

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Дальневосточное отделение
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ

КАМЧАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Белоусов В.И., Белоусова С.П.

ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ (на примере развития геотермальной энергетики)



Издательство КГПУ
Петропавловск-Камчатский
2002

5Б6(03)

УДК 624:131

Природные катастрофы и экологические риски (на примере геотермальной энергетики)/ Белоусов В.И., Белоусова С.П. Учебно-методическое пособие. – Петропавловск-Камчатский: Издательство КГПУ, 2002 – 160 с.

Ответственный редактор Делемень И.Ф.

В работе рассмотрены механизмы гидротермальных процессов в областях современного вулканизма. В пределах современных гидротермальных систем наибольшую опасность для их освоения представляют процессы образования гидротермальных взрывов и вторичные склоновые процессы. Рассмотрены типы гидротермальных систем, их образование и функционирование, обусловленные взаимодействием различных глубинных, близ поверхностных процессов и процессов, связанных с генерацией магматических расплавов и их взаимодействия с ледниками и снежным покровом. Как известно с последними связано образование грязевых потоков, сопровождающихся катастрофами.

Использование материалов, приведенных в работе, позволит оценивать опасные вулканические процессы, такие, например, как гравитационные обрушения вулканических построек, которые сопровождаются гигантскими извержениями аналогичными извержениям вулканов Безымянного на Камчатке и Сан Хеленс в США.

Значительная часть работы посвящена экологическим рискам, связанным с эксплуатацией геотермальных ресурсов, и способов экологически приемлемой их разработки.

Работа выполнена по программе и при финансовой поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (проект № 00-15-98609 по поддержке ведущей научной школы академика РАН С.А. Федотова «Изучение современного вулканизма и сейсмичности, связанных с ними процессов, их механизма и закономерностей, прогноз землетрясений и извержений»).

Издание книги осуществлено при финансовой поддержке Экологического фонда Камчатской области.

ISBN 5-7968-0043-4

© Издательство Камчатского государственного педагогического университета, 2002.

Камчатский Государственный Педагогический Университет

*Научно-исследовательский институт геологии, геофизики и экологии
Камчатки*

ПРИРОДНЫЕ КАТАСТРОФЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

(на примере развития геотермальной энергетики)

БЕЛОУСОВ В.И. БЕЛОУСОВА С.П.

Отв. редактор ДЕЛЕМЕНЬ И.Ф.

Издательство КГПУ

Петропавловск-Камчатский

2002

Предисловие	4
Введение.	6
Глава 1. Объекты использования глубинного тепла Земли.	12
1.1 Общие сведения.	
1.2 Геолого-тектонические позиции геотермальных систем и их соотношение с магматизмом.	
1.3 Предположение о происхождении и механизме функционирования корового источника тепла в гидротермально-магматических конвективных системах.	
1.4 Поверхностные термопроявления современных гидротермальных систем. Тепловая мощность. Аккумуляция геотермальной энергии в субповерхностных условиях. Тепловые экраны.	
Глава 2 Геотермия Камчатки.	55
2.1 Использование геотермальной энергии в народном хозяйстве. (диаграмма Линдела).	
2.2 Использование геотермальных ресурсов в России.	
2.3 Экономические особенности использования геотермальной энергии.	
2.4 Итоги первого этапа реализации геотермальных программ на Камчатке. Негативное воздействие на окружающую среду.	
Глава 3 Опыт реализации геотермальных проектов рубежом. Примеры.	78
3.1 Геотермальная энергетика Италии.	
3.2. Геотермальная энергетика в США.	
3.3. Проблемы использования геотермальных ресурсов в Новой Зеландии.	
3.4 Гидротермальная энергетика в Японии.	
3.5 Современное состояние и перспективы развития геотермальной энергетики в Мексике, на Филиппинах, в Индонезии и Исландии.	
Глава 4 Экологически непротиворечивые способы реализации программ по геотермальной энергетике.	106
4.1 Обзор экологически вредных способов решения проблемы энергетики и охраны окружающей среды.	
4.2 Закачка использованных гидротерм (реинжекция).	
4.3 Рекультивация.	

4.4 Формирование эталонных особо охраняемых природных геотермальных ландшафтов и геотермальных систем.

4.5 Строительство малых геотермальных станций.

4.6 Формирование системы рекреационных зон.

Заключение	122
Список литературы	124

Предисловие.

Проблема использования глубинного тепла Земли, где оно проявлялось на поверхности, вероятно, возникла на заре развития человеческой цивилизации. Промышленное освоение геотермальной энергии началось в Италии в начале XX века. Здесь был получен первый опыт воздействия цивилизованного человека на окружающую среду, обусловленную вулканической и гидротермальной деятельностью, который своим происхождением непосредственно обязан глубинным геологическим процессам.

Важной особенностью этого источника энергии является небольшая удаленность его от места потребления. Все другие виды энергетических источников обычно разделены большими расстояниями от потребителя, и поэтому люди, использующие, например, уголь, нефть, газ, дрова, торф, для получения энергии, необходимой для их жизнедеятельности, не могут наблюдать, что происходит с природой при добыче этих источников энергии. Изменения окружающей среды, которые вызваны процессом получения энергетического сырья для электростанций и систем отопления в местах их проживания, не влияют на их моральные и нравственные мотивы поведения, которые вызывали бы тревогу за среду обитания. Информация, получаемая из средств массовой информации, не может воздействовать на чувственное восприятие конкретного человека, так ярко, как это происходит при непосредственном контакте с результатами промышленной добычи органических видов топлив. Москвич, который максимально пользуется благами, получаемыми от использования газа Сибири, никогда не воспринимает так остро, как местные манси и остяки и даже приезжие строители и газодобытчики, те нарушения природных процессов в долине реки Оби и её притоков, которые связаны с промышленным освоением этого края.

По иному реагируют на использование геотермальных ресурсов в энергетических целях люди, живущие вблизи вулканов и термальных источников. Они в течение своего проживания, возможно с детства, не только наблюдали конкретный горячий источник, но даже использовали в бытовых, бальнеологических или эстетических целях термальными водами естественных термопроявлений. Когда же были пробурены скважины, которые извлекают пар и горячую воду для теплиц, нагрева жилых помещений, для геотермальной электростанции, этот источник исчез. На его месте образовалась струйка пара, отложения гейзерита разрушились, а на их месте образовалась площадка красных глин. На удалении 2-3 км от бывшего источника с экзотическим гейзерным режимом извержения кипящих гидротерм, где была небольшая парящая площадка, сложенная сверху красными глинами, а на глубине синими глинами с золотистыми

кристаллами пирита, образовалось большое геотермальное поле, изрытое глубокими ямами, заполненными булькающей глиной. Это все непривычно местному жителю и естественно, действует на него удручающе, так как он не видит прежнего образа своей «малой родины».

С точки зрения эволюции причин, породивших эти термальные источники, вообще-то в природе ничего необычного не произошло. Источники обязаны своим появлением на земной поверхности соотношению горизонтов подземных вод, обусловленному геологическим строением данного участка, и профилю рельефа этого участка. При наличии глубоких каньонообразных долин рек и ручьев, уровень в которых тесно сопряжен с водоносными горизонтами, подземные воды обычно выходят на поверхность в виде струй-источников. Как известно, рельеф быстро изменяется, в особенности, в гористой местности, где эрозионная деятельность поверхностных водотоков энергична. В результате углубления их русел уровень разгрузки подземных вод понижается, следуя за уровнем воды в водотоках. Исчезают старые термальные источники, расположенные на относительно высоких отметках рельефа, появляются новые. Изменяется режим извержения гейзеров. Пульсации в старых гейзерах становятся реже, а со временем совсем прекращается истечение гидротерм. Перестают образовываться отложения гейзеритов и травертинов. Обильные дожди или сильное снеготаяние, вызванные очередным циклоном или извержением рядом расположенного вулкана, этот процесс эрозии ускоряют или замедляют и порой приводят к полной перестройке структуры поверхностной разгрузки подземных термальных вод.

Таким образом, можно сделать вывод, что характер изменений, вызванных эволюционными или революционными природными процессами, почти ничем не отличается от изменений вызванных деятельностью человека, связанных с эксплуатацией геотермальных ресурсов. По нашему мнению, геотермальная экология и проблемы, связанные с влиянием на неё геотермальной энергетики, в значительной степени требуют философского обсуждения.

Для того чтобы перейти к философским обсуждениям, на наш взгляд, целесообразно провести аналитические исследования опыта использования геотермальных ресурсов, накопленного со времени начала включения этого вида энергии в сферу промышленного освоения. Предлагаемый материал в этой книге преследует цель информировать ученых, промышленников, общественных и политических деятелей, преподавателей учебных заведений, студентов и учащихся, а также любознательных обывателей о достижениях научно-исследовательских и промышленных работ, а также о разноплановых проблемах геотермальной энергетики, и создать основу для последующих этапов её освоения в рамках развития человеческой цивилизации.

Введение

Реальные потребности развития цивилизации на Земле обусловлены непрерывным прогрессом в наращивании энергетической вооруженности, что сопровождается постоянным увеличением энергетических мощностей, которые требуют поиска новых источников энергии. Пока проекты освоения практически неисчерпаемых, энергетических ресурсов не нашли своего решения, человечество, в силу своей исключительной особенности развития, не может остановиться на достигнутом этапе прогресса и оно будет вынуждено пользоваться теми энергетическими ресурсами, которые доступны для освоения и реализации с точки зрения современного уровня экономического развития.

Опасная зависимость общества от минеральных и энергетических ресурсов особенно обострилась на Камчатке в последние годы. В западном мире с этой проблемой столкнулись в 70-х годах XX века. Это способствовало росту сознания необходимости оценки не только их количества, которое может производиться при данных экологических условиях, но также оценки ресурсов ещё не открытых или таких, которые могут производиться по мере совершенствования геологических технологий или при других технико-экономических условиях. Более широкая оценка будущего снабжения минеральными и энергетическими продуктами геологических или космических процессов была определена термином “ресурсная оценка”.

Во второй половине XX века стало очевидно, что используемые источники энергии или ограничены в своих ресурсах, или же опасны при своём использовании, в особенности, в областях современной сейсмической и вулканической активизации. Кроме того, они распределены неравномерно и могут принести существенный вред среде обитания биоценозов или при их добыче, или при транспортировке. Зависимость многих стран и отдалённых регионов, в такой большой стране, как Россия, от импортируемого топлива даёт толчок действиям Правительств, руководителям регионов и промышленников к поиску иных источников энергии и к разработке технологий в реализации новых источников энергии. В первую очередь проявился такой интерес, как на национальном уровне, так и на международном, к разработке геотехнологических решений в использовании геотермальной энергетике.

В 1961 году в Риме под эгидой ЮНЕСКО состоялась Международная Конференция по новым источникам энергии (геотермия, энергия солнца, ветровая, биологические отходы и т.д.). Наибольшее количество докладов было представлено по проблеме геотермальной энергетике, в том числе было сделано два доклада от СССР. В этот период уже велись буровые геологоразведочные работы на Паужетских горячих источниках на юге Камчатки. Первая роторная 800 метровая скважина и ряд не глубоких скважин колонкового бурения позволяли дать первые оценки геотермальных ресурсов разведанного участка (северо-западный склон Камбального хребта), которые были достаточны для строительства опытно-промышленной геотермальной электростанции, мощностью до 5 Мвт.

Ко времени проведения Конференции в Риме по новым источникам энергии только в 3-х странах были построены и входили в разряд действующих три ГеоТЭС: две, работавшие на паровых геотермальных системах (Лардерелло в Италии и Гейзеры Калифорнии в США), и одна (Вайракей, в Новой Зеландии), работающая на высокотемпературной гидротермальной системе. В последней из скважин получали пароводяную смесь, подававшуюся на сепараторы, где происходило разделение на пар и воду. На Вайракейской системе пар по трубопроводам поступал на турбины, после прохождения которых, он конденсировался холодной водой, и жидкие гидротермы после сепаратора по каналу сбрасывались в ручей Вайракей и далее в реку Вайкато. На паровых системах получали перегретый пар прямо из скважин и подавали его на турбины.

Для более глубокого использования этого пара, он после турбины поступал в конденсаторы, которые располагались в специальных воздухообменных сооружениях (градирнях) (рис.1).



Рис.1 Геотермальная электростанция Охааки-Бродлэндс в Новой Зеландии. Установленная мощность 113 мвт. На переднем плане паропроводы, в центральной части: справа сепараторы, слева градирня. На заднем плане -

Мощность ГеоТЭС в Лардерелло к тому времени составляла 220 Мвт, Вайракей ~110 мвт и на Гейзерах Калифорнии работала 12 мвт пилотная ГеоТЭС. Таким образом, в мировой геотермике определились лидеры, которые и задавали тон развитию этой отрасли энергетики.

История развития геотермии на Камчатке. По инициативе и под руководством академика АН СССР Лаврентьева М.А. в 1955 году группой специалистов было проведено экспедиционное обследование гидротермальных источников Камчатки и Курильских островов. Это было первое и до настоящего времени не повторенное системное изучение гидротермальных ресурсов на Камчатке. Результатом этих исследований явилось научно-техническое обоснование геологоразведочных и опытно-эксплуатационных исследований Паужетской высокотемпературной гидротермальной системы с конечной целью строительства опытно-

промышленной Гео ТЭС, мощностью 5 МВт. При этом на первых этапах этих научно-исследовательских и геотехнологических работ преследовалась практическая цель – энергетическое обеспечение Озерновского рыбокомбината, колхоза “Красный труженик” и близлежащих населённых пунктов (сельхозфермы, санатория “Озерновские ключи” и собственно посёлка Паужетки).

Удачное взаимодействие академических исследований и геологов производителей, обусловленное специальным решением Правительства СССР, обеспечило быстрое решение всех научных геолого-энерготехнологических исследовательских проблем и реализацию результатов этих работ.

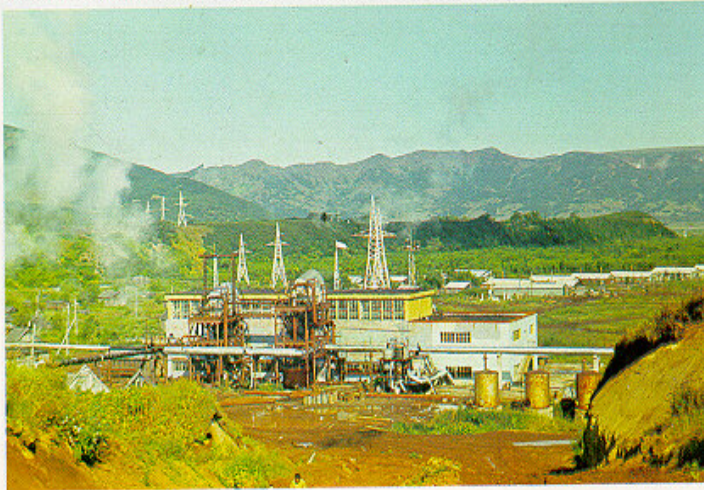
Паужетская ГеоТЭС была введена в строй в 1967 году с установленной мощностью 3 мвт. В последующем, специальным решением Министерства газовой промышленности на основании научных материалов первого этапа изучения Паужетской гидротермальной системы было пробурено несколько эксплуатационно-разведочных геотермальных скважин, энергетическая мощность которых, позволила довести мощность Паужетской ГеоТЭС до проектного уровня 5 мвт. В последующем были проведены исследования на северо-западном склоне Камбального хребта и выведены дополнительные геотермальные ресурсы, достаточные для расширения Паужетской Гео ТЭС до 20-25 МВт. Однако, идея передачи энергии этой станции на рыбокомбинат Озерновский и п. Усть-Большерецк не нашла поддержки.

После прекращения Камчатским геологическим управлением Министерства геологии РСФСР разведочных работ на Паужетке тесное сотрудничество с АН СССР также было прервано и были предприняты без достаточной научно-исследовательской и геотехнологической проработки интенсивные, в основном, геологоразведочные работы на Больше банной высокотемпературной гидротермальной системе (120 км от Петропавловска-Камчатского). Во время буровых работ были встречены не преодолимые в то время трудности (не контролируемые выбросы мощных струй парагазоводяной смеси, зарастание скважин минеральными отложениями) и вскоре эти работы были завершены, не достигнув практического результата. Более успешно велись работы по разведке Паратунской низкотемпературной гидротермальной системы, вблизи Петропавловска-Камчатского и посёлка Паратунка. Здесь также не были в полной мере проведены научно-исследовательские и энерготехнологические работы, в связи с чем, объём капитальных затрат не был оптимальным и экономическая выгодность использования геотермальной энергии подвергалась сомнению.

Постоянные попытки геотермальных специалистов Института вулканологии АН СССР побудить геологов и энергетиков к постановке системных научно-исследовательских и геолого-энерготехнологических работ наталкивались на упорное противодействие, обусловленное эйфорией нефтяного, газового и атомно-энергетического бумов. В качестве “отступного”, когда стало ясно, что атомную электростанцию вблизи Петропавловска по сеймотектонической ситуации строить нельзя, Минэнерго СССР (по инициативе заместителя начальника Камчатэнерго

Колосова В.М.) выделило сумму в 50 млн. рублей на разведку Мутновской высокотемпературной гидротермальной системы. При реализации этого проекта, как и прежде, научно-исследовательские и геолого-энергетические работы проводились по принципу “крайней необходимости”, когда геологи сталкивались с очередной непреодолимой проблемой. Итогом этих мучительно затянувшихся работ явилась Мутновская ГеоТЭС, мощностью только 12 МВт.(Рис.2)

Опытно-промышленная Паужетская ГеоТЭС мощностью 11 МВт на Камчатке.
The Pauzhetskaja pilot Geo PS 11 MW power in Kamchatka.



Испытания скважины на Мутновском геотермальном месторождении.

Test well at the Mutnovskaja geothermal field.



Поводя итог краткому историческому обзору исследований геотермальных ресурсов на Камчатке, можно констатировать, что эта задача на сегодняшний день в достаточной мере не решена. Выход из этой ситуации один - использовать опыт зарубежных стран и начать с подготовки и реализации программы исследований и использования гидротермальных систем на Камчатке, которой придать статус Федеральной.

