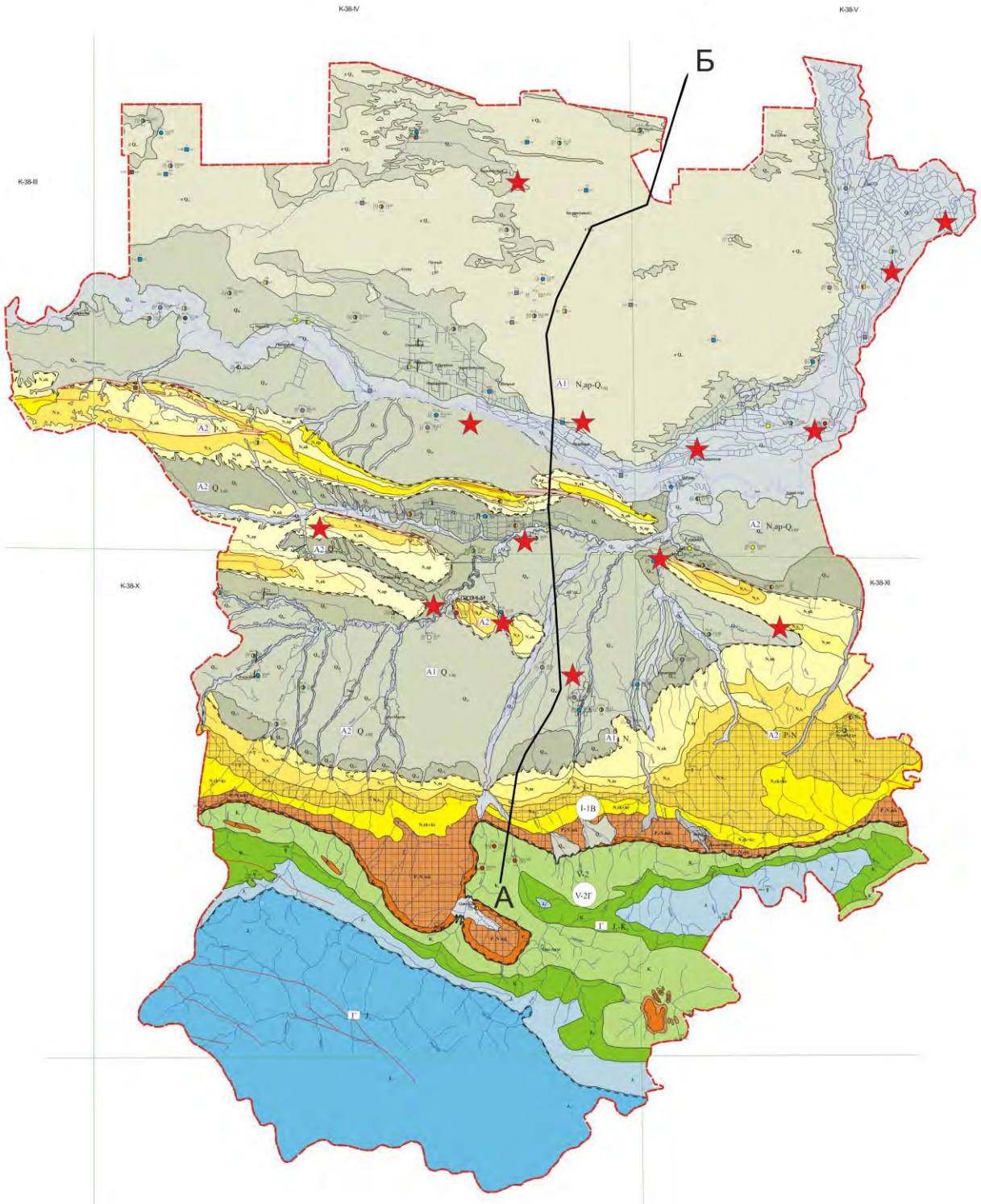


Рисунок 2.7. Гидрогеологическая карта Чеченской Республики по Г.В. Гордеевой с изменениями [2001ф]

Условные обозначения: см. приложение Г, Д.

На территории ВПАБ в пределах исследуемой области выделяются три структурно-гидрогеологических этажа: плиоцен-четвертичный, миоцен-олигоценовый и мезозойский [Курбанов, 2001]. В масштабах всего региона здесь существует вертикальная гидродинамическая зональность с зонами активного,

замедленного и весьма замедленного водообмена. В каждом отдельном водоносном комплексе различных структурно-геологических этажей эта зональность с разной контрастностью может быть выражена полностью или частично – в зависимости от гипсометрического положения конкретных участков комплекса и их удаления от областей питания инфильтрационными водами. На гидродинамическую связь областей питания и транзита влияет ряд факторов, из которых главными являются фильтрационные параметры коллекторов, определяемые их литолого-фациальным составом, мощность водоносных и водоупорных толщ и т.д. [Киссин, 1964].

Южная граница области совпадает с областью питания и проходит по Черным горам, в которых на абсолютных отметках 500–2500 м выходят на дневную поверхность и обнажаются мезо-кайнозойские отложения до нижней юры включительно. Пьезометрическая поверхность всех водоносных комплексов, при отдельных аномалиях, снижается в северном направлении по мере движения подземных вод от области питания к области разгрузки. С юга на север, как правило, изменяется и качественный состав вод от пресных и слабоминерализованных, до высокоминерализованных. По оценкам исследователей несомненна роль Каспийского моря в качестве зоны разгрузки, но нехватка материалов по опробованию различных водоносных горизонтов в акватории моря не позволяет дать точную количественную оценку [Тимохин, Алибекова, 2009ф]. И.С. Зекцером [2007] указывается цифра в 1.65 км^3/год в качестве количества воды различных гидрогеологических этажей ВПАБ разгружающегося в Каспийское море.

Водоносные комплексы развиты в следующих отложениях: четвертичных, неогеновых, палеогеновых, верхнемеловых, нижнемеловых и юрских. Основными водоупорными горизонтами мезо-кайнозоя являются майкопская глинистая толща, нижняя глинистая толща чокракского горизонта и глинистая толща сармата (рисунок 2.8).

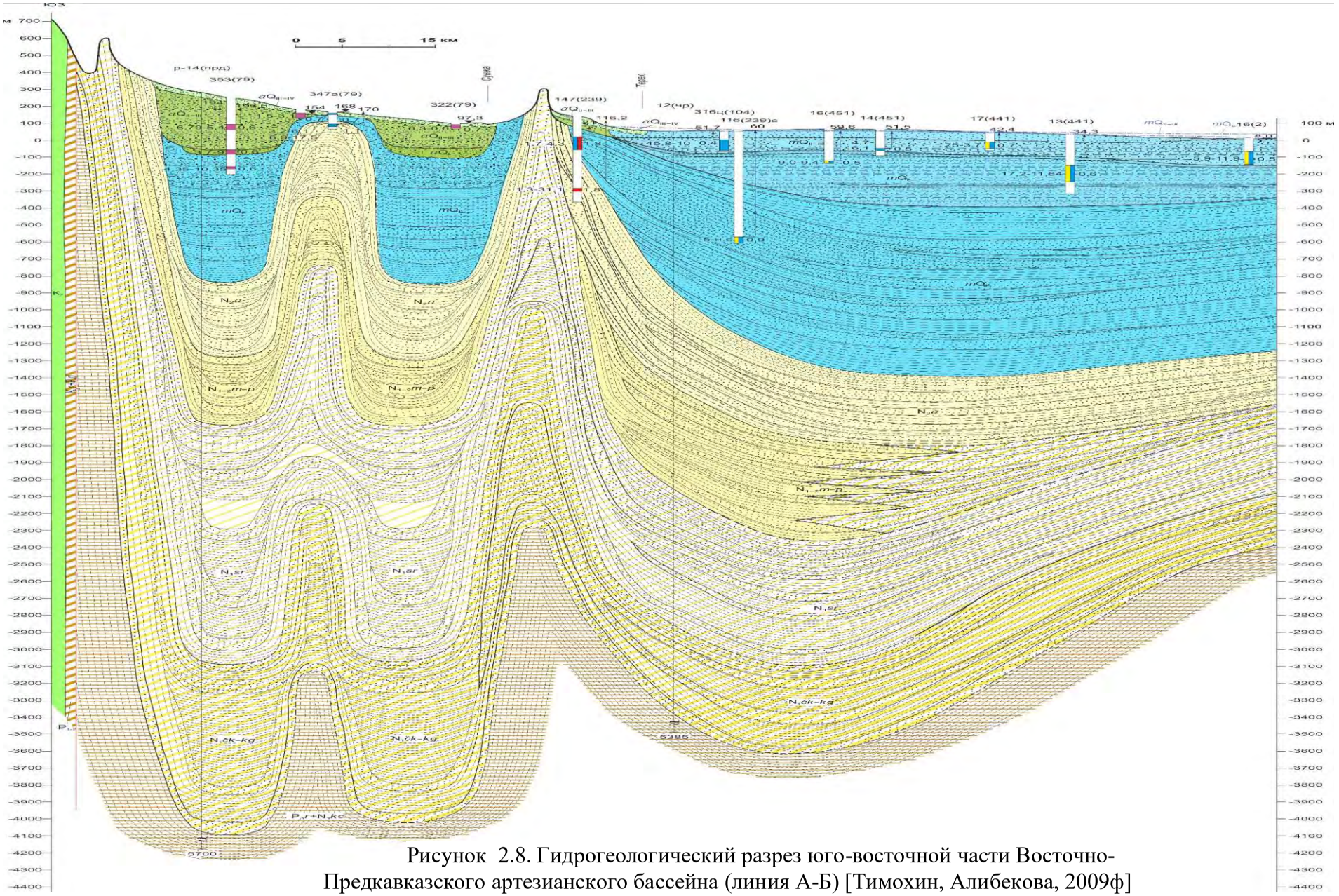


Рисунок 2.8. Гидрогеологический разрез юго-восточной части Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (линия А-Б) [Тимохин, Алибекова, 2009ф]
Условные обозначения: см. приложение Г, Д.

Основные перспективы использования термальных подземных вод Чеченской Республики связаны с водоносностью караган-чокракских отложений, поэтому особое внимание уделено описанию среднемиоценового водоносного комплекса. Описание данных структурно-гидрогеологических этажей области дано по работам Г.В. Гордеевой [2001ф], С.В. Алибековой, В.Г. Тимохина [2009ф], М.К. Курбанова [2001] и др.

Плиоцен-четвертичный структурно-гидрогеологический этаж

Воды современных отложений Q

Воды безнапорные, грунтовые, область питания горизонта совпадает с площадью его распространения. Питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, поглощения поверхностного стока и перетекания воды из нижележащих горизонтов. Водовмещающими породами являются гравийно-галечники, тонкозернистые и мелкозернистые кварцевые пески, на отдельных участках они постепенно переходят в супеси и суглинки с примесью гравия.

Дебиты источников большие (суммарный дебит Старо-Сунженских и Алдынских источников достигает 41500 $м^3$/сут). Температура воды 12 °С, минерализация невысокая (сухой остаток 0.39–0.8 г/л), по типу они сульфатные натриевые.

Воды плиоценовых отложений N_2

В плиоценовом этаже наиболее водообильными и изученными являются водоносные горизонты апшеронского и акчагыльского ярусов, представленные песками, глинами, песчаниками и конгломератами. Воды плиоценового комплекса напорные с высотой самоизлива 30 и более м выше поверхности Земли. В Передовых хребтах в ряде скважин из апшеронских отложений получена вода с дебитом 150–200 $м^3$/сут, иногда до 500–2800 $м^3$/сут. Температура вод в зависимости от глубины залегания (300–700 м) водоносных горизонтов колеблется от 25 до 60 °С, минерализация на подавляющей территории варьирует в пределах 0.5–1.5 г/л, химический тип – сульфатно-натриевый, реже гидрокарбонатно-натриевый. Воды формируются за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод и конденсации атмосферной влаги в

областях питания артезианского бассейна [Курбанов, 2001]. В области питания, вдоль предгорий Терского и Гудермесского поднятий, значения водопроводимости плиоценовых отложений составляют 100–200 м^2/сут, увеличиваясь к центральной части до 1000 м^2/сут. Водоносный горизонт понтических отложений вскрыт мелкими структурными скважинами. Водовмещающими породами являются песчаники, пески, алевролиты, иногда конгломераты, трещиноватые известняки, заключенные в толще глин. На южном крыле Сунженской антиклинали получена самоизливающаяся вода с дебитом 600–900 м^3/сут и температурой 40 °С. Это слабоминерализованная вода (от 0.8 до 2.7 г/л), в основном гидрокарбонатно-натриевого типа.

Миоцен-олигоценовый структурно-гидрогеологический этаж

Воды мэотических отложений N_1m

Выходы мэотиса отмечаются в виде полосы в предгорной части республики. В пределах сводовых частей Передовых хребтов данные отложения, как правило, размыты. Водовмещающими породами являются песчаники, пески, алевролиты, иногда конгломераты, трещиноватые известняки, заключенные в толще глин. В предгорной и низкогорной частях, в области раскрытого залегания пород, их питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Отдельные родники, приуроченные к описываемому комплексу имеют невысокие дебиты (0.02–0.5 л/с) и пресную до 0.7 г/л воду, уровни подземных вод в имеющихся скважинах устанавливаются на глубинах от 43.7 м ниже поверхности земли до +4.4 м. Дебиты скважин низкие – 0.19–0.21 л/с. По химическому составу воды хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные натриевые, хлоридно-сульфатные кальциево-магниево-натриевые. На Передовых хребтах отдельные скважины из мэотических отложений вскрыли мощные водоносные горизонты с дебитом от 1000 до 2000 м^3/сут и температурой воды от 13 до 40 °С (на юго-восточном погружении Сунженского хребта).

Воды сарматских отложений N_1s

Выходы сарматских отложений прослеживаются в области предгорий Большого Кавказа и в районе Передовых хребтов. Они протягиваются узкой

полосой с востока на запад через всю территорию республики. Водоносными породами являются прослои песчаников и известняков, залегающих среди глин. Общая мощность водовмещающих пород до 120 м. Средний и нижний сармат представлен в основном глинистой толщей и считается региональным водоупором.

В сарматских отложениях подземные воды различных типов распространяются в соответствии с условиями их залегания. К раскрытой зоне приурочены пресные воды сульфатного натриевого типа. Дебиты не превышают 5 $м^3$/сут, в исключительных случаях – 20 $м^3$/сут. Здесь минерализация вод составляет 1.0–2.5 мг-экв/л, в зонах глубокого погружения минерализация достигает 182.2–219.9 мг-экв/л. Отличительной особенностью сарматских вод здесь является полное отсутствие сульфатов. Воды напорные, максимальные зафиксированные значения пьезометрического уровня установлены в районе Червленской нефтеносной площади – 40 м выше поверхности земли. Движение вод происходит в северо-восточном и восточном направлениях.

Воды караган-чокракских отложений N_1*čk-kg*

Водоносный комплекс караган-чокракских отложений широко развит в пределах района. Область питания проходит по Черным горам, в которых отложения выходят на поверхность на абсолютных отметках от +725 до +870 м. В северо-восточном направлении от данных выходов среднемиоценовые отложения погружаются под глинистые породы нижнего сармата, и подземные воды приобретают напорный характер с пьезометрическим уровнем выше поверхности земли. Зона частичной разгрузки и питания относится к выходам отложений в районе Передовых хребтов: Сунженском, Гудермесском, Брагунском и Терском. К ним относятся минеральные источники Ачалуков, Серноводска, Брагунов, Исти-Су и другие. Дебиты родников не более 0.1–0.2 л/с, зависят от количества атмосферных осадков [Тимохин, Алибекова, 2009ф]. Общая толщина комплекса достигает 630–1000 м, причем толщина караганских отложений – 350–400 м.

Основным источником питания среднемиоценовых караган-чокракских отложений являются атмосферные осадки, а в предгорьях, возможно, вода

поступает из аллювия рек. Тектонические нарушения в области Передовых хребтов являются путями разгрузки нижних пластов среднемиоценового горизонта, которые не имеют выходов на поверхность, а также взаимосвязи различных водоносных горизонтов. Скрытая разгрузка происходит в Каспийское море и распространена в виде фильтрации воды через слабопроницаемые пласты. По оценкам разгрузка вод отложений сармата и среднемиоценового водоносного комплекса в Каспийское море составляет 0.35 км^3/год [Zekster et al., 2007]. Искусственная разгрузка обусловлена эксплуатацией нефти и газа и попутным извлечением из недр пластовых вод. После инфильтрации в зоне питания воды движутся в северном, северо-восточном направлении [Гонсировский, 1966ф].

Пьезометрические уровни в среднемиоценовых водоносных горизонтах от зоны питания падают в северном, северо-восточном направлениях. В целом на территории ВПАБ среднемиоценовые караган-чокракские водоносные горизонты изучены относительно слабо, что не позволило построить погоризонтные карты по результатам широкомасштабных работ 2009 г. «Создание гидрогеологической карты Восточно-Предкавказского артезианского бассейна масштаба 1:500 000 с оценкой современного состояния подземных вод и защищенности источников водоснабжения» [Тимохин, Алибекова, 2009ф]. Информацию о движении подземных вод в караган-чокракских отложениях дают обобщенные карты пьезоизогипс составленные Н.С. Погорельским в 1968 г. [Гидрогеология СССР, 1968] и отдельно для чокракского и караганского горизонтов Д.Г. Гонсировским в 1966 г. (рисунок 2.9).

В то же время по данным исследователей основные эксплуатационные пласты представляют собой отделенные непроницаемыми прослоями глин горизонты подземных вод [Крылов, 1984ф] и исследования в этом направлении необходимо продолжить.

Всего в пределах региона в разрезе среднемиоценовых отложений выделяется 23 водоносных песчаных пласта, из которых 10 горизонтов – в чокракских отложениях, а 13 – в караганских. Значительная мощность и высокие коллекторские свойства основных песчаных пластов разреза юго-восточной части

области (IV-VII, XIII, XVI, XXII), образующих самостоятельные бассейны высоконапорных вод, предопределяют высокую производительность этих горизонтов и низкую минерализацию вод.



Рисунок 2.9. Схематическая карта пьезоизогипс караганского комплекса юго-востока Восточно-Предкавказского артезианского бассейна по Д.Г. Гонсировскому с изменениями [1966ф]

Температура подземных вод варьирует от 60 до 110 °С. Артезианские дебиты скважин составляют от 285 до 3300 м^3/сут при избыточных устьевых давлениях от 0.3 до 1.5 МПа. Напорные воды зон погружения караган-чокракского комплекса, как правило, гидрокарбонатные и хлоридные натриевые, с минерализацией от 0.6 до 30 г/л. Наиболее минерализованные воды относятся к нижней части комплекса – чокракской свите, которая не имеет разгрузки в зонах тектонических нарушений. Максимальные водопритоки из среднемиоценовых караган-чокракских отложений получены на участках и месторождениях термальных подземных вод юго-восточной части ВПАБ. На данной территории продуктивные горизонты характеризуются глубоким залеганием и высокими напорами подземных вод. В основном дебиты скважин составляют от 7.6 до 25 л/с [Тимохин, Алибекова, 2009ф].

По генезису подземные воды среднемиоценовых отложений относятся к

инфильтрационному типу с подчиненным значением седиментационных вод. В предгорной полосе и юго-западных бортах ВПАБ преобладают пресные слабоминерализованные подземные воды преимущественно инфильтрационного происхождения. С погружением продуктивных горизонтов в северном направлении минерализация вод возрастает, и химический состав изменяется в сторону преобладания хлоридов натрия. Согласно изотопно-геохимическим исследованиям миоценового комплекса ВПАБ в пределах Дагестана среднее содержание $\delta D = -(85.1 \pm 2.4)‰$ и $\delta O^{18} = -(5.73 \pm 0.95)‰$ [Магомедов и др., 2001].

Фациально-литологические и физические особенности пластов обусловили различную скорость естественного движения подземных вод в направлении от области питания к области разгрузки. Это оказало решающее влияние на закономерности изменения в пределах региона динамики и химического состава подземных вод. В некоторых случаях в верхней части разреза залегают сильно минерализованные воды, которые сменяются с глубиной водами низкой минерализации, а в нижней части разреза снова встречаются высокоминерализованные воды (Старогрозненской, Избербашский и другие районы). Минерализация вод ВПАБ большей частью зависит от фильтрационных параметров водоносных горизонтов, а не от положения воды в стратиграфическом разрезе. При высокой проницаемости продуктивных пластов скорость движения вод от области питания до области разгрузки большая и, как следствие, минерализация вод ниже. В противном случае минерализация вод высокая, так как циркуляция вод или замедлена или вовсе отсутствует и соли и реликтовые воды вымываются медленно [Дюнин, Корзун, 2005]. Данная особенность четко выражена в водоносных пластах караган-чокрака.

Общее уменьшение толщины и выклинивание песчаных пластов происходит в направлении с востока на запад и с юга на север, причем, с уменьшением общей толщины в тех же направлениях уменьшается и песчанистость отложений. Фациально-литологические и физические свойства пластов в соответствии с закономерностями их изменения обусловили в различных зонах и различную скорость естественного движения подземных вод в

направлении от области питания к области разгрузки. Это оказало решающее влияние на закономерности изменения в пределах региона динамики и химического состава подземных вод [Вассоевич, 1959].

По условиям питания, транзита, разгрузки, фациально-литологическим и структурно-тектоническим особенностям в караганских отложениях в пределах юго-восточной части ВПАБ выделяются пять гидрохимических зон [Николаев, 1960] (рисунок 2.10).

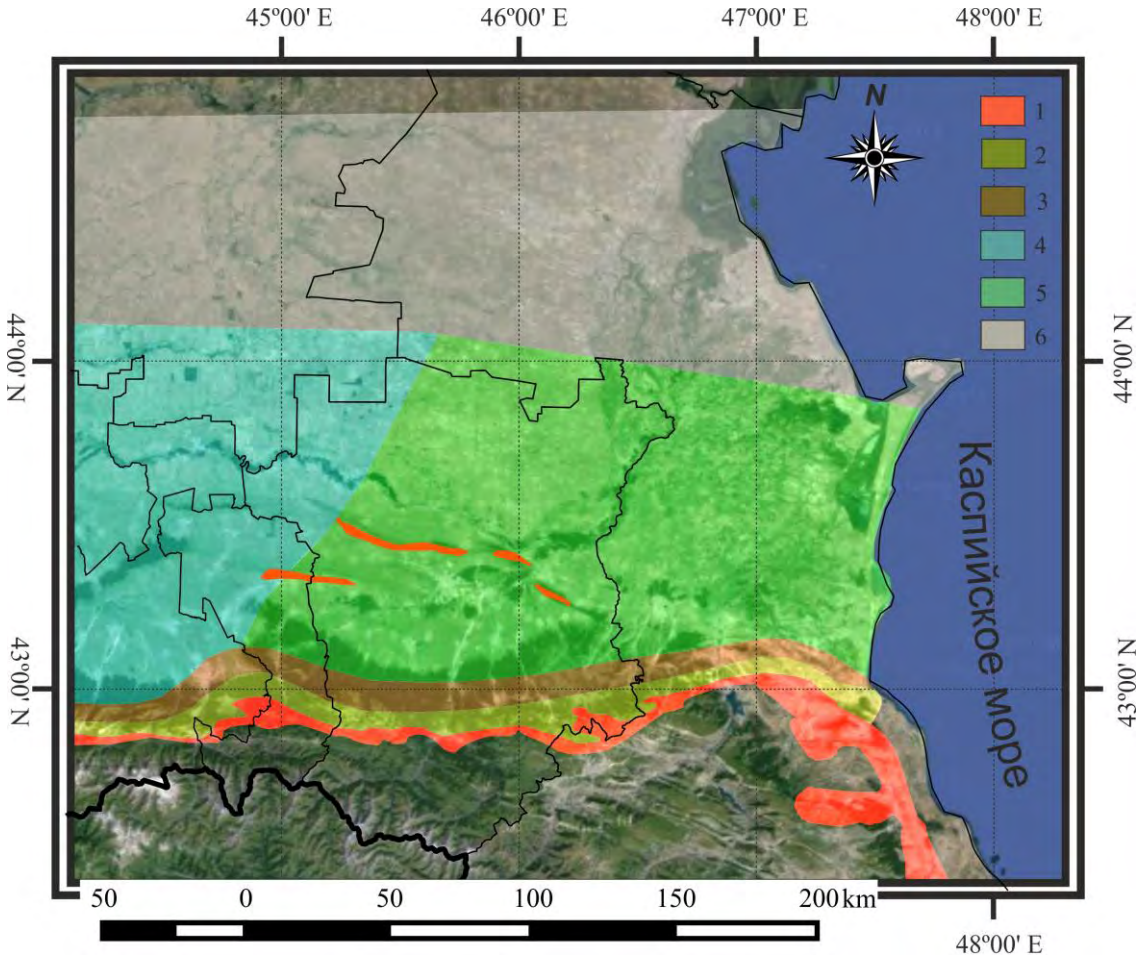


Рисунок 2.10. Схематическая карта гидрогеохимической зональности подземных вод караганского горизонта юго-восточной части ВПАБ [Николаев, 1960]

Условные обозначения: 1 – Выходы караганских отложений на поверхность 2 – Первая южная зона (HCO_3), 3 – Вторая южная зона ($Na+Ca)/(HCO_3+SO_4$), 4 – Западная зона $Na/(HCO_3+SO_4$), 5 – Восточная зона Na/(HCO3+Cl), 6 – Северная зона (Na/Cl).

Граница первой южной зоны проводится условно и простирается узкой полосой вдоль выходов караганских отложений в Черных горах. Названная территория является областью инфильтрации вод поверхностного стока. По

составу воды относятся к гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-сульфатным кальциево-магниевым с минерализацией 0.2–0.5 г/л. Пьезометрические уровни составляют 600–650 м. Здесь также находится множество пресных холодных источников с незначительными (0.1–0.5 л/с) дебитами, которые зависят от количества выпадающих осадков.

Вторая южная зона простирается узкой полосой севернее первой. По составу воды относятся к сульфатно-гидрокарбонатным кальциево-магниевым, сульфатно-гидрокарбонатным кальциево-натриевым, с минерализацией до 0.5–1.0 г/л. Пьезометрические уровни падают с юга на север от 600 до 400 м.

На территории третьей восточной зоны распространены различные типы маломинерализованных сульфатно-гидрокарбонатных натриевых и гидрокарбонатно-сульфатных натриевых вод. Минерализация составляет 0.6–1.8 г/л. С востока зона ограничена Каспийским морем.

Четвертая западная зона расположена западнее третьей зоны. В караганских отложениях западной зоны наибольшее распространение имеют хлор-гидрокарбонатно-натриевые воды [Николаев, 1960]. Минерализация вод варьирует от 8 до 18 г/л. Сульфатные воды различных типов встречаются, главным образом, на погруженных частях основных структур. Воды караганских отложений западной зоны имеют более высокую минерализацию, чем восточной.

Пятая северная зона занимает Затеречную равнину. Характеризуется преобладанием хлоридных натриевых вод с минерализацией 10–45 г/л. Присутствие хлора – типичного компонента морского происхождения, в водах исследуемого бассейна связано с морскими осадками и седиментационными водами.

Подземные воды чокракских отложений по условиям залегания, литологическому составу, расположению области питания, транзита и разгрузки и другим характеристикам сходны с водами караганских отложений. По чокракским отложениям, как и по караганским, выделяются пять аналогичных гидрохимических зон [Николаев, 1960], в каждой из которых существуют общие закономерности изменения состава, минерализации и динамики вод в

направлении с юга на север.

В целом гидрохимические зоны в чокракских отложениях соответствуют аналогичным зонам в караганских и различия заключаются в том, что первые более минерализованы, так как увеличивается глубина залегания водоносных горизонтов.

Все 14 разведанных месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики относятся к миоценовому гидротермическому этажу (рисунок 2.11).

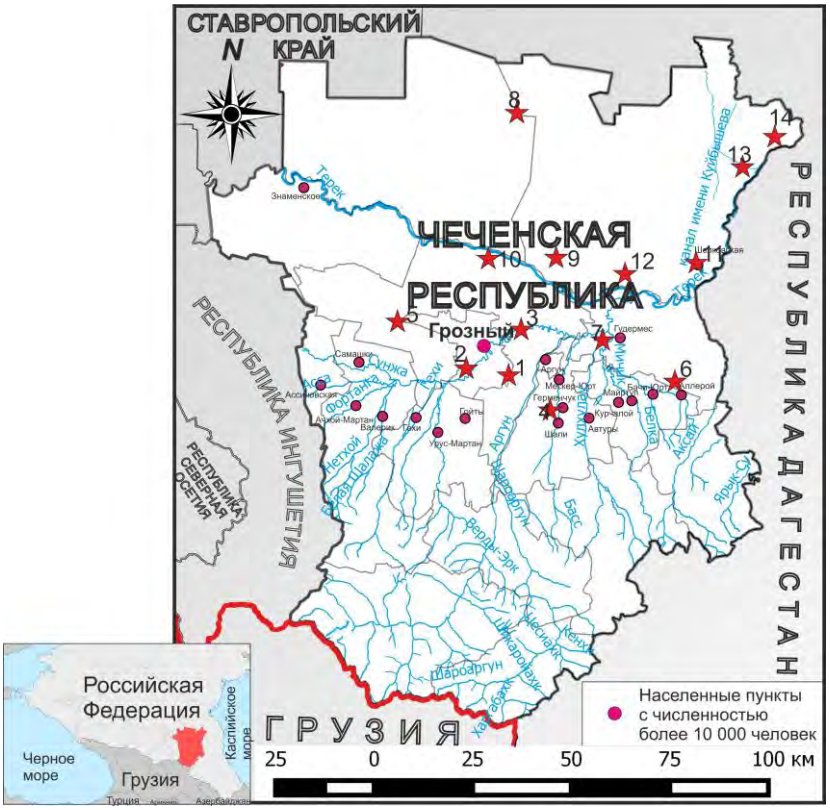


Рисунок 2.11. Карта месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики

Условные обозначения: 1 – Ханкальское, 2 – Гойтинское, 3 – Петропавловское, 4 – Герменчукское, 5 – Гунюшки, 6 – Новогрозненское, 7 – Гудермесское, 8 – Центрально-Бурунное, 9 – Червленное, 10 – Комсомольское, 11 – Шелковское, 12 – Новощедринское, 13 – Каргалинское, 14 – Дубовское.

Отложения караган-чокракского комплекса в синклинальном прогибе между Черногорской моноклиналью и Сунженским хребтом, в прогибе между Сунженским и Терским хребтами, в пределах Сунженской впадины и к северу от Терского хребта отложения залегают на глубинах до 3 км. При движении вод чокракского и караганского горизонтов с юга на север на больших глубинах они прогреваются до высоких температур (100 и более °С) и поднимаются на

поверхность в виде термальных минеральных источников. Данная особенность определила приуроченность и территориальное расположение месторождений термальных подземных вод в караган-чокракских отложениях. При этом влияние горячих вод наиболее высоко сказывается на геотермических условиях основных продуктивных пластов, обладающих ярко выраженным водонапорным режимом (IV-VII, XIII, XVI, XXII), а также на условиях выше и ниже залегающих пластов. Характерной особенностью термальных подземных вод также является их невысокая минерализация: в основном от 0.7–2.0 г/л.

Для уточнения потенциала тепловых ресурсов термальных подземных вод среднемиоценового комплекса Чеченской Республики произведен расчет суммарно возможной выработки тепла по формуле [Ресурсы …, 1975], адаптированной для установки циркуляционных систем теплоотбора (таблица 2.1):

$$G = 10^{-3} \cdot Q \cdot \eta \cdot C \cdot (T_{добычи} - T_{закачки}),$$

где G – тепловые ресурсы, ГДж/сут; Q – дебит, м^3/сут; $T_{добычи}$ – температура извлекаемой воды из скважины, ºС; $T_{закачки}$ – температура закачиваемой воды в пласт, 45 ºС; С – удельная теплоемкость воды (4.186 кДж/кг·ºС); η – коэффициент полезного действия пластинчатого теплообменника 0.9.

Таблица 2.1. Оценка тепловых ресурсов месторождений термальных подземных вод Чеченской Республики

Месторождение	Средняя температура на устье скважины, °С	$T_{добычи} - T_{закачки}$, °С	Эксплуатационные запасы, тыс. м^3/сут	КПД теплообменника	Выработка тепла, ГДж/сут	Суммарное количество тепла, ГДж/сут
Ханкальское	81.5	36.5	15.6	0.9	2145	7347
Червленое	76	31	5.2		607	
Каргалинское	96.5	51.5	5.0		970	
Новогрозненское	77	32	3.41		411	
Остальные	**87.5**	**42.5**	**20**		**3213**	

По результатам оценки вероятная суммарная выработка тепла по месторождениям термальных подземных вод составляет 7.4 тыс. ГДж/сут, что

подтверждает высокий ресурсный потенциал среднемиоценового караган-чокракского комплекса на территории Чеченской Республики.

Воды майкопских отложений N_1mk

Слабая водопроницаемость глин майкопских отложений исключает возможность скопления в них в больших количествах подземных вод. Дебит обычно не превышает 0.5–10 м^3/сут. Наибольшие дебиты, равные 200–300 м^3/сут, получены при опробовании песчаных разностей майкопа. В зоне выхода на поверхность майкопских отложений минерализация их вод не превышает 1.7–6.6 мг-экв/л. Майкопские воды, как правило, являются газосодержащими. Движение вод майкопских отложений происходит очень медленно, вследствие слабой водопроницаемости. Отдельные родники, приуроченные к майкопским отложениям в области выходов в южной части республики, имеют низкие дебиты, содержат как пресные, так и минерализованные воды, не имеющие практического значения. Водоупорные отложения майкопской серии представлены, в основном, глинами. Общая мощность водоупорной толщи от 70 до 1400 м.

Мезозойский структурно-гидрогеологический этаж

В мезозойском этаже в пределах Чеченской Республики, не выявлено площадей объектов, содержащих термальные воды в промышленных количествах.

Воды меловых отложений К

Водоносность отложений верхнего мела связана с трещинами отдельности, напластования, выветривания и тектоническими нарушениями, развитыми в толще известняков с прослоями мергелей, доломитов, реже – песчаников. Водоупорами служат монолитные карбонатные породы, а также прослои глин и аргиллитов. В горной части территории, где отложения верхнего мела развиты на поверхности, наблюдаются родники, дебиты которых в среднем равны 0.1–0.2 л/с. Воды эти хлоридно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриевые и сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Минерализация 0.1–0.3 г/л. С погружением пород в северном направлении подземные воды приобретают напорный характер. Область питания

верхнемелового водоносного комплекса совпадает с площадью выходов их отложений на поверхность. Движение вод происходит в северо-восточном направлении.

Воды юрских отложений J

Наиболее водообильными в водоносном комплексе верхнеюрских пород являются известняки трещиноватые, местами закарстованные, а также доломиты титонского яруса, мощность которых составляет 40–60 м. Воды преимущественно трещинные, трещиновато-карстовые, реже пластовые и пластово-трещинные. В зоне неглубокого залегания (зона активной циркуляции) подземные воды относятся к грунтовым. На участках погружения воды верхнеюрского комплекса не изучены. Наиболее водообильные родники отмечаются вдоль линии крупных тектонических нарушений. Дебиты одиночных родников изменяются от 0.01 до 20 л/с. Воды, в основном, сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые и хлоридно-сульфатные магниево-кальциевые с минерализацией от 0.7 до 3.5 г/л. Движение вод происходит в северо-восточном направлении.

Отложения нижней и средней юры представлены мощной толщей практически безводных глинистых сланцев с незначительными прослоями (0.2–2.5 м) трещиноватых песчаников и алевролитов. Подземные воды приурочены к зоне выветривания этих отложений и зонам тектонических нарушений. Водоносность отложений нижней и средней юры незначительна, что объясняется слабой водопроницаемостью глинистых сланцев. Дебиты отдельных родников изменяются от 0.01 до 3.5 л/с, преобладают 0.3–0.8 л/с. В зоне активной циркуляции эти воды пресные с минерализацией 0.2–0.5 г/л, гидрокарбонатные кальциевые, реже сульфатно-гидрокарбонатные натриевые. Движение вод отложений нижней и средней юры происходит в северо-восточном направлении, согласно падению пород.

Таким образом, благоприятные фильтрационные параметры караган-чокракских отложений, повышенные значения теплового потока территории, особенности литологии пород, структурно-тектонический фактор и движение подземных вод обусловили содержание значительных количеств подземных вод

высоких температур именно в среднемиоценовом структурно-гидрогеологическом этаже изучаемой области. Литологические особенности территории – снижение мощности продуктивных пластов караган-чокракских отложений и увеличение глинистости в направлении с севера на юг и с востока на запад [Вассоевич, 1959], определили наиболее благоприятные гидрогеологические условия (большая производительность горизонтов, низкая минерализация вод) юго-восточной части области. По этой причине в качестве первоочередного для разработки после длительного перерыва в использовании термальных вод региона выбрано расположенное на юго-востоке крупнейшее месторождение термальных подземных вод Чеченской Республики – Ханкальское.