Современное состояние геотермальной энергетики в мире. После длительного единоличного лидерства в геотермальной энергетике Италии, где была построена на высокотемпературной гидротермальной системе Лардерелло Гео ТЭС на 250 МВт, в 1957 году в Новой Зеландии, в Вайракее начала работать Гео ТЭС, мощность которой в последствии колебалась от 190 МВт до 147 МВт. В 1960 году в США на Гейзерах Калифорнии вошла в строй 12 мегаваттная ГеоТЭС. В это время начинаются усиленные поиски альтернативных источников энергии (солнца, ветра, гидротерм и др.), из которых приоритетным была геотермальная энергия. Энтузиазм освоения энергии земных недр сопровождался усилением научных исследований, а также разработкой технологий выбора мест бурения геотермальных скважин, усовершенствования конструкции как подземного, так и наземного оборудования, отработки технологических процессов отбора тепла из низкой и высокотемпературных гидротермальных систем и из сухих нагретых горных пород. В конце 70-х годов решаются проблемы оценки

тепловых ресурсов различного типа геотермальных систем и создания их моделей и программного обеспечения ЭВМ.

В настоящее время существует комплекс методов и способов оптимального объёма научно-исследовательских, поисковых, разведочных и эксплуатационных работ, который применяется при освоении энергетических ресурсов современных геотермальных (сюда включены не только разнообразные гидротермальные системы, но и системы нагретых твёрдых пород и геопресные системы - геотермальные системы, находящиеся под большим давлением в нефтегазовых месторождениях). Одновременно получила развитие система подготовки кадров геотермальных геологов. Результаты этих достижений приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Установленная энергетическая мощность Гео ТЭС по странам и годам.

Страна	Год	1990	1995	1998
Аргентина *		0.67	0.67	0.0
Австралия		0.0	0.17	0.4
Китай		19.2	28.78	32.0
Коста-Рика		0	55.0	120.0
Сальвадор		95.0	105.0	105.0
Франция (Гваделупа)		4.2	4.2	4.2
Греция*		0	0	0
Гватемала		0	0	5.0
Исландия		44.6	49.4	140.0
Индонезия		144.75	309.75	589.5
Италия		545.00	631.70	768.5
Япония		214.60	413.7	530.0
Кения		45.00	45.0	45.0
Мексика		700.00	753.0	743.0
Новая Зеландия		283.2	286.0	345.0
Никарагуа		70.00	70.0	70.0
Филиппины		891.00	1191.0	1848.0
Португалия (Азоры)		3.0	5.0	11.0
Россия		11.0	11.0	11.0
Тайланд		0.3	0.3	0.3
Турция		20.4	20.4	20.4
США		2774.6	2816.7	2850.0

Общая	5866.72	6796.98	8240.0
-------	---------	---------	--------

- В Аргентине и Греции пилотные станции.

После энергетического кризиса 70-х годов исследование и освоение геотермальных ресурсов получило дополнительный импульс. В развитых странах геотермальные исследования проводились на постоянной основе. Так, например, в США была принята 10 летняя программа по изучению объектов, которые в какой-либо степени могут быть источником подземного тепла. В сферу внимания вовлекались все поверхностные термопроявления, как действующие в настоящее время, так и в недалёком прошлом (четвертичный период), вулканы, зоны андезитового вулканизма, зоны поверхностного гидротермального изменения пород на вулканах и сопряжённых с ними структурах, термальных аномалий в недрах потухших вулканов и нефтегазовых месторождений.

Анализ, приведённой выше таблицы, позволяет сделать вполне определённый вывод об экономической целесообразности использования геотермальных ресурсов при наличии других энергетических источников. Аргументы, что геотермальный теплоноситель экономически не конкурентоспособен с другими видами энергетических источников, являются неправомерными. Несостоятельность такой аргументации состоит в том, что места добычи природного газа удалены от населенных пунктов на многие километры и, например, для того, чтобы доставить газ к электростанциям города Петропавловска-Камчатского необходимо проложить большой протяженности газопроводы, сжечь газ в котельных, получить пар и передать его на турбину.

У геотермальных электростанций процесс получения пара происходит в недрах Земли. Учитывая дороговизну строительства тепловых электростанций города Петропавловска-Камчатского в зоне сильных землетрясений (9 баллов по 12 – бальной шкале), и вероятность их полного разрушения будет сопровождаться непредсказуемыми трагическими последствиями, также свидетельствует о преимуществе этого типа энергетического источника. Кроме того, в пользу использования геотермальной энергии служат интенсивные работы по этой проблеме таких нефтегазодобывающих стран, как Мексика, Индонезия и Новая Зеландия. Страны, с развитой рыночной экономикой, как США, Италия и Япония также наращивают мощности геотермальных электростанций. Германия и Франция реализуют совместный проект по использованию сухих нагретых горных пород в Рейнском грабене, хотя эти страны располагаются вдали от вулканических районов. Таким образом, экономическая целесообразность должна рассчитываться с особой тщательностью.

Глава 1. Объекты использования глубинного тепла Земли.

1.1 Общие сведения.

При изучении месторождений полезных ископаемых гидротермального происхождения определилось место гидротермального процесса в длинном ряду земных процессов, что позволило назвать его постмагматическим, т.е. возникшим и действующим в результате остывания магматической инъеции в недрах земной коры. Суть концепций сводилась к механизму отторжения эманации, конденсирующихся по мере удаления от расплава и образующих растворы, в которых главным компонентом являлась вода. Гидротермальные растворы начинают самостоятельное развитие по законам гидравлики и термодинамики.

Пространственная приуроченность современных термопроявлений к областям молодого и современного вулканизма свидетельствует о тесной связи магматизма и гидротерм.

Существуют представления, что современные термопроявления являются аналогами постмагматических гидротермальных растворов, сформировавших месторождения полезных ископаемых в древних складчатых областях; такие растворы исследователи относили к поствулканическим растворам. В недавнем прошлом изучение современных гидротерм проводилось по программам, отвечающим запросам рудной геологии; в этом периоде оно характеризовалось в основном изучением поверхностных термопроявлений. Перенос рудных компонентов изучался в условиях, отвечающих термодинамическим параметрам земной поверхности. Этого, конечно, было недостаточно, чтобы получить правильное представление о гидротермальном процессе, сопутствующем современному вулканизму.

В связи с быстрым освоением глубоких горизонтов районов термопроявлений с помощью буровых скважин был получен фактический материал, который позволил по-новому подойти к решениям проблем формирования термальных вод в вулканических областях. Исследования показали значительную роль метеорных вод в составе гидротерм и установили существование в этих районах аномального теплового потока, идущего от уровней верхней мантии. В то же время изучение условий формирования термальных вод в вулканических областях позволило сделать вывод о влиянии на величину модулей подземного стока геологических факторов (верхний водоупор), которые определяют возможность образования термальных вод с высокими температурами вблизи поверхности Земли.

Эти данные, на первый взгляд, находятся в противоречии с концепциями, разработанными для рудных месторождений гидротермального происхождения. Однако это кажущееся различие. Если обратиться к деталям, то станет очевидным, что в концепциях, призванных объяснить природу гидротерм, формирующих рудные месторождения, придавалось существенное значение геолого-структурным факторам, активно влияющим на процессы рудоотложения. Это, несомненно, характеризует гидродинамические условия рудообразующих растворов в конкретной геолого-структурной ситуации. Ярким примером такого рода геологических факторов являются экраны, своеобразная роль которых в современных

гидротермальных системах изучена достаточно хорошо. Точек соприкосновения концепций гидротермального процесса, сформулированных с двух различных позиций, на наш взгляд, достаточно много.

На первых этапах изучения районов гидротермальной активности в современных вулканических областях была выделена геолого-гидрогеологическая структура в этих участках земной коры, известная под названием «гидротермальная система». Это название вошло в обиход во многих странах, исследующих современный гидротермальный процесс, однако строгого определения этой структуры вначале не было. Фактический материал, полученный в результате бурения на термальных площадках, позволил выявить общие закономерности динамики термальных вод в верхних частях земной коры.

На основании этих данных В.В. Аверьевым и В.М. Сугробовым было дано определение гидротермальной системы. «Гидротермальными системами принято считать термоаномалии в верхней части земной коры областей современного вулканизма, приуроченные к определенным геологическим структурам и характеризующиеся поверхностной гидротермальной активностью». Тепловой поток в пределах таких аномалий в 50—100 раз превышает средние показатели для Земли. Это дает основание считать, что отдача глубинного тепла здесь и приток его из недр осуществляются в основном посредством теплопереноса. В приповерхностных условиях в качестве теплоносителя выступают вода и водяной пар. Верхние части гидротермальных систем тесно связаны с окружающими их обычными холодными водами и находятся в условиях водонапорного режима. В этом отношении гидротермальные системы рассматриваются как высокотемпературные водонапорные системы, возникающие в земной коре при внедрении в водоносные слои глубинного теплоносителя — надкритического водного флюида или расплава» (Vakin и др., 1971, с.111). Однако данное определение отражает лишь первый этап в исследовании гидротермальных систем. Эта формулировка рассматривает одну сторону явления — гидродинамическую. В то же время широкому кругу исследователей хорошо известно, что циркуляция вод может происходить в геологических структурах только определенного типа. В особенности это относится к водонапорным системам. Необходимо учесть, что приведенное выше определение гидротермальных систем не учитывает особенностей состава термальных вод. Гидротермальные системы приравнивались к гидрогеологическим системам с холодными водами, хотя минерализация термальных вод и состав газов придают им своеобразную специфику. Термальные воды ведут себя как минералообразующие растворы, которые оказывают влияние на фильтрационные свойства водовмещающих толщ и водоупорных горизонтов.

В настоящей работе будет часто употребляться название гидротермальных систем как системы геотермальные. Нет никакой разницы в этих определениях, так как определение геотермальная система обозначает более широкий круг такого рода систем и включает тепловые системы в земной коре, заключенные в нагретых горных породах, которые представляют собой остывающие магматические тела, или, как их принято называть в геологии, интрузии.

При изучении современных гидротермальных систем одной из главных проблем является соотношение гидротермальной деятельности и магматизма. Работами многих исследователей показано, что в большинстве случаев гидротермы пространственно и во времени связаны с проявлениями кислого вулканизма. В.В. Аверьев (1966) пришел к выводу, что гидротермальная деятельность и кислый вулканизм находятся в парагенетической связи и они обусловлены восходящим потоком глубинного флюида, возникающего, как и андезитобазальтовый вулканизм, на уровне верхней мантии. По его мнению, гидротермальные системы и отдельные термальные проявления на глубине связаны единым фронтом теплового питания. Он предложил такие крупные участки вулканической области называть геотермальными районами.

В пределах геотермальных районов выделяются геологические структуры, пронизывающие земную кору, которые определяются, как долгоживущие вулканические центры. С развитием этих структур связано образование и деятельность современных гидротермальных систем. По ним происходит транспортирование магматического расплава, сопровождаемого аномальным тепловым потоком. В долгоживущих вулканических центрах, с которыми генетически связаны современные гидротермальные системы, извержение магматического расплава происходит из многих центров. Для них характерны побочные извержения, аппараты которых порой расположены на значительном удалении друг от друга. Изучение долгоживущих вулканических центров позволяет получить новые данные о развитии островных вулканических дуг и по-новому рассматривать генезис гидротерм и процессы рудообразования (Белоусов, 1978).

В последнее десятилетие, благодаря исследованиям молодых и палео-гидротермальных систем в областях современного вулканизма в связи с изучением геотермальных месторождений и разработкой концептуальной модели условий формирования эпитеермальных месторождений полиметаллов, накоплена значительная информация. Исследования позволили сделать вывод о наличии в этих районах гидротермально-магматических (магмо - вулканогидротермальных) конвективных систем (Белоусов и др. 1998; Giggenbach et al., 1990). Главной особенностью этих систем является перенос тепловой энергии, расплавов, газов и различных химических элементов и соединений от уровня верхней мантии в верхние горизонты земной коры.

Функционирование гидротермально-магматических конвективных систем обусловлено соответствующей геолого-структурной обстановкой и определенным сейсмотектоническим режимом в регионе. По мере развития сквозь коровых дренирующих систем, их агенты (расплавы, магматические и гидротермальные газы) взаимодействуют с вмещающими породами, морскими, подземными и метеорными водами, способствуя изоляции аномального теплового потока за счёт создания зон, препятствующих рассеянию тепла в окружающую среду. Вокруг гидротермально-магматической колонны происходит осаждение кремнезёма и других гидротермальных минералов (Белоусов и др., 1998, 1999).

Как следует из названия, системы состоят из двух частей. Верхняя часть представлена гидротермальной конвективной ячейкой, в которой главным рабочим телом являются гидротермы в жидком и парообразном состоянии, нижняя - магматической конвективной ячейкой, где основную работу выполняет магматический расплав. Расплав отличается от гидротерм сложным многокомпонентным составом, основу которого составляет силикатная масса. Гидротермальная конвективная ячейка доступна для исследователей, т. к. она расположена вблизи поверхности Земли, часто наблюдается в виде термопроявлений и вскрыта многими скважинами на геотермальных месторождениях. Парогидротермы обладают более низкими, чем у магмы, Р-Т - параметрами, что и предопределяет большую доступность их для непосредственного изучения в полевых условиях. Магматическая конвективная ячейка проявляется на земной поверхности эпизодически в виде извержений вулканов. Последние носят, в основном, катастрофический характер и доступны лишь визуальным наблюдениям с больших расстояний. Само появление магмы на поверхности Земли замаскировано процессами взрывного характера, опасными для непосредственного изучения. Чаще всего истечение магмы и её взаимодействие с гидросферой, в результате чего и формируется гидротермальная конвективная ячейка, происходит глубоко в недрах земной коры, или в океанических глубинах. Поэтому вулканы и гидротермальные системы, доступные для наблюдения, несут уникальную информацию о глубоких горизонтах земной коры и даже о мантии и должны быть тщательно изучены.

1.2 Геолого-тектонические позиции геотермальных систем и их соотношение с магматизмом.

Почти все изученные геотермальные районы Камчатки расположены в Восточно-Камчатской вулканической зоне. Формирование этой зоны связано с развитием грабен-синклиналей крупных прогибов северо-восточного простирания, ограниченных либо региональными разломами со значительной амплитудой смещения (1000—1500 м), либо серией ступенчатых сбросов небольшой амплитуды, заполненных четвертичными вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами (Эрлих, 1973). По представлениям Э.Н. Эрлиха, грабен-синклинали характеризуются телескопичностью строения, выражающейся в последовательном развитии однотипных структур все более высоких порядков вплоть до узких впадин, которые непосредственно примыкают к расположенным в их пределах одиночным вулканическим рядам (рис.3).

Ранее А.Е. Святловский (1967) выделял подобные впадины как структурные трюги, в которых кровля опущенного блока, сложенного плиоцен-четвертичными образованиями, не нарушена и залегает горизонтально. Как будет показано ниже на примере различных геотермальных районов, в том числе Паужетского, геологическое строение прогибов представляется более сложным.

Геологическое строение районов локализации современных гидротермально-магматических конвективных систем оказывает

решающее влияние на их формирование и деятельность. Оно определяется геологической историей развития этого участка земной коры, который располагается в зоне перехода от океанической коры к коре континентального типа. В настоящее время принято эту область называть зоной субдукции (рис.4)

Гидротермально-магматические конвективные системы в зонах субдукции локализуются в сложных геологических структурах, называемых долгоживущими вулканическими центрами (Белоусов, 1978), вулканогенно-рудными центрами (Василевский, 1977), центрами эндогенной активности (Егоров, 1984), и т.д. Под долгоживущими вулканическими центрами (ДВЦ) мы понимаем активно и длительно действующие геологические структуры в областях современного вулканизма, которые контролируют движение магматических расплавов, газов и флюидов от уровней верхней мантии к поверхности Земли. Возраст этих структур определяется десятками

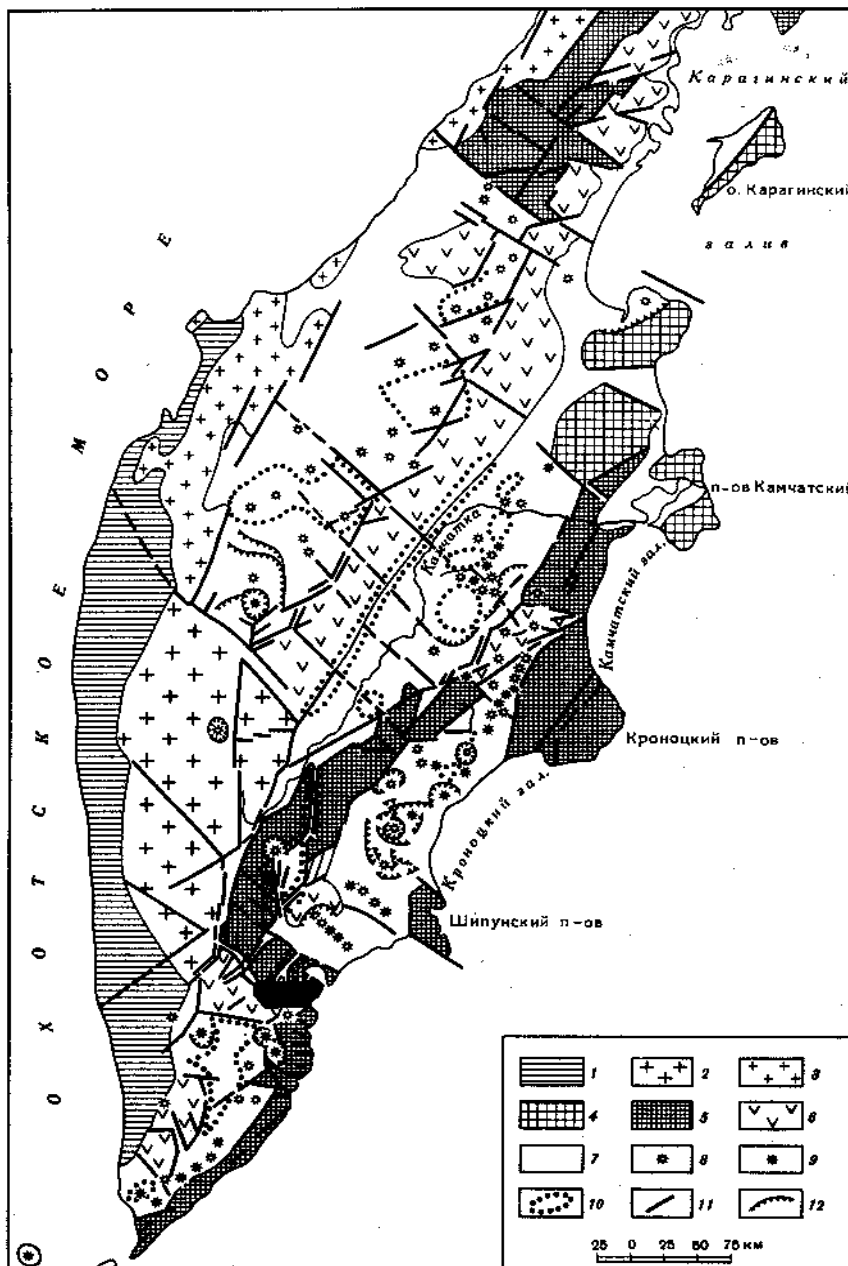


Рис. 3. Схема современной структуры и вулканизма Камчатки (из кн. Трухина и Петровой, 1977).

1 — стабильная зона равнины западного побережья, 2 — Малкинский свод, время заложения - конец олигоцена - начало миоцена; 3 - Тагильско-Паланская зона сводовых поднятий, время заложения — плиоцен; 4 — области горст-антиклинориев на меловых и палеоген-миоценовых отложениях; 5 — сводовые поднятия на меловых и палеоген-миоценовых отложениях; зона аккумулятивно -тектонических структур: 6 - вовлеченные в поднятие районы плиоцен-нижнечетвертичного времени; 7 — грабен-синклинали плиоцен-четвертичного времени; 8 - крупнейшие потухшие вулканы; 9 - действующие вулканы; 10- зоны ареального вулканизма; 11 — разломы; 12 — вулкано-тектонические депрессии. Темным цветом закрашен район работ

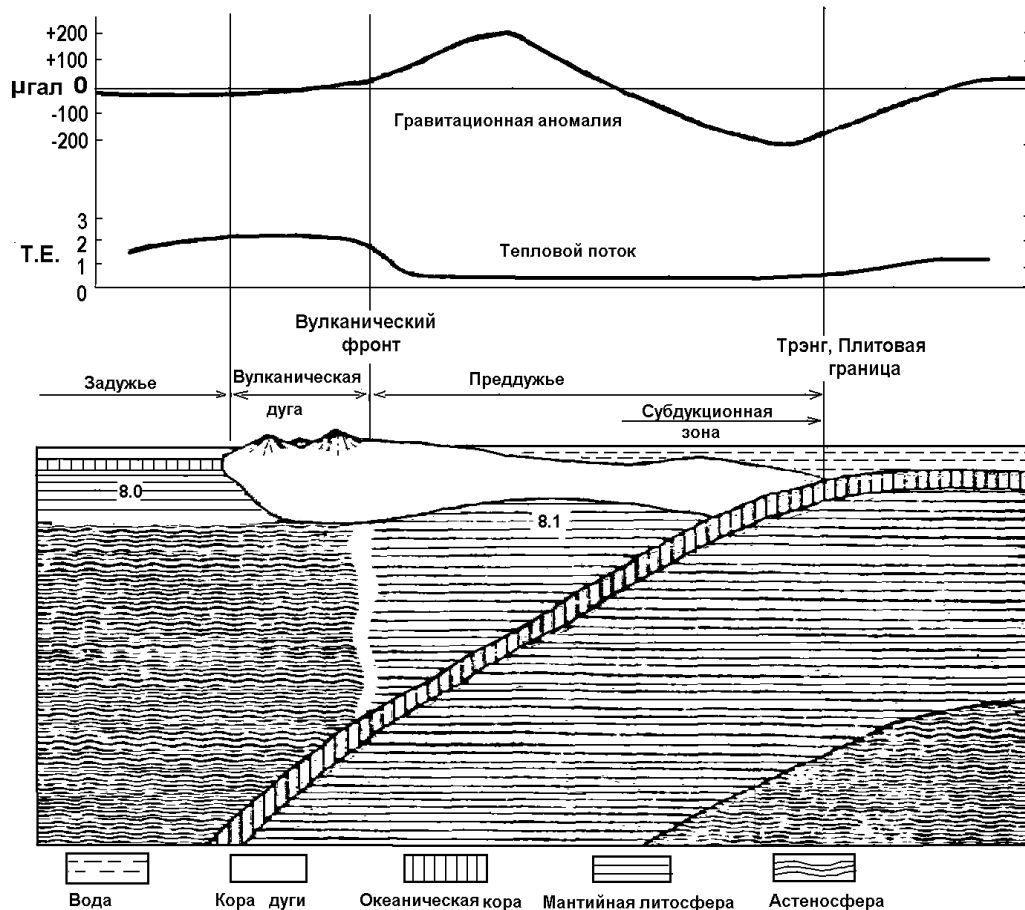


Рис. 4 Схематический поперечный разрез и номенклатура конвективной плитовой границы. Цифры в верхней части мантии - типичные скорости Р волн (Hedenquist, Noughton, 1987)

миллионов лет, от их зарождения на коре океанического типа до прекращения вулканической активности в условиях континентальной коры. ДВЦ представляют собой практически непрерывно растущие морфоструктуры вследствие накопления вулканогенного и хемогенного

материала, и в то же время они являются поставщиками материала для образования вулканогенно-осадочных пород на периферии центров и в глубоководных впадинах, смежных с островными вулканическими дугами (Белоусов, 1978).

На Камчатке ДВЦ приурочены к участкам пересечения тектонических разломов субмеридионального и субширотного простирания. Субмеридиональные разломы обычно находятся в режиме растяжения и относятся к тектоническим структурам раздвигового типа (рис.5).

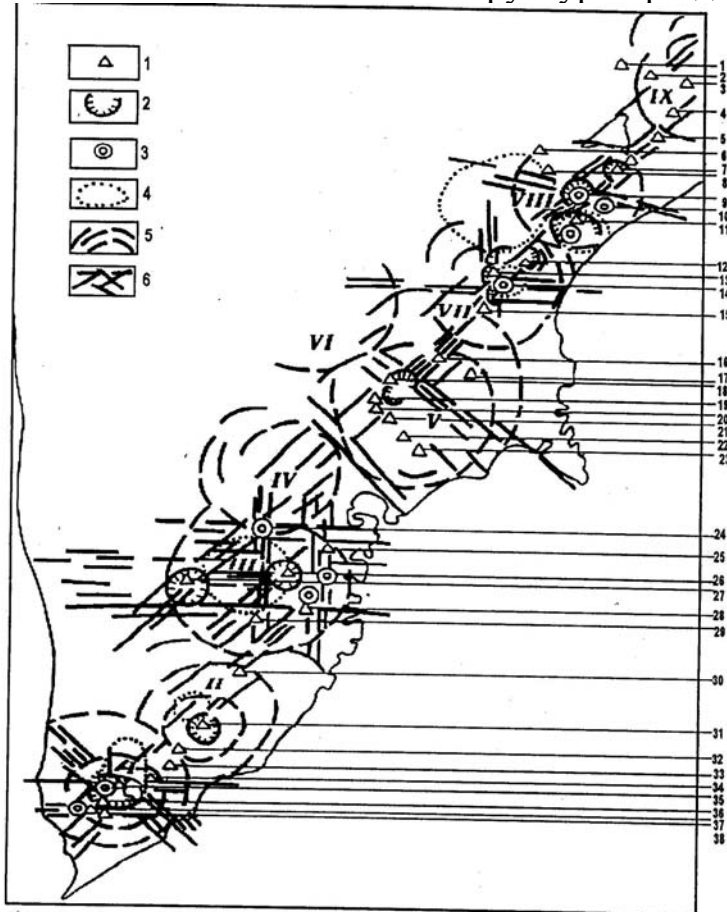


Рис 5 Региональные геолого-структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем Восточно-Камчатского вулканического пояса

I-вулканы (1-Кизимен; п2-Конради; 3-Гамчен; 4-Шмидта; 5-Кроноцкий; 6-Унана; 7-Крашенинникова; 8-Тауншиц; 11-Большой Семячик; 12-Малый Семячик; 13-Карымский; 15-Дитмара; 16-Дзэндзур; 17-Жупановский; 18-Купол; 19-Ааг; 20-Арик; 21-Корякский; 22-Авачинский; 23-Козельский; 25-Вилючинский; 26-Горелый; 27-Опала; 28-Мутновский; 29-Асача; 30-Ходутка; 31-Ксудач; 32- кальдера Призрак; 33-Желтовский; 34-Ильинский; 35-Дикий Гребень; 36-экструзия Плоская; 37-Кошелевский; 38-Камбальный); 2-кальдеры; 3-высокотемпературные гидротермальные системы, по В.М. Сугробову [1979] (9-кальдера Узон; 10-Долина Гейзеров; II-Семячинская; 14-Академии Наук; 24-Больше-Банная; 26-Жировская; 28-Северо-Мутновская; 35-Паужетская; 37-Кошелевская); 4-зоны отрицательных аномалий силы тяжести, по М.И.Зобину и др. [1971]; 5-центры эндогенной активности по О.Н. Егорову [1984]; I-Паужетский; II-Ксудачский; III-Мутновский; IV-Корякско-Быстринский; V-Налачевский; VI-Авачинский; VII-Карымско-Семячикский; VIII-Узон-Гейзерный; IX-Сторожевский; 6-основные системы разломов.

Как уже отмечалось, геологическое строение ДВЦ в зонах субдукции отличается большой сложностью. Геолого-геофизическим картированием установлено, что верхние части этих структур сложены породами различного состава: от базальтов до риолитов, образование которых связано с извержением магматических расплавов в условиях многослойной земной коры и на границе атмосферы, гидросферы и литосферы (рис. 6).

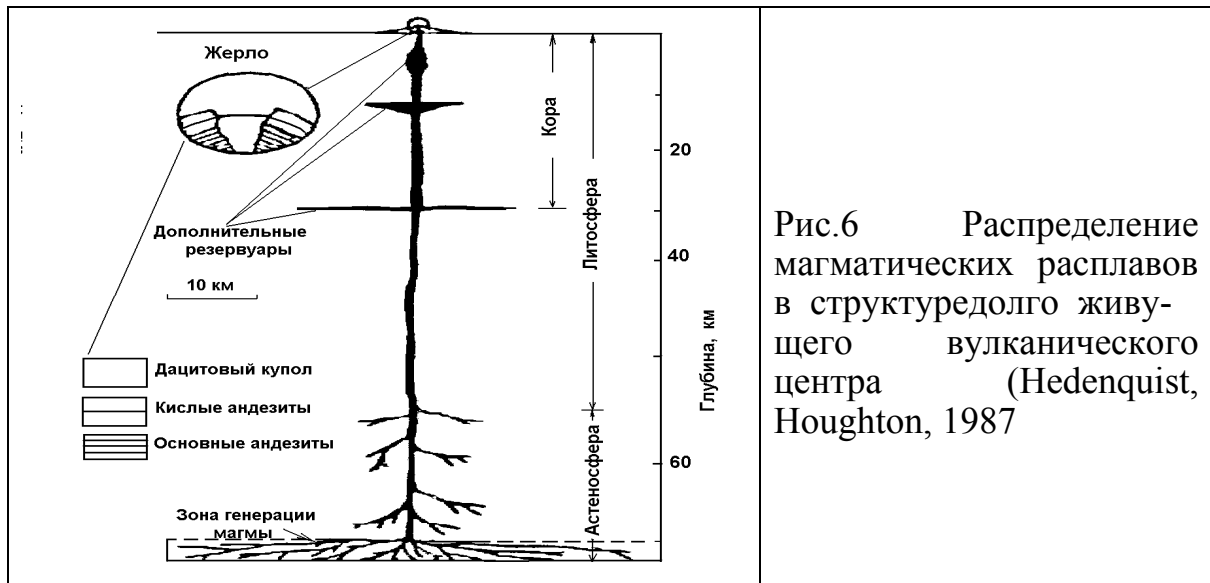


Рис.6 Распределение магматических расплавов в структуре долго живущего вулканического центра (Hedenquist, Houghton, 1987)

Сложные взаимоотношения литогенеза, магматизма и гидротермальной деятельности затушевывают реальную картину соотношения этих процессов. В связи с чем требовалось проведение специального анализа по количественной оценке энергетики геологических процессов, определяющих развитие ДВЦ. В результате исследований установлено, что ведущим процессом в деятельности ДВЦ является базальтовый вулканизм. Его тепловая мощность составляет около 75 – 80 % от общей мощности магматизма конкретного ДВЦ (Белоусов и др., 1971; Белоусов, Сугробов, 1977; Белоусов, 1978) В дальнейшем этот вывод был подтверждён другими исследователями (Muffler, 1991).

История формирования гидротермально-магматических конвективных систем История развития центров и, соответственно, гидротермально-магматических структур, может быть разбита на несколько этапов. В основу выделения этапов положен генетический принцип: развитие базальтового вулканизма и его производных на фоне перехода от океанической коры к коре континентального типа.

1. Этап подводно-океанический. В результате интенсивных исследований подводных океанических хребтов в 60-е – 80-е годы, как с помощью научно-исследовательских судов, так и глубоководного бурения, получена качественная информация о магматической и газо-гидротермальной деятельности на дне океанов и в пределах верхней части океанической коры. Возникновение океанических ДВЦ и связанных с ними гидротермально-магматических систем происходит на стадии заложения подводных вулканических хребтов или гор на океанической коре или в местах локализации «горячих точек» в районе зон спрединга (рис. 7).

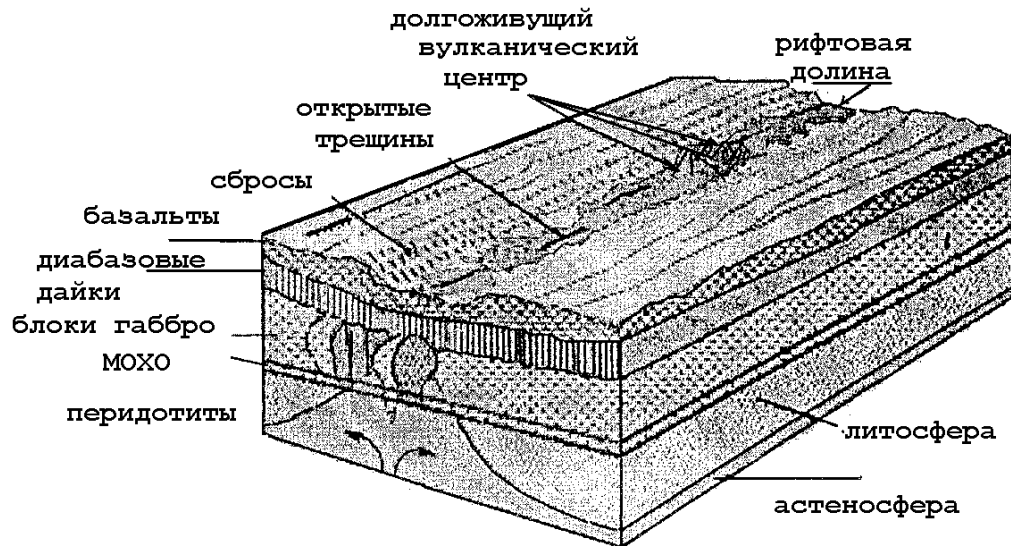


рис.7 Срединно-океанический спрединговый центр.

Магматический базальтовый расплав «впрыскивается» под давлением в коровую зону и придонные горизонты океана, и передает тепловую энергию и часть своей массы в виде летучих вмещающим породам, формируя тем самым гидротермальные растворы с химическим составом, отличающимся от морской воды (Bischoff G.L., Dickson F.W., 1975; Seyfried W.E., Bischoff G.L., 1981; Zierenberg R.A et al., 1988). Результатом взаимодействия морской воды с базальтовыми расплавами является насыщение гидротерм кремнеземом в коллоидной форме, летучими (CO_2 , H_2S и др.) и серой в сульфатной форме. Кроме того, по мере инфильтрации морской воды вглубь подводной гидротермальной системы в ней существенно понижается содержание магния, что связано с отложением кремнезема в виде халцедона и других форм кварца (Ganecky D.R., Seyfried W.F., 1984). Повышенное содержание углекислоты способствует увеличению в гидротермах содержания кальция, вступающего во взаимодействие с водородной формой силикагеля, и образование кальциевого силикагеля. Са-силикагель обладает более высокой адсорбционной способностью (в 50 и более раз) по сравнению с водородным силикагелем. Все эти процессы приводят к изменению проницаемости водовмещающих комплексов, слагающих гидротермально-магматическую систему, и создают условия «тепловой и геохимической самоизоляции» системы (Houghton V.F., Nairn I.A., 1992). Геология

гидротермально-магматических систем срединно-океанических хребтов изучена как с помощью бурения скважин, так и за счет привлечения аналогов систем, которыми могут служить месторождения массивных сульфидных руд в офиолитах Кипра или Юго-Западного Орегона США (Harper G.D. et al., 1988). Одним из наиболее значительных результатов в исследовании гидротермально-магматических систем срединно-океанических хребтов является установление различий в характере гидротермальных изменений в очагах разгрузки восходящего потока гидротерм и гидротермальных изменений пород в зонах нисходящих потоков. В первом случае диагностируются эпидот, кварц и хлорит, развиваются метаколлоидное окварцевание, ноздреватые текстуры метасоматитов, жилообразование. Во втором – стекловатые породы экструзий хлоритизированы и содержат повышенное количество магния и калия, выщелочены кальций и кремний.