2.5.2. Ханкальское месторождение термальных подземных вод

Ханкальское месторождение термальных подземных вод представляет собой месторождение многопластового типа с ярко выраженным водонапорным режимом. Площадь его оценивается в 7.3 км^2 согласно лицензированию участка недр (протокол Федерального агентства по недропользованию № 459 от 03.09.2015) (рисунок 2.12). Разведочно-эксплуатационные скважины находятся на балансе государственного унитарного предприятия «Геотермальные воды» [Тимохин, Алибекова, 2009].

Месторождение открыто в ходе разведочного бурения при разработке Октябрьского нефтяного месторождения и приурочено к юго-восточному погружению одноименной антиклинальной складки. Постановка разведочных работ на термальные воды в Ханкальской долине была определена благоприятными гидрогеотермическими условиями участка и близостью его к потребителю.

Абсолютные отметки поверхности земли составляют от +170 до +180 м, территория месторождения представляет собой древнюю долину р. Аргун. С северо-запада участок месторождения ограничен возвышенностью Сюир-Корт (наивысшая точка +396 м), с юго-востока возвышенностью Сюиль-Корт

(наивысшая точка +435 м). С северо-востока и юго-востока границами являются два взброса формирующие дислокацию типа горст, севернее и южнее которых продуктивные пласты погружаются на большие глубины, что делает экономически нецелесообразным их разработку.

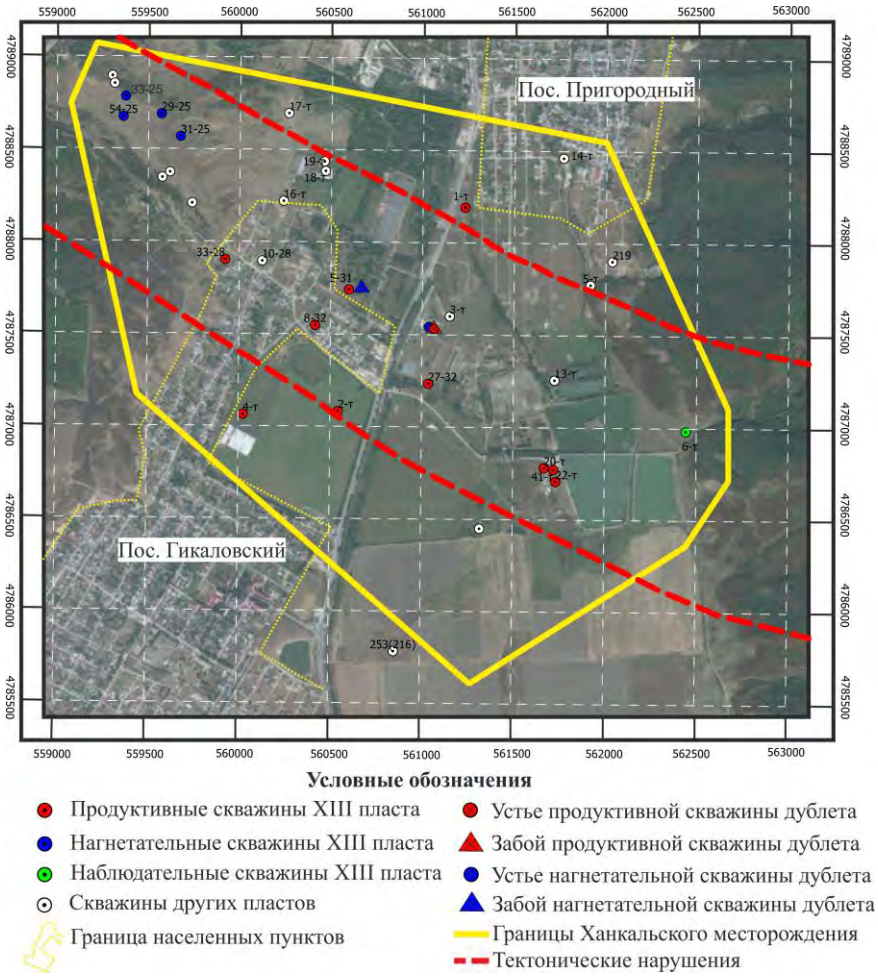


Рисунок 2.12. Территория Ханкальского месторождения термальных подземных вод

Естественные ресурсы месторождений термальных вод Чеченской Республики при фонтанном способе разработки далеко не могут обеспечить больших потребностей в тепловой энергии, что показал опыт эксплуатации в 1970-е гг. Принудительные способы водозабора (глубиннонасосный, эрлифтный и др.) чреваты своими последствиями, основным из которых является снижение пьезометрических уровней в целом по юго-восточной части караган-чокракского комплекса ВПАБ. Впоследствии это может привести к прекращению излива естественных источников, на базе которых функционируют курорты, заводы по

розливу столовых и минеральных вод. Одним из решений является создание геотермальных циркуляционных систем (ГЦС), которые позволяют добиться сразу нескольких целей [Крылов, 1984ф]:

1. Создание крупных, в десятки тысяч м^3/сутки, термоводозаборов.

2. Использование вод любого качества (потребительский и продуктивно-нагнетательный контур разведены).

3. Решение вопросов охраны окружающей среды – нет необходимости поиска путей утилизации отработанных термальных вод, а также защита недр от истощения, т.к. отработанные воды возвращаются в разрабатываемые горизонты.

4. Уменьшение территории распространения воронки депрессии.

По вышеперечисленным причинам на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод была решена установка дублетной геотермальной циркуляционной системы (ГЦС) (рисунок 2.13), представляющая собой замкнутый контур одной продуктивной и одной нагнетательной скважин с обратной закачкой всей использованной термальной воды в продуктивный пласт.

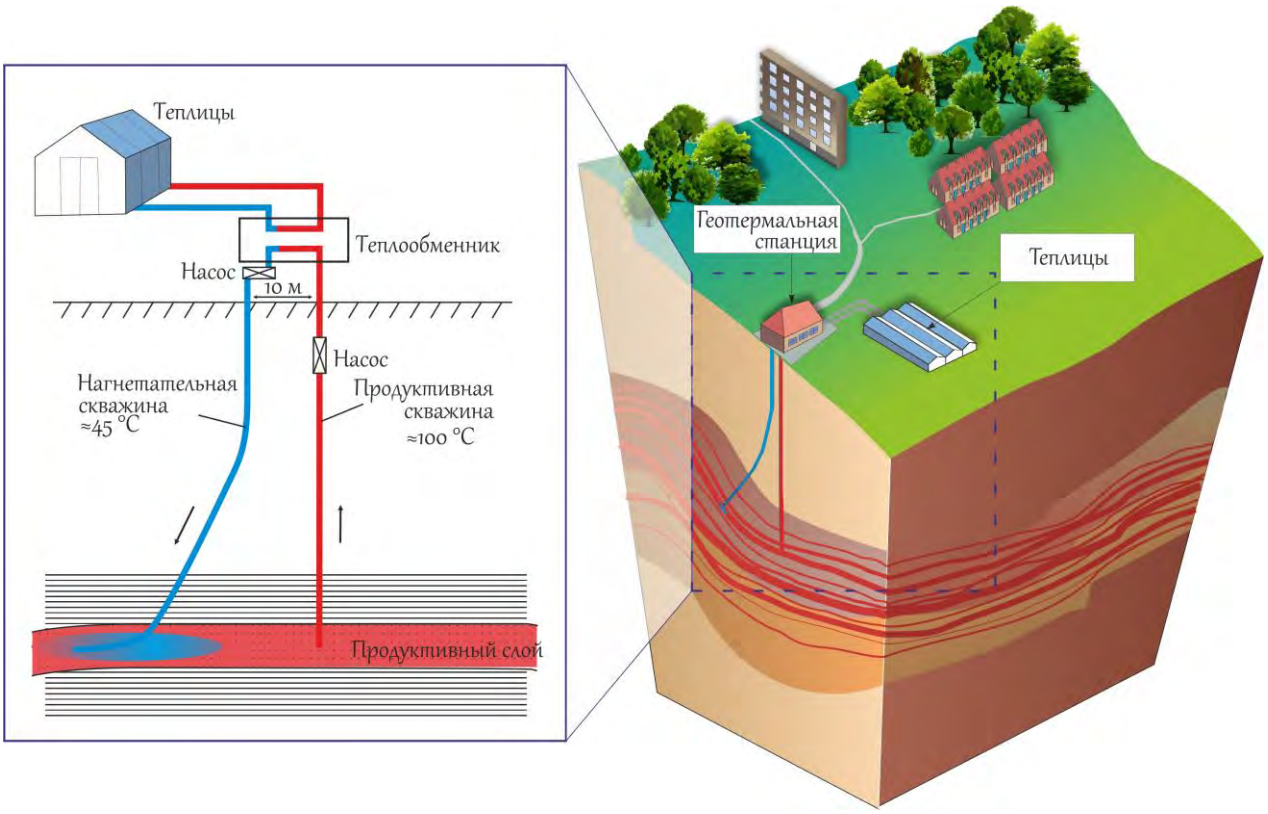


Рисунок 2.13. Схематический рисунок геотермальной циркуляционной системы («дублета») Ханкальского месторождения термальных подземных вод

В пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод выделяются 22 продуктивных пласта в караган-чокракских отложениях, многие из которых представляют собой отдельные напорные горизонты, сложенные песчаниками и разделенные непроницаемыми прослоями глин [Шпак, 1968ф] (рисунок 2.14, 2.15).

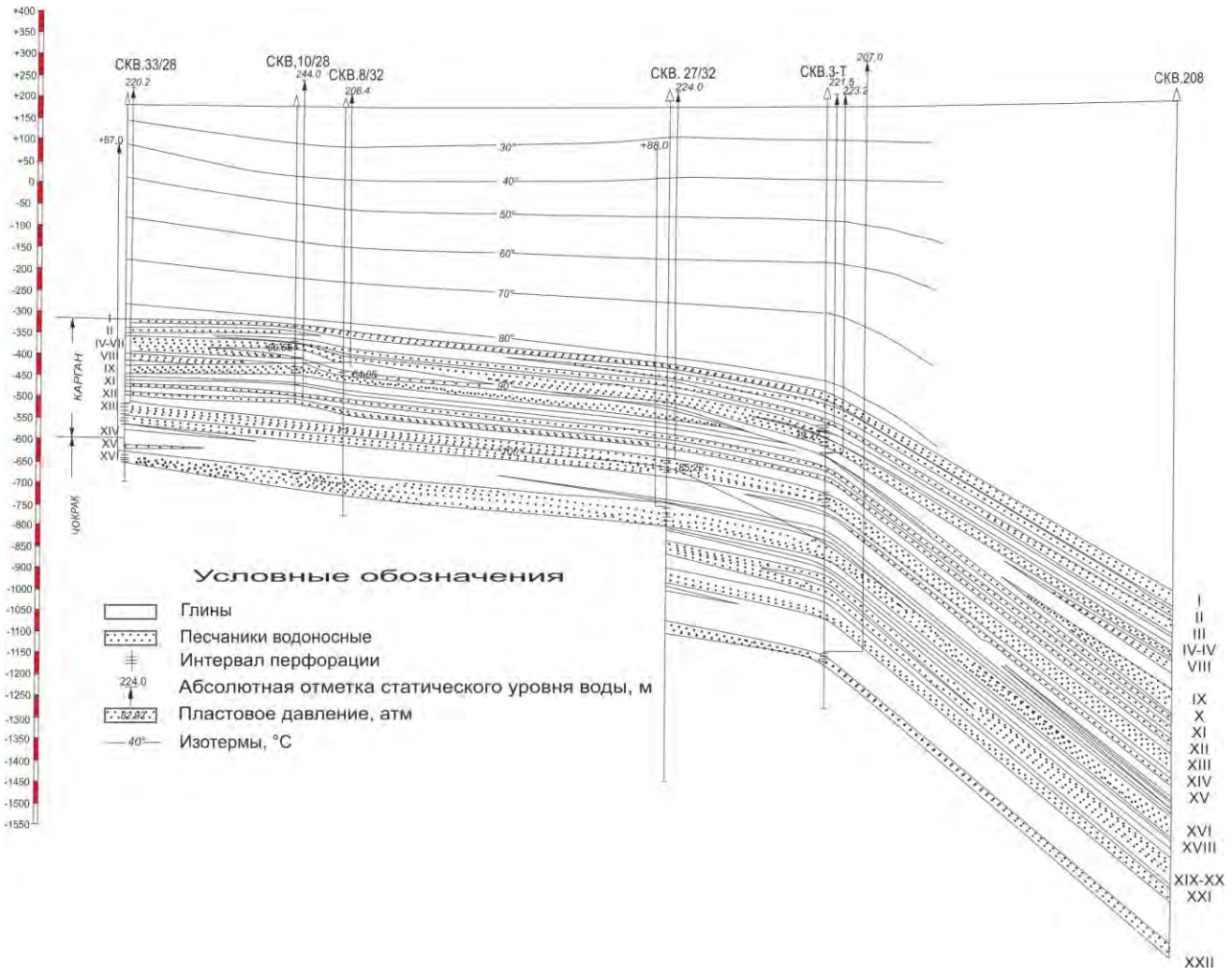


Рисунок 2.14. Схематический гидрогеологический разрез Ханкальского месторождения термальных подземных вод (скважины 33/28 – 208) [Шпак, 1968ф]

Пласты XXII–XV Ханкальского месторождения термальных подземных вод относятся к чокракскому горизонту, XIV–I – караганскому. Ввиду структурной особенности месторождения глубина продуктивных пластов на исследуемой области варьирует в широких пределах (таблица 2.2).

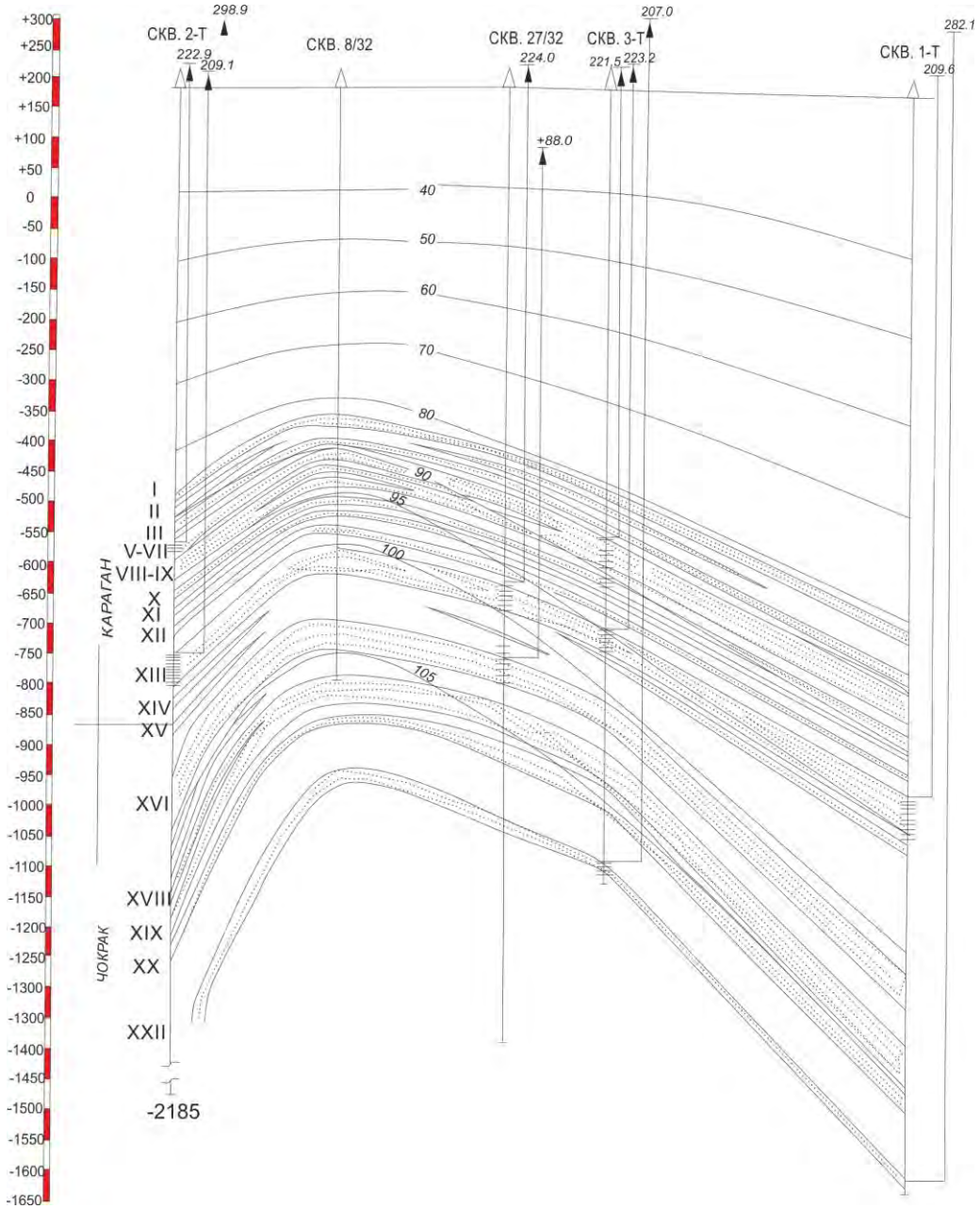


Рисунок 2.15. Схематический гидрогеологический разрез Ханкальского месторождения термальных подземных вод (скважины 2-Т – 1-Т) [Шпак, 1968ф]

Условные обозначения: см. рисунок 2.14.

Фациально-литологические особенности песчаных пластов в разрезе этих отложений (мощность и выдержанность песчаных пластов, их состав и проницаемость) полностью предопределяют изменение минерализации и химического состава вод. Вертикальная гидрохимическая зональность определяется фильтрационными параметрами продуктивных пластов – чем они выше, тем большее влияние оказывают воды инфильтрационного типа и соответственно меньше минерализация, что отмечается в целом для месторождений Восточно-Предкавказского артезианского бассейна [Дюнин,

Корзун, 2005].

Таблица 2.2. Характеристика продуктивных пластов Ханкальского месторождения термальных подземных вод по В.Б. Крылову с изменениями [1988ф]

Пласт	Мощность, м	Пористость, %	Проницаемость, Дарси	Средняя гипсометрическая отметка пласта	Средняя минерализация, г/л
I	7.5	26.7	0.77	-422.5	3.3
II	6.4	25.4	-	-440	3
III	7.7	22.3	-	-458.4	-
IV-VII	24.0	24.8	1.01	-489	2.1
VIII	10.8	16.79	-	-518.5	-
IX	-	-	-	-531	-
X	4.6	18.4	0.4	-556.6	-
XI	18.8	23.4	0.7	-588.7	-
XII	8.5	20.4	-	-600	2.5
XIII	47	24.13	1.43	-665	1.3
XIV	6.0	16.13	-	-700	-
XV	5.5	-	-	-729	-
XVI	50	20.1	1	-745	1.4
XVII	5.4	23.8	1.46	-820	-
XVIII	11.3	14.6	-	-865	-
XIX	6.2	17.4	1.47	-885	-
XX	16.3	18.34	2.26	-925	2.1
XXI	5.3	16.3	1.96	-945	3.3
XXII	28.5	16.5	2.07	-955	1.3

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 (таблица 2.3). Наряду с гидрогеологическими характеристиками выбор XIII пласта обусловлен наличием сравнительно большого количества данных, позволивших включить его в 3D геологическую модель Ханкальского месторождения [Черкасов и др., 2014], а также положительным опытом обратной

закачки вод в пласт.

XIII пласт караганского горизонта является одним из самых продуктивных на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод с довольно выдержанной по площади мощностью. Фильтрационные параметры XIII и других продуктивных пластов изучались в 1968, 1987 годах.

Таблица 2.3. Основные сравнительные характеристики наиболее перспективных водоносных пластов Ханкальского месторождения

№ пласта	Мощность, м	Дебит скважин, $м^3$/сут	Температура на устье, °С	Минерализация, г/л	Средний коэффициент водопроводимости, $м^2$/сут	Средний коэффициент пьезопроводности, 10^5 $м^2$/сут	Примечание
IV-VII	43	1000–2500	89–95.5	1.2–2.9	87.4	4.3	Сливаются вместе образуя единую пачку. Имеются глинистые прослои.
XIII	47	750–2400	95.2–102	0.87–1.7	90	3.8	
XVI	40–60	–	100	0.8–2	135	н/д	Уровни были снижены в результате разработки на Октябрьском месторождении

В процессе работ в 1968 г. XIII пласт был опробован в скважинах 1-Т, 2-Т, 33/28 и 27/32. Подробно результаты, методы их обработки (поправки на несовершенство скважин, термлифт и т.д.) отражены в «Отчете по подсчету эксплуатационных запасов вод месторождения Ханкальская долина ЧИАССР» [Шпак, 1968ф]. Всего в ходе расчетов фильтрационных параметров XIII пласта проведено 8 одиночных опытных откачек (продолжительность 3-6 суток) при различных режимах (диаметр штуцера 10, 20, 40, 63 мм) и 2 групповых опытно-эксплуатационных выпуска (продолжительность 2-3 месяца). Результаты обрабатывались методами установившихся отборов, восстановления давления, гидропрослушивания (таблица 2.4).

Таблица 2.4. Результаты исследования фильтрационных параметров XIII продуктивного горизонта.

Номер скважины	1-Т			2-Т			33/28			27/32		
Параметры	Km, $м^2$/сут	K, м/сут	a, $м^2$/сут	Km, $м^2$/сут	K, м/сут	a, $м^2$/сут	Km, $м^2$/сут	K, м/сут	a, $м^2$/сут	Km, $м^2$/сут	K, м/сут	a, $м^2$/сут
Одиночные опытные выпуски												
I режим	135.04	2.11								62.16	1.48	
II режим	142.08	2.22	–	–	–	–	96.5	1 .93	–	71.4	1.70	–
III режим	147.2	2.30	–	–	–	–	–	–	–	69.3	1.65	–
IV режим	–	–	–	–	–	–	–	–	–	60.9	1.45	–
Среднее	141.44	2.21		–	–	–	96.5	1.93	–	65.94	1 .57	–
Восстановление давления												
I	79.31	1.24	$2.68 \cdot 10^5$	78.54	1.51	$3.2 \cdot 10^5$	113.2	2.14	$4.75 \cdot 10^5$	82.94	1.97	$4.23 \cdot 10^5$
II	90.98	1.42	$3.02 \cdot 10^5$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Гидропрослушивание												
	79.32 (1/28)	–	–	–	–	–	79.5 (1/28)	–	–	71.4 (1/28)	–	–
	121.90 (27/32)	–	–	–	–	–	114.05 (1/28)	–	–	68.46 (1/28)	–	–
Групповой опытно-эксплу-атационный выпуск	72.4	–	–	–	–	–	–	–	–	61.1	–	–

Данные по фильтрационным параметрам пласта в скважине 6-Т получены по результатам анализа режимных наблюдений на геотермальных скважинах за период 1980–1986 годов, водопроводимость для данной скважины равна 87.74 $м^2$/сут [Крылов, 1987ф]. В пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод параметры XIII пласта изменяются в небольших пределах, по этой причине при аналитических расчетах, а также компьютерном моделировании (Глава 4) приняты усредненные параметры по всем измерениям – мощность равная 47 м, водопроводимость 90 $м^2$/сут и пьезопроводность – $3.8 \cdot 10^5$ $м^2$/сут. Расчеты фильтрационных параметров XIII пласта проводились также для Октябрьского нефтяного месторождения на основе анализов данных разработки за период 1916–1956 гг. Водопроводимость в общем для территории составила 61.7 $м^2$/сут [Шпак, 1969ф]. Данное значение вполне соответствуют полученным в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод, так как в

направлении с юга на север и с востока на запад происходит уменьшение мощности и песчанистости караган-чокракских отложений и XIII пласта в частности.

Влияние двух разломов на разработку Ханкальского месторождения термальных подземных вод изучалось путем закачки индикаторов и их прослушивания в скважинах по разные стороны от нарушений. Данные работы проводились в 1981, 1987 и 1988 гг., результаты отражены в соответствующих отчетах [Крылов, 1983ф, 1987ф, 1988ф]. Причем в 1981 г. исследователи пришли к выводу о непроницаемости южного разрывного нарушения, т.к. ни карбамид кальция, ни аммиачная селитра не получены в скважине 4-Т. В процессе последующих испытаний индикаторы появились во всех скважинах, включая расположенные по разные стороны от разломов. По результатам данных исследований сделаны выводы о пониженной проницаемости северного и южного разрывных нарушений.

Для Ханкальского месторождения термальных подземных вод характерна вертикальная температурная зональность, связанная с ростом температур с глубиной и латеральная зональность, вызванная структурно-тектоническим фактором и движением подземных вод, которые прогреваются на больших глубинах и затем поднимаются на поверхность. Подробнее особенности распределения температур рассмотрены и показаны на примере трехмерной модели (Глава 3). Воды XIII пласта относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу, по данным химических анализов 2013 г., минерализация вод составляет 0.87–1.7 г/л [Мачигова и др., 2014] (таблица 2.5).

Таблица 2.5. Химические анализы термальных вод со скважин Ханкальского месторождения [Мачигова и др., 2014]

Скважина	Пласт	Единицы	Катионы			Сумма	Анионы			Сумма	Минерализация	Сухой остаток	Жесткость	pH	t ^{0}C
			Na, K	Ca	Mg		Cl	SO_4	HCO_3						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10/28	IV-VII	мг/л мг-экв %экв	872 37.9 93.9	43.29 2.16 5.3	3.84 0.32 0.8	919.06 40.39 100	574 16.19 40	547 11.4 28.22	780.8 12.8 31.78	1901.8 40.39 100	2909	2519	2.48	7.5	71
1-Т	XIII	мг/л	248.4	17.64	0.96	267	32.2	185	427	664.2	1032	618.5	0.96	7.5	90

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		мг-экв %экв	10.8 91.8	0.88 7.48	0.08 0.72	11.76 100	0.91 7.74	3.85 32.74	7 59.52	11.76 100					
33/28	XIII	мг/л мг-экв %экв	271.17 11.79 84.52	36.87 1.84 13.19	3.84 0.32 2.29	311.88 13.95 100	54.4 1.53 10.97	251 5.23 37.49	438.8 7.19 51.54	744.2 13.95 100	1154	934.6	2.18	8	71
27/32	XIII	мг/л мг-экв %экв	455.63 19.81 91.16	38.48 1.92 8.84	-	494.11 21.73 100	148 4.17 19.19	469 9.77 44.96	475.4 7.79 35.85	1092.4 21.73 100	1684	1446	1.92	8	80
22-Т	XXII	мг/л мг-экв %экв	690.92 30.04 98.3	6.41 0.32 1.05	2.4 0.2 0.65	704 30.56 100	314 8.86 29	160 3.3 10.8	1121.6 18.4 60.2	1596 30.56 100	2390	1829	0.52	8	98
3-Т	IV-VII VIII-IX	мг/л мг-экв %экв	686.55 29.85 97.77	9.62 0.48 1.57	2.4 0.2 0.66	698.57 30.53 100	364 10.27 33.64	41.2 0.86 2.8	1183.4 19.4 63.56	1588.6 30.53 100	2411	1819	0.68	7.5	71
14-Т	IX	мг/л мг-экв %экв	366 15.91 94.3	14.43 0.72 4.27	2.88 0.24 1.43	383.3 16.87 100	61.9 1.75 10.37	284 5.92 35.09	561 9.2 54.54	906.9 16.87 100	1004	724	0.96	8	80
16-Т	XXII	мг/л мг-экв %экв	654.81 28.47 98.2	9.62 0.48 1.65	0.48 0.04 0.15	664.9 28.99 100	326 9.2 31.7	259 5.39 18.6	878.4 14.4 49.7	1463.4 28.99 100	2238	1799	0.52	7.5	70
8/32	IV-VII	мг/л мг-экв %экв	338.33 14.71 91.8	24.05 1.2 7.48	1.44 0.12 0.72	363.82 16.03 100	156 4.4 27.45	164.6 3.43 21.4	500.2 8.2 51.15	820.8 16.03 100	1245	995	1.32	7.5	78
5/31	XIII	мг/л мг-экв %экв	168.82 7.34 79	32.06 1.6 17.2	4.32 0.36 3.8	205.2 9.3 100	32.2 0.91 9.8	115 2.39 25.7	336 6 64.5	483.2 9.3 100	790	622	1.96	7.5	82

Газонасыщенность подземных вод караган-чокраксих отложений Ханкальского месторождения термальных подземных вод низкая и в основном измеряется величинами 12–85 $см^3$ в литре воды [Коцарев, Власова, 1963]. Более высокие содержания растворенных в воде газов устанавливаются для пластов, имеющих затрудненную связь с областью питания и характеризующихся низкой гидродинамической активностью. Состав растворенных газов – азотно-углеродный. Результаты анализа содержания газов в водах XIII продуктивного пласта приведены в таблице 2.6 [Крылов, 1988ф].

Таблица 2.6. Результаты анализов газов вод XIII продуктивного пласта [Крылов, 1988ф]

Номер скважины	41-Т		1-Т		4-Т		27/32		33/28	
Газовый фактор	0.38		0.37		0.05		0.04		0.05	
Содержание компонентов, %	Мол.	Масс.	Мол.	Масс.	Мол.	Масс.	Мол.	Масс.	Мол.	Масс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Метан	13.91	8.07	0.28	10.15	1.46	0.82	0.31	0.16	0.67	0.35
Этан	-	-	-	-	-		0.15	0.14	0.13	0.12
Пропан	0.06	0.09	0.01	0.02	0.04	0.07	0.18	0.25	0.12	0.17
Изобутан	0.03	0.06	-	-	0.02	0.04	0.11	0.20	0.02	0.04
Норм. бутан	0.03	0.07	-	-	0.02	0.04	0.18	0.33	0.08	0.15
Пентан+высшие	-	-	-	-	-	-	0.32	0.72	0.11	0.26
CO_2	7.95	12.68	11.71	17.26	5.02	7.71	21.76	29.94	18.78	26.56
Азот	78.02	78.05	87.0	82.57	93.44	91.32	76.99	68.26	78.13	70.34
Растворенные газы, мг/л:	61.6		140.0		60.2		281.6		57.2	
H_2S	-		-		-		-		-	

Для XIII продуктивного пласта рассчитаны эксплуатационные запасы при различных условиях разработки: для одной скважины и циркуляционной схемы тепоотбора (при равенстве между получаемой и закачиваемой обратно водой), непрерывной эксплуатации и разработке 7 месяцев в год (отопительный период), неограниченного в плане пласта и при непроницаемости разломов (рисунок 2.16, таблица 2.7). Для непрерывной эксплуатации использовалась формула Дюпюи:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r} \tag{2.2}$$

Где S – понижение уровня, м; Q – дебит, м^3/сут; k – коэффициент фильтрации; м/сут; m – мощность пласта, м; R – приведенный радиус равный $1.5\sqrt{at}$; где a – коэффициент пьезопроводности, м^2/сут; t – время, 10 000 сут; r – радиус скважины, м.

Для расчетов запасов при эксплуатации в отопительный сезон (7 месяцев в агод) использовалась формула Тейса:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} W(u), \tag{2.3}$$

где $W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^2}{4} - \frac{u^2}{4} + \ldots \pm \frac{u^n}{n \cdot n!}$; $u = \frac{r^2}{4at}$

Эксплуатационные запасы в случае циркуляционной схемы теплоотбора рассчитывались с учетом полной обратной закачкой получаемой воды в пласт. Вследствие того, что приемистость является одной из главных проблем пластов

представленных песчаниками с линзами и прослоями глин, после проведения тестов нагнетательной скважины следует провести пересчет запасов разработки с помощью циркуляционной схемы отбора тепла.

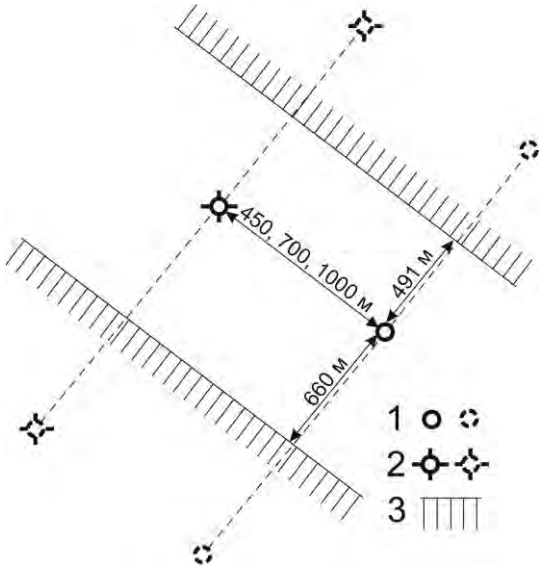


Рисунок 2.16. Расчетная схема для оценки эксплуатационных запасов XIII пласта Ханкальского месторождения.

Условные обозначения: 1 – продуктивная и отраженная скважины; 2 – нагнетательная и отраженная скважины; 3 – тектонические нарушения.

Таблица 2.7. Эксплуатационные запасы XIII продуктивного пласта

	Непрерывная эксплуатация				Эксплуатация в отопительный сезон (7 месяцев)			
	Проницаемые разломы		Непроницаемые разломы		Проницаемые разломы		Непроницаемые разломы	
	S_p*	Q_{max}**	S_p	Q_{max}	S_p	Q_{max}	S_p	Q_{max}
Одна скважина	118	595	192	364	101	691	143	489
«Дублет» с расстоянием								
450 м	73	965	74	949	73	965	74	949
750 м	76	911	80	875	76	911	80	875
1000 м	79	883	84	831	79	883	84	831

S_p – расчетное понижение при дебите 200 м^3/ч, м

**Q_{max} – максимально возможный дебит при допустимом понижении (350 м), м^3/ч*

Стратиграфия, тектоника, геотермические и гидрогеологические особенности обширной части Чеченской Республики предопределили перспективность разработки Ханкальского месторождения термальных подземных вод.

Глава 3. Применение геостатистики в изучении особенностей формирования термальных подземных вод

В настоящее время, когда термальные воды представляют собой достаточно известный вид энергии, многие исследователи ставят на первый план проблему «устойчивости» разработки геотермального резервуара [Ungemach et al., 2005, 2007, 2011; Axelsson, 2010, 2012; Antics et al., 2005]. В целях раскрытия функционирования его системы в условиях взаимодействия между подземными водами и водными ресурсами литосферы, а также особенностей развития ресурса при обратной закачке отработанных термальных вод, используются компьютерные технологии. Наиболее эффективные методы оценки формируются на основании техник ГИС-анализа, геостатистики и компьютерного моделирования, которые стали активно внедряться во все сферы наук. Они позволяют определить пространственную дислокацию резервуара, помогают в выборе оптимального режима эксплуатации.

Следует отметить, что в Российской Федерации нет широкомасштабного применения термальных вод и, как следствие, развития компьютерных технологий в этой области, в отличие от стран, где ГИС-анализ уже давно применяется в ходе освоения данного вида ресурсов.

Принимая во внимание все особенности месторождений Чеченской Республики, при выборе условий эксплуатации возможно достижение устойчивого долгосрочного использования ресурса термальных вод. В целях составления методических рекомендаций по разработке XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных вод использовались геостатистический анализ (Глава 3) и компьютерное моделирование обратной закачки воды (Глава 4).

Геостатистика в настоящее время используется практически во всех областях наук о Земле. При работе с пространственно-распределенными данными ее методы существенно повышают эффективность анализа и интерпретации информации.

Главной целью при геостатическом анализе и последующем моделировании является численное описание природных явлений, распределенных в пространстве или во времени и пространстве. В задачи входит построение вероятностной модели изучаемого явления, а затем оценка и моделирование с применением данной модели [Савельев и др., 2012].

Базовой интерполяционной моделью в геостатистике является кригинг. Впервые его теоретические положения разработаны почти 60 лет назад французским математиком Ж. Матероном [1962] на основе результатов магистерской диссертации южноафриканского горного инженера Д. Крига, в честь которого и назван метод. Д. Криг первым применил интерполятор для анализа месторождений золота Южной Африки [Krige, 1951]. Кригинг – это оптимальная интерполяция на основе минимизации среднеквадратичного отклонения, вид обобщенной линейной регрессии. Основная идея кригинга это предсказание значения функции в выбранной точке путем вычисления средневзвешенного значения по известным значениям функции в окрестности точки. Кригинг определяет вес окружающих измеренных точек, чтобы вычислить искомое значение в неизмеренной ячейке. Точки, которые располагаются ближе к оцениваемой ячейке, имеют большее влияние.