2. Этап перехода подводно-океанических хребтов в островную дугу.

Мы выделяем этот этап эволюции гидротермально-магматических конвективных систем на основании изменения термодинамических условий выделения газов из магматического расплава. Существует предположение, что на океанических глубинах в 2000 м, где гидростатическое давление составляет 200 атмосфер, в магматических расплавах на подводных вулканах образуются пузырьки газа, магма дегазирует. В реальной обстановке это проявляется в интенсивном кипении расплава и выбросах большого объема пирокластики - пеплов, шлаков, пемз. В составе летучих в магматических расплавах находится не только вода, но и другие газы, некоторые слабо растворимы в них – например, углекислый газ. Движение летучих в плоских магмоводах приводит к повышению их концентрации в головных частях поднимающихся магматических колонн. Следует ожидать, что пузырьки таких газов могут образоваться на больших глубинах, что в свою очередь приводит к формированию геологических структур, уходящих корнями в верхнюю мантию (рис.8)

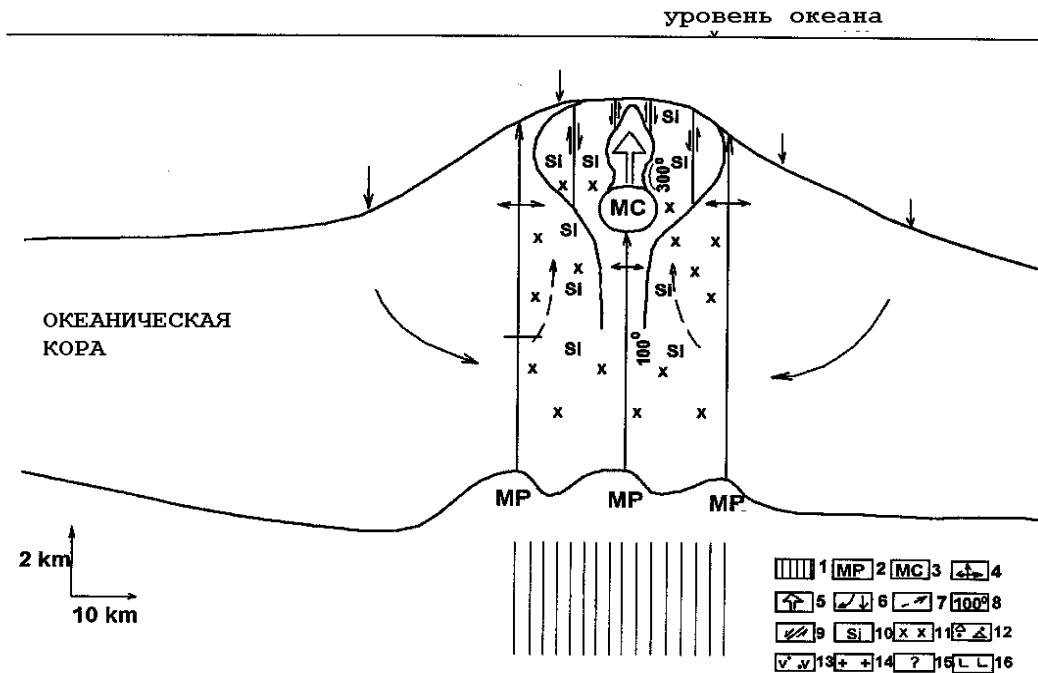


Рис.8 Схематический разрез подводного долгоживущего вулканического центра в структуре подводного океанического хребта в зоне спрединга (растяжения) океанической земной коры. 1-зона генерации примитивных магм в верхней мантии; 2- верхне-мантийные магматические резервуары – место аккумуляции примитивных расплавов; 3- коровые магматические очаги – место остановки в земной коре примитивных расплавов, где накапливается тепловая энергия и происходит плавление вмещающих метаморфизованных (окварцеванных) пород, ранее извергнутых и измененных гидротермальными растворами (пропилитизация, окварцевание, происходящие при взаимодействии гидротерм, насыщенных золями кремнекислоты и морской водой, в которой содержится магний и кальций, осаждающие коллоидную кремнекислоту в виде кварца-халцедона); анатектический расплав, возбужденный последующими инъекциями примитивных расплавов, участвует в образовании дифференцированных расплавов, вплоть до образования дацитов-гранодиоритов, риолитов; 4- инъекции примитивных расплавов; 5- инъекции дифференцированных расплавов; 6- инфильтрация морской (океанической) воды; 7 – миграция подводных гидротерм; 8 – изотермы гидротермальных систем; 9- тектонические разломы; 10- гидротермальные изменения (окварцевание); 11- гидротермальные изменения (пропилитизация, хлоритизация); 12-пирокластика (гиалопилиты, взрывная пирокластика); 13-андезиты; 14 – риолиты; 15-интрузии; 16- базальтовые дайки.

Таким образом, переход гидротермально-магматических конвективных систем в эту стадию развития привносит некоторую специфику, как в динамику их развития, так и в их морфологию. Приток тепла и ускоренный рост верхней части долгоживущего вулканического центра за счет отложения больших объемов пирокластики и вулканогенно-осадочных пород способствует увеличению объема гидротермальной системы. Одновременно активизируются процессы взаимодействия вода-порода, которые приводят к изменению генерации силикагелей и других адсорбентов, отложению продуктов коагуляции и сорбции из гидротерм при взаимодействии их с морской водой.

3. Этап островной дуги. В островодужных условиях, характеризуемых как субэаральные, гидротермальные системы своими верхними частями располагаются на границе взаимодействия трех геосфер: атмосферы, гидросферы и литосферы (рис. 9).

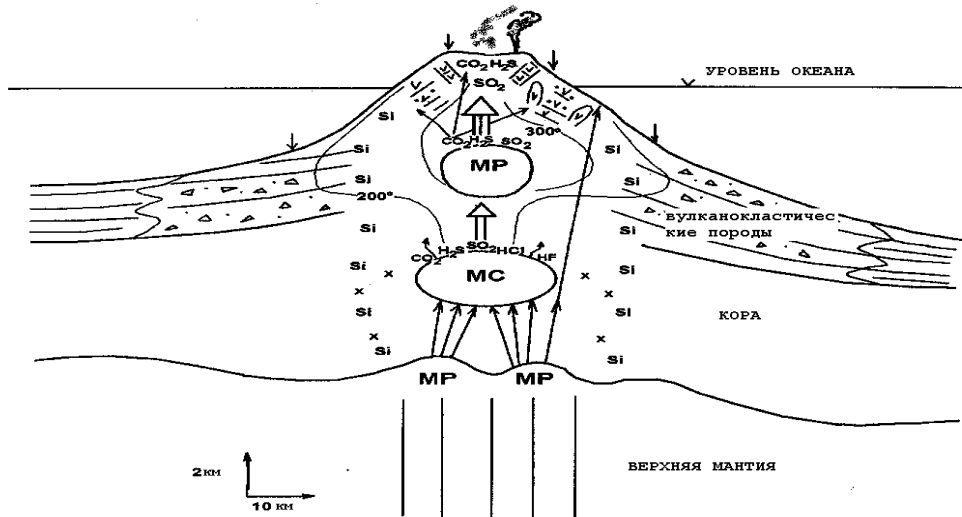


Рис.9 Принципиальная схема развития островной дуги (условные обозначения на рис.8).

Это определяет протекание таких процессов, как взаимодействие гидротерм с холодными метеорными водами, подземное кипение и парогазоотделение. При извержении вулканов происходит поступление большого количества (подсос) атмосферных газов на глубину до нескольких километров, что создает предпосылки для начала фреатоматмических и фреатических взрывов (Ohsawa S, et al.,1995) и активизации гидротермальных процессов. В гидротермальных системах формируются среды, в которых происходит динамичное изменение термодинамических параметров, вызывающее образование смешанных гидротерм, имеющих различные pH и Eh. Эти условия определяют перенос, концентрирование и отложение благородных и не благородных металлов. По существу в таких условиях происходит формирование эпитептермальных рудных месторождений Hedenquist G.W.et al.,1988).

Повышенные концентрации углекислоты в верхней части гидротермально-магматических систем стадии островодужного вулканизма обусловлены именно особыми структурно-геологическими процессами. Поскольку эта часть систем сложена, в основном, рыхлыми продуктами, здесь создаются предпосылки для формирования магматических тел большого объема. На стадии островодужного вулканизма большая часть глубинного высокотемпературного магматического расплава локализуется в самой структуре долгоживущего центра. Такая задержка магматических расплавов в верхних горизонтах земной коры приводит к относительно равномерному и постепенному рассеянию тепла и длительной дегазации расплавов, что обеспечивает устойчивое питание гидротермальной системы. Для гидрохимической структуры гидротермально-магматических систем этого этапа характерно наличие субповерхностного горизонта бикарбонатных гидротерм, насыщенных углекислотой. Интенсивное отделение CO_2 и обширное парообразование приводит к формированию мощных зон сульфатно-кислотных изменений, а также окремненных пород и отложению большого количества металлов.

4. Этап перехода островной дуги в континент. Образование гидротермалитов с повышенным содержанием кремнезема в островодужную стадию приводит к появлению гибридных расплавов кислого состава, вплоть до риолитов. Большинство островодужных андезитов имеет низкие значения δO^{18} , что свидетельствует о

значительном влиянии поверхностного кислорода на формирование расплавов (Иванов Б.В. 1990). В зрелых вулканических островных дугах, таких как Курило-Камчатская, длительноживущие гидротермально-магматические системы образуются в пределах кольцевых вулкано-тектонических структур (рис.10).

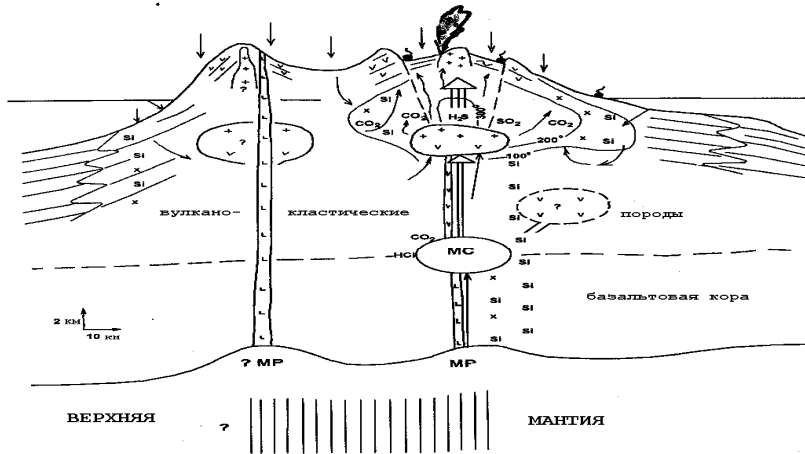


Рис. 10 Принципиальная схема перехода островной дуги к континенту (условные обозначения на рис. 8).

Образование этих структур связано с извержением больших объемов газо-насыщенных кислых расплавов из дифференцированных крупных магматических резервуаров, кровля которых может располагаться на глубине до 5-7 км (Белюсов В.И. и др., 1983). В пределах этих отрицательных структур формируются гидротермальные системы типа артезианских бассейнов или артезианских склонов, широко известных в областях четвертичного вулканизма. Такой этап развития гидротермально-магматических конвективных систем характерен для Восточно-Камчатской вулканической зоны, Вулканической зоны Таупо в Новой Зеландии, и других. Большая часть поступающей глубинной тепловой энергии рассеивается в водовмещающих комплексах. Внешние проявления вулканической деятельности на этом этапе становятся все реже и большая часть тепловой энергии идет на поддержание циркуляции гидротерм в нагретых породах. В крупных кислых магматических очагах происходит снижение температуры, расплав в них постепенно закристаллизовывается. Описываемый этап развития гидротермально-магматических систем характеризуется разобщением верхней конвективной гидротермальной ячейки от нижней магматической, и он наблюдается при переходе от островодужной стадии вулканизма к континентальной. Таким образом, гидротермально-магматические конвективные системы проходят в своем развитии несколько этапов (мы выделяем – 4) и обеспечивают поступление к дневной поверхности тепловой энергии и вещества в виде магматических расплавов, вулканических газов и гидротермальных растворов. Корни этих структур погружаются на глубины десятки километров – до уровня генерации примитивных базальтовых магм в верхней мантии. Гидротермальная ячейка, «надстраивая» магматическую конвективную ячейку, контролирует распределение химических, в т.ч. рудных и радиоактивных, элементов в верхних горизонтах земной коры и является в определенном отношении самоизолирующейся геологической системой.

1.3 Предположение о происхождении и механизме функционирования корового источника тепла в гидротермально-магматических конвективных системах.

Происхождение тепловой энергии, определяющей функционирование магматизма и сопряженных с ним гидротермальных систем, остаются одной из главных проблем геологии. Обычно предполагается, что для гидротермальных систем источником тепла

являются магматические расплавы, генерируемые в нижней коре и в верхней мантии за счет энергии, выделяемой при распаде радионуклидов или в результате трения субдуцирующей океанической литосферной плиты.

Во второй половине XX века, когда изучение гидротерм в областях современного вулканизма приобрело промышленный масштаб, в результате чего потребовались количественные оценки тепловой мощности современных гидротермальных систем, были получены данные об энергетическом балансе этих процессов. Оказалось, что энергетика гидротермального процесса сопоставима с величиной тепловых потерь корового магматизма (кислого и андезитового; Аверьев, 1966; Белоусов и др. 1971; Белоусов, Сугробов, 1977). В связи с этим модель теплового питания современных гидротермальных систем включала приток тепла с уровней верхней мантии. При этом подразумевалось, что теплоносителем являются трансмагматические летучие и, в основном, вода. Подъем этих летучих осуществлялся через процессы диффузии, механизм которых обеспечивался в результате адиабатического расширения газов (Грейтон, 1949; Аверьев, 1966).

Проблема теплового взаимодействия магматизма и гидротермальной деятельности остаётся нерешенной. Как правило, предлагаемые модели гидротермальных систем базируются на представлениях, в основе которых заложены принципы петрологических концепций прошлых (XX-XIX) веков, в которых главным источником энергии является магматический расплав, а рабочим телом - вода.

Тепловой дисбаланс магматизма и гидротермальной активности в некоторых областях современного вулканизма вынуждает исследователей искать новое объяснение возникновения и функционирования источников тепла в гидротермально-магматических структурах. Так, например, в работе Белоусова и других (1971) и Белоусова и Сугробова (1977) приводятся оценки выноса тепла гидротермами, кислыми и базальтовыми магмами некоторых гидротермально-магматических систем южной Камчатки. Отмечается, что в голоцене в структуре Камбального долгоживущего вулканического центра, когда происходили мощные извержения кислых расплавов в виде экструзий, пемзовых и игнимбритовых потоков, выделение тепловой энергии в единицу времени в 4-5 раз превысило средний аномальный тепловой поток предыдущих периодов развития этой структуры. В этот период активизации вулканическая деятельность приобрела площадной характер и островная дуга, существовавшая в этом месте на протяжении нескольких десятков миллионов лет, превратилась в субконтинентальную структуру южной оконечности Камчатского полуострова. Достойного объяснения этого энергетического импульса вулканизма до сих пор не найдено.

Хохштейн М.П. (Hochstein, 1995), оценивая коровый теплоперенос в вулканической зоне Таупо в Новой Зеландии, пришёл к

выводу, что общий тепловой поток в этой зоне 2 млн. лет тому назад составлял 2600 мегаватт на 100 км. Большую долю из этого энергетического потока составлял конвективный тепловой поток, реализуемый гидротермальными системами. Этот исследователь считает, что около 600 мегаватт на 100 км обеспечен «нормальной» компонентой, связанной с выносом тепла экструзиями и интрузиями андезитов и дацитов, а 2000 мегаватт на 100 км обеспечивалась «аномальной» компонентой, связанной с экструзиями и интрузиями риолитовых расплавов, генерация которых непосредственно не контролировалась субдукционными процессами. Риолитовые магмы в этой зоне преимущественно корового происхождения. Образование большеобъемной четвертичной риолитовой пироклаستيки явление редкое и, очевидно, связано с несколькими дуговыми сегментами (Вулканическая зона Таупо, Суматра, Кюсю), которые подверглись значительным коровым деформациям. Аномальный тепловой поток, связанный с вспышкой риолитового вулканизма в Новой Зеландии, как и в предыдущем случае на южной оконечности Камчатки, не нашел достаточно логичного объяснения с позиций современных геотектонических гипотез.

В последние годы при исследовании областей современного и молодого вулканизма большое внимание уделяется изучению объемных кислых пирокластических образований, связанных с кальдерами различного происхождения (Wolff et al., 1990). Предполагается, что они связаны с расслоенными обширными коровыми магматическими резервуарами. Ведущим процессом, который приводит к расслоению расплава в них, является кристаллизационная дифференциация. В результате ее происходит образование больших объемов кислого расплава и постепенное насыщение его летучими, эвакуация которых сопровождается выбросами пересыщенных газопаровой смесью колонн пироклаستيку на высоту до 9 км (Sparkc et al., 1978). Эти колонны пироклаستيку обрушиваются и порождают обширные потоки и покровы игнимбритов.

“Внезапное” появление больших расслоенных магматических резервуаров связано с островодужным и субконтинентальным этапами их развития (Белоусов и другие, 1998). На предыдущих этапах развития этих систем преобладает извержение андезитов и базальтов (Гриб, Леонов, 1992, 1993). Ожидаемая постепенность в переходе к более кислым расплавам почти не заметна, и резкий переход к извержениям кислых расплавов трудно объяснить чрезвычайно инерционным процессом кристаллизационной дифференциации, тем более осложненной конвективным перемешиванием в результате частых инъекциях глубинных (базальтовых) расплавов. Энергетика кристаллизационной дифференциации не оценивается исследователями, но можно предполагать, что ее удельное воспроизводство на единицу объема крайне незначительно, в связи с тем, что расслоение минеральных

новообразований по плотности расплавов относится к механическому самому малопроизводительному виду энергии. Так, например, для повышения температуры на 3-4 °С одного килограмма кислого расплава необходимо совершить 427 кг механической работы. Образно говоря, в идеальном случае, чтобы нагреть 1 кг кислого расплава за счёт механической энергии его необходимо переместить, без потерь на трение, на расстояние более 400м от исходного положения. Поскольку такие условия невозможны в остывающем магматическом резервуаре, то нагрев за счёт механической энергии будет составлять ничтожную долю его теплового баланса. К тому же, необходимо учитывать энергетические затраты на решение «проблемы пространства» необходимого для размещения больших коровых магматических резервуаров, которое можно создать или за счет дробления и выброса соизмеримых объемов вмещающих пород, или за счет их плавления. Энергетика глубинного базальтового расплава и содержащейся в нем воды, по нашему мнению, не может обеспечить нагрев и плавление вмещающих пород и фильтрующихся в них подземных вод, так как энтальпия базальтового расплава превышает энтальпии кислых и андезитовых расплавов лишь на 15-20%.

Исходя из вышеизложенных проблем развития гидротермально-магматических конвективных систем, располагающихся в структурах долгоживущих вулканических центров (Белоусов,1978), в их верхней части должен находиться мощный источник генерации тепловой энергии, действующий на островодужном и субконтинентальном этапах их развития.

Гипотеза о коровом источнике тепла в верхней части гидротермально-магматических конвективных систем. В настоящее время в геологии господствуют ортомагматические модели, объясняющие происхождение гидротермальных систем, в которых основу составляют идеи, разработанные петрологами, базирующиеся на физико-химических процессах, действие которых определяется термодинамикой магматических расплавов. Магматические расплавы рассматриваются в качестве главных агентов транспортирующих тепло, газы и металлы и формирующие гидротермальные растворы. Последние воздействуют на окружающую среду, взаимодействуя с породами, гидросферой и атмосферой, изменяют их и образуют залежи рудных и нерудных полезных ископаемых различной концентрации. Участие продуктов гидротермального метаморфизма в гидротермально-магматической деятельности рассматривается лишь механистически в качестве нейтральных элементов, что проявляется в названии этих процессов (контаминация, ассимиляция), определяющих их физическую природу. В результате этих событий не предполагается какой-либо генерации тепловой энергии. Иногда лишь упоминается, что в некоторых случаях происходит разогрев магматических расплавов за счет химических

реакций, вызванных взаимодействием их с кислородом воздуха в приповерхностных зонах вулканических аппаратов (Трухин, Шувалов 1984, Макдональд, 1975).

Мы считаем, что, как процесс генерации магматических расплавов, так и сопряженные с ним гидротермальный, метаморфический, контаминационно-ассимиляционный и анатектический процессы, обусловлены, в первую очередь, химическими взаимодействиями различных химических элементов и их соединений, в результате которых образуются продукты этих реакций, устойчивые в определенных термодинамических условиях

Таким образом, гидротермально-магматические конвективные системы в областях современного вулканизма на разных этапах своего развития рассматриваются нами в качестве сложных химических реакторов, работающих в самоподдерживающем режиме, как с точки зрения генерации тепловой энергии, так и с точки зрения сохранения устойчивости термодинамических параметров, обеспечиваемых самоизоляцией от воздействий внешних факторов.

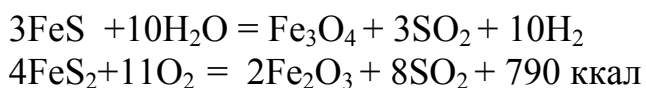
Исходные данные. Изучение гидротермально-магматических конвективных систем в 70-х годах XX века получило мощный импульс в связи с открытием подводных вулканов и подводных гидротермальных систем (Богданов, 1997). В океанских рифтах подводные высокотемпературные гидротермы формируют массивные сульфидные залежи, которые достигают объемов в десятки миллионов тонн сульфидной массы. Исследование этих районов сопровождалось глубоководным бурением, по данным которого поверхностная гидротермальная постройка имеет «корни», по меньшей мере, до глубины 125 м. В верхней части этой постройки преобладают сульфидные отложения со значительной примесью ангидрита. Рудными минералами являются пирит, пирротин и халькопирит, соотношение которых изменяется по разрезу. В нижней части залегает брекчия, пропитанная кремнеземом, переходящая в хлоритизированные базальты, а глубже прослеживаются свежие базальты.

При объяснении генезиса последовательности отложения полиметаллов и микроэлементов в составе сульфидных минералов используется в основном температурный параметр (высоко-, средне- и низкотемпературные минеральные образования) из истинных гидротермальных растворов (Janecky, Seyfried, 1984). Тесный парагенезис аморфного кремнезема с сульфидами железа навело нас на мысль о соосаждении этих минералов из коллоидных растворов, каковыми представляются подводные гидротермы. В местах их разгрузки, где гидротермальные растворы смешиваются с холодной морской водой, происходит пересыщение их кремнеземом. Последний образует золь кремнекислоты. (Janecky, Seyfried, 1984). Предполагается, что лиофильные коллоиды кремнекислоты защищают от коагуляции лиофобные коллоиды сульфидов и коагуляция и осаждение первых автоматически влечет выпадение последних (Эйтель, 1962; Некрасов, 1973). Учитывая, что как лиофильные, так и лиофобные золи, в рассматриваемом случае, заряжены электроотрицательно, и естественно ожидать конденсацию на них многих

катионов металлов. Предпочтением будут пользоваться химические элементы, имеющие большие атомные радиусы с «рыхлой» внешней электронной оболочкой (Белоусов и др. 1998, 1999).

Описываемые образования сульфидно-кремнистого состава, по мере развития долгоживущих вулканических центров, «насыщают» их структуру вплоть до субконтинентального этапа развития гидротермально-магматических конвективных систем (Белоусов и др., 1998). Этот процесс пространственно и во времени сопряжен с частыми инъекциями высокотемпературных мантийных расплавов. Окремненные породы, «насыщенные» или «прослоенные» залежами массивных сульфидов типа Куроко (Sato, 1972) или густыми вкраплениями сульфидов железа, будут попадать в зону теплового влияния инжецируемых расплавов. В составе аморфного кремнезема присутствуют ион-гидроксил и связанная вода, которые, при воздействии на них теплового поля магматических расплавов, должны подвергаться отделению от молекул кремнекислоты и при высоких температурах будут подвергаться процессу диссоциации. В результате образуется атомарный кислород и водород. Эти ингредиенты воздействуют на сульфиды однозначно. Происходит их окисление с переходом при достаточно высоких температурах к процессу самопроизвольного возгорания, которое часто происходит при разработке колчеданных месторождений (Калата, Урал, Россия).

Процесс идет по следующим реакциям:



Температура, при которой происходит реакция горения пирита, составляет примерно 800°C . Для того, чтобы этот процесс реализовался, необходимо иметь температуру воспламенения около 800°C . Это может произойти при контакте сульфидных скоплений с базальтовыми магматическими расплавами, температура которых около 1200°C . Поскольку в результате реакций окисления сульфидов выделяется до 800 ккал на 4 грамм-молекулы пирита, то процесс самоподдерживающийся. Теплотворная способность пирита составляет около 2000 ккал/кг. При сгорании 1 кг пирита выделяется тепла достаточно расплавить 8-9 кг породы от 0°C до $800-900^\circ\text{C}$ с теплоёмкостью около 300 ккал/кг.

Сульфидно-кремнистые гидротермалиты, широко развитые в структуре долгоживущих вулканических центров, являются удобной средой для образования коровых андезитовых, дацитовых и риолитовых расплавов. При этом необходимо учитывать, что процесс плавления происходит как бы «изнутри» субстрата, подвергающегося воздействию теплового поля инъекций глубинного магматического расплава, а не через контактную поверхность высокотемпературного расплава и холодной не подготовленной к плавлению породой.

Существенным фактором, способствующим развитию процесса плавления, является повышенное содержание кремнезема в исходной породе и других добавок, в том числе легколетучих химических элементов, которые играют

роль флюсов, понижающих температуру плавления исходных пород, действие которых достаточно хорошо исследовано в металлургии.

Вторым важным положением в предлагаемой гипотезе является установленный факт генерации в больших объёмах органики и предбиологических соединений вблизи очагов разгрузки подводных гидротерм, воспроизводство которой оценивается в миллионы тонн в год. Вблизи подводных гидротермально-магматических систем функционирует зона химического и микробиологического окисления восстановленных газов. Процессы, происходящие в этой зоне, играют роль в изменении океанической коры, которые приводят к образованию аргиллизитовых слоев, выполняющих функцию экранов, способствующих аккумуляции как тепла, так и природного газа (Thorseth et al., 1995; Behar et al., 1995). Эти структуры также могут подвергаться воздействию магматических расплавов, возгораться и дополнять тепловой баланс гидротермально-магматических конвективных систем.

Модель формирования и деятельности коровых магматических очагов в структуре гидротермально-магматической конвективной системы. На этапе зарождения долгоживущих вулканических центров в условиях океанического дна, прототипом которых на островах или континенте могут служить вулканы центрального типа, восходящие колонны магматических расплавов, распределяясь по системе радиальных разрывных нарушений, прогревают окружающие водоносные горизонты и формируют гидротермальную конвективную ячейку (Леонов, 1989). В процессе взаимодействия вода-порода происходит насыщение гидротерм кремнезёмом, рудными и газообразными элементами. Среди металлов ведущая роль принадлежит железу (Nuphris et al., 1995). В результате реакций между высокотемпературными кремнезёмистыми гидротермами и окружающей морской водой в недрах гидротермально-магматических систем и, в особенности, в очагах разгрузки напорных подводных гидротермальных струй («черные» и «белые» курильщики) происходит осаждение аморфного и кристаллического кремнезёма в парагенезисе с сульфидными минералами, преимущественно пиритом, пирротинном и халькопиритом (Белоусов и др., 1998:1999). Эта реакция океанической земной коры на внедрение глубинных магматических расплавов, преимущественно базальтового состава, выражается, как в тепловой, так и в химической изоляции магматической конвективной ячейки первого этапа развития долгоживущего вулканического центра.

Коллоидная форма гидротермальных растворов ещё недостаточно хорошо изучена даже с позиций теоретической химии и таит массу нерешенных проблем. Так, например, существует гипотеза о ключевой роли пирита в происхождении жизни на Земле (Bebii, Schoonen, 1999). Поскольку подводные гидротермально-магматические системы формируют как залежи массивных сульфидов, так и рассеянные сульфидные скопления, основную массу которых составляет пирит и пирротин, то можно предполагать образование в зоне их генерации природных газов и предбиологической органики. Наряду с образованием продукции, порождаемой биоценозами около гидротермально-магматических систем срединно-океанических хребтов, предбиологический синтез может

производить значительные объёмы природного газа (Botz et al., 1999). Общая первичная продуктивность в подводной гидротермальной струе оценивается в 50 мг сухой биомассы на килограмм гидротерм. Ежегодная биомасса в гидротермальных струях океанов составляет 10^{12} грамм сухого вещества. Биомасса, генерируемая гидротермами в гидротермальных струях подводных гидротермально-магматических систем, может представлять значительную долю органики в глубинах океанов, а также органики, которая отложилась в осадках океанов (McCollom, 2000).

Выделяемая тепловая энергия, полученная при горении сульфидов и природного газа, аккумулируемого под непроницаемыми экранами аргиллизированных и тонкообломочных осадочных слоев, слагающих периферийные формации гидротермально-магматических конвективных систем, должна составлять существенную, а возможно и большую долю, приходной части теплового баланса этих структур областей вулканизма. В связи с вышеизложенным, аномальный тепловой поток, образованный часто повторяющимися инъекциями мантийных расплавов в океаническую кору, усиливается притоком тепла экзотермических самоподдерживающихся химических реакций, возбуждаемых этими инъекциями в метаморфических вулканогенно-кремнистых формациях подводных океанических хребтов и вулканических островных дуг. Примечательно, что образование сульфидно-кремнистых формаций происходит при параметрах гидротермального синтеза, а тепло, выделяемое при их горении способно образовывать низкотемпературные расплавы андезитового, дацитового и риолитового состава. Как нам представляется, усиленный аномальный тепловой поток увеличивает тепловую мощность гидротермальной конвективной ячейки и её объёмные параметры, что приводит к интенсификации процессов гидротермального метаморфизма, в связи с чем скорость роста подводных долгоживущих центров прогрессивно со временем увеличивается. В составе этих структур появляются очаги образования анатектических расплавов с повышенным содержанием кремнезёма, по мере вовлечения в процесс разогрева и плавления окремненных пород, окружающих магмопроводящую зону. Происходит зарождение коровых магматических камер, аналогичных коровым магматическим очагам вулканов центрального типа.

По мере приближения к поверхности океана растущей морфоструктуры долгоживущего вулканического центра, являющегося продуктом деятельности гидротермально-магматической конвективной системы, и появления стратиформной пироклаستيкулы, происходит усиление латерального растека гидротермальных растворов по водоносным горизонтам. Они на этом этапе развития гидротермально-магматических систем удаляются на всё большие расстояния от восходящей мантийной магматической колонны. Изометрический характер конфигурации распространения гидротермальных водоносных горизонтов определяет форму тел вулканогенно-кремнистых формаций.

К вышесказанному следует дополнить, что сульфидно-кремнистые метаморфиты обогащены набором рудных элементов в результате

конденсации этих элементов на электроотрицательно заряженные золи кремнекислоты и сульфидов в момент их образования. Анатексис или ассимиляция этих рудоносных формаций приводит к образованию кислых и андезитовых расплавов с повышенным содержанием тех или иных рудных элементов (рудоносные магмы). Поскольку химические элементы с большими радиусами атомов конденсируются на эти адсорбенты в первую очередь, то следует ожидать повышенных концентраций урана в кислых расплавах. Эти расплавы могут быть как исходным источником тепловой энергии, генерируемой в результате радиоактивного распада урана и его продуктов, так и магматогенным источником элементов для образования урановых и редкометальных месторождений. Как нам кажется, предлагаемая гипотеза рационально объясняет повышенные содержания радионуклидов в гранитном слое Земли.

С выходом морфоструктуры долгоживущего вулканического центра из океана и образованием вулканических островов происходит продвижение интегрального теплового фронта в этом же направлении. Как известно из литературных источников, вулканогенно-кремнистых формации являются непременным элементом структуры вулканических островных дуг (Хворова, 1968), механизм которых, как нам кажется, можно объяснить именно нашей моделью формирования и деятельности коровых источников тепла.

Островодужный этап развития гидротермально-магматических конвективных систем характеризуется большей её открытостью за счёт взаимодействия с атмосферой. Так, например, в структуре долгоживущих вулканических центров на этом этапе их развития начинают проявляться кальдерообразующие процессы с извержением специфической формации спекшихся туфов и игнимбритов кислого и субкислого составов. Эти процессы интенсифицируются на этапе перехода от островной дуги в субконтинент (Белоусов и др., 1998). Для этого же этапа характерно широкое развитие на островодужных вулканах и связанных с ними гидротермальных системах продуктов сернокислотного выщелачивания, обусловленного выделением этими вулканами больших количеств сернистого газа (Casadevall, 1991). Как нам представляется, на этом этапе развития гидротермально-магматических систем в процесс горения вовлекаются всё большие объёмы сульфидно-кремнистых и аккумулярованных соединений предбиологических и органических образований по мере прогрессивного увеличения объёмов магмогенерации в их структуре. В приповерхностных частях этих систем в результате дополнительного притока кислорода атмосферы процесс образования SO_2 усиливается (Ohsawa et al., 2000). Эти реакции сопровождаются выделением больших количеств тепла, которые увеличивают тепловую мощность островодужных гидротермальных систем. Эквивалентное количество тепловой энергии потребляется при плавлении кремнистых гидротермалитов, из которых образуются большие объёмы низкотемпературных кислых, в большинстве случаев пластичных расплавов. Последние, имея меньшую плотность по сравнению с окружающими андезитовыми и базальтовыми породами предыдущих извержений, подвергаются воздействию изостатического уравновешивания

и, в связи с приобретенной пластичностью, распределяются в пространстве долгоживущего вулканического центра вплоть до появления на поверхности Земли в виде экструзий.

Как известно, процесс окисления сульфидов и углеводов сопровождается воспроизводством свободного водорода (Giggenbach, 1976), который, находясь даже в подчиненном количестве в составе газовых смесей, соединяясь с кислородом, создает взрывоспособную смесь. Гельфандом Б.Е. и другими (1997) показано, что существует две основные разновидности развития взрывных процессов при воспламенении: мягкий и жесткий режим. Мягкий режим воспламенения характеризуется плавным повышением давления в процессе развития очагов горения, спонтанно возникающих в объеме свежей смеси. Жесткий режим характеризуется появлением ударных и взрывных волн. Взрывной процесс при этом режиме внешне выглядит как фронт горения, мгновенно охватывающий всё поперечное сечение. Этот фронт на коротком расстоянии преобразуется в детонационную волну. В случае генерации газовых смесей при горении сульфидов и углеводов реален жесткий режим воспламенения, который сопровождается взрывом и детонацией.

Предполагается, что взрывной характер эруптивной деятельности при образовании игнимбритов, характерных, как для завершающего периода островодужного этапа, так и для начальной стадии переходного этапа от островной дуги к континенту (как, например, в системе Северный остров Новой Зеландии к островодужной системе Тонго-Кермадек или переход от островодужной системы Курил к южной оконечности Восточно-Камчатского вулканического пояса), не вызывает сомнений. Результатом этого процесса, на наш взгляд, объясняется дробление значительных объемов окружающих пород, относительно низкие средние температуры игнимбритообразующей смеси, умеренные или даже незначительные теплопотери, что приводит не только к спеканию выброшенного материала, но и к свариванию и даже вторичному плавлению, так как химические реакции, генерирующие тепло, могут продолжаться в отложенном материале. Ударные волны, вызванные газозрывными процессами, разрушают кровлю над очагами генерации игнимбритообразующего материала с образованием открытых трещин отрыва на значительной площади. По этим разрывам происходит просадка блоков пород и подсос воздуха в зону генерации взрывов, где давление на несколько порядков ниже атмосферного. Приток атмосферного кислорода усиливает процессы окисления, как сульфидов, так и генерируемых газов, и с этим периодом связаны наиболее мощные взрывы и выбросы игнимбритообразующих колонн, механизм влияния которых на образование обширных пирокластических потоков описан Спарксом и соавторами (Sparks et al., 1978).