Изучаемое явление рассматривается как бесконечное множество случайных величин или реализаций случайной функции $Z(x)$. Переменная $z(x)$ является реализацией данной функции для определенного места в пространстве, таким образом, ее значение зависит от местоположения точки x. Для любой пары точек x и $x+h$ соответствующие случайные величины $Z(x)$ и $Z(x+h)$ связаны корреляцией. Такая корреляционная зависимость отражает пространственную структуру явления, его статистическую регулярность [Савельев и др., 2012].

В геостатистике, как правило, работа ведется со стационарными данными (либо они приводятся к стационарности), т.е. для любого приращения h, распределение $Z(x_1), Z(x_2), \ldots, Z(x_n)$ соответствует распределению $Z(x_{1+h}), Z(x_{2+h}), \ldots, Z(x_{n+h})$. Стационарность в строгом смысле требует, чтобы все

моменты случайной величины были инвариантны к трансляции. Но обычно такое условие нельзя проверить по ограниченному количеству первоначальных данных. Поэтому в геостатистике пришли к допущению, что постоянство должны сохранять лишь 2 первых момента – среднее и ковариация, что является стационарностью второго порядка [Матерон, 1967; Девис, 1990]. Случайная функция $Z(x)$ обладает стационарностью второго порядка или «слабой» стационарностью [Journel, Huijbregts, 1978], если:

1) Математическое ожидание *m* существует и не зависит от *x*:

$$m(x) = E\{Z(x)\} = const, \forall x \tag{3.1}$$

2) Для каждой пары случайных величин $\{Z(x), Z(x+h)\}$ ковариация существует и зависит только от разности координат h:

$$C(h) = E\{Z(x+h)Z(x)\} - m^2, \forall x \tag{3.2}$$

На практике эти допущения часто не могут удовлетворяться. Матероном разработана так называемая «внутренняя гипотеза» (intrinsic hypothesis). Она допускает, что приращения функции слабо стационарны, т.е. среднее значение и дисперсия (variance) приращений $Z(x) - Z(x+h)$ существуют и не зависят от точки x:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0 \tag{3.3}$$

$$Var[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h) \tag{3.4}$$

Функция $\gamma(h)$ называется вариограммой, которая является основным инструментом в геостатистическом анализе. Вариограмма – вариация разницы значений переменной в двух точках как функция расстояния и направления между ними:

$$\gamma(x, x+h) = 0,5Var[Z(x) - Z(x+h)] = 0,5E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \tag{3.5}$$

Для $N(h)$ экспериментальных точек, разделенных вектором h:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{3.6}$$

Вариограмма характеризует степень различия данных в зависимости от

расстояния между ними, это математический инструмент, используемый для оценки пространственной корреляции геологических данных: «непрерывности» (continuity) или «вариации» (variability). Другими словами, это функция, показывающая изменчивость некоторого параметра в зависимости от расстояния между его значениями, причем при увеличении дистанции, как правило, увеличивается и степень вариации. Вариограмма в стационарных случаях связана с ковариацией следующей формулой:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \tag{3.7}$$

Таким образом, они являются зеркальными отображениями друг друга (рисунок 3.1).

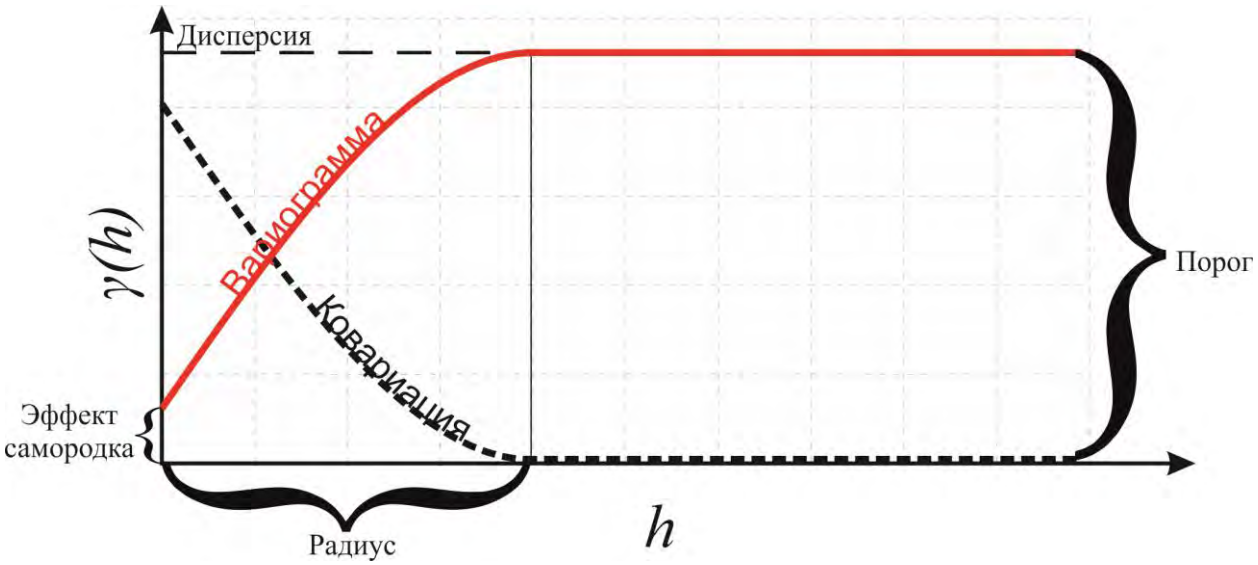


Рисунок 3.1. Вариограмма и ковариация

Элементами вариограммы являются:

1. Эффект самородка (nugget effect) – это случайная составляющая, которая показывает насколько велико различие очень близко расположенных значений. Она зависит от сети опробования месторождения и степени его изменчивости. Название этого параметра пришло к нам из оценки месторождений золота, где часто встречаются непредсказуемые «ураганные» содержания металла в пробах.

2. Порог вариограммы (sill) – это обычно величина дисперсии проб, значение вариации, при котором функция вариограммы выходит на постоянное значение. Когда вариограмма достигает порога, она часто выполаживается.

3. Эффективный радиус корелляции, или зона влияния (range), – это максимальное расстояние, на котором между пробами еще существует взаимосвязь и в пределах которого между точками есть корреляция. Когда расстояние между двумя точками превышает зону влияния, вариация между этими точками становится непредсказуемой и ее невозможно описать каким-либо законом. К примеру, на меньших расстояниях с определенной долей вероятности можно предсказать содержание золота в точке массива по данным опробования, на больших дистанциях – нет.

Для существования вариограммы не требуется стационарности второго порядка, достаточно выполнения внутренней гипотезы [Демьянов, Савельева, 2010]. Вариограмма, построенная по начальным данным, называется экспериментальной и как только она будет описана математической моделью, она может быть с успехом использована для оценки неизвестных значений исследуемого параметра в любой точке данного пространства, т.е. для интерполяции [Капутин, 2002]. Наиболее широко применяются следующие модели вариограммы: сферическая, экспоненциальная, гауссова и кубическая (рисунок 3.2).

Они описываются следующими формулами:

1. Эффект самородка

$$\gamma(h) = c_0 \tag{3.8}$$

2. Сферическая

$$\gamma(h) = \begin{cases} c\left[\dfrac{3h}{2a} - \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{h}{a}\right)^3\right], \text{для } h \le a \\ c \text{ для } h > a \end{cases} \tag{3.9}$$

3. Экспоненциальная

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, \text{для } h = 0 \\ c\left[1 - \exp\left(\dfrac{-3h}{a}\right)\right], \text{для } h \ne 0 \end{cases} \tag{3.10}$$

4. Гауссова

$$\gamma(h) = c\left[1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right)\right] \tag{3.11}$$

5. Кубическая

$$\gamma(h) = \begin{cases} c\left[7\left(\frac{h}{a}\right)^2 - \frac{35}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{7}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^5 - \frac{3}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^7\right], для\ h \le a \\ c\ для\ h > a \end{cases} \tag{3.12}$$

Где a – радиус, c – порог, c_0 – эффект самородка, h – расстояние между данными.

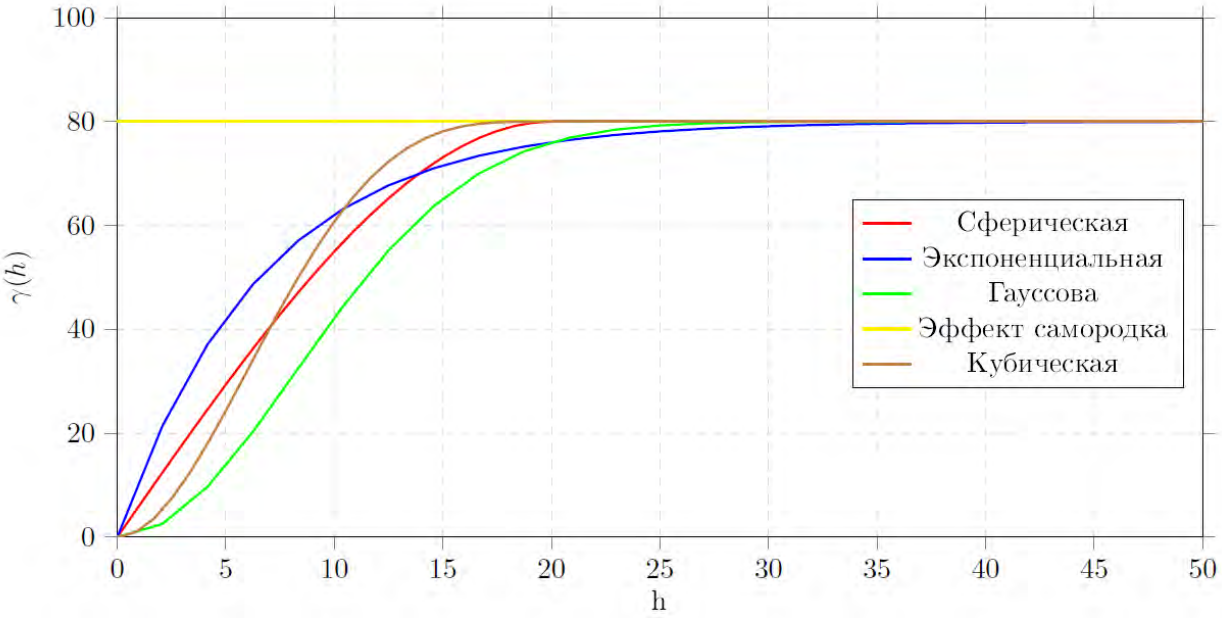


Рисунок 3.2. Примеры моделей вариограмм

Наиболее часто используемой является сферическая модель вариограммы [Smith, 2014]. Она характеризует плавное, равномерное увеличение дисперсии между данными до определенного максимума. Экспоненциальная модель вариограммы характеризуется быстрым нарастанием дисперсии, однако при этом она лишь стремится к максимальной дисперсии, никогда не достигая ее. Примером геологической обстановки, аппроксимируемой такой моделью вариограммы, может служить среда, характеризующаяся мелкими «островками» схожих по свойствам пород, хаотично распределенных во вмещающей породе. Дисперсия в гауссовой модели сначала нарастает медленно, затем быстро и ближе

к максимальной опять замедляется. Кубическая модель схожа с гауссовой и принадлежит к классу гладких, непрерывных функций [Потехин, 2014].

После выбора теоретической модели и подбора ее компонент (радиуса и порога) приступают к интерполяции одним из вариантов кригинга. Выделяют несколько типов кригинга (простой, обычный, универсальный, IRF-k, с внешним дрейфом и др.), которые различаются принятыми предположениями и используемой информацией о моделируемой переменной. Все виды являются различного рода модификациями базового линейного регрессионного оценивателя $Z^*(x)$, определяемого следующим образом [Goovaerts, 1997; Chilès et Delfiner, 2012]:

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^{n(x)} \lambda_i(x)[Z(x_i) - m(x_i)] \tag{3.13}$$

где $\lambda_i(x)$ – весовые коэффициенты, относящиеся к данным $Z(x_i)$.

Значения $z(x_i)$ интерпретируются как реализации случайной переменной $Z(x_i)$. Величины $m(x)$ и $m(x_i)$ являются математическими ожиданиями случайных переменных $Z(x)$ и $Z(x_i)$. Число данных, использующихся при оценке, и значения весовых коэффициентов могут меняться в зависимости от местоположения оцениваемой точки x. Кригинг может быть точечным и блочным. Точечный позволяет оценить значение изучаемой величины в искомой точке, блочный оценивает значение на определенной площади.

Кригинг называют «лучший линейный несмещенный оцениватель» («best linear unbiased estimator» B.L.U.E.). «Линейный» потому что оцениваемые значения являются взвешенными линейными комбинациями известных значений:

$$Z^*(x) = \sum \lambda_i Z(x_i) \tag{3.14}$$

«несмещенный» потому что среднее значение ошибки равно 0:

$$E\{Z^*(x) - Z(x)\} = 0 \tag{3.15}$$

и «лучший» т.к. он стремится к минимизации вариации ошибки:

$$\sigma_E^2(x) = Var\{Z^*(x) - Z(x)\} \tag{3.16}$$

Система уравнений кригинга получается после удовлетворения всех данных

условий.

Целью геостатистического анализа в настоящей работе являлось построение структурной карты по кровле XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных вод, выбранного на разработку, а также создание 3D карты распределения температур в пределах изучаемой территории (рисунок 3.3).

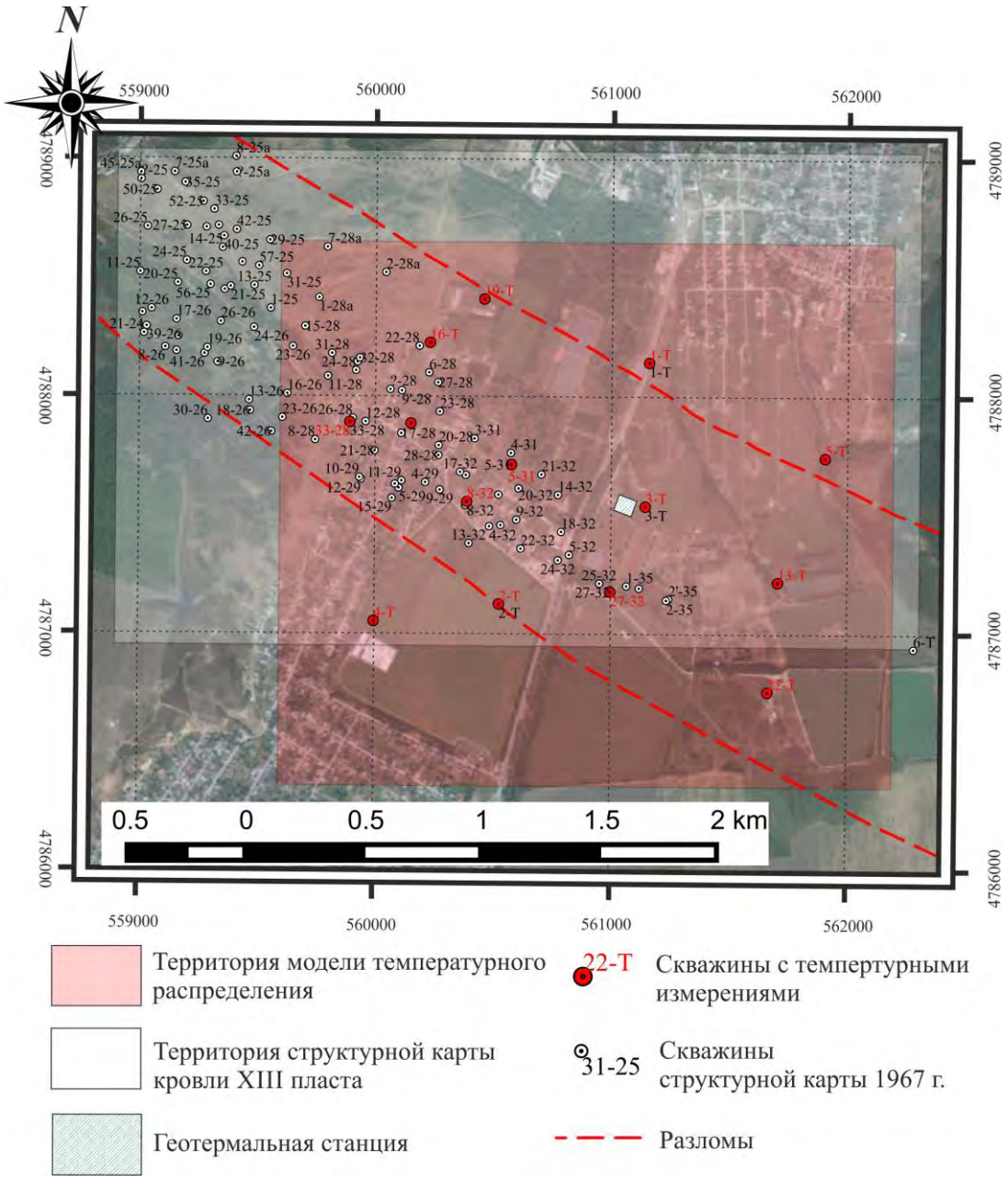


Рисунок 3.3. Области определения глубины кровли XIII пласта и температурного распределения

Обработка данных и последующая оценка производились в программе ISATIS.

3.2. Оценка глубины кровли продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод

Первоначальным этапом работы являлся сбор материала. В связи с тем, что Ханкальское месторождение приурочено к Октябрьской антиклинали, к которой относится одноименное нефтяное месторождение, имеется более 100 скважин, вскрывших XIII продуктивный пласт. В исследовании применялись данные структурной карты 1967 г. [Шпак, 1968ф], привязка которой осуществлена в программе Quantum GIS по найденным на территории Ханкальского месторождения скважинам (рисунок 3.4). По точкам автоматически подбирался масштаб карты и производилось ее вращение по методу «тонкой сплайн пластины» («thin plate spline»), т.к. отсутствуют атрибуты географической привязки.



Рисунок 3.4. Скважины 27/32, 14-т, 5/31 Ханкальского месторождения термальных вод (слева направо). Фото автора.

После оцифровки географически привязанной карты получено 106 точек с альтитудой кровли XIII пласта (рисунок 3.5).

Первым этапом является статистическая оценка начальных данных и построение экспериментальных вариограмм согласно формуле 3.6 с учетом направления, угла раствора вокруг направления (direction tolerance), шага (lag) и ширины полосы (bandwidth). Перечисленные параметры определяются, так как исходные измерения обычно имеют произвольное распределение в пространстве и нельзя набрать достаточное количество пар точек, разделенных определенными

расстояниями в заданном направлении. Этот этап проводится в целях проверки стационарности и анизотропии данных (рисунок 3.6). Сектора (рисунок 3.7) перемещаются по области определения от одной точки к другой для учета всех пар, которые ранжируются по расстоянию между ними и попадают в тот или иной лаг для рассматриваемого направления [Демьянов, Савельева, 2010]. Две скважины по разные стороны от разломов были убраны из оценки, так как они не могут быть коррелированы с другими измерениями из-за дислокаций.

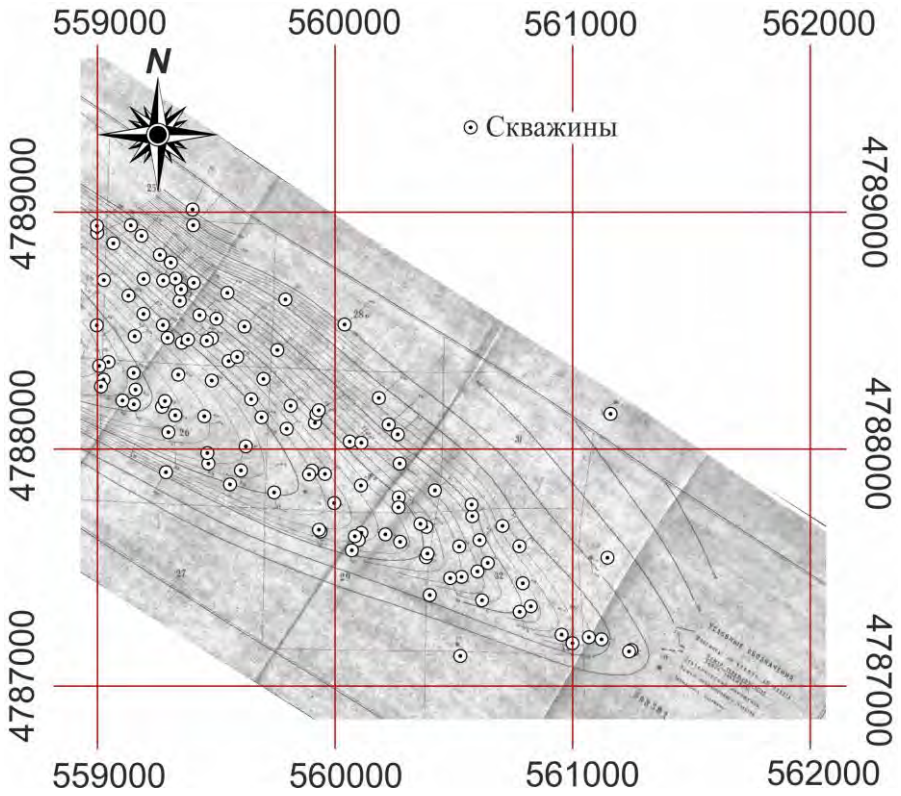


Рисунок 3.5. Структурная карта XIII пласта [Шпак, 1968ф] после географической привязки и оцифровки

По результатам вариограммного анализа можно сделать вывод о нестационарности начальных показателей (среднее значение плавно меняется на исследуемой области), т.к. антиклинальная складка погружается в юго-восточном направлении и среднее значение альтитуды кровли пласта на северо-западе больше среднего значения альтитуды на юго-востоке.

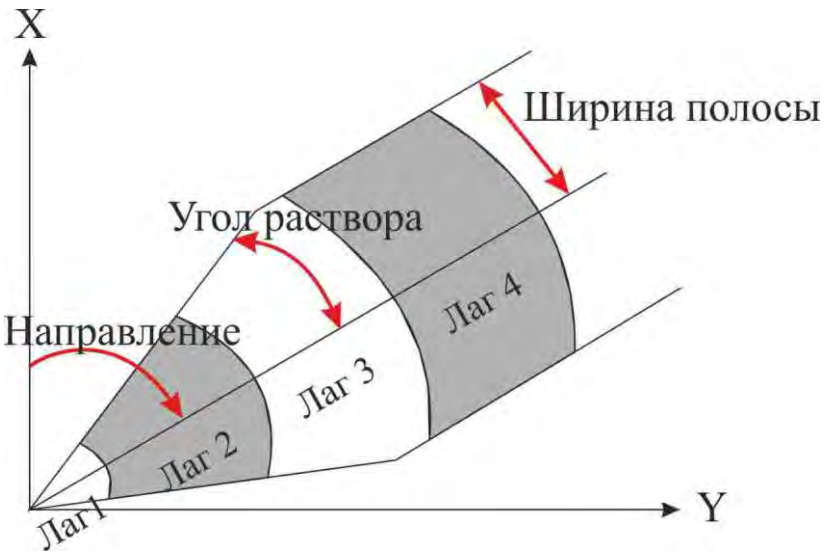


Рисунок 3.6. Элементы вариограммы

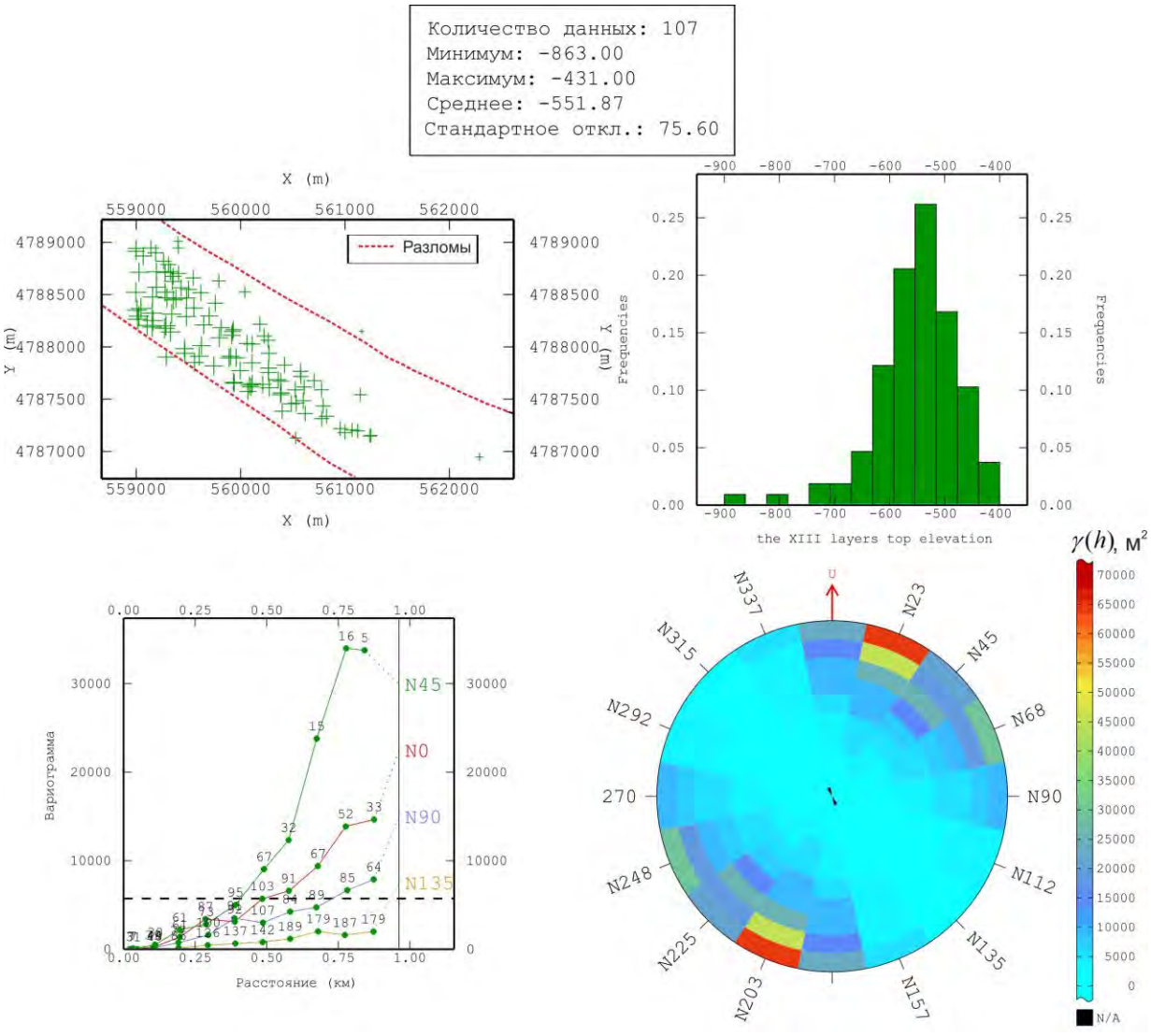


Рисунок 3.7. Статистическая оценка данных (статистика, расположение начальных данных, гистограмма, направленные вариограммы и вариограммная роза)

Как правило, при работе с нестационарными данными применяется один из

трех вариантов кригинга: универсальный, кригинг с внешним дрейфом либо кригинг с использованием внутренних случайных функций (рисунок 3.8).

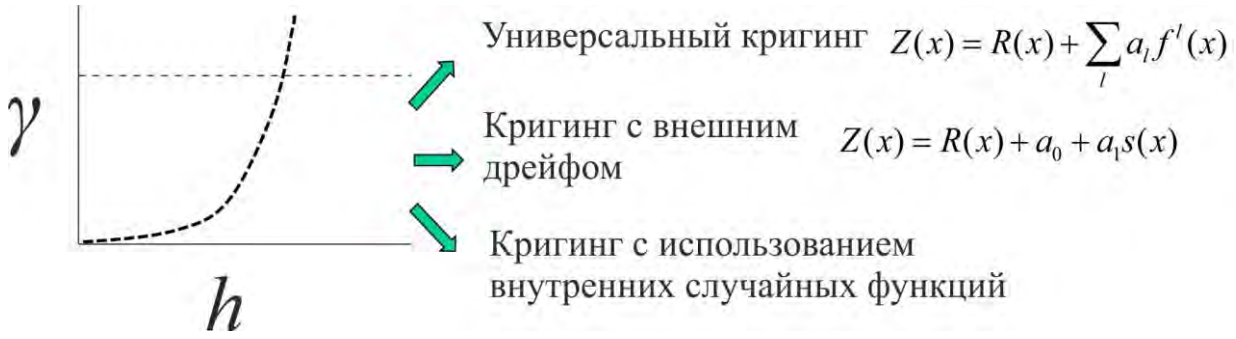


Рисунок 3.8. Виды кригинга при нестационарности в данных

Кригинг с внешним дрейфом использует дополнительные данные измерений коррелированной переменной в качестве модели тренда. Он позволяет достаточно точно оценить тренд при наличии данных дополнительной тренд-переменной во всех точках оценивания [Демьянов, Савельева, 2010].

Суть кригинга с использованием внутренних случайных функций состоит в обеспечении квазистационарности данных путем оперирования приращениями k-порядка или, как их называют, авторизированными линейными комбинациями k-порядка ($k=0$ обозначает разницу $Z(x)-Z(x+h)$, обычно выбирается порядок не выше 2). Использование авторизированных линейных комбинаций отфильтровывает среднее и его изменение, или тренд, выраженный полиномом k-порядка в координатах (x в одномерном или x, y в двумерном пространстве).

В представленной работе для интерполяции был использован универсальный кригинг. Универсальный кригинг предполагает, что неизвестное среднее значение $m(x)$ плавно меняется во всей области исследования и случайную функцию $Z(x)$ можно разложить на стационарный остаток $R(x)$ и тренд $m(x)$: $Z(x) = R(x) + m(x)$. Тренд в свою очередь можно смоделировать с помощью детерминистической полиномиальной функции $m(x) = \sum_l a_l f^l(x)$, где a_l неизвестные коэффициенты, f^l базисные (известные функции), причем $f^0(x) = 1$.

Условие несмещенности оценки:

$$E\{Z^*(x)-Z(x)\}=\sum_\alpha \lambda_\alpha E\left[Z_\alpha\right]-E\left[Z_0\right]=$$
$$=\sum_\alpha \lambda_\alpha m_\alpha - m_0=\sum_\alpha \lambda_\alpha \sum_l a_l f_\alpha^l - \sum_l a_l f_0^l = \sum_l a_l\left(\sum_\alpha \lambda_\alpha f_\alpha^l - f_0^l\right)=0 \quad (3.17)$$

Таким образом, для выполнения данного условия требуется:

$$\sum_\alpha \lambda_\alpha f_\alpha^l = f_0^l \quad (3.18)$$

Вариация ошибки:

$$Var(\varepsilon)=Var\left(\sum_\alpha \lambda_\alpha Z_\alpha - Z_0\right)=\sum_\alpha\sum_\beta \lambda_\alpha\lambda_\beta C_{\alpha\beta}-2\sum_\alpha \lambda_\alpha C_{\alpha 0}+C_{00} \quad (3.19)$$

Минимизация вариации ошибки с учетом условий несмещенности оценки приводит к системе уравнений универсального кригинга. Построив соответствующий лагранжиан, продифференцировав его по всем неизвестным переменным и приравняв к нулю соответствующие производные, получаем следующую систему уравнений:

$$\phi = Var(\varepsilon)+2\sum_l \mu_l\left(\sum_\alpha \lambda_\alpha f_\alpha^l - f_0^l\right)$$
$$\frac{\partial\phi}{\partial\lambda_\alpha}=0\Rightarrow\sum_\beta \lambda_\beta C_{\alpha\beta}+\sum_l \mu_l f_\alpha^l = C_{\alpha 0} \quad (3.20)$$
$$\frac{\partial\phi}{\partial\mu_l}=0\Rightarrow\sum_\alpha \lambda_\alpha f_\alpha^l = f_0^l$$

Вариация оценки универсального кригинга:

$$\sigma^2=Var(\varepsilon)=C_{00}-\sum_\alpha \lambda_\alpha C_{\alpha 0}-\sum_l \mu_l f_0^l \quad (3.21)$$

Уравнения могут легко быть переписаны в матричном виде:

Вычислить веса:

$$\begin{bmatrix} C_{\alpha\beta} & f_\alpha^l \\ f_\beta^l & 0 \end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\lambda_\alpha \\ \mu_l\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{\alpha 0}\\ f_0^l\end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Оценить неизвестные значения:

$$Z^* = \begin{bmatrix} Z_\alpha \\ 0 \end{bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \mu_l \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

Дисперсия оценки:

$$\sigma^2 = C_{00} - \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \mu_l \end{bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} C_{\alpha 0} \\ f_0^l \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

Для универсального кригинга в качестве наиболее подходящего выбран тренд 1 x y x^2 xy y^2. На рисунке 3.9 можно наблюдать, что вариограмма по данным, представляющим собой остаток после вычета тренда, стационарная. Для нее подбирается соответствующая математическая модель – кубическая с радиусом корреляции (range) 667 м и плато (sill) 1084.3 $м^2$.

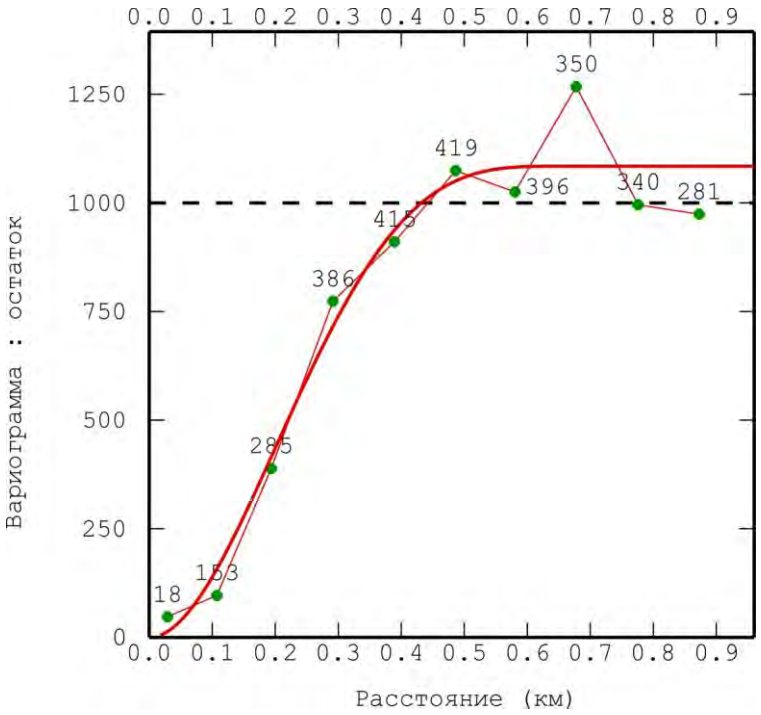


Рисунок 3.9. Экспериментальная вариограмма данных после вычета тренда и подобранная к ней модель

Ввиду небольшого количества данных применена глобальная окрестность кригинга, т.е. для оценки каждой точки используются все известные значения. Первоначально выбранные параметры (модель и окрестность) проходят процедуру перекрестной проверки (cross-validation): начальные измерения один за другим «прячутся» и переоцениваются, затем рассчитывается разница между

исходными и полученными показателями. Данная процедура позволяет оценить правильность выбора модели и окрестности кригинга (рисунок 3.10).

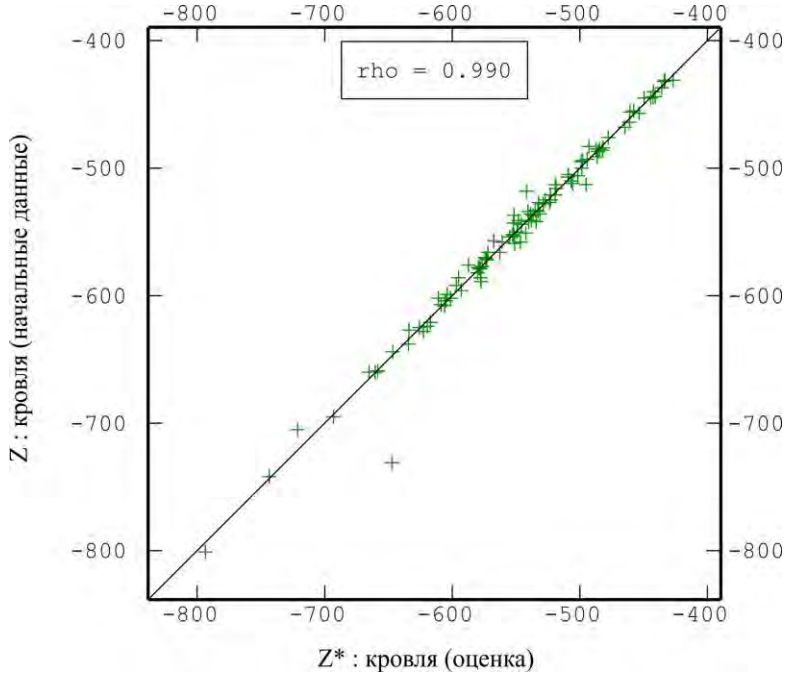


Рисунок 3.10. Перекрестная проверка по данным кровли XIII продуктивного пласта

Перекрестная проверка показала достаточную точность оценки глубины кровли XIII пласта на основе подобранных параметров: коэффициент корреляции между изначальными и полученными значениями составил 0.99, а средняя ошибка – 4.8 м.