Как известно, в очаге взрыва создается вакуум. Вакуумирование места образования игнимбритовой смеси способствует усиленному притоку нижележащих (возможно глубинных) магматических расплавов, которые должны подвергаться интенсивной дегазации, в результате чего в подводных магматических дренах за счёт газлифтного эффекта

происходит высокоскоростное впрыскивание газовой-магматической смеси. Приток высокотемпературного двухфазного теплоносителя в полости, образованные взрывами, ускоряет процесс перемешивания этих расплавов с материалами корового плавления и с раздробленными породами, нагревает их, вызывая выделение из них летучих, и стимулирует процесс усиленной эрупции по ранее проложенным каналам. Кроме того, следует предполагать, что очаги дробления и зоны обрушения являются очагами стока подземных и возможно поверхностных вод метеорного происхождения. Смыкание описанных сред порождает специфические условия резкого охлаждения магматических расплавов и окружающих нагретых пород и образование контракционной трещиноватости штокверкового типа. Образованные гидротермальные растворы перегреваются и могут находиться в состоянии продолжительного кипения, в результате которого возможно концентрирование рудных элементов (Hedenquist, Houghton, 1987). Учитывая, что в результате газовых реакций образуется большое количество сернистого газа, а при притоке избыточных количеств атмосферного кислорода и сернистого ангидрида, то создаются условия для образования сернокислых гидротермальных растворов. Последние, взаимодействуя с первичными сульфидными рудами, приводят к вторичному сульфидному обогащению, которое характерно для медно-порфировых месторождений (Павлова, 1978; Туговик, 1984).

Таким образом, предлагаемая нами модель возникновения и функционирования корового источника тепла в гидротермально-магматических конвективных системах, на наш взгляд, вполне логично объясняет возникновение специфических гидротермальных систем порфирового типа и, сопряженных с ними гидротермальных систем хай сульфидейшн (Corbett, Leach, 1998), образование мощных расслоенных магматических резервуаров и механизм возникновения игнимбритовых гетерогенных смесей и брекчированных интрузивных образований во флюидно-эксплозивных структурах (Туговик, 1984).

1.4 Поверхностные термопроявления современных геотермальных систем. Тепловая мощность. Аккумуляция геотермальной энергии в субповерхностных условиях. Тепловые экраны.

Определение гидротермальных систем, приведенное во введении, акцентирует внимание на динамике гидротерм. Гидротермальные системы — это «высокотемпературные водонапорные системы, возникающие в земной коре при внедрении в водоносные слои глубинного теплоносителя, надкритического водного флюида или расплава» (Белоусов, Сугробов, 1976). Не каждая высоконапорная система, расположенная вблизи высокотемпературных аномалий, какими являются вулканы и долгоживущие вулканические центры, может привести к образованию гидротермальной системы. Последние возникают на геологических структурах определенного типа. Геологическое строение влияет не только на динамику воды (создание высоконапорных гидрогеологических систем

требует особого строения геологического разреза и особых условий залегания водовмещающих горизонтов), но и оказывает активное воздействие на возникновение условий аккумуляции тепла в недрах гидротермальных систем. Таким образом, создаются условия для образования высокотемпературного режима, и фильтрующаяся холодная вода превращается в теплоноситель.

Изучение условий теплового питания гидротермальных систем привело многих исследователей к выводу, что плотность тепловых потоков значительна, но недостаточна для того, чтобы в любой геологической структуре, склонной к формированию водонапорной системы, они могли образоваться. Гидротермальная система возникает только при условии замедленного водообмена и при чрезвычайно малых тепловых потерях на путях миграции водного потока. Геологическое строение участков, где формируются гидротермы, должно обладать элементами, которые регулируют поступление холодных вод метеорного происхождения; недра гидродинамической системы и обеспечивают их замедленную циркуляцию. Такие геологические структуры, по нашему мнению, играют роль активного посредника в период образования гидротермальной системы. Гидротермы, имея высокую температуру и фильтруясь по породам, постепенно насыщаются растворенными элементами и газами. Гидростатическое давление, находящееся в условиях пластового давления и высокой температуры, при приближении к пониженным участкам рельефа изменяется вблизи очагов разгрузки. Это приводит к изменению параметров термальных вод в недрах системы. В результате происходит нарушение химических равновесий, что приводит к усилению реакций раствор—порода. Эти процессы оказывают существенное влияние на изменение геологического строения участков развития гидротермальных систем.

Первые исследования на гидротермальных системах были сосредоточены на изучении парогидротерм, их термодинамических параметров, химической специализации, особенностях динамики. В дальнейшем, в связи с необходимостью получения больших дебитов парогидротерм высоких параметров, началось изучение геолого-структурных условий их формирования и динамики. Над этой проблемой работали итальянские геологи Р. Бургасси, Г. Факка, Ф. Тонани (Burgassi, 1961; Facca, Tonani, 1961, 1963, 1967), новозеландские исследователи Л. Гранж, Г. Гриндли, Дж. Хили (Grange, 1955; Grindly, 1961; Healy, 1964) американские — Дж. Макнитт (McNitt, 1961).

На Камчатке геологическим строением гидротермальных систем занимались В.В. Аверьев (1961, 1965, 1966), Е.А. Вакин, И.Т. Кирсанов, Т.П. Кирсанова (1976), А.И. Сережников, В.М. Зимин (1976), Э.Н. Эрлих (1973), В.И. Белоусов (1967а, б, 1971; Белоусов, Сугробов, 1976; Белоусов и др., 1976; Belousov, 1967; Vakin et al., 1971).

Объем работы не позволяет автору привести описание всех гидротермальных систем, изученных к настоящему времени. Однако нами была предпринята попытка систематизировать многие из них и сгруппировать по особенностям геологического строения. Были выделены Вайракейский тип геологических структур, Паратунский и два подтипа: Лардерелло и

Больше-Банний (Белоусов, 1967а, 1967б; Belousov, 1967). Особенности геологического строения каждой группы гидротермальных систем отражались в своеобразии их гидрогеотермических характеристик.

В настоящем разделе представлены наиболее характерные гидротермальные системы.

Гидрогеотермическая характеристика гидротермальных систем

Водоносные системы, к которым приурочена гидротермальная деятельность, имеют относительно небольшие размеры, что обусловлено достаточно четким ограничением геологических структур, с которыми они связаны (кальдеры, наложенные и унаследованные грабены и т.п.), или локальным распространением водовмещающих литологических комплексов. Наличие в верхних пластах этих геологических структур относительно непроницаемых отложений придает им гидрогеологически закрытый характер. Особенно это характерно для районов вулканотектонических депрессий. Приуроченные к ним водоносные системы в гидродинамическом отношении соответствуют малым артезианским бассейнам и артезианским склонам, формирующимся при инфильтрации атмосферных осадков. По характеру циркуляции воды этой системы относятся к трещинному и пластово-трещинному типам напорных (артезианских) вод, так как обводненные породы обладают трещинной и поровой проницаемостью, а перекрывающие и подстилающие породы являются слабопроницаемыми и играют роль водоупоров.

Мощность обводненных комплексов пород, по данным разведочного бурения на Паужетском и Больше-Банном месторождениях, достигает 200 - 500 м, а мощность перекрывающих их водоупоров составляет 50-150 м. Проницаемость водовмещающего туфогенного комплекса пород, слагающих гидрогеологические структуры закрытого типа, невелика и составляет, по данным лабораторных исследований и опытных выпусков, из одиночных скважин $1 \cdot 10^2$ — $5,6 \cdot 10^4$ дарси. Эффективная проницаемость водоносных пластов, определенная на основании длительных опытных выпусков, как правило, превышает величину, измеренную в лаборатории, отражая, видимо, как поровую, так и микро- и макротрещинную проницаемость в сумме. На Паужетском месторождении, например, проницаемость водовмещающих псефитовых туфов, рассчитанная по данным опытной эксплуатации, изменялась от 0,26 до 0,44 дарси.

В гидротермальных системах, приуроченных к Паратунскому геотермальному району и сходных с ним, поровая проницаемость плотных пород ничтожна, и циркуляция воды или пара происходит по системе разломов и трещин. Проницаемость пород в зоне водопритока для таких систем можно представить на примере Больше-Банного месторождения. По данным лабораторных исследований, проницаемость встреченного здесь псаммитового окварцованного туфа- $(3-14) \cdot 10^{-4}$ дарси, андезита с волосовидными трещинами $-(7-9) \cdot 10^{-5}$ дарси. Эффективная же проницаемость обводненных пород этого района приближается к проницаемости пород Паужетского месторождения.

Температура на глубине в гидротермальных системах Камчатки изучена на Паужетском, Больше-Банном, Паратунском и Кошелевском месторождениях. Температурными измерениями охарактеризован разрез до глубины 1200 м. Максимальная температура в этом интервале глубин зарегистрирована на Кошелевском месторождении (+231 °С). Все термограммы имеют выпуклую форму по отношению к оси глубин, показывая интенсивное нарастание температуры в верхней зоне, обычно отвечающей водонепроницаемой толще. Температурный градиент в ней достигает величины 50—70°С/100 м. В обводненных породах температурный градиент резко уменьшается. Распределение температуры по площади зависит от характера обводненности и геологического строения конкретного участка и связано с передвижением воды под действием градиента напора (вынужденной конвекцией) и свободной конвекцией. В обводненной толще температура распределяется довольно равномерно, постепенно уменьшаясь к границе потока гидротерм. В водоупорной кровле она распределяется в соответствии с условиями кондуктивной теплопередачи, а крутизна термограммы определяется теплофизическими свойствами пород и их мощностью. Все температуры, измеренные в скважинах, меньше значений для кривой насыщения пара. Очевидно, пароотделение происходит лишь в приповерхностных условиях или трещиноватых зонах, где снижается гидростатическое давление. В толще пород, вмещающих высоконагретые воды и пар, температура с глубиной остается постоянной или постепенно увеличивается. Максимальная температура в геотермальных районах зафиксирована на глубине 1320 м мексиканского месторождения Серро-Прието (+354°С). Только на отдельных участках гидротермальных систем температура уменьшается с глубиной. Обычно такая инверсия температур характерна для гидротермальных систем, циркуляция воды в которых происходит в трещинно-поровом коллекторе (например, в Паужетской системе), и вызвана латеральной миграцией парогидротерм. Температурная аномалия в зоне разгрузки представляет собой наведенное тепловое поле, связанное с движением гидротерм (Сугробов, 1964).

Величина температур в недрах систем Камчатки и зарубежных геотермальных месторождений варьирует в значительных пределах, что объясняется различием их геологического строения. Анализ геологического строения современных гидротермальных систем мира позволил установить геоструктурные элементы, оказывающие существенное влияние на процесс их формирования. К ним относятся коллекторские свойства водовмещающих пород, характер водоупорных горизонтов и морфология их подошвы. Особенно велика роль верхнего водоупора в становлении высокотемпературного режима в недрах гидротермальных систем (Белоусов, 1967а, б). Горизонты плотных слабопроницаемых пород в период формирования, т.е. нагревания водоносных горизонтов эндогенным теплоносителем до наступления теплового равновесия в гидротермальной системе, играют роль теплоизолятора. В период же деятельности гидротермальной системы, когда процесс теплообмена приближается к стационарному, верхний водоупорный горизонт регулирует поступление метеорных вод в недра гидротермальной системы, тем самым создавая условия для поддержания высоких температур. В тех случаях, когда

коллекторские свойства водовмещающих пород характеризуются высокими коэффициентами проницаемости, а тектонические условия способствуют интенсивному водообмену, формируются системы относительно низкотемпературных вод.

Взаимосвязь холодных и термальных вод, по крайней мере в верхних частях гидрогеологических структур, доказана результатами разведочного и эксплуатационного бурения, проводившегося в геотермальных районах. Особенно четко гидравлическая связь холодных (напорных и грунтовых) вод с высокотермальными водами выявлена в гидротермальных системах с поровой и порово-трещинной циркуляцией вод. Пластовое давление в гидротермальной системе определяется пластовым давлением, существующим в гидрогеологической структуре, в рамках которой она возникает. Пьезометрические уровни термальных вод согласуются с положением статистических уровней холодных напорных вод, изменяющихся по площади в соответствии с геоморфологической обстановкой. Абсолютные отметки пьезометрических уровней закономерно снижаются от возвышенных участков рельефа к долинам рек, озерам или морским берегам. Мощные очаги разгрузки обычных холодных вод приурочены к этим отрицательным формам рельефа. Например, разгрузка паужетских гидротерм осуществляется в долине р. Паужетки, а гидротермы Семячикской системы разгружаются вдоль берега океана. Следует отметить, что положение пьезометрической поверхности определяется не только пластовым давлением, но и температурой, сказывающейся в уменьшении объемного веса нагретой воды, благодаря чему возможна за счет увеличения разуплотненного столба воды разгрузка термальных вод на более высоких отметках. Новозеландские исследователи ввели в связи с этим понятие о термоартезианском давлении.

Высокая температура увеличивает скорость фильтрации за счет понижения вязкости, вследствие чего слабопроницаемые породы для них оказываются коллекторами, а для холодных вод — относительными водоупорами. Особенно ярко влияние высокой температуры на движение гидротерм выражено в очагах разгрузки систем, на что обратил внимание В.В. Аверьев (1961). Разгрузка гидротерм интенсифицируется повышением статистического уровня из-за термоартезианского напора. Там, где пьезометрические уровни располагаются ниже поверхности, разгрузка гидротерм осуществляется за счет пароотделения. Возможность вскипания воды определяется конкретной геолого-гидрогеологической обстановкой на участках термальных полей и прежде всего высокой температурой в недрах гидротермальных систем и величиной гидростатического давления. Вскипание воды при снижении гидростатического давления в области разгрузки, кроме того, приводит к самопроизвольной откачке воды паром, когда тепловая энергия гидротерм вследствие расширения пара частично преобразуется в механическую энергию поднимающейся пароводяной смеси в канале источника или вскрывшей их скважины.

Относительная высокая динамичность гидротерм, которая не изолирована от окружающих холодных вод, способствует интенсификации водообмена в единой гидрогеологической структуре. Восходящее движение или движение нагретых водных масс в субгоризонтальном потоке в при-

поверхностных условиях обуславливает более глубокое проникновение инфильтрационных холодных вод к основанию гидротермальных систем из-за различия в плотностях холодных и горячих вод. Таким образом, на участках гидротермальных систем циркуляция вод отвечает условиям свободной конвекции, а возникшие в их верхних частях ограниченные напорные потоки гидротерм усиливают перемещение тепла в ее недрах.

Вскипание гидротерм в приповерхностных условиях является причиной того, что разгрузка гидротерм проявляется в различных формах. В гидротермальных системах, в верхних частях которых имеется относительно проницаемый пласт, вмещающий перегретые (по отношению к атмосферному давлению) воды и перекрывающийся водоупором (закрытая система), характер термальной активности определяется в зависимости от положения пьезометрического уровня. Если пьезометрическая поверхность находится над поверхностью Земли (обычно область разгрузки водонапорной системы), наблюдаются преимущественно горячие или кипящие источники и гейзеры, паровые струи и участки нагретой ими почвы (Паужетское термальное поле. Долина Гейзеров, Больше-Банное поле и др.). Там, где пьезометрические уровни устанавливаются ниже поверхности, отмечаются только выходы пара в виде отдельных струй или рассредоточенного парения (участки парящей земли). Выходящий пар, как правило, является «вторичным», и его температура соответствует точке насыщения при данном атмосферном давлении. Обычно участки с выходами пара приурочены к возвышенностям микрорельефа. Если пар, выделившийся с верхнего уровня подземных вод, выходит в понижение, заполненное поверхностными водами, то образуются кипящие или грязевые котлы и озера, от которых непрерывно отделяется пар. Как правило, они характеризуются почти полным отсутствием стока.

В гидротермальных системах, в верхних частях которых развиты плотные трещиноватые породы (относительно открытые системы), поверхностные термопроявления представляют собой главным образом паровые струи, горячие и кипящие котлы. Последние часто имеют вид источников, хотя формируются вследствие внедрения парогазовых струй в поверхностные или грунтовые воды и подобны проявлениям гидротермальных систем закрытого типа на участках низкого положения пьезометрической поверхности.

Масштаб современной гидротермальной деятельности можно оценить по тепловой мощности гидротермальных систем в естественных условиях. Тепловая мощность гидротермальных систем или термальных полей в настоящее время определяется по суммарному выносу тепла источниками, паровыми струями или фумаролами, теплоотдачей с участков рассредоточенных выходов пара («парящая земля»), теплоотдачей с поверхности нагретых пород, кондуктивным потоком на участках термальных полей, теплоотдачей с поверхности теплых озер и кипящих котлов. Методика измерения тепловой мощности наиболее сложных по условиям теплоотдачи проявлений была разработана В.В. Аверьевым — «Теплоотдача с поверхности парящей земли», Г. Даусоном и Р. Фишером (Dawson, 1964; Dawson, Fisher 1964). Г.Н. Ковалев описал методы определения выноса тепла специфическими термопроявлениями -термальными озерами - и те-

плоотдачи с поверхности нагретой почвы (Ковалев, 1966) .В табл. 1 приведены данные по тепловой мощности термальных полей и гидротермальных систем, при определении которых с той или иной степенью точности учтены все ее составляющие, включая скрытую разгрузку высокотермальных вод.