После того как вариограмма описана математической функцией, следующим этапом является интерполяция с помощью универсального кригинга (рисунок 3.11). Стандартное отклонение кригинга достигает максимальных значений в 160 м^2 на территории, где почти нет изначальных данных, и невозможно с уверенностью оценить абсолютную отметку кровли XIII пласта.

В 1967 г. при создании структурной карты применялся распространенный метод триангуляции, когда по замеренным точкам обрисовываются треугольники, затем на каждой линии по правилу линейной интерполяции находят точки со значениями абсолютных отметок. В новой геостатистической интерпретации учитываются все данные в окрестности точки (также скважина 6-Т на юго-востоке территории), что дает более точную оценку (рисунок 3.12).

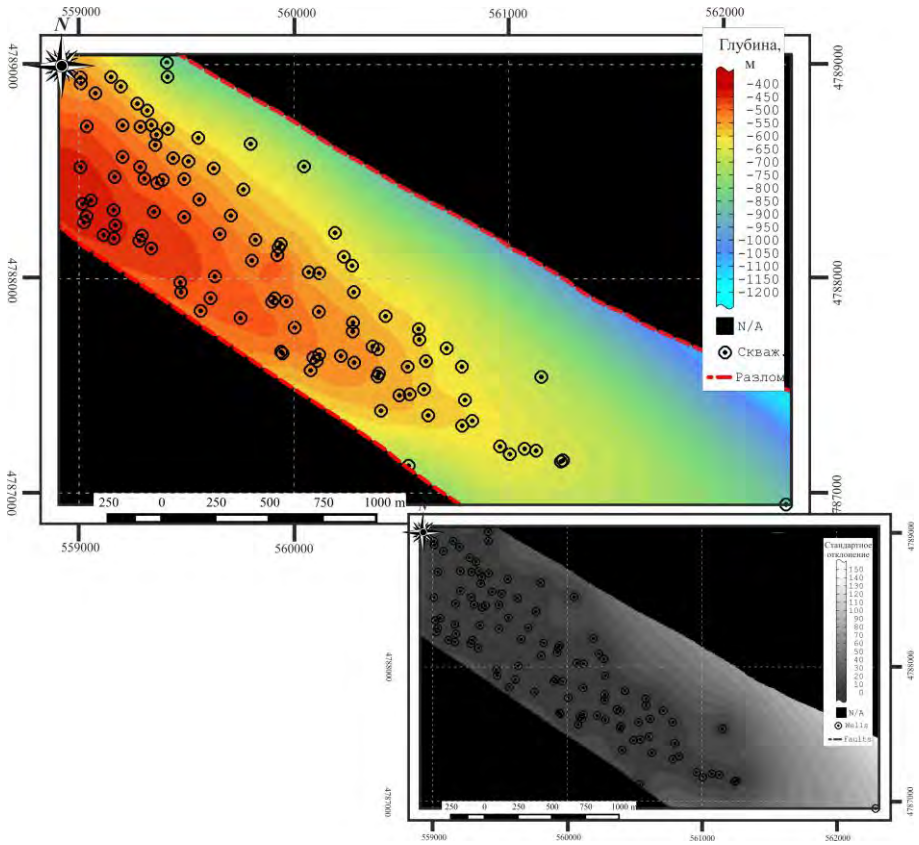


Рисунок. 3.11. Оценка (сверху) и стандартное отклонение оценки (снизу) абсолютных отметок кровли XIII пласта

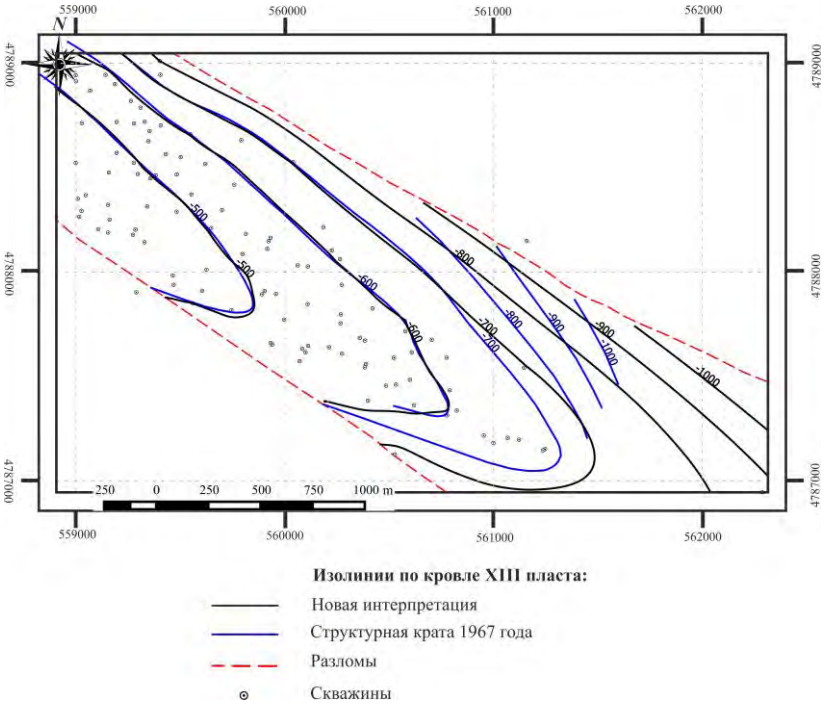


Рисунок 3.12. Сравнение двух структурных карт кровли XIII пласта

Следует отметить, что на картах 1967 г. и 2016 г. при хорошо совпадающих конфигурациях кровли пласта на северо-западе исследуемой территории в юго-

восточной части расхождение по глубине превышает 100 м. Такая разница является существенной при выборе положения скважин, тем более, что именно южная часть по результатам анализа температур является перспективной для разработки XIII пласта. Результаты создания структурной карты вошли в 3D модель Ханкальского месторождения термальных подземных вод [Черкасов и др., 2014].

3.3. Моделирование распределения температуры в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод

Как геологические наблюдения, так и измерения температуры по стволам скважин месторождения осуществлялись в 1968 и 1988 гг. и отражены в соответствующих отчетах [Шпак, 1968ф; Крылов, 1988ф]. Замеры осуществлялись после временного прекращения откачки термальных вод для установления температурного равновесия скважина-порода. Всего выполнено около 100 измерений по 14 добывающим скважинам (рисунок 3.13).

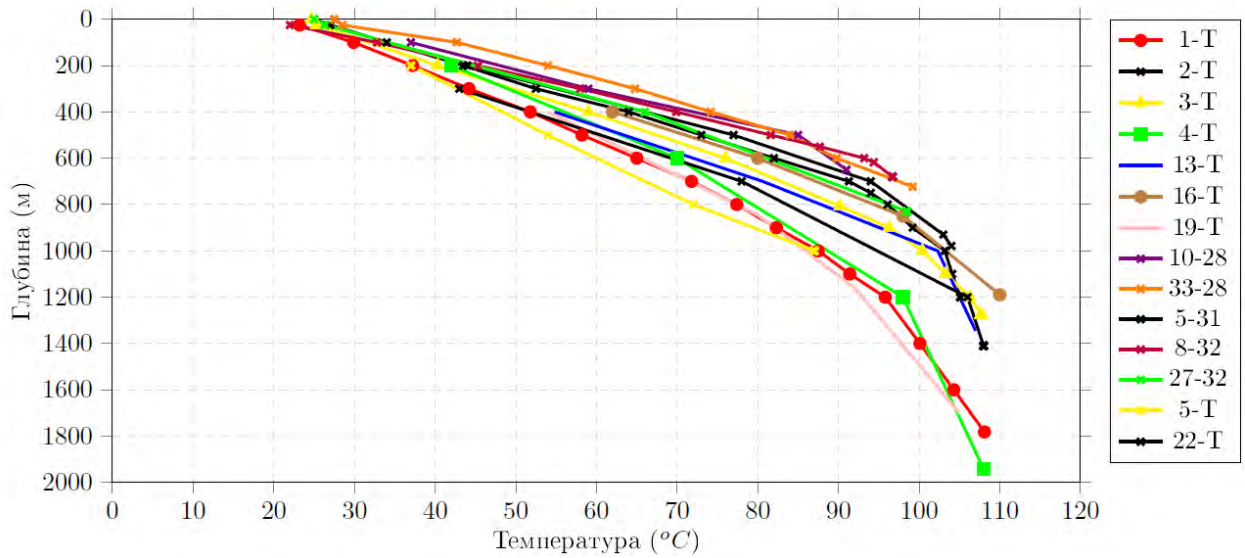


Рисунок 3.13. Измерения температуры по стволам скважин Ханкальского месторождения

В начале измерения температуры показывают линейный рост, но когда глубина достигает продуктивных пластов, геотермальный градиент имеет тенденцию к снижению. Это может быть объяснено конвекцией, вызванной

циркуляцией термальных вод. Это явилось главной причиной, чтобы разделить нашу оценку и использовать две разные модели, что описано ниже.

3 скважины замаскированы при статистическом анализе, потому что они расположены на другой стороне от разрывных нарушений и не могут быть скорреллированы с другими данными (рисунок 3.14).

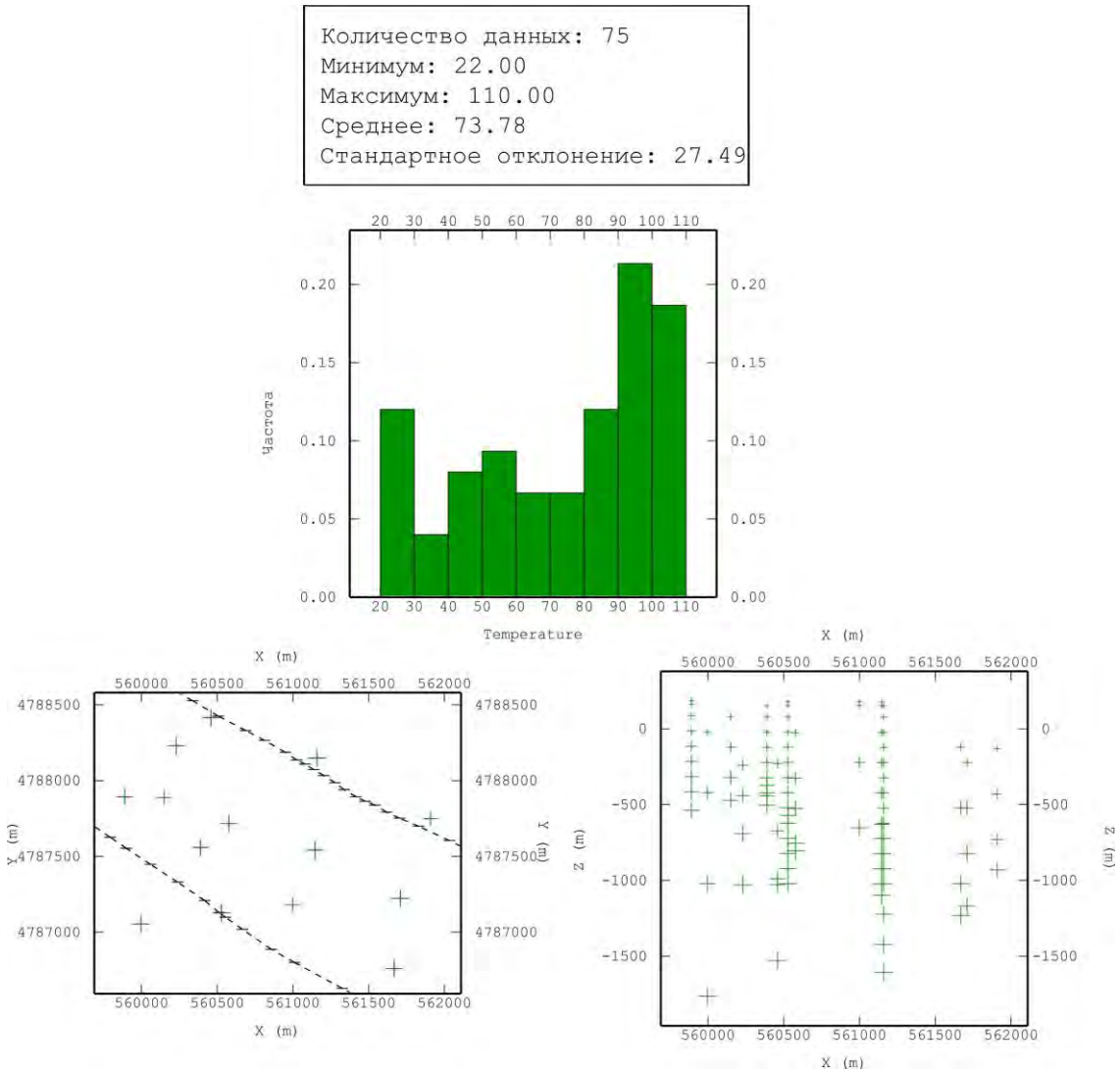


Рисунок 3.14. Статистика и расположение измерений температуры (в проекциях XOY, XOZ)

В результате трагических событий, произошедших на территории Чеченской Республики, паспорта скважин были утрачены, поэтому данные по инклинометрии отсутствуют. Единственной имеющейся информацией, позволяющей оценить положение стволов скважин в пространстве, являются приведенные в фондовых материалах поправки на кривизну скважин, которые

достигают 11 м для глубины более 1 км [Шпак, 1968ф], что означает относительно малый уклон. В связи с этим при проведении геостатистического анализа все скважины рассматривались как вертикальные. Область исследования ограничивалась двумя разломами, расположенными на юго-западе и северо-востоке исследуемой территории.

Существовало два варианта выбора исходной системы координат для работы с измерениями температуры: обычная система координат и кровля XIII продуктивного пласта в качестве плоскости отчета (рисунок 3.15), и оба были протестированы.

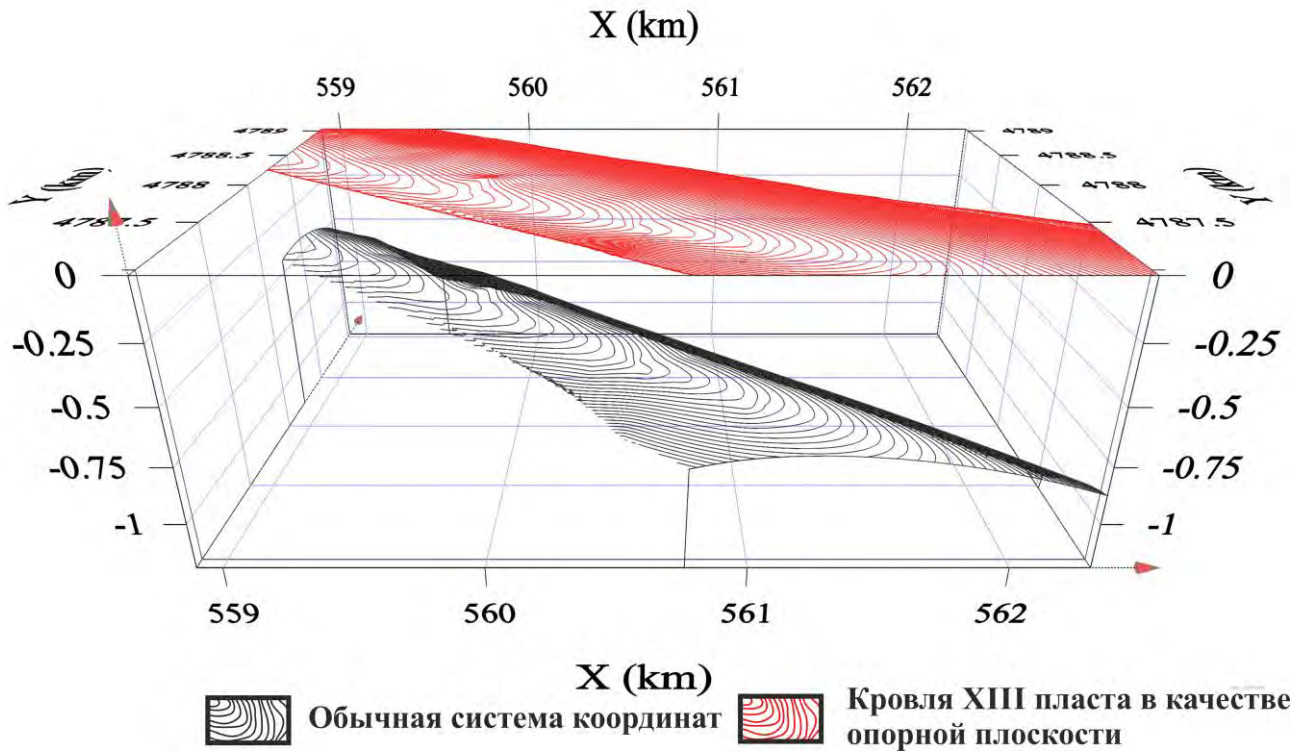


Рисунок 3.15. Выбор плоскости отчета

Как можно видеть из представленных диаграмм рассеяния (рисунок 3.16), дисперсия данных уменьшается в случае выбора кровли XIII пласта в качестве базовой плоскости, особенно в непосредственной близости от самого продуктивного слоя. Этот факт может быть объяснен тем, что вариация температуры с глубиной меньше в пределах продуктивных слоев, т.к. они содержат термальные воды.

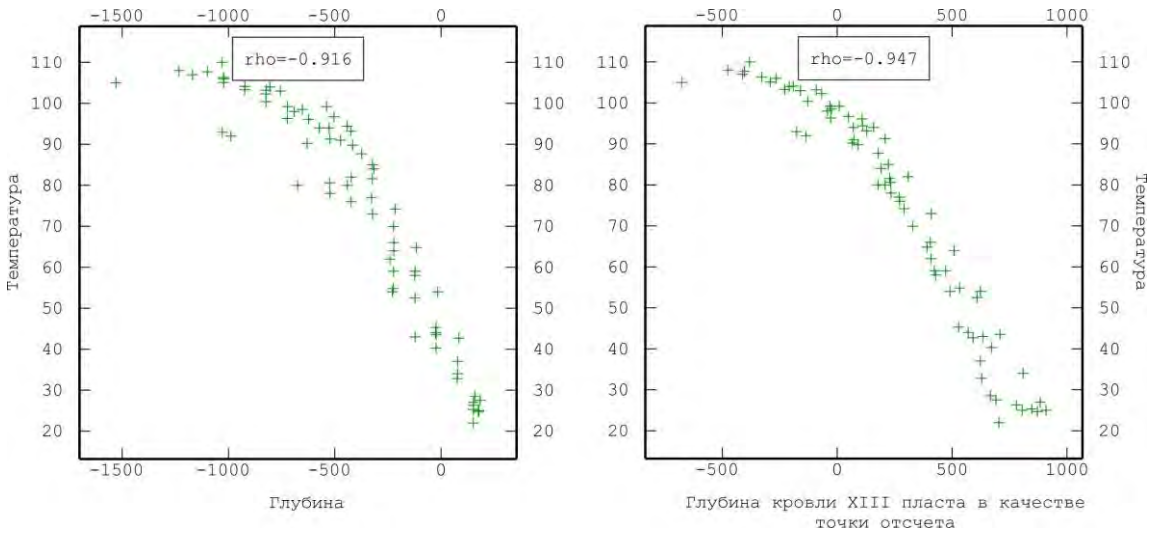


Рисунок 3.16. Диаграммы рассеяния температуры с глубиной в случаях различных систем координат

Перед началом вариограммного анализа система координат повернута так, что антиклинальная складка падает в восточном направлении, т.е. с запада на восток, и от оси антиклинали на юг и север глубина продуктивных пластов увеличивается. Это упрощало поиск тренда в качестве первого шага моделирования.

4 горизонтальные вариограммы для различных направлений были рассчитаны, чтобы оценить преимущества выбора того или иного варианта для системы координат (вертикальная вариограмма остается неизменной в обоих случаях) (рисунок 3.17).

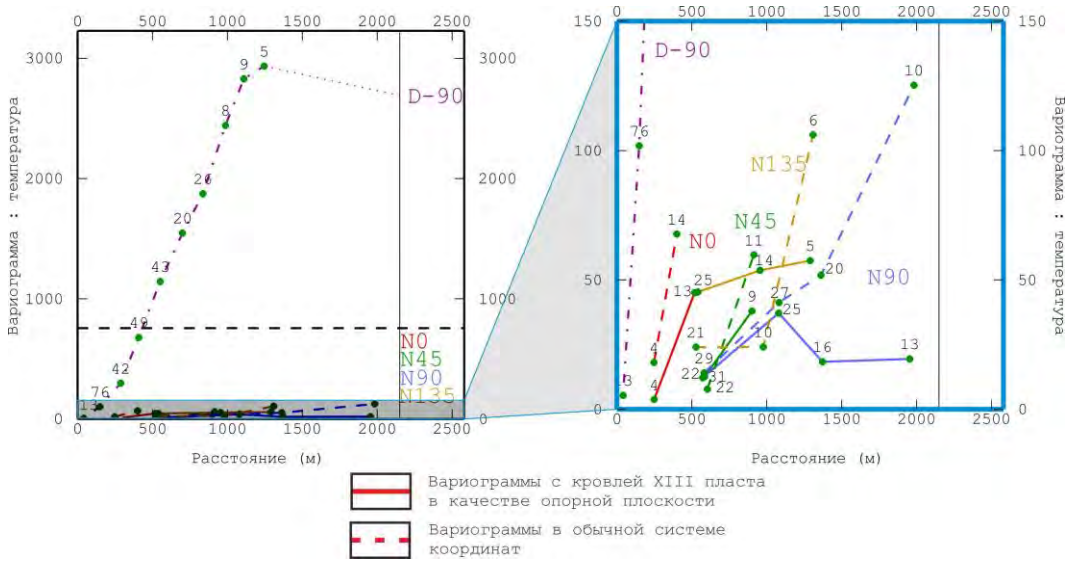


Рисунок 3.17. Расчет вариограмм

Хотя количество пар значений недостаточно для надежных выводов, особенно с увеличением расстояния, следует отметить, что вариация температуры при выборе кровли XIII пласта в качестве базиса уменьшается, что делает этот вариант координатной системы предпочтительным (особенно для оценки температуры непосредственно около слоя). Это можно объяснить эффектом конвекции в продуктивных пластах, представляющих собой антиклинальную структуру.

Вертикальная вариограмма нестационарная из-за того, что температура постепенно возрастает с глубиной. Это было главной причиной для выбора универсального кригинга.

Решено произвести две оценки в двух системах координат: с XIII пластом в качестве базисной плоскости для измерения температур на наибольших глубинах и в обычной системе координат ближе к поверхности земли. Затем результаты скомпонованы (рисунок 3.18).

Следующими были шаги универсального кригинга:

1. Подбор тренда.
2. Вычисление остатков.
3. Подбор модели вариограммы после вычета тренда и параметров кригинга (рисунок 3.18, таблица 3.1).
4. Оценка и ее стандартное отклонение.

Таблица 3.1. Параметры кригинга в различных системах координат

Нормальная система координат	
Тренд	1 y z
Вариограмма	Кубическая (радиус: x=y=3500 м z=900 м, порог = 150 °C^2)
Окрестность	Движущаяся (x=y=3000 м, z=250 м)
Кровля XIII слоя в качестве базиса	
Тренд	1 y z
Вариограмма	Кубическая (радиус: x=y=3500 м z=850 м, порог = 130 °C^2)
Окрестность	Движущаяся (x=y=3000 м, z=250 м)

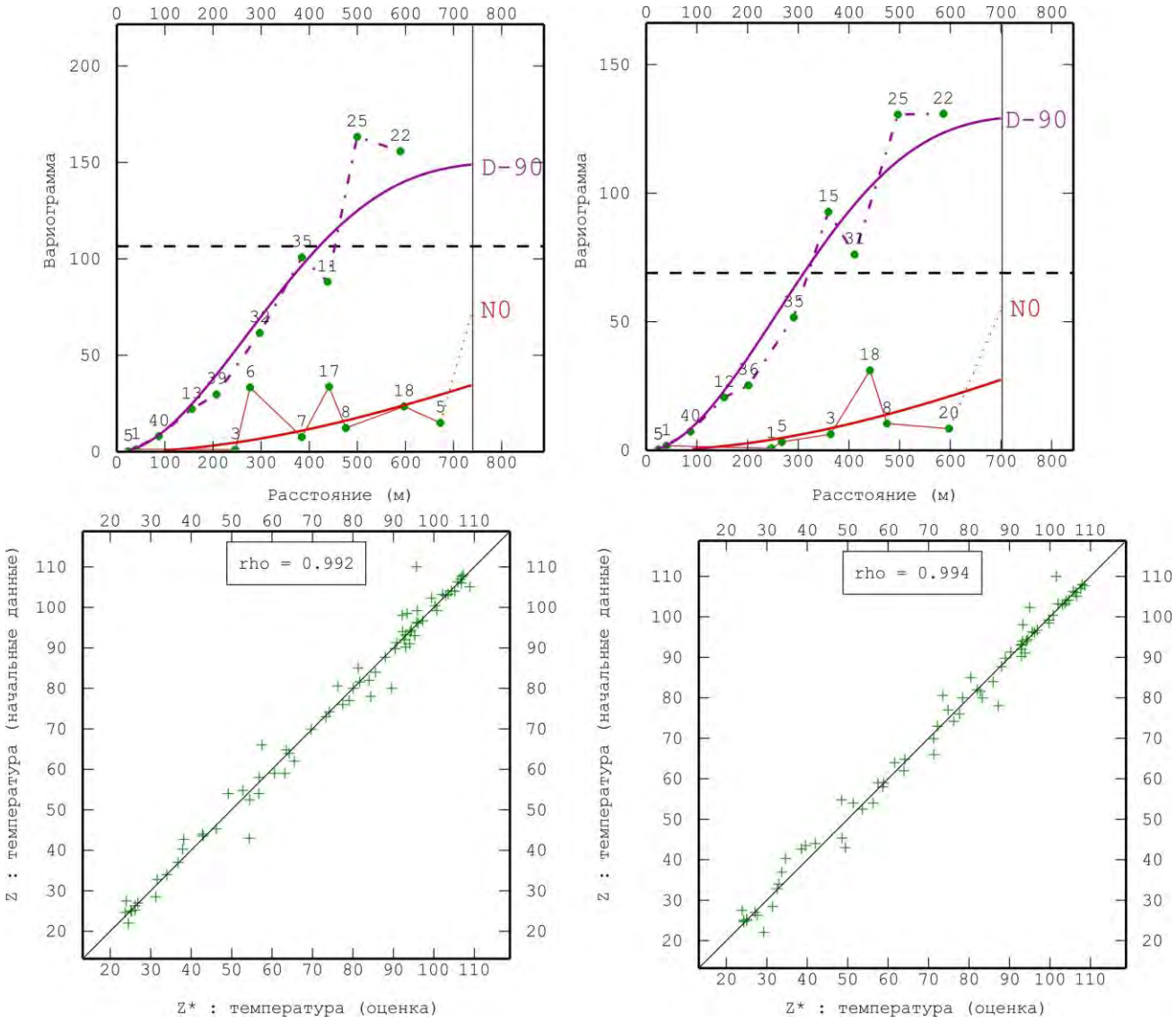


Рисунок 3.18. Подобранные модели вариограмм и результаты перекрестной проверки в случае обычной системы координат (слева) и кровли XIII пласта в качестве плоскости отчета (справа)

Абсолютные ошибки в оценке, полученные при кросс-валидации, показаны на рисунке 3.19.

Можно наблюдать из рисунка 3.19, что малые значения температуры, которые соответственно ближе к поверхности земли, измеряются более точно в обычной системе координат, и измененная система дает лучшие результаты с увеличением температуры и, следовательно, глубины. Например, суммарная абсолютная погрешность при оценке температуры от 22 до 54 °C равна 35.7 и 47.7 °C, а от 54 до 110 °C равна 118.1 и 100.9 °C для обычной системы координат и измененной, соответственно.

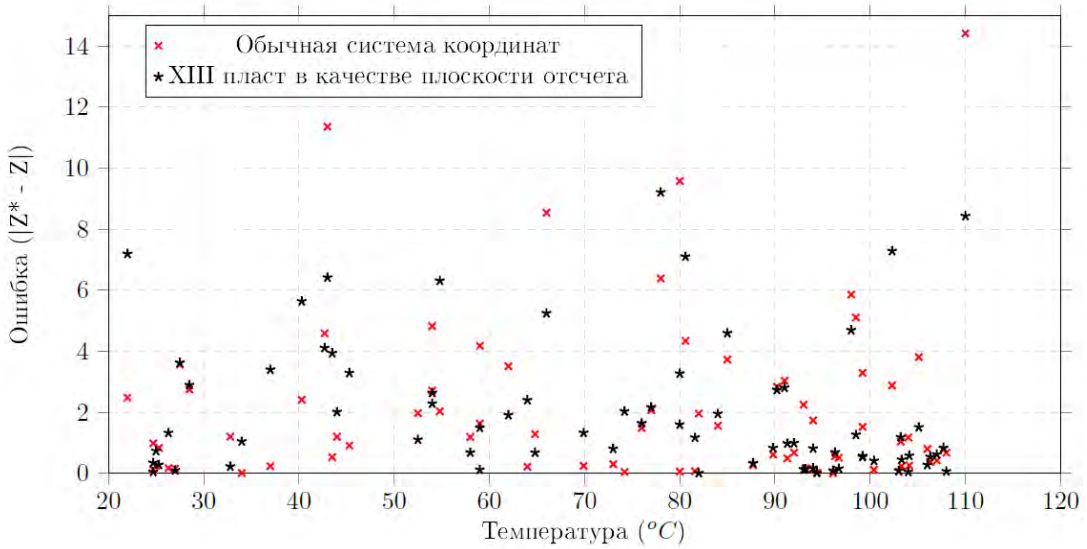


Рисунок 3.19. Абсолютные ошибки при кригинге в нормальной и измененной системах координат

Результаты перекрестной проверки подтверждают правильность использования двух различных моделей, скомбинированных впоследствии в одну для создания оценки температуры (рисунок 3.20).

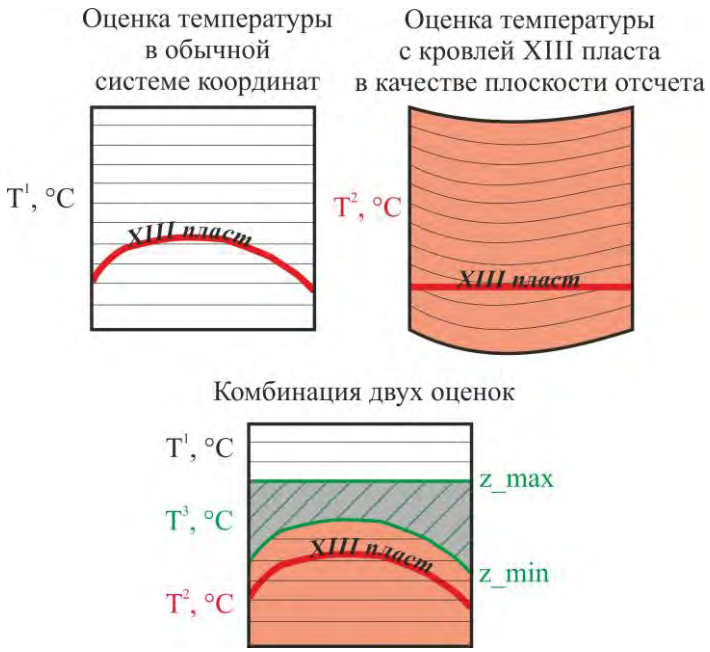


Рисунок 3.20. Комбинация двух оценок

Значения $z_\max$ и $z_\min$ являются произвольными и выбраны с учетом диаграмм рассеяния (рисунок 3.16), кросс-валидации (рисунок 3.18) и стандартных отклонений двух оценок, с $z_\max$ равным -200 м, $z_\min$ равным

разности глубины кровли XIII пласта плюс 200 м. Для того, чтобы объединить две оценки, сохраняя плавный переход между ними, новая температура рассчитана по следующей формуле:

$$T^3 = (1-\alpha)\times T^1 + \alpha \times T^2, \tag{3.25}$$

где $\alpha = \sin(p * \pi / 2)$ и $\begin{cases} p = 1, для\ z \le z_\min \\ p = 0, для\ z \ge z_\max \\ p = \dfrac{z_\max - z}{z_\max - z_\min}, для\ z_\min < z < z_\max \end{cases}$

Стандартное отклонение при оценке кригинга рассчитано по аналогичному принципу (рисунок 3.21).

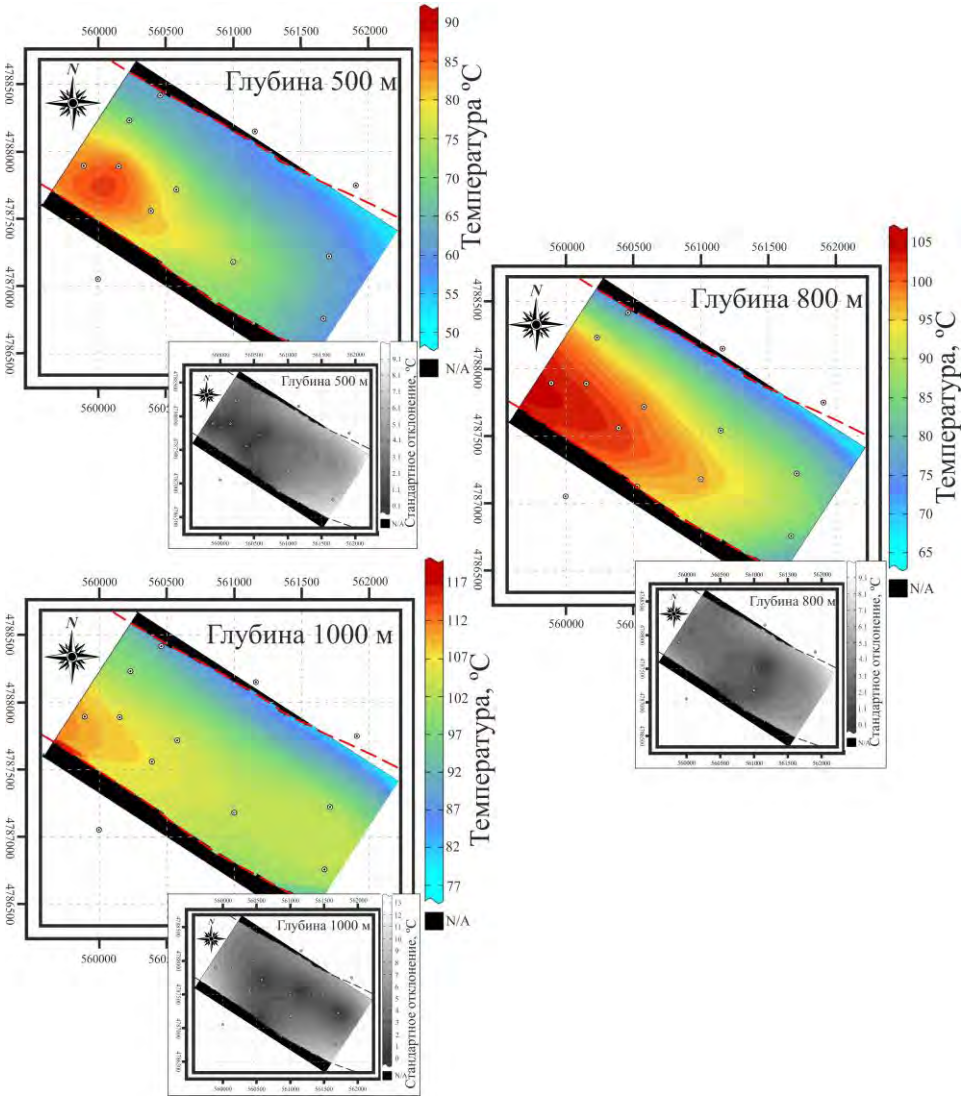


Рисунок 3.21. Поперечные профили 3D блока итоговой оценки распределения температуры и ее стандартного отклонения

«Антиклинальная» форма распределения температур на рисунке 3.21 обуславливается тем, что продуктивные слои месторождения слагают антиклинали и наиболее высокие температуры относятся к термальным водам, содержащимся в этих слоях.

Оценка температуры XIII продуктивного пласта показана на рисунке 3.22.

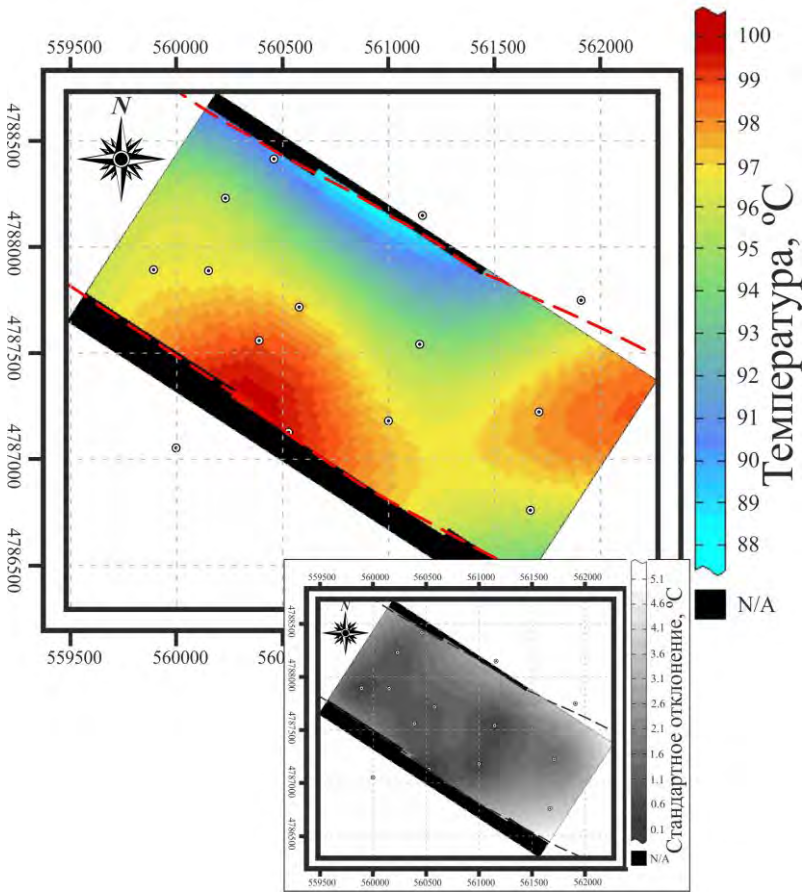


Рисунок 3.22. Оценка температуры XIII продуктивного пласта и ее стандартное отклонение

Геостатистическая оценка распределения температуры XIII пласта обнаружила наиболее высокие значения в юго-западной части месторождения, осложненной разрывным нарушением, что отмечалось В.Б. Крыловым [1983ф].

Наиболее высокие температуры, приуроченные к южной части месторождения и главному разлому соответственно, могут быть объяснены тектонической их составляющей. Источник геотермального тепла может быть разделен на радиоактивный, химический и механический компоненты, таким образом, суммарная объемная скорость выработки тепла [Stüwe, 2002]:

$$S = S_{радиоакт} + S_{химич} + S_{механич} \quad (3.26)$$

Поэтому возможным дополнительным источником тепла является тектоническое движение по главному южному разлому Ханкальского месторождения. Этот факт, как и общий характер распространения термальных вод на Северном Кавказе объясняется в рамках шарьяжно-надвиговой теории [Камалетдинов, 1981], рассматривая его в качестве мобильной тектонической зоны. Согласно данной теории, земная кора состоит из множества тектонических пластин (шарьяжей), представляющих ее главные структурные элементы и испытывающих горизонтальные перемещения с амплитудой в десятки, иногда в сотни километров в течение многих миллионов лет. Движением и трением шарьяжных пластин обеспечиваются основные геологические явления и процессы (орогенез, складчатость, сейсмичность, вулканизм и др.), а также образование важнейших полезных ископаемых (нефть, газ и др.). По теории шарьяжей, формирование термальных вод также является результатом тектонической активности, движение тектонических пластин влияет на их температурный режим и минерализацию.

По результатам геостатистического анализа для координат проектируемой продуктивной скважины оценка температуры показала 96.2 °С, со стандартным отклонением 0.5 °С^2. Абсолютная отметка кровли XIII продуктивного пласта -674.69 м, устья +178 м, таким образом расчетная глубина 852.69 м при стандартном отклонении 10.5 м^2. По результатам бурения глубина кровли XIII продуктивного пласта 843 м, температура на устье продуктивной скважины 95 °С.

Карта распределения температуры и структурная карта XIII пласта с использованием геостатистических методов построена впервые, и она позволяет в зависимости от выбранной территории спрогнозировать температуру воды в продуктивной скважине, что совместно с дебитом дает важную информацию по потенциальной мощности будущей геотермальной станции.

Глава 4. Прогноз последствий использования термальных подземных вод

Для составления методических рекомендаций по эксплуатации и прогноза эволюции ресурса Ханкальского месторождения термальных подземных вод одним из этапов, наряду с геостатистической оценкой, являлось моделирование процесса обратной закачки отработанного флюида.

Как отмечалось выше, на месторождении установлена циркуляционная система теплоотбора («дублет») (Глава 2), т.е. одна эксплуатационная и одна нагнетательная скважина с обратной закачкой всей использованной воды. Для того, чтобы спрогнозировать изменения в температуре ресурса (она понижается в результате нагнетания холодной воды), необходимо построить математическую модель.

С 1970-х годов разработан ряд компьютерных программ, в задачи которых входит также моделирование длительной обратной закачки вод (FEFLOW [Diersch, 2014], Comsol, Tough2 [Pruess et al., 1999], Metis [Goblet, 1980], Marthe [Thiéry, 1990], Opengeosys [Kolditz et al., 2012] и др.). Данные программы позволяют спрогнозировать и правильно выбрать вариант разработки ресурса термальных вод. К примеру, во Франции после 20 лет эксплуатации термальных вод Парижского бассейна с обратной закачкой столкнулись с проблемой развития холодного фронта: температура снизилась в одной продуктивной скважине, и по прогнозам в скором времени должно произойти постепенное снижение также в другой [Lebrun et al., 2011; Lopez et al., 2012]. Предложены различные концепции для решения этой проблемы, такие как строительство реверсивных скважин и сезонная (зима-лето) закачка-получение термальной воды [Réveillère et al., 2013]. В Парижском бассейне моделирование используется уже более 20 лет для предсказания длительности эксплуатации термальных вод и влияния установки новых «дублетов» [Lopez et al., 2010] (рисунок 4.1).

Для составления рекомендаций по достижению долгосрочной устойчивой эксплуатации XIII пласта термальных вод Ханкальского месторождения необходимо проведение симуляции обратной закачки отработанной воды. По

оценкам ряда исследователей, в случае устойчивой разработки временной отрезок, в течение которого не должно произойти существенного снижения температуры в продуктивной скважине, составляет 30–40 лет. При детальном, всестороннем изучении месторождений термальных вод Чечни и правильном выборе параметров эксплуатации возможно достижение устойчивого использования ресурса.

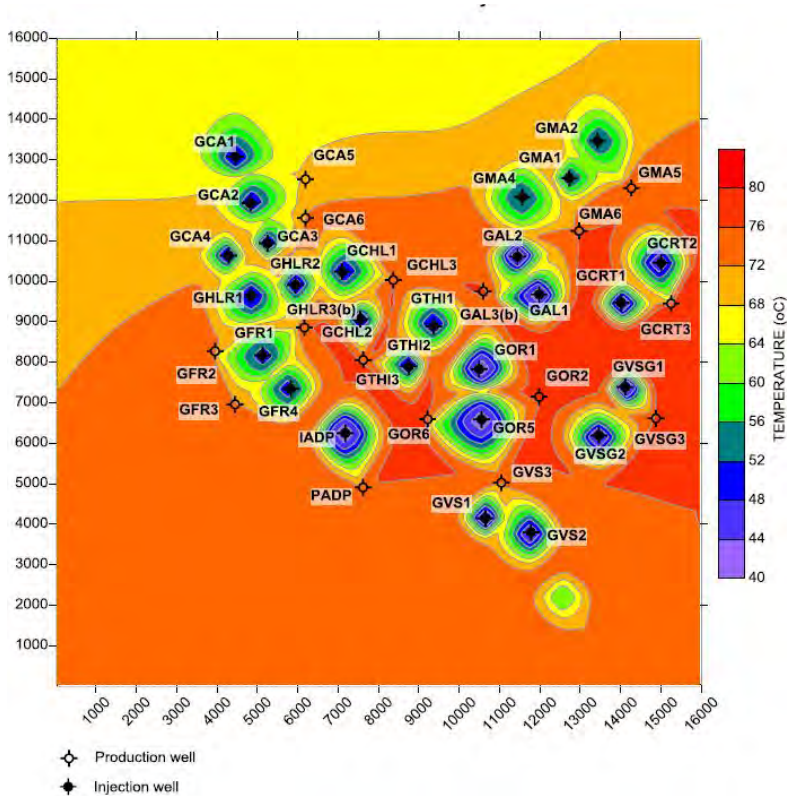


Рисунок 4.1. Прогноз температур в пределах Парижского бассейна на 2035 г. [Papachristou, M. 2011]

Для определения параметров достижения долгосрочного устойчивого эксплуатации XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения необходимо моделирование обратной закачки термальных вод. При построении математической модели использовалась программа Metis [Goblet, 1980], разработанная в Парижской горной школе. Математические уравнения, описывающие процессы, преобразуются в форму, пригодную для компьютерной обработки методом конечных элементов, который является одним из наиболее эффективных численных методов решения дифференциальных уравнений, описывающих состояние физических систем сложной структуры [Розин, 2000].

Это сеточный метод: интересующая нас область разбивается на части (элементы), модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными граничными условиями. Уравнения дискретизируются в пространстве в соответствии с формализмом Галеркина. Системы линейных уравнений решаются методом сопряженных градиентов [Хестенса, Steifel, 1952].

4.1. Региональная гидрогеологическая модель

Первоначальным этапом работы являлось создание региональной гидрогеологической модели для понимания общих аспектов функционирования резервуара XIII пласта термальных вод в пределах обширной территории Чеченской Республики. Как говорилось выше, зоной питания являются выходы караган-чокракских отложений на поверхность в пределах Черных гор, явившихся южной границей моделируемой области. Северная граница проведена по реке Терек (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2. Границы региональной модели и модели «дублета»

Пористая геологическая среда представляет собой твердую часть и пустоты,

и их соотношение должно быть распределено непрерывно для определенного объема. В целях соответствия этому требованию введено понятие элементарного представительного объема (representative elementary volume – REV) [Bear, 1972]. Для небольших объемов контроля значение пористости будет зависеть от выбранного местоположения (рисунок 4.3). С увеличением размеров контрольного объема колебание пористости будет уменьшаться. Начиная с определенного размера, значение параметра системы будет оставаться постоянным независимо от контрольного размера. В этом масштабе контрольный объем представляет собой среднее значение каждого параметра пористой среды (REV). В гетерогенной среде дальнейшее увеличение контрольного объема приведет к колебаниям параметров системы.

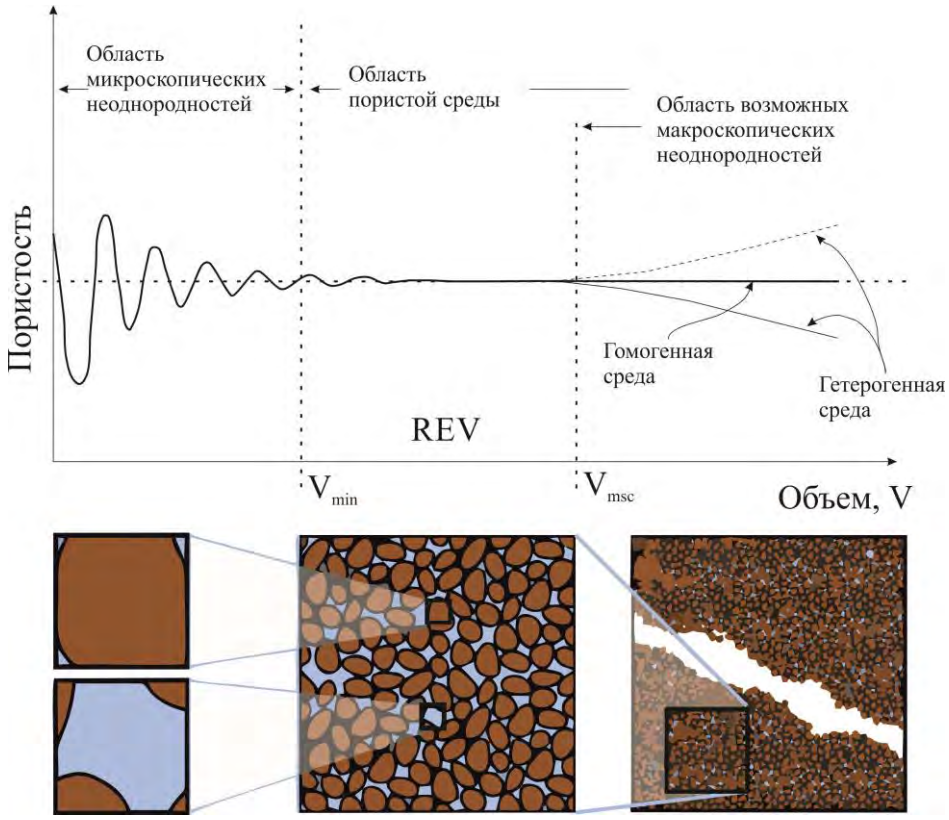


Рисунок 4.3. Понятие элементарного представительного объема [Böttcher, 2013]

В случае построения региональной модели в пределах Чечни задача заключалась в моделировании потока подземных вод (несжимаемой жидкости) в насыщенной пористой среде при установившемся режиме течения.

Данная проблема описывается двумя законами:

1. Закон Дарси (рисунок 4.4). Дарси [1856] эксперементально определил, что для определенного типа песка объем жидкости Q, протекающей через образец, прямо пропорционален изменению гидравлического напора $h_2 - h_1$ и площади сечения A и обратно пропорционален расстоянию l:

$$Q = -KA\frac{h_2 - h_1}{l} \tag{4.1}$$

где K коэффициент фильтрации.

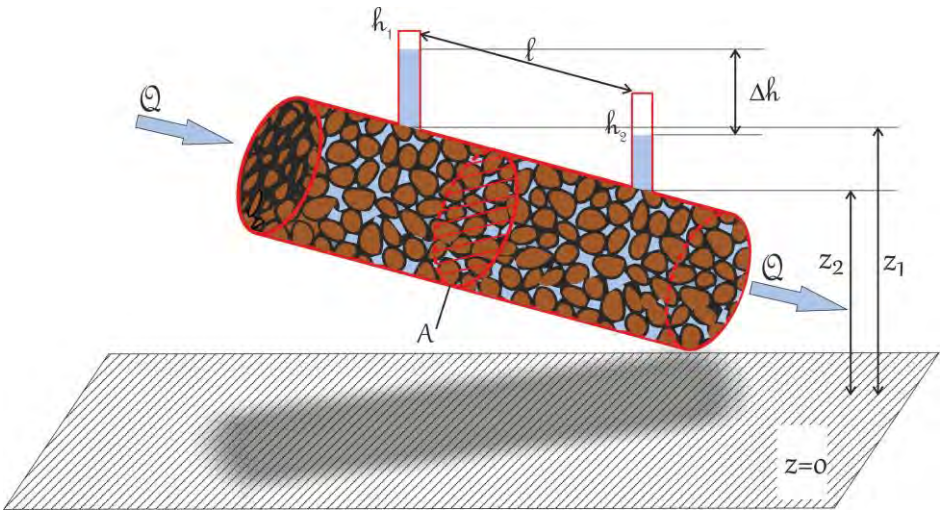


Рисунок 4.4. Закон Дарси

Пусть $q = Q / A$ это объемный расход на единицу площади (скорость Дарси). Тогда дифференциальная форма закона Дарси (4.2):

$$q = -K\frac{dh}{dl} \tag{4.2}$$

В трехмерном пространстве:

$$q_x = -K\frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K\frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K\frac{\partial h}{\partial z} \tag{4.3}$$

Что может быть записано как:

$$q = -K\ grad\ h \tag{4.4}$$

2. Закон сохранения массы (уравнение неразрывности) (рисунок 4.5), из которого следует, что количество воды, поступающей в REV, равно количеству оттуда вытекающему (при установившемся режиме):

$$\frac{\partial q}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}+\frac{\partial q}{\partial z}=0 \tag{4.5}$$

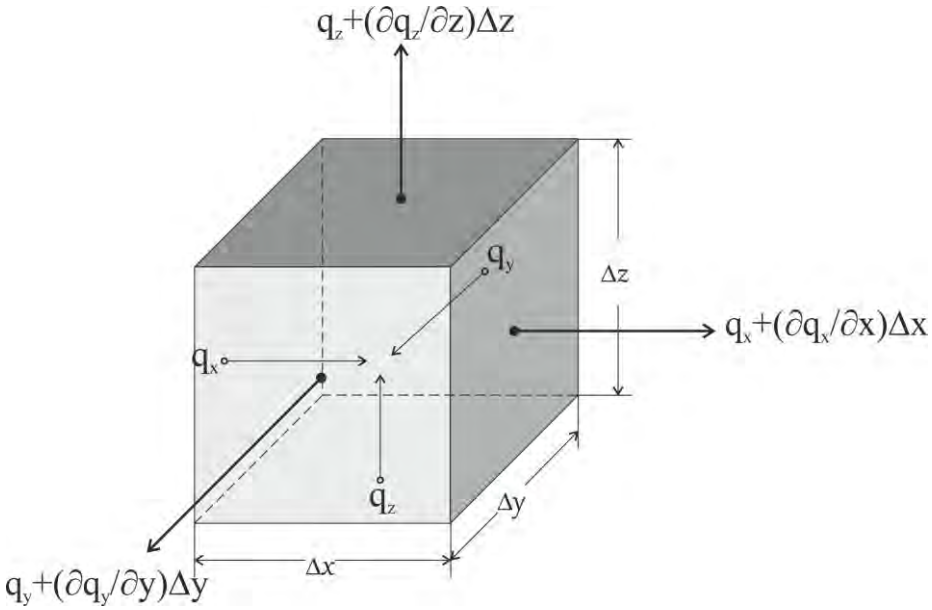


Рисунок 4.5. Уравнение неразрывности [Istok, 1989]

В случае неустановившегося потока:

$$\frac{\partial q}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}+\frac{\partial q}{\partial z}=-S_s\frac{\partial h}{\partial t} \tag{4.6}$$

где S_s коэффициент упругоемкости пласта.

Это уравнение является частным случаем, действительным для несжимаемой жидкости. Уравнение сохранения массы для сжимаемой жидкости:

$$div(\rho U)+\frac{\partial}{\partial t}(\omega\rho)+\rho q=0 \tag{4.7}$$

где U – скорость Дарси,

ω – пористость,

ρ – плотность воды,

q – скорость нагнетания/добычи воды на единицу объема пористой среды,

ρq обозначает существование источника или стока.

Закон Дарси (4.3) и уравнение неразрывности (4.6) объединены в одно уравнение частных производных второго порядка:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(-K\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(-K\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(-K\frac{\partial h}{\partial z}\right)+G=-S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.8)$$

Где G обозначает присутствие источника или стока, объем воды нагнетаемой/получаемой на единицу объема резервуара за единицу времени.

Первым шагом в моделировании является дискретизация исследуемой области. Это делается путем ее замены на узлы и элементы (в данном случае треугольники), которые обозначаются как сетка конечных элементов. Свойства продуктивного пласта (например, коэффициент проницаемости) должны быть определены для каждого элемента, при этом каждому узлу и элементу присваивается номер [Istok, 1989].

До моделирования должны быть определены геометрия, параметры системы, начальные и граничные условия (рисунок 4.6).

Геометрия и параметры системы:

– Толщина продуктивного пласта 40 м.

– Проницаемость продуктивного пласта 2.e-13 м^2.

Граничные условия:

– Постоянный гидравлический напор вдоль южной и северной границ, в соответствии со средними абсолютными высотными отметками. Это условие означает, что уровень воды в региональном масштабе в основном определяется топографией.

В соответствии с данной моделью движения подземных вод XIII пласта обширной территории Чеченской Республики поток жидкости через южную границу равен 0.62 м^3/с что соответствует скорости фильтрации 1.4e-7 м/с. Гонсировский [1966] рассчитал движение подземных вод XIII пласта по формуле, которая является региональной формой закона Дарси:

$$Q = K \cdot m \cdot B \cdot i \quad (4.9)$$

где K – коэффициент фильтрации,

m – мощность пласта,

B – ширина фронта фильтрации,

i – пьезометрический уклон.

При условии, если *K* равно 2 м/сут, мощность пласта – 40 м, ширина фронта фильтрации – 95 км, пьезометрический уклон – 6e-3, то поток подземных вод через южную границу составляет 0.53 $м^3/с$, что относительно близко к результатам, полученным в ходе моделирования.

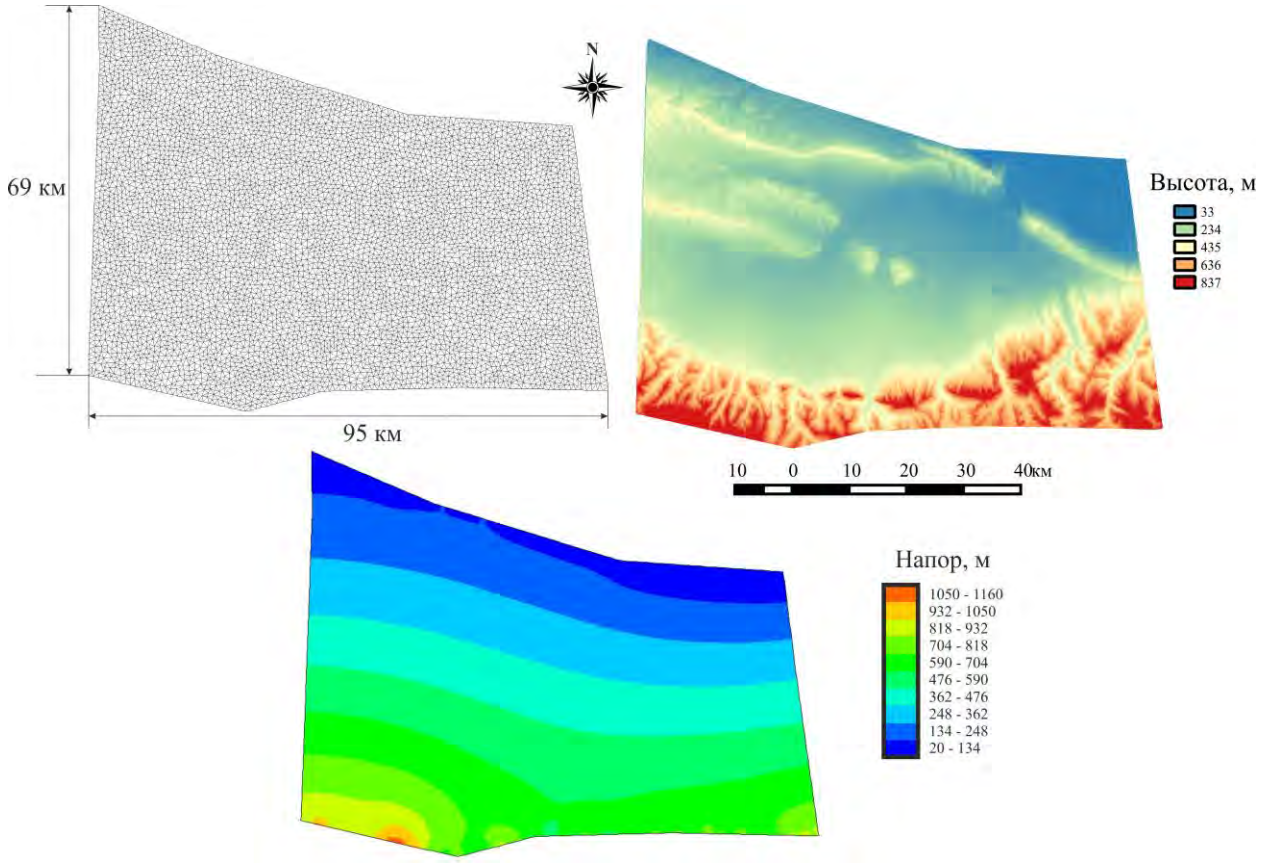


Рисунок 4.6. Сетка, топография территории и результаты моделирования

Результаты оценки регионального потока подземных вод учтены при моделировании обратной закачки в «дублете», описанного в следующей части.

4.2. Моделирование использования термальных подземных вод Ханкальского месторождения

Более детальное моделирование обратной закачки использованных термальных вод в XIII пласт проведено после того, как определены общие параметры потока подземных вод на территории Чеченской Республики. Симуляция основана на местной 3D модели.

Процесс обратной закачки термальной воды может быть разделен на два:

движение подземных вод и перенос тепла.

Изменение вязкости и плотности воды в зависимости от температуры должны быть приняты во внимание, так для жидкости с переменной плотностью закон Дарси можно записать в виде:

$$U = -\frac{k}{\mu}(\rho_0 g \nabla h + (\rho - \rho_0) g \nabla z) \tag{4.10}$$

где k проницаемость (м^2), связанная с коэффициентом фильтрации отношением:

$$K = k\frac{\rho g}{\mu},$$

μ динамическая вязкость воды (Па·с),

ρ_0 плотность воды в нормальных условиях (кг/м^3),

ρ плотность воды (кг/м^3),

g ускорение свободного падения (м/с^2),

z вертикальная координата (м) (рисунок 4.1.3),

h «псевдо-напор», который определяется как:

$$h = \frac{p}{\rho_0 g} + z,$$

где p давление воды (Па).

Уравнения (4.7) и (4.10) могут быть объединены в одно, учитывая наличие источников или стоков:

$$div\left\{\frac{k\rho g}{\mu}(\rho_0 \nabla h + (\rho - \rho_0)\nabla z)\right\} = S_s \rho_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \rho q \tag{4.11}$$

где S_s коэффициент упругоемкости (м$^{-1}$).

Для переноса тепла следующие механизмы должны быть приняты во внимание:

– Адвекция (конвекция), перенос тепла движущейся водой;

– Кинематическая тепловая дисперсия в водоносном горизонте (тепловой поток вследствие локальной неоднородности поля скоростей) (рисунок 4.7);

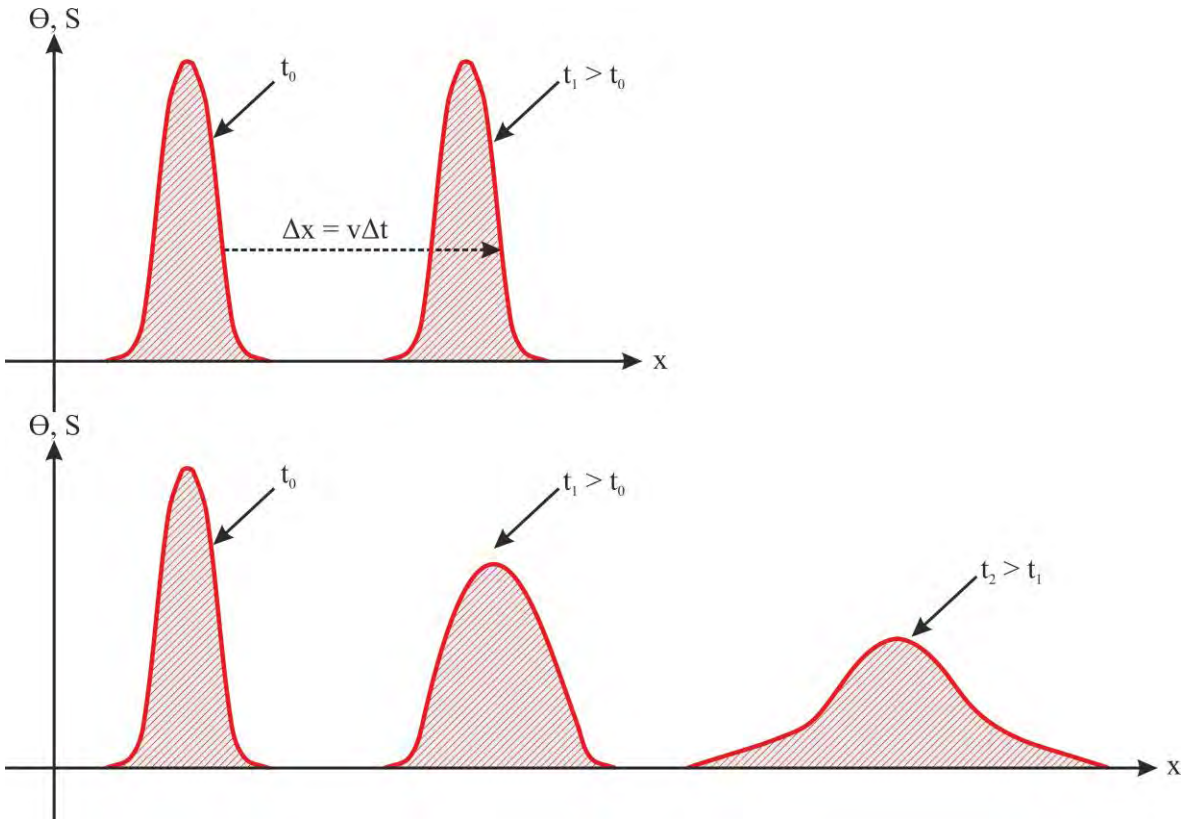


Рисунок 4.7. Пример адвекции (сверху) и дисперсии (снизу) в одномерном пространстве [Pruess, 2002]

– Теплопроводность в водоносном горизонте и перекрывающих и подстилающих непроницаемых отложениях (тепловой поток в результате температурного градиента).

Конвекция является доминирующим механизмом. Обмен с окружающими слоями за счет теплопроводности задерживает развитие холодного фронта. Теплопроводность и дисперсия в водоносном горизонте имеют эффект распространения переходной зоны между холодной и нагретой подземной термальной водой [Goblet, 2005].

Процесс теплопередачи описывается уравнением баланса количества тепла, присутствующего в элементе объема [Goblet, 2005]:

$$div(\psi_T) + \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} + qt = 0 \qquad (4.12)$$

Где $\psi_T = \psi_C + \psi_D + \psi_d$, ψ_C – передача тепла адвекцией, ψ_D – передача тепла дисперсией, ψ_d – передача тепла в результате теплопроводности, γ – объемная теплоемкость среды, θ – температура, qt – внешний источник тепла

или холода.

Поток тепла в результате адвекции:

$$\psi_C = U\gamma_E\theta \tag{4.13}$$

γ_E – объемная теплоемкость воды.

Дисперсионный поток тепла:

$$\psi_D = -\bar{\bar{\alpha}}\,|U|\,\gamma_E\nabla\theta \tag{4.14}$$

$\bar{\bar{\alpha}}$ – коэффициент дисперсии (м).

Поток тепла в результате теплопроводности выражается законом Фурье:

$$\psi_d = -\Lambda\nabla\theta \tag{4.15}$$

где Λ коэффициент теплопроводности среды.

Исходя из (4.12), (4.13), (4.14), (4.15) получается уравнение теплового баланса, решаемое в программе Metis [Goblet, 2005]:

$$div\left\{\left(\bar{\bar{\alpha}}\gamma_E\,|U|+\Lambda\right)\nabla\theta - \gamma_E U\theta\right\} - \gamma\frac{\partial\theta}{\partial t} - qt = 0 \tag{4.16}$$

Результаты оценки температуры в пределах области и пространственное размещение XIII продуктивного пласта термальных вод, полученных после применения геостатистических методов [Фархутдинов и др., 2015], используются для расчета начальных условий системы (температуры и геотермального потока) и в качестве основы для создания сетки, соответственно.

Процесс подготовки данных и моделирования проходит несколько этапов (рисунок 4.8):

1. Создание двухмерной сетки на основе программы Delos [Stab, 2006] со сгущением элементов около скважин.

2. Импорт узлов сетки в программу Isatis для оценки z – глубины залегания кровли XIII пласта согласно параметрам, выбранным в ходе геостатистического анализа (Глава 3.2).

3. Экспорт данных из программы Isatis и создание трехмерной сетки, с учетом глубины продуктивного пласта и границ модели.

4. Импорт узлов трехмерной сетки в программу Isatis для оценки температуры и геотермального потока с параметрами, выбранными в ходе

геостатистического анализа (Глава 3.3).

5. Моделирование теплового потока при установившемся режиме в программе Metis с учетом полученной температуры и геотермального потока для расчета температуры для узлов, которые не были охвачены геостатистической оценкой на 4 этапе, что дает начальную температуру в соответствии с геостатистической оценкой.

6. Моделирование тепломассопереноса с помощью программы Metis.

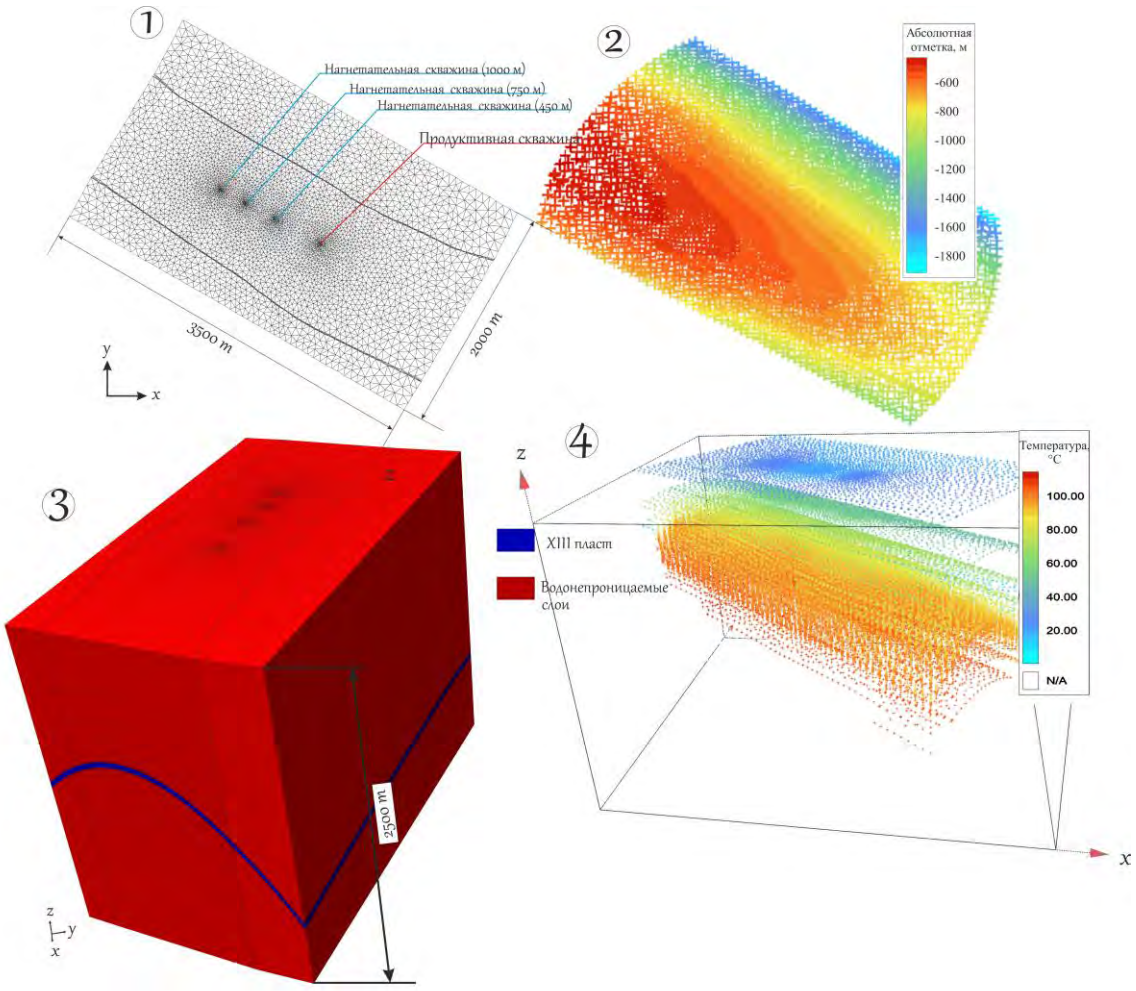


Рисунок 4.8. Этапы подготовки данных для моделирования: 2D сетка (сверху слева), оценка глубины кровли XIII пласта каждого узла 2D сетки (сверху справа), 3D сетка (снизу слева), оценка температуры каждого узла 3D сетки (снизу справа)

Следует отметить, что модель упрощена вследствие сравнительно небольшого количества исходных данных: разломы были представлены в качестве вертикальных и при геостатистической оценке на стадиях 2 и 4 они не были приняты во внимание.