Таблица 1

Естественная тепловая мощность известных гидротермальных систем Камчатки

Гидротермальные системы и термальные поля	Тепловая мощность, 10^3 ккал/сек	Удельный вынос тепла ккал/сек·км ²	Автор обследований
Долина Гейзеров	70	2800	В.В. Аверьев
Кальдера Узон	64	580	В.В. Аверьев Г.Н.Ковалёв Г.Ф.Пилипенко
Паужетская	25	1600 для поля 15 км ² 620 для поля 40 км ²	В.В. Аверьев В.М. Сугробов
Кошелевская	75	-	Е.А. Вакин
Большой Семячик	75	880	В.В.Аверьев Е.А. Вакин Г.Н. Ковалёв

Наибольшую тепловую мощность на Камчатке имеют Кошелевская (75 тыс. ккал/сек) и Семячикская системы (74 тыс. ккал/сек). В этом отношении они сходны с гидротермальными системами Новой Зеландии. В.В. Аверьев (1966) обратил внимание на близость этих цифр по порядку величин к величинам, характеризующим тепловую мощность фумарольной активности отдельных вулканов и определенным пока в диапазоне $4,5 \times 10^5$ ккал/сек (вулкан Мутновский) - $0,2 \cdot 10^5$ ккал/сек (вулкан Авачинский).

Удельный вынос тепла (отношение тепловой мощности гидротермальных систем к площади их формирования) позволяет сравнить интенсивность гидротермальной деятельности в различных районах. Характерн, что в гидротермальных системах удельный вынос тепла имеет одинаковый порядок и превышает среднепланетарные кондуктивные теплопотери в десятки и даже сотни раз. Некоторое расхождение в величине удельного выноса тепла между отдельными системами объясняется, по-видимому, различным отношением исследователей к ограничению площадей генерации и трудностью их точного оконтуривания. Так, например В.В. Аверьев удельный вынос тепла в гидротермальных системах называл интенсивностью теплового питания и связывал его с площадью, на которой происходят инфильтрация и нагрев атмосферных вод. Эта площадь, как правило, имеет четкие геологические границы и соответствует площади водонапорных систем. Оценив возраст гидротермальной системы данным об эволюции геологической структуры

подобных районов величиной порядка 10^4 лет, В.В. Аверьев указал, что общий вынос тепла индивидуальными системами за все время их существования должен соответствовать 10^{15} - 10^{16} ккал.

Химический состав гидротерм Камчатки типичен для вод районов активного вулканизма. Табл. 2 дает представление об их основных гидрохимических типах, встречающихся в каждой из изученных в этом отношении систем. Первый тип представляют собой воды термальных (как правило, кипящих) источников, наиболее близко отражающие глубинный состав растворов, циркулирующих в системах. Ко второму типу относятся воды теплых источников, располагающихся на периферии очагов разгрузки и возникающих вследствие восходящих перегретых вод и последующей конденсации гидротермального пара в приповерхностной частях разреза. К третьему типу относятся естественные конденсаты парогазовых струй, заполняющих бессточные котлы, и, наконец, к четвертому — конденсаты вторичного пара.

Разнообразие химического состава поверхностных проявлений гидротермальной активности связано, во-первых, с дифференциацией химического состава гидротерм в очагах их разгрузки благодаря фазовым переходам при их вскипании (Аверьев, 1961), а во-вторых, с приповерхностными изменениями состава глубинных струй вследствие смешения с грунтовыми водами. Классическим примером поверхностной гидрохимической аномалии, связанной с разгрузкой гидротермальной системы, служит Узонское термальное поле (Пилипенко, 1971). Проявленная здесь концентрическая зональность вод позволяет проследить все стадии химической дифференциации перегретых терм в очаге их разгрузки - от слабощелочных хлоридных натриевых в центре участка разгрузки, через группу смешанных вод разнообразного химического состава к слабокислым сульфатным водам периферийных участков

Изучение солевого и газового состава вод поверхностных источников и паровых струй позволяет реконструировать первоначальный состав гидротермальных растворов. Такой балансовый расчет был сделан В.В. Аверьевым и В.И. Кононовым (Аверьев и др., 1965) для определения глубинного состава гидротерм Узонской и Гейзерной систем. Оказалось, что на глубине в несколько сот метров, где существование гидротерм возможно лишь в жидкой фазе, резко усиливается роль соединений углерода и серы, которые в этих условиях занимают в составе растворов равноправное положение с ионом хлора или выступают на первый план. Для окончательной реконструкции глубинного состава гидротерм необходимо учитывать взаимодействие их с окружающими породами в процессе фильтрации и, в частности, выпадение минеральных новообразований.

Роль верхнего водоупорного горизонта в становлении и деятельности гидротермальных систем. Формирование гидротермальных систем в современных вулканических областях отличается рядом особенностей. Главная из них та, что они располагаются в субповерхностных условиях. Разгрузка гидротерм происходит непосредственно на поверхность в виде высоконагретых, кипящих источников и струй насыщенного или

перегретого пара воды в смеси с газами. Это обусловлено особым развитием этих участков Земли, которые характеризуются тепловыми потоками, в десятки и сотни раз превышающими среднеземные значения. Однако наблюдения за количеством выпавших осадков, условиями водного питания подземных водоносных горизонтов приводят к выводу о наличии особых геологических структур, в которых происходит формирование гидротермальных систем. Главными из них являются литолого-структурные особенности водовмещающих пород и условия их залегания, создающие обстановку для медленной циркуляции в их недрах воды и обязательное наличие верхнего водоупора.

Таблица 2

Сравнительная характеристика химического состава вод гидротермальных систем Камчатки

Система	Типы воды			
	I	II	III	IV
Паужетская	Источник Парящий I M _{3.2} T=100 ⁰ PH=8.2	Источник Южный M _{0.5} T=50 ⁰ PH=5.8	Воронка с термальной водой на II Восточно-Камбальном поле M _{1.8} T=70 ⁰ PH=2.5	Паровая струя на Верхнем термальном поле M _{0.09} T=98 ⁰ PH=8.0
Кальдера Узон	Источник Гейзеритовый M _{2.1} T=84 ⁰ PH=8.0	Источник Последний M _{1.2} T=55 ⁰ PH=7.0	Источник на Западном термальном поле M _{3.0} T=96 ⁰ PH=2.1	Паровая струя на Восточном Термальном поле M _{0.05} T=95 ⁰ PH=8.0
Долина Гейзеров	Гейзер Великан M _{1.8} T=100 ⁰ PH=7.6	Источник на Участке Нижних Гейзеров M _{0.6} T=68 ⁰ PH=7.2	Источник на Участке Верхних Гейзеров M _{1.2} T=98 ⁰ PH=3.5	
Семячикская	Источники Нижне-Семячикские M _{1.7} T=49 ⁰ PH=6.5	Источник в Межгорной котловине M _{2.1} T=55 ⁰ PH=7.5	Паровая струя вулкана Бурлящий M _{0.9} T=95 ⁰ PH=2.3	Паровая струя вулкана Центральный Семячик M _{0.3} T=98 ⁰ PH=8.0
Северо-мутновская и Жировская	Источники Нижнежировские M _{0.8} T=100 ⁰ PH=7.9	Источники на Верхнежировском термальном поле M _{1.0} T=58 ⁰ PH=7.1	Источники Дачные M _{0.8} T=96 ⁰ PH=4.0	

Особая роль верхнего водоупорного горизонта в формировании и деятельности субповерхностных гидротермальных систем в современных вулканических областях признается абсолютным большинством исследователей, изучающих геологическое строение этих участков (Fassa, Nonani,

1961, 1963, 1967; Nealy, 1964, 1965; Белоусов, 1967а, 1967б; Belousov, 1967; Манухин, Ворожейкина, 1976; Вакин, 1968; Вакин и др., 1976). Эта проблема возникает при геолого-поисковых и геологоразведочных работах на месторождении гидротерм с целью их эксплуатации. Роль экранов в формировании гидротермальных месторождений полезных ископаемых аналогична роли водоупоров в современных субповерхностных гидротермальных системах: позволяет использовать полученные нами данные в разработке теории экранов в рудообразующем гидротермальном процессе.

Кроме того, изучение условий теплопередачи в верхних частях гидротермальных систем, где обязательно присутствует верхний водоупор, позволяет определить общие закономерности тепломассопереноса в условиях земной коры не только в гидротермальном, но и в вулканическом процессе.

Представляется целесообразным рассмотреть этот вопрос в двух аспектах: 1) роль верхнего водоупорного горизонта в образовании гидротермальной системы и 2) роль верхнего водоупорного горизонта в деятельности гидротермальной системы.

Роль верхнего водоупорного горизонта в образовании гидротермальной системы удобнее рассматривать на идеальных моделях. Геологический разрез такой модели представим двумя горизонтами: нижним водовмещающим, сложенным породами с хорошими фильтрационными свойствами, и верхним — сложенным плотными породами с низким коэффициентом проницаемости. В водоносном горизонте находится вода, в которой отсутствует вынужденная конвекция. Эта система подогревается снизу контактным способом или путем привноса высоконагретого водяного пара в нижние части водоносного горизонта. За счет источника тепла создается разность температур между нижней частью модели и верхней. В связи с этим создаются условия для теплопереноса. Теплоперенос в нашем случае осуществляется двумя путями: кондуктивной (молекулярной) теплопроводностью и конвекцией. Так как в условии модели предусмотрен застойный режим воды в водовмещающем горизонте, конвекция будет осуществляться лишь действием разности плотностей воды при разных температурах: за архимедовой силы более нагретые порции воды в нижней части водоносного горизонта будут подниматься вверх до тех пор, пока их температура и соответственно плотность не выровняются с вышележащими частями водоносного горизонта. Теплопередача в этом случае будет происходить результате свободной конвекции (рис. 11).

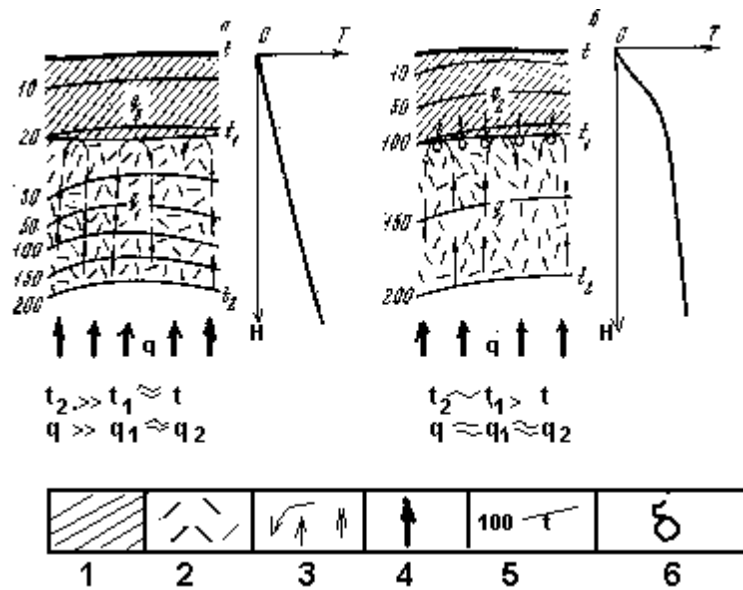


Рис. 11. Схема распределения температур и тепловых потоков в водовмещающе водоупорном горизонтах при образовании высокотемпературной гидротермальной системы. Составил В.И. Белоусов. Стадии теплового равновесия: а - неустановившегося; б - установившегося 1 - верхний водоупор, 2 - водовмещающий горизонт; 3 - направление циркуляции гидротерм; 4 - аномальный тепловой поток; 5 - изотермы; 6 - грани фазового перехода (параобразование). t_2 - температура гидротерм в глубоких недрах гидротермальной системы; t_1 - температура у нижней границы водоупора; t - температура у верхней границы водоупора; q - глубинный тепловой поток; q_1 - тепловой поток в водоносном горизонте; q_2 - тепловой поток в водоупорном горизонте

Свободная конвекция и связанный с ней тепломассоперенос осуществляются при малых температурных градиентах, значительно меньших, чем при молекулярной теплопроводности. Это означает, что при тепломассопереносе эквивалентное количество тепла переносится при значительно меньшей разности температур, чем при молекулярной (кондуктивной) теплопроводности. В нашем примере процесс тепломассопереноса, идущий за счет свободной конвекции будет стремиться к выравниванию температур в вертикальном разрезе, в связи с чем доля теплопереноса за счет молекулярной теплопроводности будет сводиться к минимуму (рис. 11, б). Однако в верхнем водоупоре соотношение долей этих способов теплопередачи будет обратное. Из условий модели следует, что породы водоупорного горизонта отличаются крайне низкой пористостью и малыми коэффициентами проницаемости. Все это позволяет считать, что свободная конвекция, возникающая за счет градиента температур на границах слоя, невозможна и превалирует молекулярная теплопроводность. В связи с этим в нашей модели создается ситуация, когда при малых температурах поступает достаточно большое количество нагретой воды и все тепло, переданное нижней кромке водоупорного горизонта, не может быть передано дальше вверх по разрезу, так как в дальнейшем это количество должно двигаться при большом перепаде температур. В модели можно предусмотреть дополнительное условие, при котором температура над верхней границей водоупорного горизонта постоянна. В реальных случаях она может соответствовать сред-

несуточным или среднегодовым значениям температуры воздуха в данном районе.

Для того чтобы обеспечить передачу всего тепла, поступающего из глубин через водоупорный горизонт, необходимо поднять температуру у нижней кромки водоупорного горизонта до значений, когда количество тепла, идущего снизу, будет эквивалентно теплотермам от верхней границы водоупорного горизонта. В реальных гидротермальных системах это равновесие наступает значительно раньше в связи с тем, что мощность верхнего водоупора имеет ограниченные размеры и может изменяться по простиранию.

В тех местах, где мощность водоупорного горизонта наименьшая и он не разбит системой трещин, создаются условия наибольшей концентрации тепла, так как наиболее нагретые порции воды стремятся занять наиболее верхнее положение в водоносном горизонте (см. рис. 12). В этих случаях давление столба породы (литостатическое давление) над водовмещающим горизонтом в какой-то момент будет недостаточным, т.е. будет меньше давления насыщения воды при данной температуре. В этих случаях должно произойти вскипание гидротерм. Часть гидротерм в этом месте перейдет в пар, который стремится подняться вверх через водоупорный горизонт по трещинам, унося с собой избыточное тепло к поверхности Земли, где проявится или в виде паровых струй, или термопроявлений конденсатного типа.

Таким образом, можно сделать вывод, что верхний водоупорный горизонт в субповерхностных гидротермальных системах, обладая водоупорными свойствами, играет роль теплоизолятора, который создает условия для аккумуляции тепла в водовмещающем горизонте. На количество аккумулированного тепла влияют водоупорные свойства пород горизонта (пористость, трещиноватость) и его мощность. Необходимость такого горизонта в верхней части геологического разреза на участке формирования субповерхностной гидротермальной системы очевидна, иначе тепло, поступающее из недр, рассеялось бы.

Существенную роль при этом также играет состояние коллекторов. Ведущим качеством структуры водовмещающих горизонтов должно

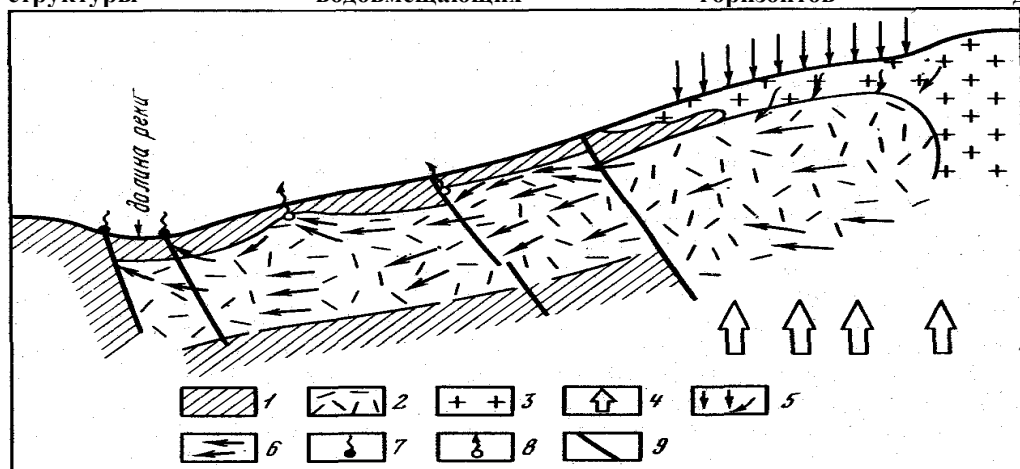


Рис. 12 Схематический геолого-гидрогеологический разрез гидротермальной системы Паужетско Вайракейского типа. Составил В.В. Аверьев

1 - водоупорные горизонты; 2 - водовмещающий горизонт; 3 -экструзия риодацитов; 4 - аномальный тепловой поток; 5 - инфильтрация метеорных вод; 6- циркуляция гидротерм; 7 - выходы гидротерм в очаге разгрузки; 8 - выходы паровых струй; 9 - разрывные нарушения

быть обеспечение замедленной циркуляции воды в их недрах. В рассмотренных примерах геологических структур гидротермальных систем эта достигается слабой пористостью и проницаемостью водоносных горизонтов. В гидротермальных системах Паужетского типа возможно формирование высокотемпературных гидротермальных систем типа артезианского склона, где господствует вынужденная конвекция, обусловленная перепадом напорных уровней в области питания и в области разгрузки (см. рис. 12).

В случаях коллекторов с хорошими фильтрационными свойствами замедленная циркуляция обеспечивается структурой типа артезианского бассейна, когда открытая разгрузка гидротерм практически отсутствует (рис. 13).