Параметры водоносного горизонта, граничные и начальные условия должны быть определены до моделирования (таблица 4.1., рисунок 4.9). Использовались фондовые данные – результаты опытно-фильтрационных работ, некоторые теплофизические данные (Глава 2), а также литературные источники с параметрами средних значений теплопроводности и теплоемкости для различных типов горных пород [Marsily, 1981].

Параметры продуктивного пласта:

– Мощность 47 м.

– Проницаемость 6.77e-13 м^2 (которая соответствует водопроводимости пласта 90 м, при мощности 47 м, вязкости и плотности жидкости температурой 95 °C).

– Поперечная и продольная тепловая дисперсия 10 × 2 м.

– Коэффициент упругой емкости пласта 5e-6.

– Объемная теплоемкость воды 4.18 МДж/м^3/°C.

– Объемная теплоемкость водоносного горизонта 2.485 МДж/м^3/°C, при расчете которой приняты во внимания параметры воды и пород продуктивного пласта [Marsily, 2004]:

$$\rho^{"}C^{"} = \omega\rho C + (1-\omega)\rho' C', \tag{4.17}$$

где $\rho^{"}$ – плотность резервуара, $C^{"}$ – удельная теплоемкость резервуара, ω – пористость породы, ρ – плотность породы, C – удельная теплоемкость породы, p' – плотность воды, C' – удельная теплоемкость воды.

– Объемная теплоемкость непроницаемых слоев выше продуктивной толщи 2.2 МДж/м^3/°C.

– Объемная теплоемкость непроницаемых слоев ниже продуктивной толщи 2.3 МДж/м^3/°C.

– Теплопроводность резервуара 2.3 Ватт/(м·K).

– Теплопроводность непроницаемых слоев толщи выше продуктивной 1.52 Ватт/(м·K).

– Теплопроводность непроницаемых слоев толщи ниже продуктивной 1.5 Ватт/(м·K).

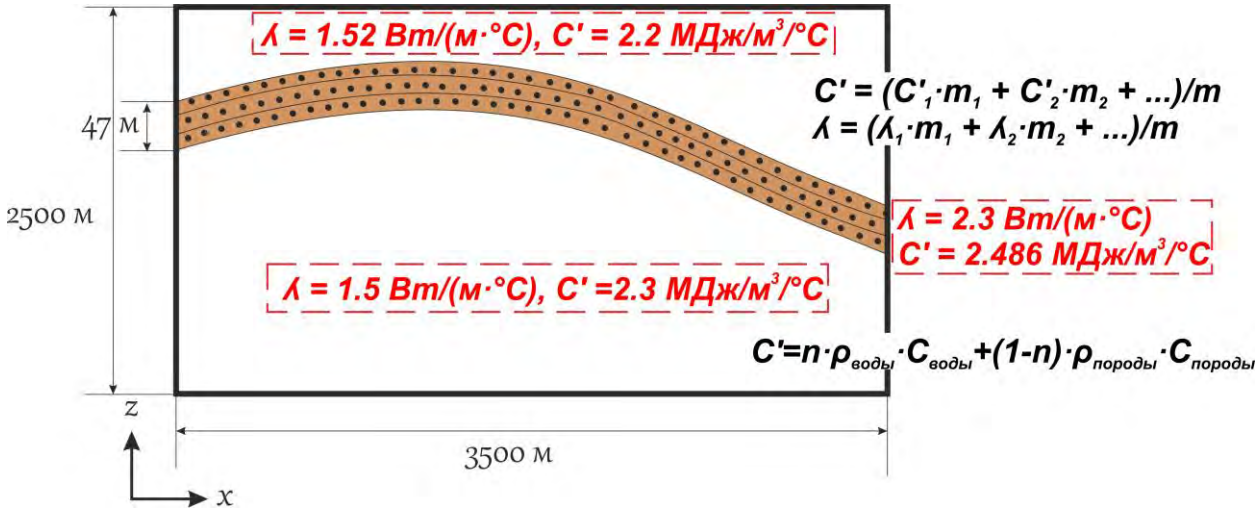


Рисунок 4.9. Теплофизические параметры моделирования

Таблица 4.1. Теплофизические параметры моделирования

Глубина залегания, м		Мощность, м	Геологический разрез	Теплопроводность, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, МДж/м^3/°С	
от (верх)	до (низ)						
0	35	35	Четвертичные отложения	2.1	1.53	2.1	2.23
35	700	665	Сарматские отложения	1.4		2.2	
700	843	143	Караганские отложения (до XIII пласта)	2		2.4	
843	890	47	XIII продуктивный пласт	2.3	2.3	2.486	2.486
890	1290	400	Караган-чокракские отложения (после XIII пласта)	1.8	1.5	2.4	2.28
1290	2500	1210	Майкопские отложения	1.4		2.25	

Граничными условиями являются (рисунок 4.10):

– Нагнетание воды 200 м^3/час 7 месяцев в году с постоянным потоком тепла 10051 МВатт, что соответствует температуре воды 45 °С.

– Тепловой поток от основания моделируемой области – 82 мВт/м^2 (по данным Курбанова [2001]).

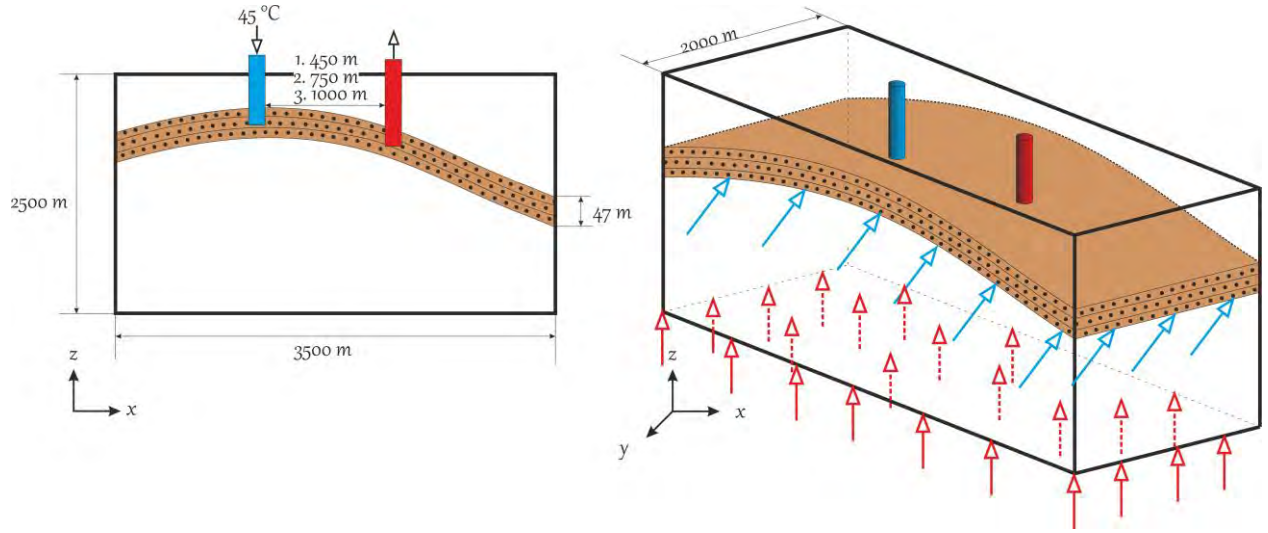


Рисунок 4.10. Схематический рисунок модели дублета. Красные и синие стрелки обозначают тепловой поток и направление движения подземных вод соответственно.

В случае учета естественного движения подземных вод для создания скорости фильтрации 1.4e-7 м/с устанавливались две фиктивные скважины – нагнетательная и продуктивная, по одной вертикальной линии каждая в 100 км от центра между скважинами «дублета» (рисунок 4.11).

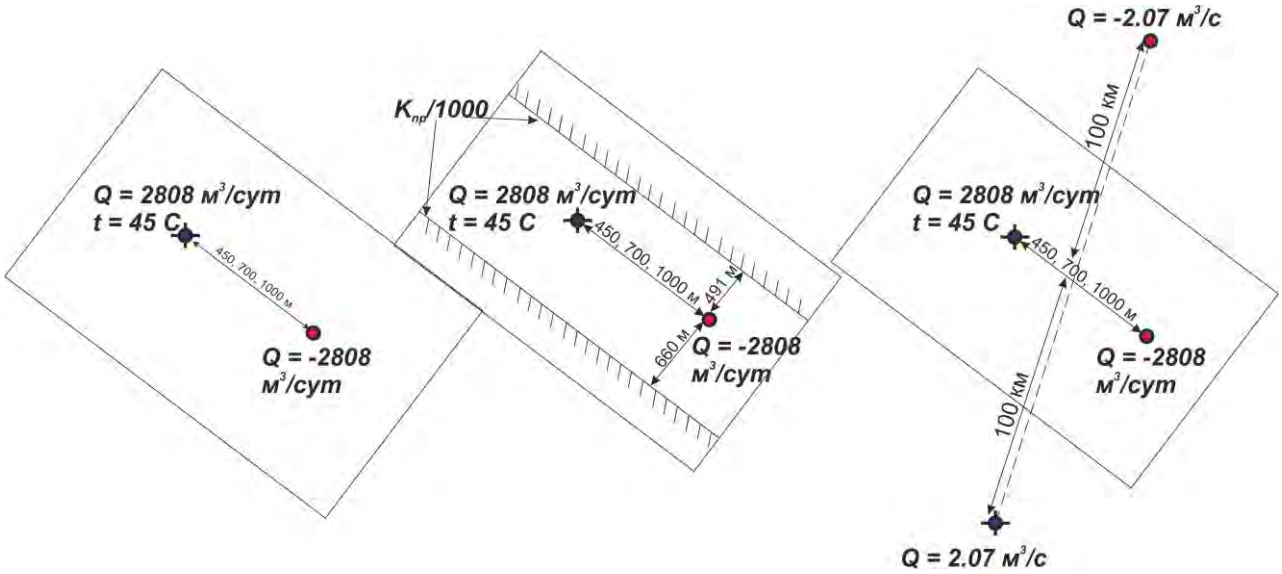


Рисунок 4.11. Граничные условия моделирования

Для определения дебита фиктивных скважин использовалась формула:

$$U = \frac{Q}{2\pi \cdot R \cdot m} \tag{4.18}$$

По данной формуле дебит продуктивной скважины и закачка в нагнетательную скважину составляют 2.07 м^3/с.

Изменение вязкости жидкости в зависимости от ее температуры учитывается в программе Metis уравнением Бигнама [Marsily, 2004]. В 1988 г. проведены лабораторные анализы термальных вод Ханкальского месторождения, включая изменение вязкости в зависимости от температуры [Крылов, 1988ф]. Результаты хорошо коррелируют с уравнением, используемым при моделировании (рисунок 4.12). Данный факт объясняется низкой минерализацией вод XIII пласта Ханкальского месторождения, что позволяет ограничиться моделированием тепломассопереноса, не принимая во внимание химической составляющей жидкости.

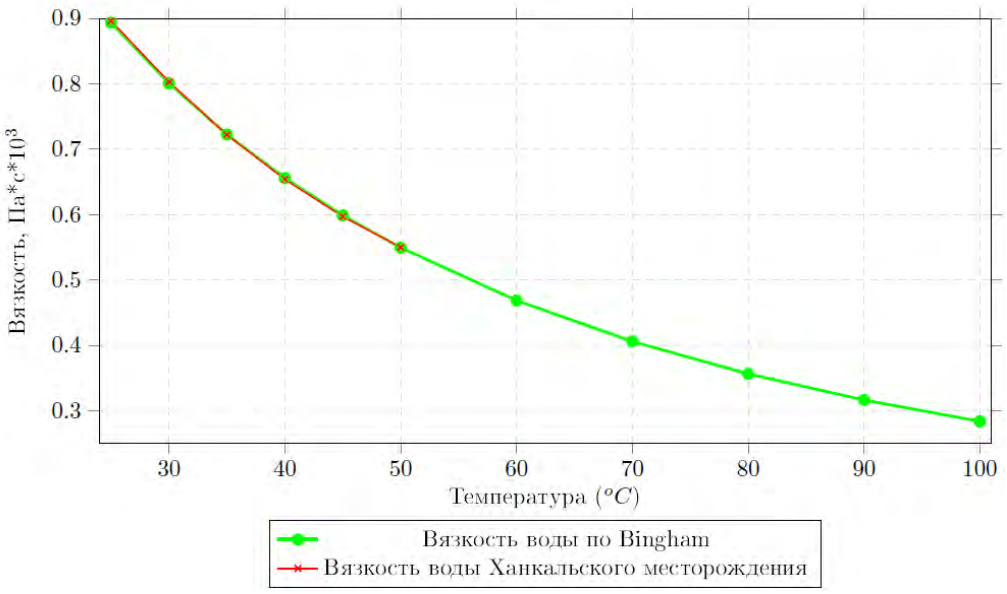


Рисунок 4.12. Вязкость воды в зависимости от температуры

Вначале решалась задача потока подземных вод в пористой насыщенной среде для установившегося режима (рисунок 4.13), затем рассчитывалось изменение температуры.

В ходе моделирования опробованы различные гипотезы и варианты, в которых учитывались (таблица 4.2., рисунок 4.14., 4.15., 4.16):

– Расстояние между продуктивной и нагнетательной скважинами.

– Проницаемость двух главных разломов месторождения.

– Влияние естественного движения подземных вод XIII пласта.

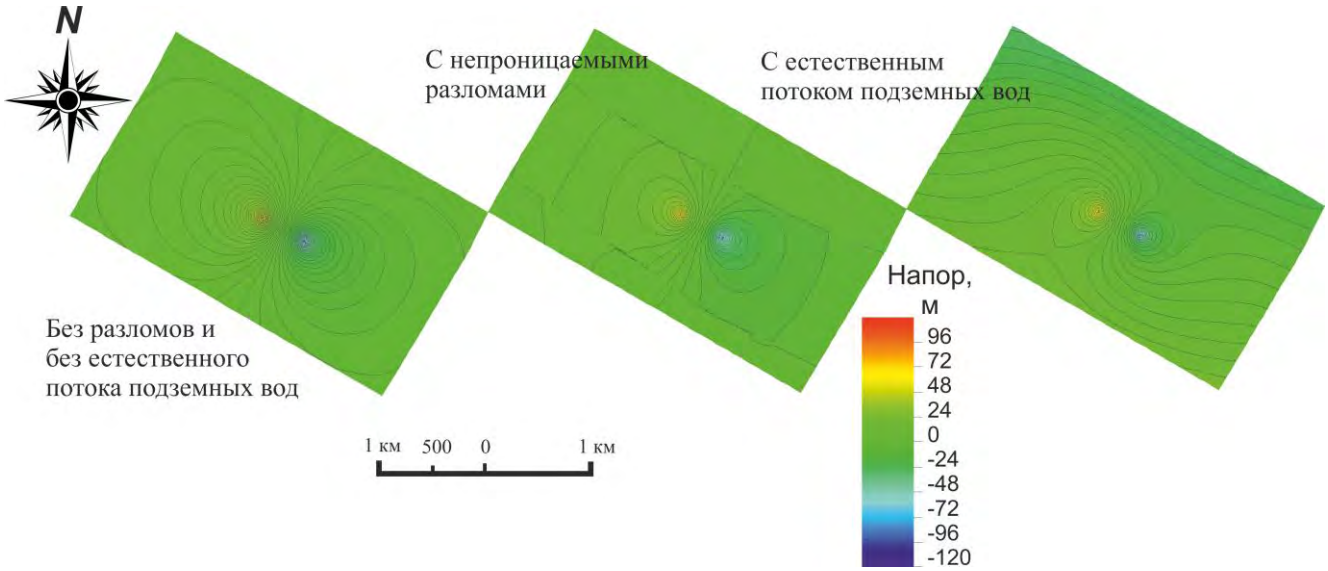


Рисунок 4.13. Результаты моделирования движения подземных вод (расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

Результаты сравнивались с аналитическим решением изменения температуры на устье продуктивной скважины «дублета» [Gringarten et Sauty, 1975]:

$$\frac{T_0 - T_w(t)}{T_0 - T_i} = \int erfc\left\{\frac{d(S_{\max}/D^2)}{d(\psi/Q)} \cdot \left[\lambda(t_D - \frac{d(S_{\max}/D^2)}{d(\psi/Q)}\right]^{-1/2}\right\} d\left(\frac{\psi}{Q}\right) = T_{wD}\left[f(\psi), \lambda, t_D\right] \qquad (4.19)$$

где $\lambda = (\rho_w C_w \rho_A C_A / K_R \rho_R C_R)(Qh/D^2)$, $\rho_w C_w$ – объемная теплоемкость воды, $\rho_A C_A$ – объемная теплоемкость резервуара, K_R – теплопроводность непроницаемых слоев, $\rho_R C_R$ – объемная теплоемкость непроницаемых слоев, h – мощность продуктивного пласта, Q – дебит нагнетательной/продуктивной скважин, D – расстояние между продуктивной и нагнетательной скважинами, $t_D = (\rho_w C_w / \rho_A C_A)(Qt/D^2h)$, T_0 – начальная температура резервуара и перекрывающих/подстилающих слоев, T_i – температура нагнетаемой воды, $S_{\max}$ – общая площадь потока между нагнетательной и продуктивной скважинами.

Таблица 4.2. Результаты моделирования

Условие	$\Delta T = 1^o C$, Год	ΔT, °C (50 лет)
1	2	3
Расстояние 450 м		
Без естественного подземного потока и без влияния разломов	5.33	25.82

1	2	3
С непроницаемыми разломами	5.25	27.35
С естественным подземным потоком	5.75	23.33
Аналитическое решение	6.3	24.07
Расстояние 750 м		
Без естественного подземного потока и без влияния разломов	16.5	14.61 °C
С непроницаемыми разломами	15.17	17.04 °C
С естественным подземным потоком	18.42	11.76 °C
Аналитическое решение	19.3	11.92 °C
Расстояние 1000 м		
Без естественного подземного потока и без влияния разломов	31.33	6.43 °C
С непроницаемыми разломами	27.5	9.11 °C
С естественным подземным потоком	38.25	3.63 °C
Аналитическое решение	37.8	3.66 °C

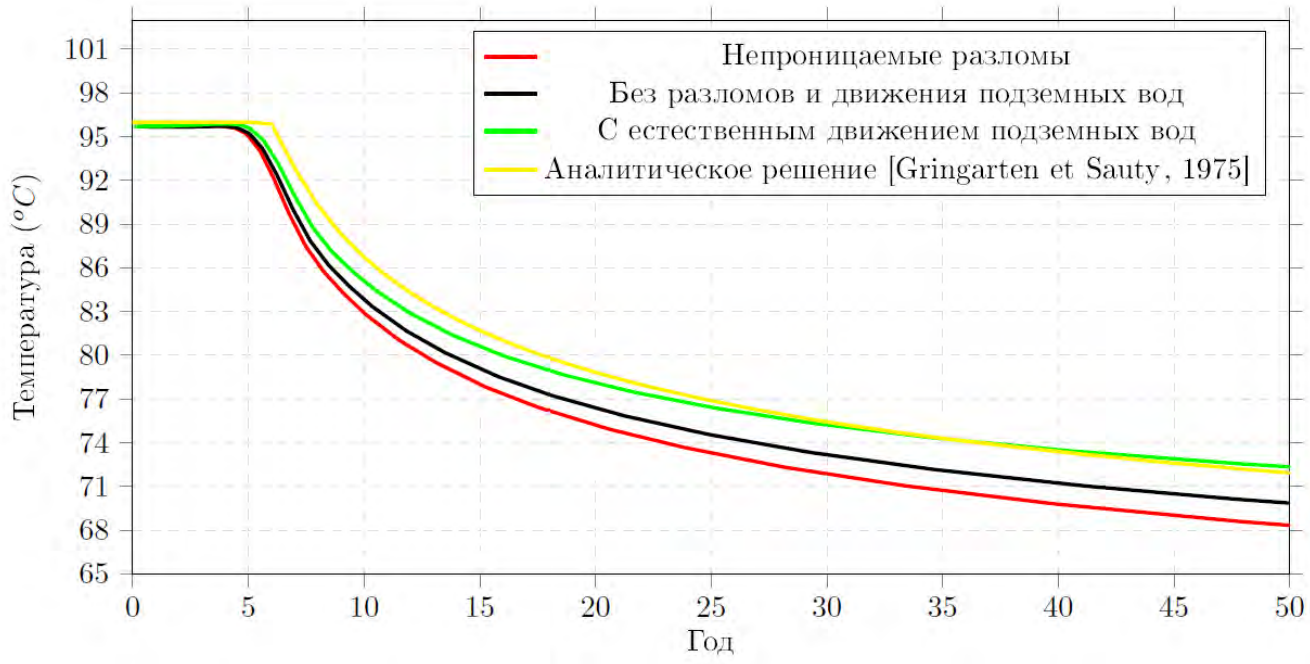


Рисунок 4.14. Изменение температуры в продуктивной скважине при эксплуатации (расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

Наличие непроницаемых разломов при моделировании не имеет большого влияния на температуру продуктивной скважины, потому что забои скважин «дублета» находятся на достаточном расстоянии от разрывных нарушений. Естественный поток подземных вод в XIII слое в значительной степени задерживает снижение температуры в продуктивной скважине.

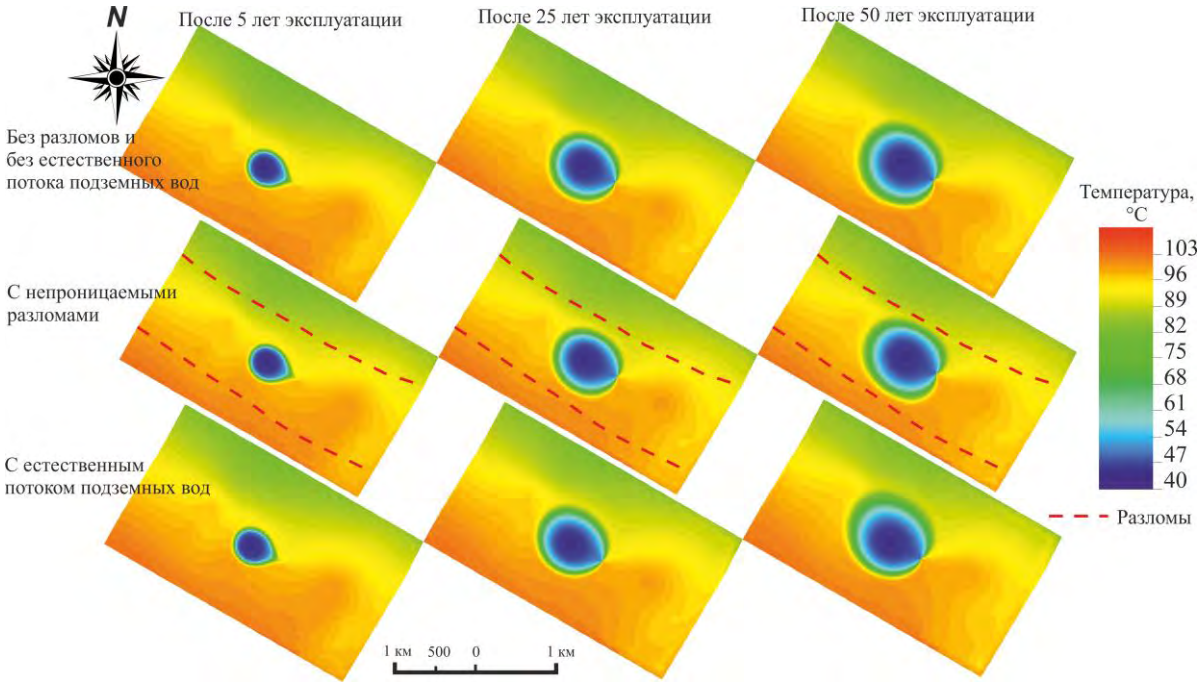


Рисунок 4.15. Изменение температур XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод при эксплуатации: 5 лет, 25 лет и 50 лет (расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

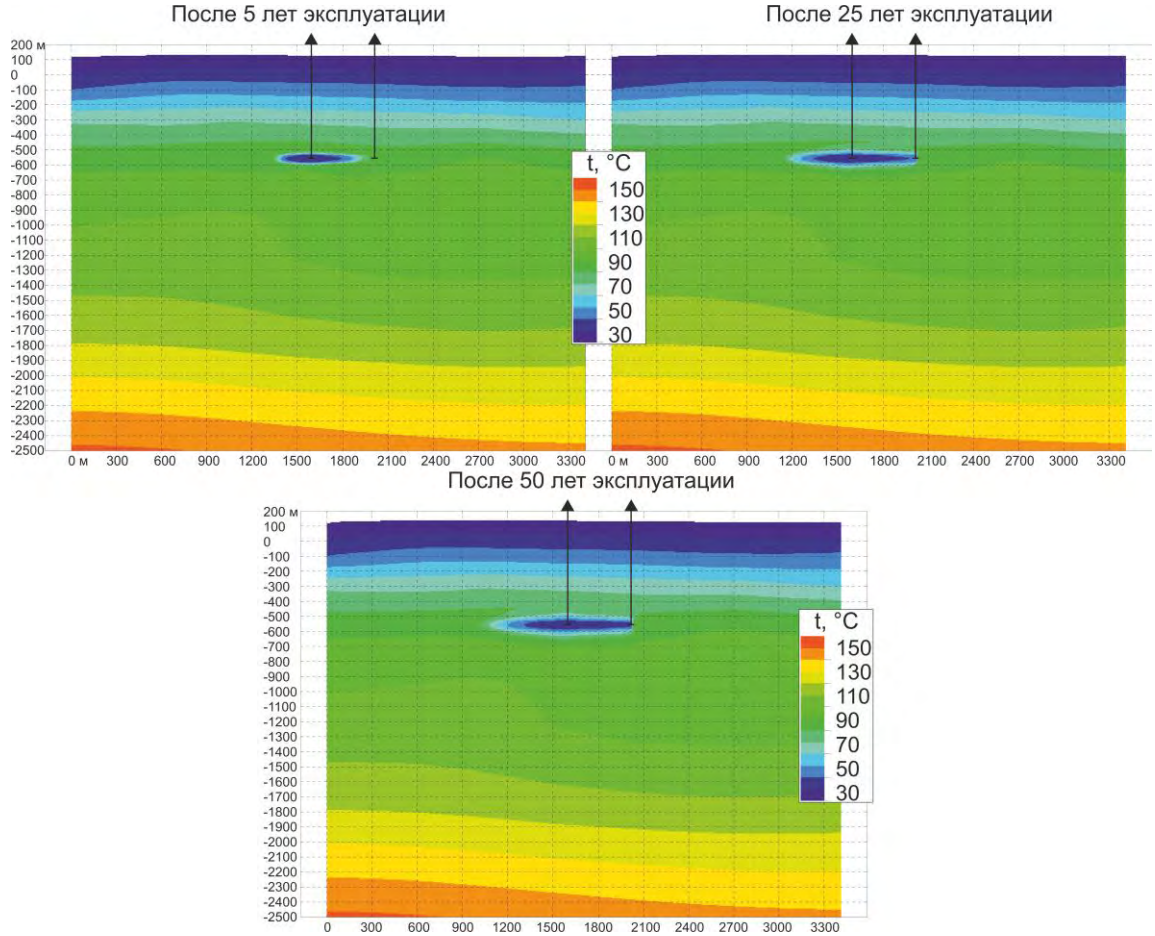


Рисунок 4.16. Изменение температур Ханкальского месторождения термальных подземных вод при эксплуатации: 5 лет, 25 лет и 50 лет (вид сбоку, расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

По результатам моделирования обратной закачки отработанной термальной воды в XIII пласт Ханкальского месторождения, следует отметить, что важно размещать скважины параллельно двум разломам с забоями продуктивной скважины в южной части и нагнетательной скважины в северной части. Рекомендуемое расстояние между забоями нагнетательной и продуктивной скважин составляет более 750 м, что позволит избежать значимого снижения температуры в скважине через 25–30 лет эксплуатации – обычного периода жизни скважинного оборудования, после чего, возможно, потребуется его замена.

Дальнейшим было исследование восстановления теплового ресурса XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод. Производилась симуляция эксплуатации резервуара в течение 50 лет (расстояние между скважинами равно 450 м) с последующей остановкой разработки (рисунок 4.17., 4.18).

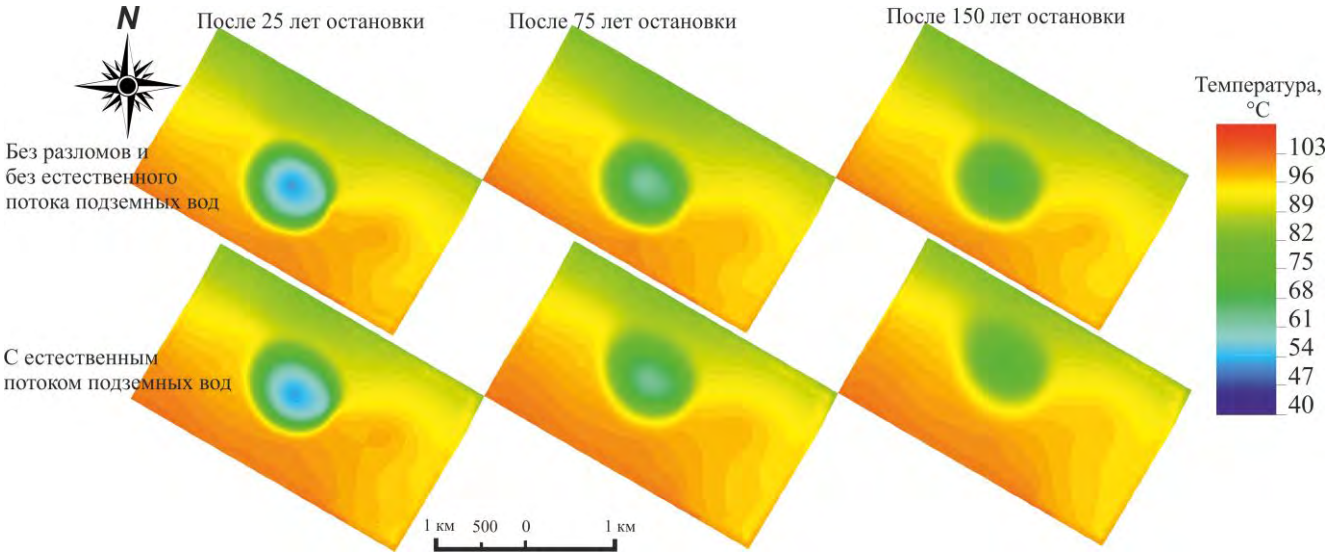


Рисунок 4.17. Изменение температур XIII продуктивного пласта Ханкальского месторождения термальных подземных вод после завершения эксплуатации: 25 лет, 75 лет и 150 лет (расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

Когда естественный поток подземных вод учитывается, полное восстановление температуры в добывающей скважине происходит через 113.5 лет после остановки эксплуатации. Без учета этого фактора температура восстанавливается на 56.4% через 150 лет после завершения разработки.

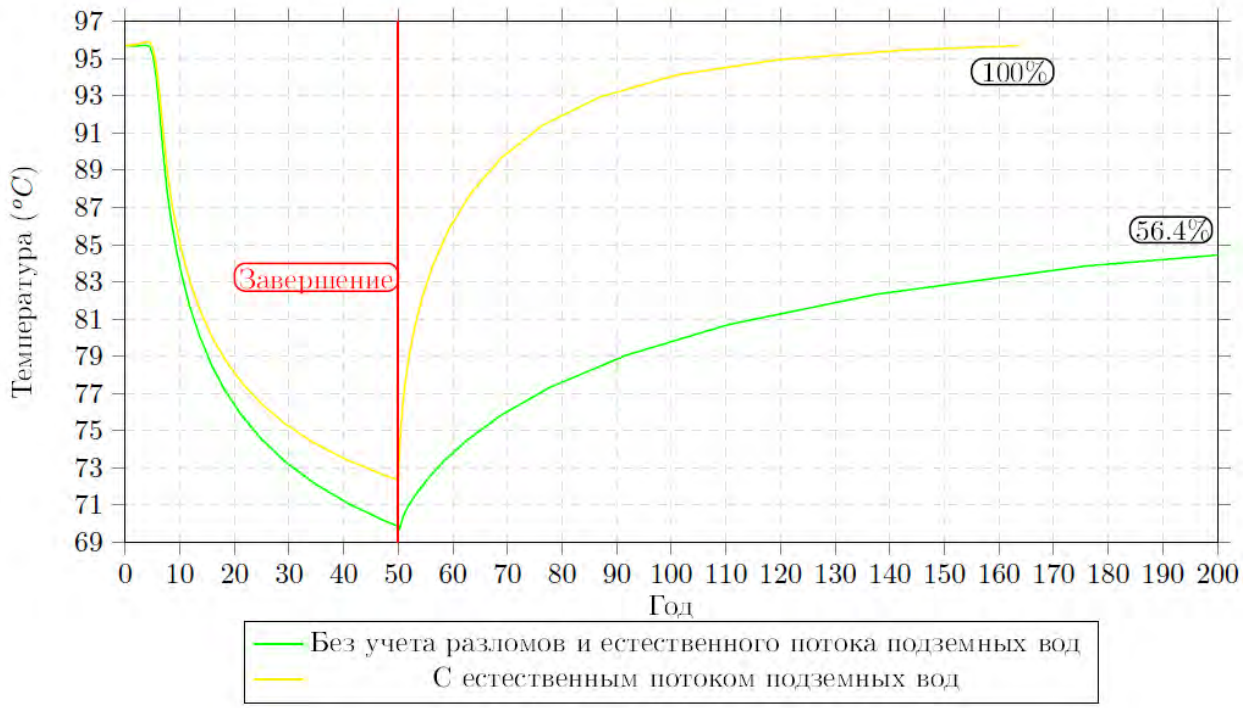


Рисунок 4.18. Изменение температуры в продуктивной скважине в течение 50-летней эксплуатации и после завершения разработки (расстояние между забоями скважин «дублета» – 450 м)

По результатам математического моделирования изменения температур после остановки эксплуатации Ханкальского месторождения термальные подземные воды XIII пласта быть вновь использованы после некоторого периода времени с учетом сравнительно высокой скорости восстановления температуры.

Глава 5. Рекомендации по дальнейшей эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод

На Ханкальском месторождении термальных подземных вод применяется дублетная циркуляционная схема отбора тепла – решение, принятое после изучения мирового, в частности французского опыта эксплуатации термальных подземных вод. По этой причине в составлении рекомендаций по дальнейшей разработке Ханкальского месторождения использовался сравнительный анализ гидрогеологических, геотермических, гидрогеохимических характеристик термальных вод караган-чокракских отложений юго-востока ВПАБ и среднеюрских отложений Парижского артезианского бассейна.

Франция является одной из стран, достигших хорошие результаты в использовании среднетемпературных термальных вод (55–85 °C). Основной объект эксплуатации – резервуар возраста Доггер (средняя юра) в Парижском бассейне. Парижский бассейн находится на севере Франции, является внутриплатформенным осадочным бассейном почти овальной формы площадью 110,000 км^2 – самый большой береговой осадочный бассейн во Франции. Его образование связывают с рифтогенезом в перми-триасе. Формации геотермального резервуара протягиваются на более чем 15000 км^2, располагаясь на глубинах от 1500 до 2000 м. Наиболее продуктивные слои относятся к Батскому ярусу, представлены оолитовыми известняками мощностью от 5 до 45 м. В среднем общая толщина продуктивного слоя порядка 20 м, с 10–15 высокопроницаемыми (2–20 Дарси) слоями. Температуры формации резервуара варьируют от 55 до 85 ºC, геотермический градиент территории меняется от 2.75 до 4.1 °C/100 м. Минимальными температурами характеризуются участки на глубине 1650 м северо-восточнее Парижа, где средний температурный градиент равен 2.75 ºC/100 м. Эта территория относится к аномальной зоне, существование которой объясняется перемещением холодных вод из перекрывающих горизонтов вниз к резервуару. Максимальный градиент в 4.1 ºC/100 м относится к району

Валь–де–Марн, юго–восточнее Парижа. Средняя температура термальных вод, получаемых на устье скважин – 70 °С, средний дебит продуктивной скважины – 175 м^3/час, средняя температура вод, закачиваемых обратно – 45 °С. Минерализация вод увеличивается от 6.4 г/л на юго-востоке, где резервуар выходит на поверхность, до 35 г/л в самой глубокой области. Минерализация специфична для определенных слоев и не обязательно зависит от глубины. Воды содержат большое количество сульфидов, что приводит к коррозии скважинного оборудования [Lopez et al., 2010].

Разработке геотермального резервуара Парижского бассейна благоприятствовали 3 технических и экономических фактора [Menjoz, 1990]:

– Рациональная глубина продуктивного резервуара термальных вод при характеристиках (температура и дебиты), подходящих для обеспечения сетей отопления.

– Рынок сбыта тепла с высоко населенными территориями, где уместно использование низко- и среднетемпературных вод.

– Государственные меры страхования, стимулирующие разработку нового ресурса энергии.

Развитие технологии «дублетов» сделало возможным геотермальную эксплуатацию Парижского бассейна. Технология циркуляционной схемы теплоотбора имеет несколько преимуществ [Lopez et al., 2012]:

– Отсутствие отрицательного воздействия на окружающую среду и затрат на химическую обработку флюида для сброса на поверхность земли, т.к. термальная вода после снятия теплового потенциала полностью закачивается обратно.

– Сохранение дебита продуктивной скважины, в то время как эксплуатация без обратной закачки постепенно снижает пластовое давление, что, в конечном счете, влияет на условия эксплуатации.

– Стабилизация давления благодаря обратной закачке и ограничение территории влияния его изменения, что позволяет выработать эффективную стратегию для оптимального использования ресурса водоносного горизонта.

Основные проблемы эксплуатации Парижского бассейна коррозия и осаждение сульфидов железа в скважинах, приводящие к прогрессивному снижению дебитов и интенсивности отбора вод. Для ее решения скважины очищаются механически, затем проводятся превентивные мероприятия (инъекция ингибиторов коррозии). 42 скважины (21 «дублет») закрыты из-за технических и экономических причин, но не в результате истощения ресурса. Однако считается, что природный тепловой поток является недостаточным для поддержания температур на неопределенный срок. В ходе разработки Парижского бассейна артезианских вод применялся и используется геостатистический анализ и оценка, включая построения карт минерализации, температуры, водопроводимости и др., а также компьютерное моделирование. По прогнозам экспертов, геотермальная энергия будет оставаться неотъемлемой частью системы отопления в Парижском бассейне как минимум еще 40 лет [Lopez et al., 2010]. Проводится математическое моделирование для прогноза снижения температуры и для выбора наиболее рационального расположения новых «дублетов».

На Ханкальском месторождении термальных вод было решено установить подобную циркуляционную схему теплоотбора с прохождением флюида через теплообменник с последующей закачкой обратно в пласт. В сравнении с термальными водами Парижского бассейна месторождения Чеченской Республики обладают следующими преимуществами (таблица 5.1):

1. Более высокая температура флюида (на 10–15 °С).
2. Низкая минерализация вод, что означает сравнительно невысокую коррозионную активность.
3. Сравнительно большая мощность некоторых продуктивных слоев (к примеру, средняя мощность XIII пласта Ханкальского месторождения – 47 м).

Имеют место также следующие недостатки:

1. Множество продуктивных пластов опробовалось только в режиме самоизлива при сравнительно низких дебитах.
2. Пласты представлены песчаниками с прослоями и линзами глин, что может негативно влиять на приемистость скважин.

3. Тектоническая структура месторождений имеет сложный характер.

Таблица 5.1. Характеристика караган-чокракского комплекса Чеченской Республики и Парижского бассейна

	Караган-чокракский комплекс	Парижский бассейн (Доггер)
Глубина, м	600–3500	1500–2000
Геотермальный градиент, °С/м	0.04	0.035
Температура воды на устье скважины, °С	65–110	58–85
Дебит по различным скважинам, $м^3$/сут	285–3300	1200–14400
Минерализация, г/л	0.7–13.6	6–38.8
Водопроводимость, $м^2$/сут	25–175	33–182
Тепловой поток, $мВт/м^2$	30–90	45–60
Период разработки, годы	1974–1994	1969–2016
Основные проблемы	Приемистость нагнетательных скважин	Коррозия и отложение солей, постепенное охлаждение ресурса

Сравнительный анализ подтверждает высокую перспективность разработки среднемиоценового караган-чокракского комплекса Чеченской Республики: большие значения геотермального градиента позволяют достигать высокие температуры на меньшей глубине, тепловой поток способствующий восстановлению ресурса при обратной закачке охлажденных вод выше, меньше потенциально необходимые затраты на борьбу с коррозией и отложением солей. В тоже время необходимо учитывать сложность геологического строения изучаемой территории – складчатость и присутствие разломов, а также особенности литологии продуктивных пластов. Использование успешного продолжительного опыта (более 45 лет) разработки Парижского артезианского бассейна дает большое преимущество при эксплуатации месторождений Чеченской Республики, позволяя учесть возможные проблемы и способы их решения.

В 1980-е годы на Ханкальском месторождении существовал опыт закачки вод. Термальные воды непосредственно с насосной станции подавались в систему отопления, после чего частично сбрасывались на рельеф, частично транспортировались по поверхностному трубопроводу к насосной станции

поддержания пластового давления. При транспортировке использованных термальных вод на определенное расстояние для закачки в нагнетательные скважины неизбежно снижение температуры. Объем закачиваемых вод по сравнению с добычей составлял 50–60%, «дублет» же предполагает закачку 100% полученной термальной воды обратно в резервуар.

В то же время эксплуатационные запасы Ханкальского месторождения должны быть пересчитаны, т.к. заявленный дебит будет зависеть также от приемистости нагнетательной скважины, что является одной из основных проблем продуктивных слоев, представленных песчаником.

В настоящее время аварийные скважины пласта закрыты, эксплуатация горизонта на Октябрьском нефтяном месторождении завершена и не ведется на Гойтинском месторождении термальных подземных вод, поэтому созданы условия для более точной оценки фильтрационных параметров. Перед началом исследования необходимо произвести режимные наблюдения на старых скважинах пласта и нагнетательной и продуктивной скважинах «дублета». Измерение устьевых давлений позволит также составить более детальную карту пьезоизогипс по XIII пласту в отличие от ранее составленных обобщенных карт для караганских и чокракских отложений.

В ходе опытно-фильтрационных работ рекомендуется проведение откачки с поддержанием постоянного дебита 200 $м^3$/час с режимными наблюдениями за снижением давления (уровня) на скважинах XIII пласта с последующей остановкой и регистрацией восстановления уровня.

Одними из основных проблем, с которыми столкнулись французские исследователи, являлись коррозия и отложение солей. Изменение температуры флюида и давления при движении термальных вод из водоносного горизонта к поверхностным установкам может привести к осаждению растворенных частиц. Осаждение может происходить особенно быстро на холодной стороне теплообменника или в местах падения давления, что приводит к дегазации кислотных газов (H_2S, CO_2). Дальнейшее осаждение может происходить в результате изменений в составе жидкости. Например, богатые сульфидами

жидкости могут вступать в реакцию с железом при коррозии обсадных труб, что приводит к образованию сульфидов железа. Кроме этого, в образовании отложений на стенках трубопроводов могут участвовать бактерии. Отсутствие кислорода в воде значительно снижает скорость коррозии корпуса из углеродистой стали. Однако данный материал не коррозийно устойчив в присутствии агрессивных химических элементов в жидкости (хлориды, нитраты, сульфаты и т.д.), чья скорость реакции увеличивается за счет высокой температуры. Коррозия может также частично происходить из-за наличия бактерий. После того, как процесс начался, он самоускоряется, так как размножение бактерий приводит к увеличению количества сульфидов, что сопровождается коррозией и отложением солей. Поэтому очень важно задержать начало этого процесса как можно дольше. Один из лучших методов – эксплуатация на максимально возможной скорости потока, в таком случае бактериальным колониям труднее адсорбироваться на поверхности [Giuglaris et al., 2014]. По этим причинам при разработке месторождений Чеченской Республики и Ханкальского в частности необходим постоянный мониторинг скважинного оборудования и наземных установок, проведение химических анализов и тестов скорости развития коррозии. Работы по мониторингу и очистке при необходимости могут выполняться в неотопительный период, когда геотермальная станция простаивает.

Ввиду гидрогеологических особенностей месторождения, которое представлено мультипластовой системой, и сравнительно быстрого восстановления температурного режима при остановке эксплуатации, в случае снижения температуры в продуктивной скважине до недопустимо низкой отметки рекомендуется бурение и периодическая работа нескольких «дублетов» различных водоносных горизонтов. Наиболее перспективными после XIII по своим гидрогеологическим параметрам являются пласты IV-VII, XVI и XXII. Периодическая эксплуатация позволит продолжить работу геотермальной станции и будет способствовать устойчивости в разработке Ханкальского месторождения термальных подземных вод.

Глава 6. Эколого-экономические аспекты использования термальных подземных вод Ханкальского месторождения

6.1. Экологические аспекты

Основным парниковым газом, выделяемым работающей геотермальной станцией является CO_2 (90%), объем которого значительно колеблется (в среднем 122 CO_2/кВтч). Для сравнения газовая электростанция за мегаватт-час выделяет углекислого газа больше почти в 14 раз. Кроме того, работа газовой электростанции сопровождается выбросом оксида серы, количество которой в 22 раза выше, а также оксида азота и твердых частиц, отсутствующих при эксплуатации геотермальной станции [Matek, 2013]. В бинарных геотермальных станциях с замкнутым контуром, к которым относится Ханкальская, количество выбросов CO_2 близко к нулю. Все выбросы парниковых газов геотермальных установок, прямо или косвенно связанных со строительством, использованием и выводом из эксплуатации, учитываются при оценке «жизненного цикла» станции (life-cycle assessment). В этом случае количество выбросов парниковых газов варьирует от 14.3 до 57.6 г эквивалента CO_2 за киловатт-час для систем централизованного теплоснабжения [Kaltschmitt, 2000].

Применение термальных вод XIII продуктивного пласта на Ханкальской станции позволит избежать выбросов около 7 тыс. тонн CO_2 за отопительный период (7 месяцев), что равнозначно количеству углекислого газа, выделяемого газовой котельной аналогичной мощностью в 5.45 Гкал/час.

В отношении негативных воздействий, сопровождающих разработку Ханкальского месторождения, они преодолимы с помощью современных технологий, одной из которых является установка циркуляционной схемы теплоотбора:

1. Шумовое загрязнение: шум оборудования во время бурения, строительства. Однако после окончания строительства и ввода в эксплуатацию работа геотермальной электростанции, как правило, производит меньше шума, чем «шелест листьев от ветра» в соответствии со стандартами уровня шумового

загрязнения [Kagel et al., 2007].

2. Нарушение поверхностного слоя земли, возникающее при сооружении станции, как и при любой другой строительной деятельности, и влияющее на флору, фауну, почву и поверхностные воды. В случае установки циркуляционной схемы теплоотбора продуктивная и нагнетательная скважины бурятся с одной буровой площадки, расстояние между устьями нагнетательной и продуктивной скважин составляет около 10 м. В результате территория, отчуждаемая под водозабор и зону санитарной охраны, уменьшается в разы. В условиях российских реалий компактное расположение двух скважин и геотермальной станции является важным преимуществом, поскольку облегчает их контроль и охрану.

Площадь территории, отведенной для Ханкальской геотермальной станции, составляет 4900 м^2, при этом площадь самой станции, включая скважины – 406 м^2.

3. Физическое воздействие. Эксплуатация подземных термальных вод сопряжена с такими природными факторами риска как микро-землетрясения, извержения гидротермального пара и просадка грунта. Оценка геологических рисков и использование направленной обратной закачки для поддержания давления на важнейших глубинах позволяют избежать таких последствий, либо свести к минимуму проседание грунта [Goldstein et al., 2011].

4. Воздействие на природные термальные источники. Разработка XIII продуктивного пласта повлияла на дебит Восточных источников в Горячеводске, а эксплуатация XXII пласта запрещена Госгортехнадзором для защиты Серноводских источников от истощения.

5. Тепловое и химическое загрязнение вследствие слива термальной воды на поверхность. Большинство вредоносных химических веществ термальных вод находится в жидком состоянии, что наносит вред экосистемам при их попадании в случае значительного превышения естественного содержания химических элементов.

При разработке месторождений термальных подземных вод с использованием технологии «дублетов» основную опасность для окружающей среды представляют собой утечки флюида из первичного контура. В рамках

работы (частично выполнена при поддержке Минобрнауки – соглашение № 14.607.21.0081 от 16.10.2014) проведен экспериментальный мониторинг эксплуатируемого месторождения с использованием мультиспектральной съемки с беспилотного летательного аппарата (Geoscan 201 Pro). Проведена теплосъёмка п. Гикало с прилежащей к нему территорией Ханкальского месторождения термальных подземных вод (рисунок 6.1., 6.2).



Рисунок 6.1. Фотосъемка поселка Гикало

Для сшивки снимков использовалось ПО Agisoft PhotoScan, сшивка была произведена при помощи алгоритма накидного монтажа. Съёмки проводились в соответствии с алгоритмами ПО GeoScan Planner, являющимся частью наземной станции управления беспилотного летательного аппарата. Маршрут рассчитывался автоматически, исходя из параметров матрицы и оптики тепловизора, расстояния выбирались исходя из необходимости 70% перекрытия между соседними кадрами. Использован тепловизор Термофрейм-М-640. В результате теплосъемки п. Гикало было выявлено 13 аномалий с различными

источниками (костры, система отопления и др.).

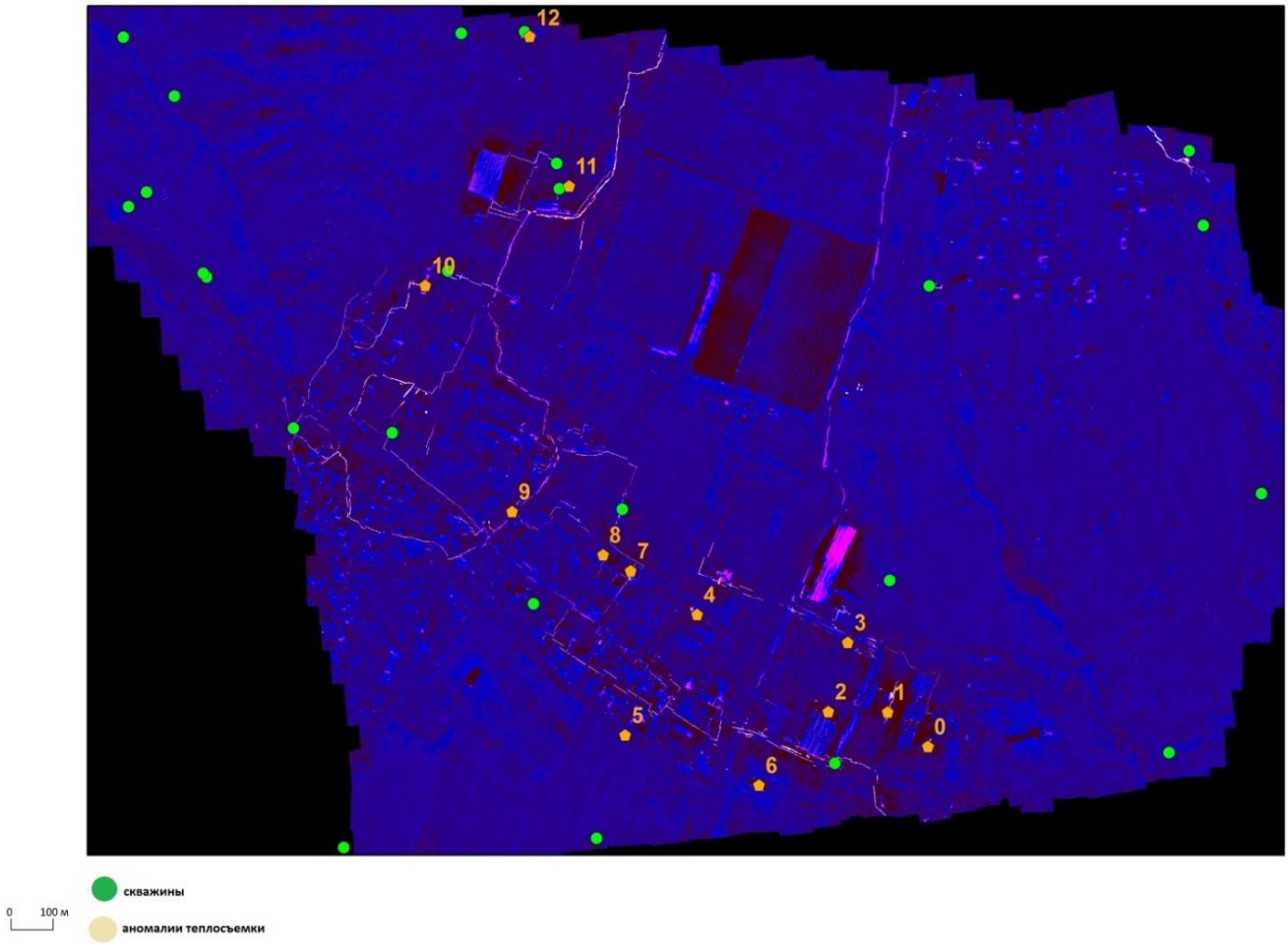


Рисунок 6.2. Теплосъемка поселка Гикало

Проведенный эксперимент показал возможность проведения мониторинга эксплуатируемого месторождения термальных подземных вод с помощью беспилотного летательного аппарата и тепловизора, с выделением аномалий, вызванных утечками старых скважин, трубопроводов, сливом использованного флюида на рельеф и т.д.

Таким образом, применение технологии «дублета» с обратной закачкой получаемых вод наряду с современными методами мониторинга и надлежащим экологическим управлением позволяет решить проблему негативных последствий эксплуатации ресурса Ханкальского месторождения. В тоже время использование термальных вод, частично замещая традиционные виды энергии, дает возможность существенно улучшить региональную экологическую

обстановку.

6.2. Экономические аспекты

В сравнении с другими технологиями геотермальные проекты предполагают значительные первоначальные инвестиции: затраты на разведку, включающую сейсмические исследования, бурение скважин. Создание геотермальных циркуляционных систем (ГЦС) также требует сравнительно высоких вложений в капитальное строительство. Вместе с тем операционные издержки являются низкими, хотя и варьируют в зависимости от количества и качества термальных вод и более предсказуемы в отличие от электростанций, основанных на традиционных источниках энергии, подверженных рыночным колебаниям. Небольшая себестоимость получаемого тепла за счет низких операционных затрат обуславливает конкурентоспособность ГЦС [Богуславский и др., 2000].

Ханкальская геотермальная станция не имеет аналогов в России, поэтому величина инвестиций на ее строительство возрастет на стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) [Малышев и др., 2014]. Но в дальнейшем есть возможность поставки инжиниринговых услуг в части монтажа ГЦС, тиражирования полученных результатов, что положительно скажется на эффективности проекта и возврата вложений. Кроме того, станции такого типа обладают потенциалом расширения полезного эффекта за счет возможностей подключения бинарной электростанции и блока извлечения полезных компонентов из теплоносителя – пластовой воды.

Ханкальская геотермальная циркуляционная система (рисунок 6.3) – это изолированная станция со своим сетевым хозяйством. Она проектируется и строится с учетом статуса гарантирующего поставщика в Ханкальском энергоузле. Потребителем является тепличный комплекс, но в будущем она способна обеспечивать энергией предприятия, учреждения и близлежащие объекты сельского хозяйства. Форма участия государства в финансовом обеспечении проекта – субсидирование со стороны Минобрнауки РФ. Финансирование проекта при общей стоимости 430000000 рублей: собственные

средства – 50%, бюджетные средства Минобрнауки РФ – 50%.

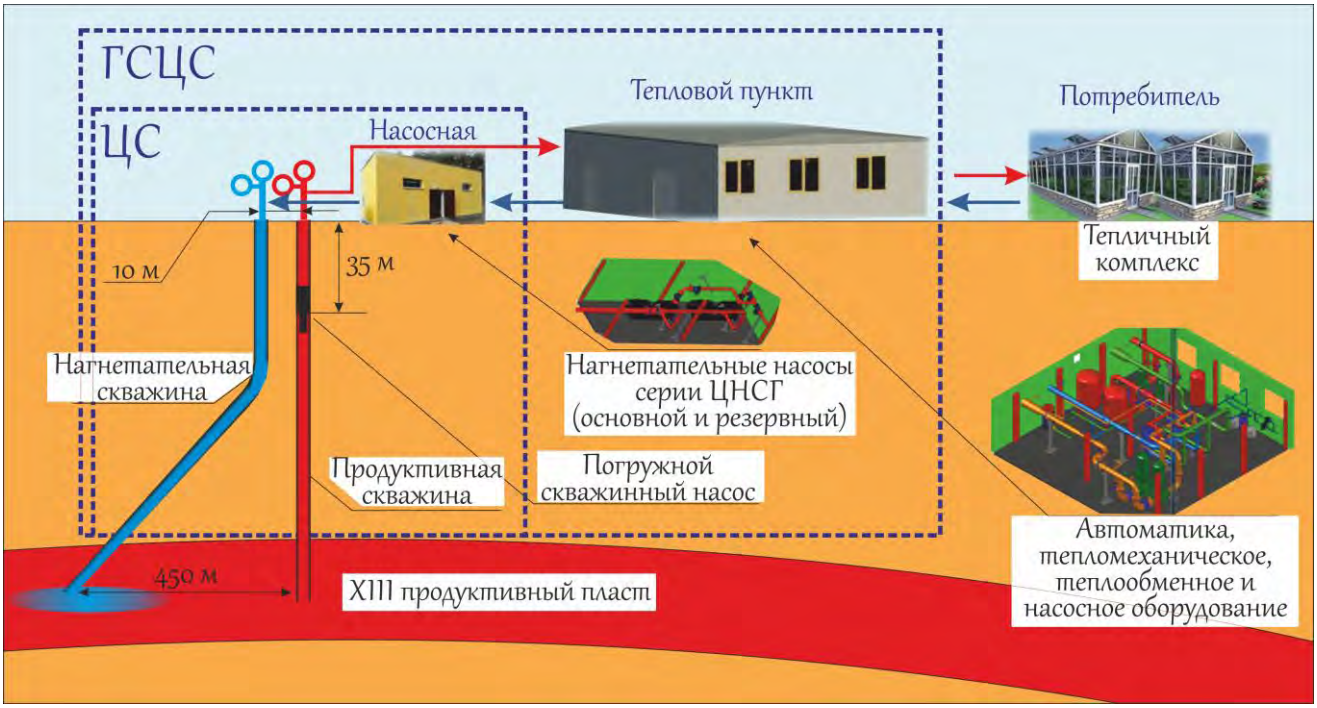


Рисунок 6.3. Схематический рисунок Ханкальской геотермальной станции с циркуляционной схемой отбора глубинного тепла Земли [Заурбеков и др., 2015]

Энергосбытовая деятельность проектируемой станции регламентируется действующей нормативно-правовой базой РФ и Чеченской Республики, а также нормативными документами, приказами, распоряжениями и методическими указаниями Министерства энергетики РФ. Взаимоотношения с потребителями электроэнергии строятся на договорной основе в соответствии с гражданским законодательством РФ. Анализ предложения тепловой энергии показывает значительный диапазон в ценах реализации теплоэнергии. В 2015 г. стоимость составила от 880.64 до 1717.68 руб. за одну Гкал тепла при среднем тарифе по региону 1284.19 руб. В расчетах также учитывался прогнозу Министерства экономического развития РФ по росту стоимости коммунальных услуг до 2018 г.

Затратами на производство теплоэнергии пилотной ГЦС являются: основные и вспомогательные материалы (включая ингибиторы солей), электроэнергия, оплата труда, отчисления от фонда заработной платы, амортизация основных фондов, текущий и капитальный ремонт и др.

Для оценки коммерческой эффективности использования термальных вод на ГЦС рассчитаны стандартные показатели инвестиционной привлекательности

проекта [Карев, 2010]: срок окупаемости, дисконтированный срок окупаемости, чистый дисконтированный доход, внутренняя норма рентабельности. Оценка основывается на ожидаемых в будущем денежных потоках и ставках дисконтирования, поэтому при использовании этого метода применительно к геологическим проектам главная проблема состоит в измерении риска (при оценке ставок дисконтирования) по анализу исторических данных [Damodaran, 2012]. Однако при пилотном запуске последние отсутствуют. Ставка дисконтирования взята в размере 16%, исходя из ставки рефинансирования 11% и премии за риск, а также мировой практики геотермальных проектов [Geirdal et al., 2015]. Расчеты производились непосредственно для Ханкальского проекта (с учетом НИОКР и доходов от последующего тиражирования) и для строительства станции аналогичной мощности (без НИОКР и тиражирования) (рисунок 6.4., таблица 6.1).

Таблица 6.1. Экономические показатели (15-летний срок эксплуатации)

Капитальные расходы, млн. руб.	Срок окупаемости, лет	Дисконтированный срок окупаемости, лет	Чистый дисконтированный доход, млн. руб.	Внутренняя норма доходности, %
Проект Ханкальской геотермальной станции				
430	4.6	13.5	356.7	18
Геотермальная станция				
130	6	>15	-167.7	10

В целом показатели обнаруживают достаточную инвестиционную привлекательность проекта, за исключением реализации тепла, где существенным фактором выступает государственное регулирование тарифов. К примеру, при использовании значений среднего тарифа за второе полугодие 2015 г. в Северо-Кавказском федеральном округе и России, равному 1663.81 и 1649.03 руб. за Гкал соответственно оценка эффективности инвестиций в геотермальную станцию существенно возрастает (таблица 6.2).

С точки зрения общественной эффективности развитие геотермии имеет важные преимущества. Она способствует созданию новых рабочих мест во время

поисков, бурения и строительства геотермальных станций, а также постоянных рабочих мест при введении станции в эксплуатацию [Kagel, 2006]. В дальнейшем в Чеченской Республике целесообразно создание научно-исследовательского центра для изучения геотермальных ресурсов и подготовки и переподготовки специалистов. В целях исследований по геотермии и научному сопровождению строительства геотермальных станций центр может быть востребован как в республике, так и за ее пределами.



Рисунок 6.4. Экономические показатели Ханкальского проекта

Таблица 6.2. Экономические показатели реализации теплоэнергии при изменении тарифа

Срок окупаемости, лет	Дисконтированный срок окупаемости, лет	Чистый дисконтированный доход, млн. руб	Внутренняя норма доходности, %
4.6	13.3	76	19

Как следует из таблиц 6.2 и 6.3., для окупаемости необходима государственная поддержка таких источников тепла, в том числе в рамках тарифного регулирования.

Для полноты экономической оценки использования геотермального ресурса необходимо учесть риски, возникающие при реализации ГЦС. Любой

промышленный проект подвергается рискам, даже если они не материализуются в конечном счете. Наибольший уровень риска приходится на первую стадию – разведку и бурение, так как существует опасность пустой безводной скважины. С момента успешного бурения уровень риска снижается до приемлемого значения. Этот риск невысок в случае разработки месторождений Чеченской Республики и Ханкальского месторождения термальных вод, в частности, благодаря высокой разбуренности территории (имеется множество старых скважин Октябрьского нефтяного месторождения), где геология известна, хотя и нуждается в уточнении.

Принципиальной особенностью проекта по строительству ГЦС является инновационный характер. С точки зрения геологических, технических, экономических и маркетинговых параметров данный проект представляет безусловный интерес. Но, как и любой проект инновационной направленности, все потенциальные риски можно изучить только после реализации пилотного проекта, который в случае положительного результата будет способствовать изменению структуры энергопотребления в регионах, обладающих запасами термальными.

Выводы

1. Термальные воды среднемиоценовых караган-чокракских отложений Чеченской Республики обладают высоким тепловым потенциалом, что обосновывает перспективность их разработки путем строительства геотермальных циркуляционных систем.

2. На основании структурной карты основного продуктивного пласта и трехмерной карты распределения температур в пределах Ханкальского месторождения термальных подземных вод, разработанных с помощью методов геостатистики, показана значимость структурно-тектонического фактора и движения подземных вод в формировании температурного режима территории, установлена закономерность повышения температуры с северо-востока на юго-запад.

3. По результатам математического моделирования обратной закачки на Ханкальском месторождении термальных подземных вод прогнозируется постепенное снижение температуры в продуктивной скважине через 5–6 лет эксплуатации. Установлено, что оптимальная дистанция между забоями скважин дублетной циркуляционной системы для достижения устойчивости в эксплуатации ресурса составляет более 750 м. Показано, что выбор месторасположения забоев продуктивной и нагнетательной скважин на территории Ханкальского месторождения термальных подземных вод должен производиться с учетом двух главных тектонических нарушений и естественного движения вод от зоны питания к зоне разгрузки.

4. Восстановление температуры в добывающей скважине при непрерывной 50-летней эксплуатации Ханкальского месторождения термальных подземных вод (расстояние между забоями скважин дублетной циркуляционной системы – 450 м) с учетом естественного потока подземных вод прогнозируется через 113.5 лет после остановки разработки. Без естественного движения подземных вод температура восстанавливается на 56.4% через 150 лет.

5. С учетом различных вариантов эксплуатации, в случае снижения температуры в продуктивной скважине до недопустимо низкой отметки рекомендуется установка нескольких дублетных циркуляционных систем различных продуктивных пластов и периодическая их эксплуатация.

Список литературы

Список опубликованной литературы

1. Абих, Г.В. Краткие сведения о некоторых малоизвестных минеральных водах на Северном склоне Кавказа / Г.В. Абих. – Тифлис, 1874. – 12 с.
2. Алхасов, А.Б. Возобновляемая энергетика / А.Б. Алхасов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2012. – 256 с.
3. Алхасов, А.Б. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие / А.Б. Алхасов. – М.: МЭИ. – 2011. – 270 с.
4. Алхасов, А.Б. Современное состояние и перспективы развития геотермальной энергетики / А.Б. Алхасов // Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. – Махачкала. – 2006. – С. 4-11.
5. Архангельский, А.Д., Залманзон, Э.С. Сравнительное литологическое исследование по вопросу о поисхождении подземных вод Грозненских нефтяных месторождений / А.Д. Архангельский, Э.С. Залмазон // Бюлл. Московского общества испытателей природы, отдел геологический. – № 9. – 1931. – С. 3-4.
6. Бекетов, С.Б., Коссович, Т.А., Штепа, С.И. Анализ рисков при реализации научно-технических решений в области бурения и капитального ремонта скважин / С.Б. Бекетов, Т.А. Коссович, С.И. Штепа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 6. – 2005. – С. 52-54.
7. Богуславский, Э.И. Использование геотермальной энергии для целей теплоснабжения / Э.И. Богуславский. – Экологические системы: Электронный журнал энергосервисной компании. – 2010. – № 3 (99). http://esco-ecosys.narod.ru
8. Богуславский, Э.И. Перспективы развития геотермальной технологии / Э.И. Богуславский // Разведка и охрана недр. – №7-8. – 2000. – С. 43-48.
9. Богуславский, Э.И. Проблемы освоения тепловых ресурсов недр / Э.И. Богуславский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 12. – 2003. – С. 125-129.
10. Богуславский, Э.И., Певзнер, Л.А., Хахаев, Б.Н. Перспективы развития

геотермальной технологии / Э.И. Богуславский, Л.А. Певзнер, Б.Н. Хахаев / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 5. – 2000. – С.142-148.

11. Богуславский, Э.И., Певзнер, Л.А., Хахаев, Б.Н. Тепловые ресурсы недр России / Э.И. Богуславский, Л.А. Певзнер, Б.Н. Хахаев // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 25-32.

12. Богуславский, Э.И. Состояние и проблемы развития мировой и отечественной геотермальной энергетики, Институт Геологии РАН / Э.И. Богуславский // Доклад на Конференции по Физико-Химической Геотехнологии, Москва, МГГУ, – 2013.

13. Вассоевич, Н.Б. Чокракско-караганская нефтеносная толща восточной части северного склона Кавказа / Н.Б. Вассоевич // Геология и нефтегазоностность юга СССР. – Л., ГОНТИ, 1959. – С. 402-546.

14. Всеволожский, В.А. Основы гидрогеологии / В.А. Всеволожский – 2-е. изд. М.: Изд-во МГУ. – 2007. – 448 с.

15. Гареев, А.М., Фархутдинов, А.М., Фархутдинов, И.М., Черкасов, С.В. Современное состояние и перспективы использования термальных вод Российской Федерации (на примере Ханкальского месторождения) / А.М. Гареев, А.М. Фархутдинов, И.М. Фархутдинов, С.В. Черкасов // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Том 19, № 3. – С. 887-892.

16. Гвоздецкий, Н.А. Физическая география Кавказа. Закавказье. Предкавказье. / Н.А. Гвоздецкий. – Вып.2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1958. – 260 с.

17. Геология и генезис тепловых аномалий горы Янгантау / Р.И. Нигматулин, Т.Т. Казанцева, М.А. Камалетдинов, Ю.В. Казанцев. – Отделение наук о Земле и экологии АН РБ, Уфа. – 1998. – 70 с.

18. Геология и нефтегазоносность Восточного Предкавказья / Под ред. И.О. Брода. – Тр. КЮГЭ АН СССР: Гос. изд. нефт. и горнотоплив. литературы. – 1958.

19. Геостатистический анализ данных в экологии и природопользовании (с применением пакета R): Учебное пособие / А.А. Савельев, С.С. Мухарамова,

А.Г. Пилюгин, Н.А. Чижикова. – Казань: Казанский университет, 2012. – 120 с.

20. Геотермальные ресурсы Чеченской республики: состояние и перспективы / Малышев Ю.Н., Таймасханов Х.Э., Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш. – Материалы Международной научно-практической конференции GEOENERGY– Грозный, 2015. – С. 83-91.

21. Геохимические исследования термальных вод Ханкальского месторождения Чеченской Республики / Ф. И. Мачигова, А.А. Шаипов, Л.Р. Бекмурзаева Л.Р., С.В. Черкасов // Устойчивое развитие горных территорий. – Владикавказ, 2014. – № 2. – С. 61-64.

22. Гидрогеология СССР / Под ред. Н.А. Григорьева. – М.: Недра, 1968. Т. IX. – 488 с.

23. Гнатусь, Н.А., Хуторской, М.Д. Тепло «сухих» горных пород – неисчерпаемый возобновляемый источник энергии / Н.А. Гнатусь, М.Д. Хуторский // Литология и полезные ископаемые. – 2010. – № 6. – С. 1-9.

24. Девис, Д.С. Статистический анализ данных в геологии / Д.С. Девис. – М. Недра, 1990. – Книга 1. – 319 с.

25. Девис, Д.С. Статистический анализ данных в геологии / Д.С. Девис. – М. Недра, 1990. – Книга 2. – 426 с.

26. Дегтярев, К.С. Тепло Земли (ч.I) / К.С. Дегтярев // Наука и жизнь. – 2013. – № 9. – С. 27-31.

27. Дегтярев, К.С. Тепло Земли (ч.II) / К.С. Дегтярев // Наука и жизнь. – 2013. – № 10. – С. 31-37.

28. Дежникова, И.Ю. Карта запасов подземных вод и степени их освоения по гидрогеологическим структурам территории Российской федерации / И.Ю. Дежникова, компьютерное исполнение Грохольский Н.С. – 2015. http://www.geomonitoring.ru/

29. Демьянов, В.В., Савельева, Е.А. Геостатистика. Теория и практика / В.В. Демьянов, Е.А. Савельева. – Издательство «Наука», Москва, 2010. – 327 с.

30. Джамалов С.А., Левкович Р.А. Закономерности изменения температур по глубине / С.А. Джамалов // Тр. Геол. Ин-та Дагестанского филиала. – 1960. –

С. 245-251.

31. Джамалов, С.А. Геотермические исследования в Дагестанском филиале / С.А. Джамалов // Вест. АН СССР. – №4. – 1959. – С.113-114.

32. Джамалова, А.С. Глубинный тепловой поток на территории Дагестана / А.С. Джамалова. – М., Наука. 1969. –128 с.

33. Дураева, Е. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реальности / Е. Дураева. – Париж: Изд. ОЭСР/МЭА, 2004. – 124 с.

34. Дьяконов, Д. И. Геотермия в нефтяной геологии / Д.И. Дьяконов. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 277 с.

35. Дюнин, В.И., Корзун, В.И. Гидрогеодинамика нефтегазоносных бассейнов / В.И. Дюнин, В.И. Корзун. – М.: Научный мир, 2005. – 524 с.

36. Зимин, Н.Н. Минеральные воды Терско-Сунженской долины / Н.Н. Зимин // Военный медицинский журнал. – № 3. – 1853.

37. Использование и перспективы освоения минеральных, термальных и промышленных вод / Г.С. Вартанян, В.А. Комягина, Р.И. Плотникова и др. – М. – 1999. – 86 с.

38. К истории изучения минеральных и целебных вод Чеченской Республики / И.А. Керимов, А.А. Даукаев, А.А. Абумуслимов, Аслан А. Даукаев // Вестник Академии наук Чеченской Республики. – 2012. – № 1 (16). – С. 59-64.

39. Кавказ (Серия «Природные условия и естественные ресурсы СССР») / Под общ. ред. акад. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1966. – 482 с.

40. Камалетдинов, М.А. Современная теория шарьяжей / М.А. Камалетдинов // Геологический Сборник ИГ УНЦ РАН. – 2001. – № 2. – С. 29–37.

41. Капутин, Ю.Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика / Ю.Е. Капутин. – СПб: Недра, 2002. – 424 с.

42. Карцев, А.А. Вода и нефть / А. А. Карцев, С. Б. Вагин. – М. : Недра, 1977. – 112 с.

43. Карцев, А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений / А.А. Карцев. – Гостоптехиздат, 1963. – 353 с.

44. Киссин, И.Г. Восточно-Предкавказский артезианский бассейн / И.Г. Киссин.

– М., Недра. – 1964. – 240 с.

45. Комплексный проект по созданию опытно-промышленной геотермальной станции на основе реализации циркуляционной схемы использования глубинного тепла Земли: отчет о НИОКР: Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова; рук. Ш.Ш. Заурбеков, М.Ш. Минцаев; исполн.: Шаипов А.А. и др., Грозный, 2013. – 134 с.

46. Кононов, В.И., Поляк, Б.Г., Хуторской, М.Д. Гидрогеотермальные ресурсы России / В.И. Кононов, Б.Г. Поляк, М.Д. Хуторской // Георесурсы. – 2005. – № 2(17). – С. 29-33.

47. Коншин, А.М. Описание минеральных источников Северного Кавказа / А.М. Коншин // Материал для геологии Кавказа, сер. 3, кн. 2, Тифлис. – 1899.

48. Коцарев, И.Ю., Власова, С.П. Геотермические условия среднемиоценовых отложений Северного Кавказа / И.Ю. Коцарев, С.П. Власова // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1963. – № 12. – С. 124-125.

49. Кошкуль, Ф.Г. Геологические исследования, произведенные в хребтах Терском и Кабардино-Сунженском и в находящейся между ними долине Алхан-Чурт / Ф.Г. Кошкуль // Горный журнал. – Т. III. – 1879. – С. 170–204.

50. Кудрявцев, Н.А. К строению Ново-Грозненского нефтеносного района / Н.А. Кудрявцев. – Геологический комитет. Материалы по общей и прикладной геологии. – № 75. – Л. Издание Геологического комитета. – 1928. – 164 с.

51. Курбанов, М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья / М.К. Курбанов – М.: Наука, 2001. – 260 с.

52. Кутателадзе С.С.. Розенфельд Л.М. Геотермальная энергетическая установка / С.С. Кутателадзе, Л.М. Розенфельд – Патент № 941517/24-6. – 1965.

53. Линдтроп, Н.Т. Режимы нефтяных фонтанов Грозненского района / Н.Т. Линдтроп // Нефтяное и сланцевое хозяйство. – 1925. – №4. – С. 607-635.

54. Маврицкий, Б.Ф., Антоненко, Г.К., Отман, Н.С., Полуботко, Л.Ф. Ресурсы термальных вод СССР / Б.Ф. Маврицкий, Г.К. Антоненко, Н.С. Отман, Л.Ф. Полуботко – М.: Недра, 1975. – 152 с.

55. Магомедов, Ш.А., Маммаев, О.А., Магомедов, А.Ш. Изотопно-геохимическая зональность вод различных типов // Ш.А. Магомедов, О.А. Мамаев, А.Ш. Магомедов. – Материалы конференции «Гидрогеология и некоторые прикладные аспекты геологии Восточного Кавказа», 2013. – С. 25-29.
56. Макаренко, Ф.А. Термальные воды СССР и вопросы их теплоэнергетического использования / Ф.А. Макаренко. – М., Изд. Академии наук СССР. – 1963. – 292 с.
57. Матерон, Ж. Основы прикладной геостатистики / Ж. Матерон – М., Мир. – 1967. – 387 с.
58. Мачигова, Ф.И., Шаипов, А.А., Бекмурзаева, Л.Р., Черкасов, С.В. Геохимические исследования термальных вод Ханкальского месторождения Чеченской Республики / Ф.И. Мачигова, А.А. Шаипов, Бекмурзаева Л.Р., С.В. Черкасов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2014. – № 2. – С. 61–63.
59. Милановский, Е.Е., Хаин, В.Е. Геологическое строение Кавказа / Е.Е. Милановский, В.Е. Хаин. – М., Изд. МГУ. – 1963. – 358 с.
60. Николаев, В.М. Подземные воды караганских отложений Терско-Сунженской нефтеносной области / В.М. Николаев // Тр. ГрозНИИ, № 8. – 1960.
61. Николаев, В.М. Подземные воды чокракских отложений Терско-Сунженской нефтеносной области / В.М. Николаев // Тр. ГрозНИИ, № 9. – 1960.
62. Николаев, В.М. Термальные воды Терско-Сунженской нефтеносной области / В.М. Николаев. – В книге «Термальные воды СССР и вопросы их теплоэнергетического использования». – Изд. АН СССР, М. – 1963. – С. 218-245.
63. Овчинников А.М. Схема гидрогеологического районирования СССР. – В кн.: «Труды III Всесоюзного гидрологического съезда», т. 9, Л. – 1959.
64. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология / Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский, С.Л. Шварцев и др. – Наука. Новосибирск, 1980. – 225 с.
65. Перспективы развития геотермальной энергетики в Чеченской республике / Ю.Н. Малышев, Х.Э. Таймасханов, Ш.Ш. Заурбеков, М.Ш. Минцаев // Геоэкологические, медико-биологические и рекреационные вопросы устойчивого

развития горных территорий. – №1(19). – 2014. – С. 63-67.

66. Перспективы использования термальных вод Чеченской Республики на базе опыта аналогичных работ во Франции (Парижский бассейн) / Фархутдинов А.М., Исмагилов Р.А., Фархутдинов И.М. и др. // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 398. – С. 257-264.

67. Поваров, О.А. Тепло Земли. Эффективное энергообеспечение удаленных районов и ЖКХ России / О.А. Поваров // Возобновляема энергия. – 2003. – №4 – С. 2-3.

68. Потехин, Д.В. Оптимизация технологии многовариантного трехмерного геологического моделирования залежей нефти и газа : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (25.00.12) / Д.В. Потехин. – М., 2014. – 151 с.

69. Результаты проекта строительства пилотной геотермальной станции с циркуляционной схемой отбора тепла на Ханкальском месторождении Чеченской Республики / Заурбеков Ш.Ш., Минцаев М.Ш., Черкасов С.В. и др. // Материалы третьего международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности», Крым, г. Ялта. 17-19 ноября 2015. – С. 123-136.

70. Ресурсы термальных вод СССР / Под ред. С.С. Бондаренко. – М.: Наука, 1975. – 240 с.

71. Розин, Л.А. Метод конечных элементов / Л.А. Розин. – СПб.: СПбГТУ. – 2000. – С. 120-127.

72. Свалова, В.Б. Комплексное использование гидротермальных ресурсов / В.Б. Свалова // Георесурсы. – 2009. – № 1. – С.17-22.

73. Состояние и перспективы использования геотермальных ресурсов в Российской Федерации / С.В. Черкасов, Т.Г. Чурикова Л.Р. Бекмурзаева и др. – Материалы Международной научно-практической конференции GEOENERGY – Грозный, 2015. – С. 303-322.

74. Сухарев, Г.М. Геотермические особенности Терско-Дагестанской нефтегазоносной провинции / Г.М. Сухарев. – Гостоптехиздат. – 1948. – 41 с.

75. Сухарев, Г.М. Гидрогеология мезозойских и третичных отложений Терско-Дагестанской нефтегазоносной области и Нижнего Поволжья / Г.М. Сухарев. – Гостоптехиздат. – 1954. – 400 с.

76. Сухарев, Г.М. Подземные воды Терско-Дагестанской нефтегазоносной области / Г.М. Сухарев. – Грозный. – 1948.

77. Сухарев, Г.М., Власова, С.П., Тарануха, Ю.К. К вопросу использования термальных вод и восстановления ресурсов на примере гидродинамической системы юга Восточного Предкавказья / Г.М. Сухарев, С.П. Власова, Ю.К. Тарануха // Изв. ВУЗ. Нефть и газ, № 4, Баку. – 1966.

78. Сухарев, Г.М., Мирошников, М.В. Подземные воды нефтяных и газовых месторождений Кавказа / Г.М. Сухарев, М.В. Мирошников. – Гостоптехиздат. – 1963. – 328 с.

79. Фархутдинов А.М. Геотермальные воды: экологические аспекты эксплуатации Ханкальского месторождения (Предкавказская горная зона) / А.М. Фархутдинов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – Том 20, № 4. – С. 102-108.

80. Фархутдинов, А.М. Экологические аспекты использования термальных вод Ханкальского месторождения / А.М. Фархутдинов // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – № 20. – С. 81-84.

81. Фархутдинов А.М., Гоблет П., Черкасов С.В. Компьютерное моделирование в освоении резервуаров термальных вод на примере Ханкальского месторождения / А.М. Фархутдинов, П. Гоблет, С.В. Черкасов. – Материалы международной научно-практической конференции «GEOENERGY», Грозный, 19-21 июня 2015 г. – С. 224-232.

82. Фархутдинов, А.М., Исмагилов, Р.А. Геотермальные ресурсы Чеченской Республики и перспективы их использования / А.М. Фархутдинов, Р.А. Исмагилов // Геоинжиниринг. – 2014. – № 2(22). – С. 60-63.

83. Фархутдинов, А.М., Фархутдинов, И.М., Исмагилов, Р.А. История открытия и разработки Ханкальского месторождения термальных вод / А.М. Фархутдинов,

И.М. Фархутдинов, Р.А. Исмагилов // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Том 19, № 1. – С. 93-96.

84. Фархутдинов, А.М., Фархутдинов, И.М., Исмагилов, Р.А., Черкасов, С.В. Перспективы использования геотермальных вод в Предкавказской предгорной зоне (Ханкальское месторождение) / А.М. Фархутдинов, И.М. Фархутдинов, Р.А. Исмагилов, С.В. Черкасов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Том 19, № 4. – С. 34-43.

85. Фархутдинов А.М., Черкасов С.В., Фархутдинов И.М., Гареев А.М. Эксплуатация Ханкальского месторождения термальных вод / А.М. Фархутдинов, С.В. Черкасов, И.М. Фархутдинов, А.М. Гареев // Геосфера: сборник научных статей студентов, магистрантов и аспирантов географического факультета. – Уфа: БашГУ, 2015. – Вып. 8. – С. 7-8.

86. Фархутдинов, А.М., Шанталь де Фуке, Минцаев, М.Ш., Черкасов, С.В. Применение геостатистики для анализа перспектив эксплуатации Ханкальского месторождения термальных вод / А.М. Фархутдинов, Шанталь де Фуке, М.Ш. Минцаев, С.В. Черкасов // Геоинформатика. – 2015. – № 1. – С. 60-68.

87. Хаин, В.Е. Геотектоническое развитие Юго-Восточного Кавказа / Хаин В.Е. – Баку: Азнефтеиздат, 1950. – 224 с.

88. Хребтов А.И. Геотермические условия и термальные воды Центрального Предкавказья / А.И. Хребтов. – М. Наука, 1965. – 110 с.

89. Хуциев, А.А. Геология третичных и мезозойских отложений Северного Кавказа и Предкавказья / А.А. Хуциев. – Грозненский нефтяной научно-исследовательский институт, Грозный Труды. – том 8. – 1960. – 273 с.

90. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология / С.Л. Шварцев. – Изд 2-е. испр. и доп., М.: Недра, 2012. – 601 с.

91. Шагоянц, С.А. Подземные воды центральных и восточных частей Северного Кавказа и условия их формирования / С.А. Шагоянц. – Госгеолтехиздат, М., 1959. – 307 с.

92. Шарьяжно-надвиговая тектоника литосферы / М.А. Камалетдинов, Т.Т. Казанцева, Ю.В. Казанцев, Д. В. Постников. – М.: Наука. – 1991. – 255 с.

93. 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin, France / S. Lopez, V. Hamm, M. Le Brun et al. // Geothermics. – 2010. – № 39. – 339–356 p.
94. Antics, M., Papachristou, M., Ungemach, P. Sustainable heat mining. A reservoir engineering approach / M. Antics, M. Papachristou, P. Ungemach. – Proceedings of the 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, January 31-February 2, 2005, Stanford University, Stanford, California. – 14 p.
95. Axelsson, G. Sustainable geothermal utilization – Case histories, definitions, research issues and modelling / G. Axelsson // Geothermics. – № 39. –2010. – p. 283–291.
96. Axelsson, G. Sustainable geothermal utilization / G. Axelsson. – Proceedings of Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells, UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador. – 2012. – 18 p.
97. Bear, J. Dynamics of fluids in porous media / J. Bear – American Elsevier, New York. – 1972. – 764 p.
98. Bertani, R. Geothermal Power Generation in the World, 2005-2010 Update Report / R. Bertrani. – Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010. – 41 p.
99. Böttcher, N. Thermodynamics of porous media: non-linear flow processes. PhD thesis, Technische Universitat Dresden, 2013. – 47 p.
100. Chilès, J.P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty / J.P. Chiles, P. Delfiner, – Second Edition, N.Y.: Wiley. – 2012. – 734 p.
101. Damodaran, A. Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset / A. Damodaran. – John Wiley & Sons, 3rd Edition. – 2012. – 992 p.
102. Darcy, H. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon / H. Darcy, – Dalmont, Paris. – 1856. – 647 p.
103. Diersch, Hans-Jörg G. FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media / H.-J. G. Diersch, – Springer, Berlin. – 2014. – 996 p.
104. Farkhutdinov, A., Goblet, P., Fouquet de C., Cherkasov, S. A case study of the

modeling of a hydrothermal reservoir: Khankala deposit of geothermal waters / A. Farkhutdinov, P. Goblet, C. de Fouquet, S. Cherkasov // Geothermics, Volume 59, January 2016. – p. 56-66.

105. Farkhutdinov A., Goblet P., Fouquet de 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, Volume 5, No. 4, December 2015. – p. 1062-1068.

106. Geirdal, C., Gudjonsdottir, M., Jensson, P. Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one / C. Geirdal, M. Gudjonsdottir, P. Jensson // Geothermics, Volume 53, January 2015. – p. 1-13.

107. Geothermal contribution to the energy mix of a heating network when using Aquifer Thermal Energy Storage: modeling and application to the Paris basin / A. Réveillère A., Hamm V., Lesueur H. et al. // Geothermics. – 2013. – № 47. – p. 69-79.

108. Geothermal Energy: International Market Update / A. Holm, L. Blodgett, D. Jennejohn, K. Gawell. – Geothermal Energy Association. – 2010. – 77 p.

109. Giuglaris, E., Malcuit, E., Wacogne, F. Khankala Project. Study of a geothermal loop in Grozny (Chechen Republic, Russia) / E. Giuglaris, E. Malcuit, F. Wacogne. – Technical audit of Report n°1. Report BRGM/RC-63510-FR, 2014. – 41 p.

110. Goblet, P. METIS – Tutoriel et notice d'utilisation / P. Goblet. – Rapport Ecole des Mines de Paris. Centre d'Informatique Géologique LHM/RD/05/25. – 2005.

111. Goblet, P. Modélisation des transferts de masse et d'énergie en aquifère [Modelling mass and energy transfers in aquifers] / P. Goblet. – PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, University Pierre and Marie Curie, Paris, France. – 1980. – 200 p.

112. Goblet, P. Programme METIS – Simulation d'écoulement et de transport miscible en milieu poreux et fracturé / P. Goblet. – Notice de conception mise à jour le 6/09/10 Rapport Mines ParisTech - Centre de Géosciences R100907PGOB. – 2005.

113. Goblet, P. Programme METIS – Simulation d'écoulement et de transport miscible

en milieu poreux et fracturé / P. Goblet. – Notice d'emploi Rapport Ecole des Mines de Paris. Centre d'Informatique Géologique LHM/RD/05/24. – 2005.

114. Goldstein, B., G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutiérrez-Negrín, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, V. Zui, 2011: Geothermal Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

115. Goovaerts, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation / P. Goovaerts. – Oxford Univ. Press, New-York. – 1997. – 483 p.

116. Gringarten, A.C., Sauty, J.P. (1975), A Theoretical Study of Heat Extraction From Aquifers With Uniform Regional Flow / A.C. Gringarten, J.P. Sauty // Journal of Geophysical Research. – 1975. – № 35. – p. 4956-4962.

117. Huttrer, G.W. The status of world geothermal power generation 1995-2000 / G.W. Huttrer. – Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000, v.1, p. 23-37.

118. Ingimarsson, J. Challenges for Geothermal Energy - Experience from Iceland / J. Ingimarsson. – Energy Future: The Role of Impact Assessment conference, 32 annual conference of the international association for impact assessment. – 2012. – 5 p.

119. Istok, J. Groundwater Modeling by the Finite Element Method / J. Istok – American Geophysical Union, Water Resources Monograph 13, Wash., D.C. – 1989. – 495 p.

120. Journel A.G., Huijbregts C.J. Mining Geostatistics / A.G. Journel, C.J. Huijbregts. – London: Academic Press. – 1978. – 600 p.

121. Kagel, A., Bates, D., Gawell, K. A Guide to Geothermal Energy and the Environment / A. Kagel, D. Bates, K. Gawell. – Washington, DC, Geothermal Energy Association, 2007. http://geo-energy.org/reports/environmental%20guide.pdf

122. Kaltschmitt, M. Environmental effects of heat provision from geothermal energy in comparison to other resources of energy / M. Kaltschmitt. – Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 28 May - 10 June 2000 (ISBN:

0473068117). www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0908.pdf

123. Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand / D.G. Krige // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. – 1951. – № 52 (6) – p. 119–139.

124. Kutas, R.I., Lubimova, E.A., Smirnov, Ya.B. Heat Flow Studies in the European Part of the Soviet Union / R.I. Kutas, E.A. Lubimova, Ya.B. Smirnov – Terrestrial Heat Flow in Europe, 1979. – p. 301-308.

125. Lopez, S., Hamm, S., Goyeneche, O. Optimal and sustainable use of the Dogger aquifer geothermal resource: long-term management and new technologies / S. Lopez, S. Hamm, O. Goyeneche. – SIMS 2012 The 53rd Scandinavian Conference on Simulation and Modelling. – 17 p.

126. Lund, J.W., Freeston, D.H. World-Wide direct uses of geothermal energy 2000 / J.W. Lund, D.H. Freeston. – Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000, v.1, p. 1-21.

127. Lund, J.W., Freeston, H.H., Boyd, T.L. Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review / J.W. Lund, H.H. Freeston, T.L. Boyd. – Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 26–30 April 2010. 23 p.

128. Sustainable Geothermal Reservoir Management / P. Ungemach, M. Antics, M. Papachristou. – World Geothermal Congress, 24-29 April 2005, Turkey. – 12 p.

129. Marsily, G. Hydrogéologie quantitative / G. Marsily. – Masson, Paris. – 1981. – 215 p.

130. Matek, B. Geothermal Power: International Market Overview / B. Matek. – Geothermal Energy Association. – 2013. – p. 10-11.

131. Matek, B. Promoting Geothermal Energy: Air Emissions Comparison and Externality Analysis / B. Matek. – Washington, DC: Geothermal Energy Association (GEA). Accessed September 20th, 2013. http://geoenergy.org/events/Air%20Emissions%20Comparison%20and%20Externality%20Analysis_Publication.pdf

132. Matheron, G. Traité de géostatistique appliquée / G. Matheron. – Editions Technip, France. – 1962. – 333 p.

133. Menjoz, A. Lectures on the characterization and the exploitation of geothermal reservoirs in France / A. Menjoz. – Report No. 2, United National Geothermal Training Program, The United Nations University, Reykjavík, Iceland. – 1990. – 89 p.

134. OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media / O. Kolditz, S. Bauer, L. Bilke [et al.] // Environ. Volume 67, Issue 2. – 2012. – p. 589–599.

135. Papachristou, M. The Use of Numerical Simulation in Low Enthalpy Geothermal Reservoir Management / M. Papachristou // The Paris Basin Case, PhD Thesis, 02 Dec. 2011. Aristotle University, Geology Dpt. Thessaloniki, Greece.

136. Pruess, K. Mathematical modelling of fluid flow and heat transfer in geothermal systems. An introduction in five lectures / K. Pruess – Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51295, Berkeley, CA. – 2002. – 84 p.

137. Pryde, P.R.. Geothermal Development in the Soviet Union / P.R. Pryde // GHC Bulletin Vol 4. – 1976. – № 2. – p. 8–14

138. Smith, T.E. Notebook on Spatial Data Analysis [Online] / T.E. Smith. – 2014. http://www.seas.upenn.edu/~ese502/#notebook

139. Stab, O. Delos 2.0.3 User's manual [Online] / O. Stab. – 2006. http://people.mines-paristech.fr/olivier.stab/delos/telechargement/doc/delos_GB.pdf

140. Stober, I. Geothermal energy. From theoretical models to exploration and development / I. Stober, K. Bucher. – Springer, IX, 2013. – 291 p.

141. Stüwe, K. Geodynamics of the Lithosphere. An Introduction / K. Stuwe. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. – 2002. – 449 p.

142. Svalova V.B. Geothermal energy use in Russia / V.B. Svalova. – Proceedings of the 4th African Rift Geothermal Conference 2012, Nairobi, Kenya, 21-23 November 2012. – 6 p.

143. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change / I.B. Fridleifsson, R Bertani, E Huenges, J.W. Lund et al. // IPCC. Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Proceedings, Luebeck, Germany, 20-25 January 2008, – 2008. – p. 59-80.

144. Thiéry, D., Software MARTHE. Modelling of Aquifers with a Rectangular Grid

in Transient state for Hydrodynamic calculations of heads and flows. Release 4.3 / D. Thiéry. – Report BRGM 4S/EAU n° R32548. – 1990.

145. Ungemach, P., Insight into geothermal reservoir management district heating in the Paris Basin, France / P. Ungemach // GHC Bulletin. – 2001. – № 22. – p. 3–13.

146. Ungemach, P., Antics, M., Lalos, P. Sustainable geothermal reservoir management – a modelling suite / P. Ungemach, M. Antics, P. Lalos. – Proceedings of Australian Geothermal Energy Conference, 16-18th Nov. 2011, Melbourne, Geoscience Australia Record 2011/43. – p. 267-275.

147. Ungemach, P., Papachristou, M., Antics M. Renewability Versus Sustainability. A Reservoir Management Approach / P. Ungemach, M. Papachristou, M. Antics. European Geothermal Conference, 30 May – 1 June 2007, Unterhaching, Germany. – 13 p.

148. Williams, C.F., Reed, M.J., Anderson, A.F. Updating the Classification of Geothermal Resources / C.F. Williams, M.J. Reed, A.F. Anderson. – Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California. January 31– February 2, 2011. – 7 p.

149. Zektser, I.S., Dzhamalov, R.G. and Everett, L.G. / I.S. Zektser, R.G. Dzhamalov, L.G. Everett. – 2007. Submarine Groundwater. CRC Press, Boca Raton, FLa., – 466 pp.

Список фондовой литературы

150. Гонсировский, Д.Г., Судейко, Л.И., Рудина, Т.А. Оценка естественных ресурсов термальных вод южных районов Восточного Предкавказья по плиоценовому, верхнеплиоценовому, караганскому и чокракскому водоносным комплексам / Д.Г. Гонсировский, Л.И. Судейко, Т.А. Рудина. – ТГФ СКГУ Ессентуки. – 1966. – 137 с.

151. Гордеева Г.В. Отчет по гидрогеологическому доизучению площадей масштаба 1:200 000 в пределах Чеченской Республики листов К-38-III, IV, V, X, XI (ГГДП-200 - ревизионно-оценочные работы). – 2001. – 540 с.

152. Ермолаев, А.Н., Лялин, Л.К., Напольский, М.С., Фельдман, С.Л. Подсчет запасов нефти и газа по Октябрьскому месторождению по состоянию на 1 января 1954 года / А.Н. Ермолаев, Л.К. Лялин, М.С. Напольский, С.Л. Фельдман. – 1953.

– 338 с.

153. Крылов, В.Б. Гидрогеологические исследования термоводоносных комплексов в районе города Грозного / В.Б. Крылов. – 1981. – 229 с.

154. Крылов, В.Б. Комплексные исследования скважин и оценка эксплуатационных запасов термоэнергетических подземных вод в условиях геотермальной циркуляционной системы на Ханкальском месторождении ЧИАССР / В.Б. Крылов. – 1988. – 128 с.

155. Крылов, В.Б. Отчет по теме «Рекомендации по дальнейшей эксплуатации карагано-чокракских отложений на термоводозаборах Ханкала и Гойты ЧИАССР» / В.Б. Крылов. – 1983. – 104 с.

156. Крылов, В.Б. Отчет по теме: «Анализ эксплутационной разведки месторождений термальных вод Грозненского района ЧИАССР» / В.Б. Крылов. – 1986. – 135 с.

157. Крылов, В.Б. Отчет по теме: «Изучение гидродинамических и теплофизических показателей карагано-чокракских отложений в процессе эксплуатационной разведки в Ханкальской долине ЧИАССР с целью увеличения использования геотермальной энергии путем создания искусственной системы восполнения ресурсов термальных вод» / В.Б. Крылов. – 1984. – 50 с.

158. Крылов, В.Б. Подсчет эксплуатационных запасов термальных вод XIII пласта Ханкальского месторождения в условиях поддержания пластового давления путем создания ГЦС / В.Б. Крылов. – 1987. – 134 с.

159. Назаретов, М.Б., Меркулов, Н.Е. Составление схемы доразработки Октябрьского нефтяного месторождения / М.Б. Назаретов, Н.Е. Меркулов. – 1956.

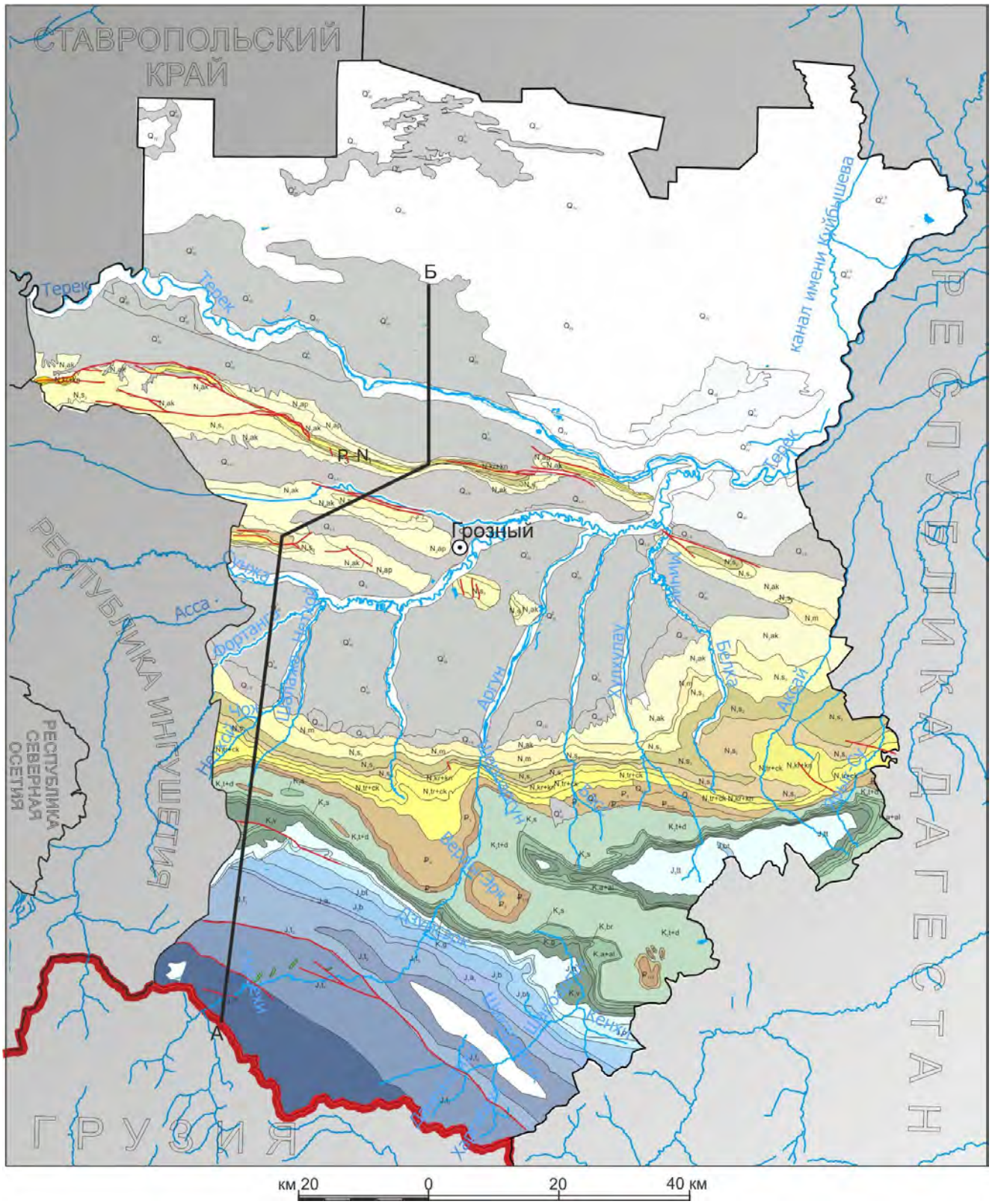
160. Николаев, В.М. Влияние длительной разработки карагано-чокракских нефтяных залежей водонапорного режима на естественные режимы водонапорных систем / В.М. Николаев. – 1961. – 74 с.

161. Шпак, А.А. Отчет по подсчету эксплуатационных запасов термальных вод месторождения Ханкальская долина ЧИАССР (для теплоснабжения и горячего водоснабжения) по состоянию на 1/1-68 г. / А.А. Шпак. – 1968. – 352 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

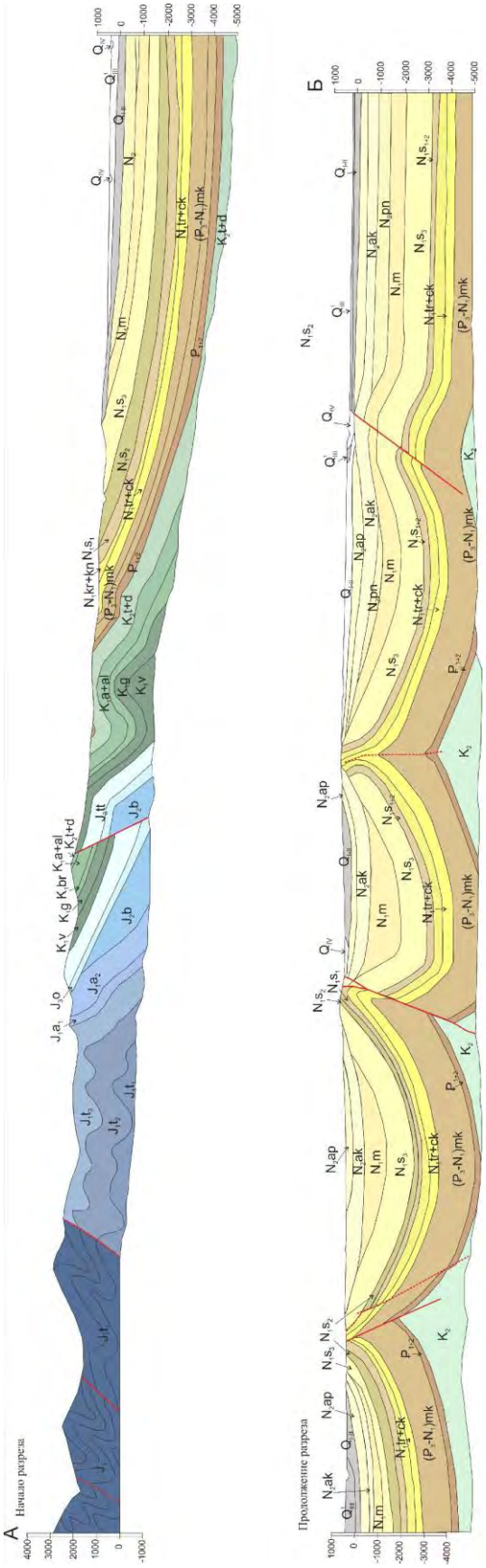
Приложение А

Геологическая карта Чеченской Республики [Гордеева, 2001ф]



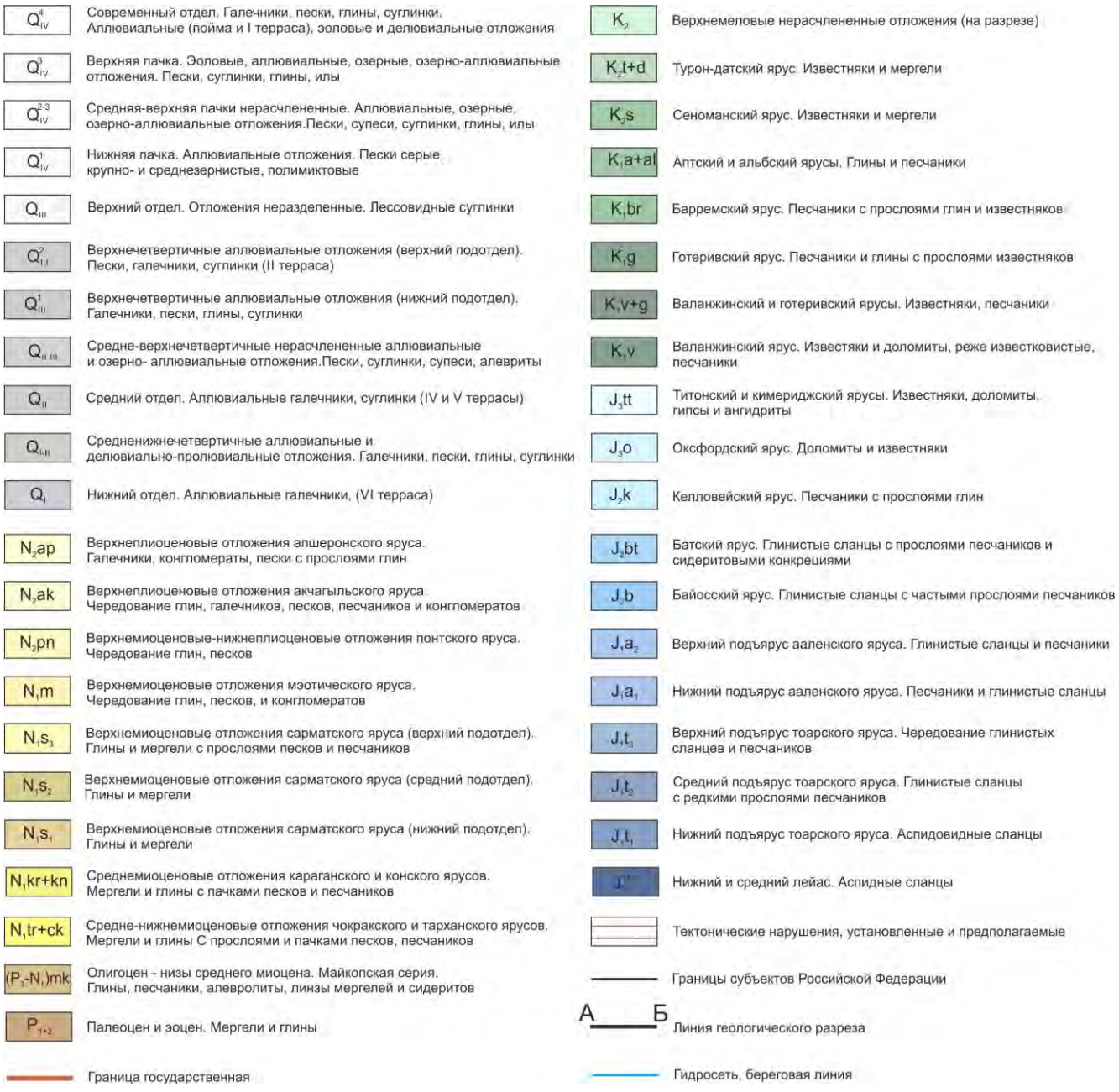
Приложение Б

Геологический разрез по линии А-Б к геологической карте Чеченской Республики [Гордеева, 2001ф]



Приложение В

Условные обозначения к геологической карте и разрезу



Приложение Г

Условные обозначения к гидрогеологической карте и разрезу



Приложение Д

Условные обозначения к гидрогеологической карте и разрезу (продолжение)