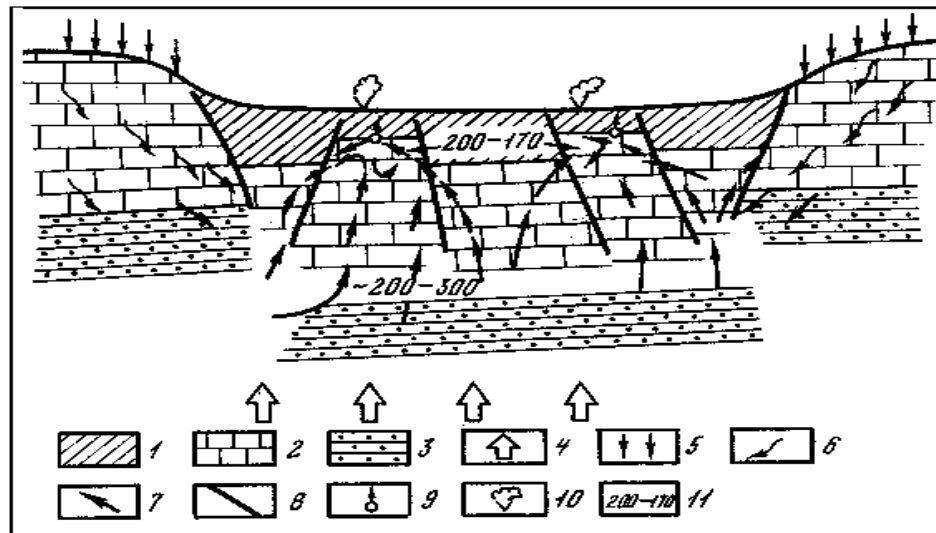


Рис. 13. Схематический геолого-гидрогеотермический разрез гидротермальных систем типа Лардерелло. Составил В.И. Белоусов

1 - верхний водоупор; 2 - водовмещающий комплекс пород, представленный кавернозными трещиноватыми известняками; 3 - нижний водоупор, гидротермально измененные терригенные осадочные породы; 4 - аномальный тепловой поток; 5, 6 - инфильтрация метеорных вод; 7 - направление циркуляции гидротерм в недрах гидротермальной системы; 8- разрывные нарушения, формирующие поровые ловушки (очаги разгрузки); 9, 10- уровни образования пара в поровых ловушках и поверхностная разгрузка гидротерм; 11-предполагаемое распределение температур в недрах гидротермальной системы

Этап образования субповерхностной гидротермальной системы, обусловленной первичной структурой данного участка, заканчивается в период установления теплового равновесия, когда количество тепла, поступающего к корням гидротермальной системы, уравнивается с тепловыми потерями у земной поверхности. После этого наступает второй этап в жизни гидротермальных систем.

Роль верхнего водоупорного горизонта в деятельности субповерхностной гидротермальной системы. Этап образования субповерхностной гидротермальной системы, как было рассмотрено выше, характеризуется

повышением температуры воды в водовмещающем горизонте. Повышение температуры воды приводит к изменению ее некоторых свойств. Так, например, с повышением температуры очень резко уменьшаются вязкость воды и плотность. Изменение этих параметров усиливает циркуляцию в водоносном горизонте, а соответственно значительно активизируются теплообменные процессы. Кроме того, при циркуляции в толще осадочных пород, седиментация которых еще не завершена и в которых существует первичная пористость, происходит мобилизация различных органических и неорганических соединений и в результате этого обогащение гидротерм газами CO_2 , H_2S , SO_2 , CH_4 и др. Находясь в гидротермах в растворенном состоянии при высоких температурах, эти компоненты усиливают их растворяющую способность. В связи с этим высоконагретые воды приобретают минеральную нагрузку как путем привноса элементов глубинным теплоносителем, так и вследствие мобилизации их из водовмещающих горизонтов и комплексов. Химическое равновесие (раствор-порода) в субповерхностных гидротермальных системах обеспечивается термодинамическими параметрами данной системы (Эллис, 1975). Вблизи поверхности водоносного горизонта, у нижней кромки водоупора или в очагах разгрузки субповерхностных гидротермальных систем создаются условия, где происходит резкое изменение термодинамических параметров за счет активной теплоотдачи при кипении или вынужденной конвекции. Эти изменения отражаются на химических равновесиях в гидротермах и приводят к выпадению компонентов из перенасыщенных растворов с образованием минералов гидротермального происхождения, которые заполняют поры и трещины. А так как такие нарушения термодинамических условий проявляются в основном у нижней границы водоупора, то выпадение минералов происходит в нижней части водоупорного горизонта. Кальматация пор и трещин в этом горизонте ведет к улучшению его водоупорных свойств.

Таким образом, создаются условия для обратного воздействия водоупора на термодинамическое состояние гидротерм в нижележащем водовмещающем горизонте. Это позволяет сделать вывод о том, что процессе достигнутого теплового равновесия в первичной структуре не завершается и создаются условия для прогревания данной системы. Процесс прогревания, по-видимому, не повсеместный, а локализуется вблизи очагов разгрузки, где возможно нарушение химического равновесия в гидротермах и выпадение минеральных новообразований с улучшением водоупорных и соответственно теплоизолирующих свойств водоупорного горизонта. Повышение температуры в недрах гидротермальных систем носит местный характер.

На Паратунской гидротермальной системе, как это известно из описаний ее геологического строения, на участке выхода Среднепаратунских термальных источников под чехлом рыхлых и слабоуплотненных пород четвертичного возраста водовмещающая толща образует куполообразно поднятие. Основная разгрузка наиболее высокотемпературных гидротерм этой системы приурочена к этому поднятию. Замеры температур в скважинах показали, что на границе водоупора и водовмещающей толще происходит резкий перепад температур. Из описаний геологических

разрезов известно, что нижняя часть рыхлых и слабоуплотненных пород четвертичного возраста, которая играет роль относительного водоупора, сцементирована гидротермальным халцедон-цеолитовым цементом. Максимальная мощность сцементированного горизонта располагается в наиболее приподнятой части куполообразного поднятия, где наблюдается наибольшая разгрузка гидротерм.

Несколько по-иному создаются гидротермальные системы на вулканических массивах, подобных Кошелевскому. Геолого-структурные условия вулканических аппаратов, на первый взгляд, неблагоприятны для создания гидротермальных систем вообще, а для высокотемпературных - в особенности. Как было рассмотрено ранее, для начальной аккумуляции тепла в недрах гидрогеологических систем необходимо существование верхнего водоупора, выполняющего одновременно роль теплоизолятора. Сейчас мы подчеркиваем, что наличие верхнего относительного водоупора обязательно и в низкотемпературных напорных гидротермальных системах, аналогичных Паратунской. При зарождении гидротермальных систем Кошелевского вулканического массива также предполагается наличие верхнего водоупорного горизонта. Изучение литологического строения этих гидротермальных систем показало, что роль верхнего водоупорного горизонта могут играть глинистые прослои, образованные в результате постмагматической деятельности при внедрении магматических образований. Такие глинистые прослои вскрыты скважинами в разрезах Нижнекошелевского термального поля

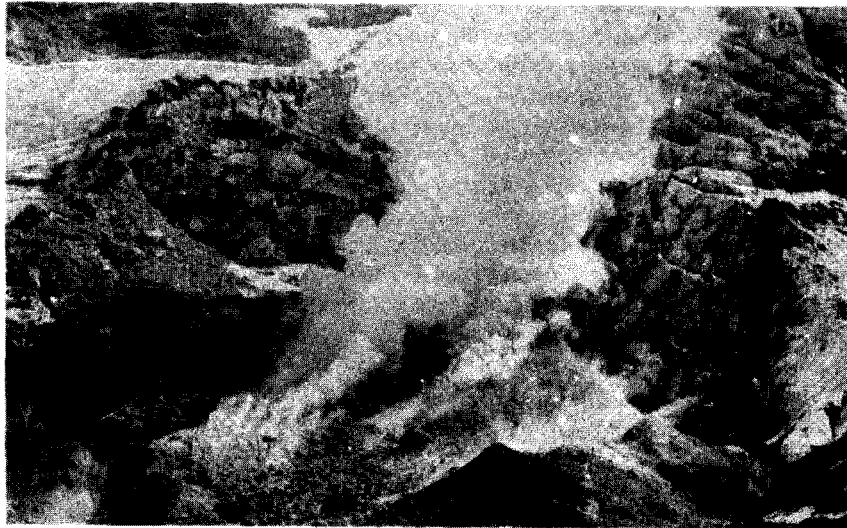


Рис. 14. Кратер Мутновского вулкана. Взаимодействие парогидротерм с ледником. Фото А.Л. Самойленко

В свое время, изучая химизм гидротерм Курильской островной дуги, С.С. Сидоров (1967) обратил внимание на тот факт, что внедрение некоторых экструзий сопровождается изменениями вмещающих пород под действием термальных вод, а другие экструзии таких изменений не производят.

Объяснялось это, как правило, степенью газонасыщенности внедрившихся расплавов. С.С. Сидоров обратил внимание, что конденсаты газов, выделяющиеся из экструзивного расплава, производят гидротермальные изменения на ограниченной площади. Он предположил, что для формирования больших полей гидротермально измененных пород вокруг экструзии необходим большой объем кислых растворов. Это могло произойти при наличии значительных запасов воды на участке внедрения экструзии. Последние на вулканах или сложных вулканических постройках часто образуются в их вершинных частях. Здесь возможно существование кратерных озер, многолетних снежников и ледников. По нашему мнению, в этих условиях могли образовываться значительные объемы кислых растворов при таянии вод. Талые воды формируются в результате таяния ледников или многолетних снежников при их контакте с горячими экструзиями (рис. 14). В таких водах растворялись газы, выделявшиеся из экструзии с образованием кислых растворов. Они, фильтруясь по трещинам, питали поверхностный грунтовый поток, распространявшийся по экструзии и вмещающим ее породам. В результате взаимодействия кислых растворов с породой происходило образование глинистых минералов, опалов и алунитов. Глинистые частицы, как наиболее легкие и поддающиеся механическому разрушению, вымывались грунтовыми и поверхностными водами. Они переотлагались на более низких гипсометрических уровнях у экструзивного купола или на некотором удалении от него.

Образование глинистого прослоя вблизи экструзии могло служить предпосылкой для образования гидротермальной системы (см. ниже рис. 15). После образования высокотемпературного потока гидротерм при подземном кипении его возможно отделение вторичного пара, который, поднимаясь вверх, может охлаждаться и, конденсируясь, образовывать кислые растворы. На уровнях конденсации вторичного пара происходят процессы аргиллизации вмещающих пород и образуется новый верхний водоупорный горизонт.

Типизация геологического строения современных гидротермальных систем

В основу типизации современных гидротермальных систем положены геолого-структурные факторы. Они определяют локализацию гидротерм, температурный режим и условия разгрузки. При обобщении данных по гидротермальным системам учитывались зарубежные исследования.

Паужетско-Вайракейский тип. Гидротермальные системы этого вида в настоящее время наиболее изучены и активно эксплуатируются. Водовмещающие толщи представлены псефитовыми туфами, которые состоят из крупных обломков пемз, реже андезитов и базальтов. Межобломочное пространство заполнено мелкими обломками кристаллов и вулканическим стеклом. Цементация очень слабая. Активная пористость этих пород низка и существенную роль в повышении фильтрационных

свойств играет трещиноватость. Сеть трещин разрежена. Как правило, на один погонный метр разреза приходится около двух трещин. Исключение составляют участки крупных зон дробления. Водовмещающие толщи обычно перекрываются горизонтами плотных пород, играющих роль верхнего водоупора. Часто нижняя граница водоупорного горизонта неровная. В местах ее более высокого гипсометрического положения (куполовидное и блоковое поднятия) в верхней части водоносного горизонта создаются условия подземного кипения и как следствие образуются скопления насыщенного пара (см. рис. 12).

Большинство известных высокотемпературных гидротермальных систем в областях современного вулканизма: Вайракей (Новая Зеландия), Оникобе, Мацукава (Япония), Паужетская, Долина Гейзеров, Узон (Камчатка) — характеризуются таким строением.

В районах развития гидротермальных систем данного типа, как правило, отмечается ненарушенное или слабонаклонное залегание вулканогенно-осадочных толщ. Локальные нарушения известны вблизи экстрезий, которые рвут водовмещающие и водоупорные толщи. Во многих случаях в поднятие вовлекаются большие участки пород, разбитых в приподнятых частях (вблизи контактов с экстрезией) на крупные блоки. Часто бывает, что экстрезии обрамляют крупный блок вулканогенно-осадочных пород. Для всех гидротермальных систем этого типа характерны трещинно-поровые условия циркуляции. Наличие водоупорных толщ, перекрывающих обводненные породы, придает им гидрогеологический закрытый характер и препятствует интенсивному проникновению в недра метеорных вод. В очагах разгрузки пьезометрический уровень находится выше земной поверхности. Благодаря хорошей проницаемости водовмещающих пород создаются условия для бокового (горизонтального) перемещения гидротерм в субповерхностных условиях. Это обуславливает значительную протяженность термоаномалии и поверхностных термопроявлений (десятки квадратных километров).

Паратунский тип. Отличительными чертами гидротермальных систем этого типа являются низкие температуры в их недрах. Водовмещающими породами в подобных системах являются непроницаемые породы, которые пересечены относительно изолированными трещинами и зонами дробления. Роль верхнего водоупорного горизонта в паратунском типе гидротермальных систем выполняют рыхлые или слабоуплотненные гляциальные, флювиогляциальные и аллювиальные отложения четвертичного возраста (верхний структурный ярус). Эти образования являются лишь относительным водоупором, так как они в свою очередь являются водовмещающими для грунтовых вод. Основная часть тепловой разгрузки осуществляется за счет выходов термальных вод, что обусловлено высоким положением пьезометрического уровня. Для систем этого вида характерен трещинно-жильный тип циркуляции термальных вод.

Зоны разгрузки, выраженные на поверхности низкотемпературными восходящими источниками (до 100° С), приурочены к крупным разрывным нарушениям или к местам, где подошва пород верхнего структурного яруса образует свод (куполовидную структуру). Нижняя часть рыхлых и слабоуплотненных отложений над сводами сцементирована кремнистыми

и карбонатными минералами, что является реакцией взаимодействия нижнего потока термальных вод и верхнего «холодного» грунтового потока и обусловлена выпадением минералов из растворов при дегазации и перепаде температуры. Мощность горизонта, цементированного карбонатно-кремнистым цементом, уменьшается от вершины сводовой структуры к периферии. В результате этого процесса поток напорных термальных вод самоизолируется от верхнего «холодного» грунтового потока.

Гидротермальные системы паратунского типа связаны с крупными геологическими структурами, линейные размеры которых достигают нескольких десятков километров. Очаги разгрузки имеют точечный характер, так как зависят от особенностей геологического строения, например наличия верхнего водоупора.

Нами выделена еще одна группа гидротермальных систем, которая характеризуется высокими тепловыми параметрами термальных вод, подобными тепловым параметрам паужетско-вайракейского типа, но имеющих геологическое строение, подобное паратунскому типу. Наиболее яркими представителями этой группы являются Лардерелло (Италия, провинция Тоскана) и Гейзеры Калифорнии (США). На Камчатке к этому подтипу, по нашему мнению, относится Больше-Банная гидротермальная система.

Подтип Лардерелло. Для него характерен, так же как и для систем паратунского типа, сильно трещиноватый коллектор, перекрытый водоупорными отложениями. Относительная изолированность трещин в практически непроницаемых породах, перекрытых локальным водоупором, не создает условий для формирования мощного потока холодных грунтовых вод. Вследствие этого в результате притока глубинного теплоносителя, нагрева и последующего вскипания ограниченного объема воды в верхних частях разреза образуются скопления сухого или перегретого пара (рис.13).

Такого рода система описана Макниттом в районе Калифорнийских Гейзеров (McNitt, 1961). Площадь термального поля и участки с поверхностной гидротермальной активностью имеют малые размеры; (первые единицы км²) в отличие от гидротермальных систем, характеризующихся развитием пород с поровой проницаемостью.

В районе Лардерелло наблюдаются хорошо проницаемые известняки и доломиты, перекрытые на значительной площади водоупорными сланцевыми глинами. Поэтому площади термальных полей, в недрах которых содержатся скопления нагретого пара, достигают 40 км², а площадь все системы - 150 км².

На примере Больше-Банных термальных источников, расположенных в пределах развития источников паратунского типа, и характеризующихся таким же геологическим строением участка, их проявления можно видеть, что в значительной мере их образование - явление случайное, обусловленное чисто геологическим событием. Перед внедрением экструзивного купола произошло извержение пирокластического потока, который вблизи выхода термальных источников перегородил р. Банную. В результате запруды образовалось долинное озеро, в котором сформировался небольшой мощности чехол тонкообломочных осадочных

пород; в последующем (когда перестало существовать озеро) он сыграл роль верхнего водоупора. В связи с его ограниченным распространением инфильтрационные воды попадают в систему и оказывают охлаждающее воздействие, чем и объясняется относительно небольшая их температура.

Кошелевский тип или геологические структуры современных гидротермальных систем вулканических построек. Изучение геологических структур гидротермальных систем этого типа началось на Камчатке одновременно с изучением других гидротермальных систем. Они, так же как системы Паужетско-Вайракейского типа, относятся к высокотемпературным. Температуры, замеренные в скважинах на Кошелевской гидротермальной системе на глубине около 400 м, составляют + 240° С.

Водовмещающими горизонтами для гидротермальных систем являются лавово-пирокластические образования, формирующие постройки плейстоценовых вулканов, которые наследуют структуру и характер извержений от долгоживущих вулканических центров, имеющих длительную предысторию развития. Глубокие недра таких структур характеризуются сложнейшими фаціальными переходами лавово-пирокластических толщ и вулканогенно-осадочных пород, часто прорванных субинтрузивными телами. Характерной особенностью плейстоцен-голоценовых вулканов является рассредоточение эруптивных центров андезито-базальтового материала в пределах постройки. Эти центры группируются в линии, субпараллельные региональным тектоно-магматическим разломам, по которым проявляется вулканизм ареального типа. На последних этапах развития таких структур происходит внедрение экструзий дацитового состава. Часто этот процесс совпадает по времени с присутствием в месте внедрения ледников. Это служит главным условием образования опал-алунитовых и опал-каолинитовых пород (рис. 15).

При инфильтрации грунтовых вод на этих участках происходило образование глинистых прослоев или кальматация трещин в верхней части сильнотрещиновых лавово-пирокластических пород с формированием водоупорного горизонта, который для нижележащих горизонтов сыграл роль верхнего водоупора. Этот геолого-структурный фактор явился и теплоизолятором, создав условия для аккумуляции тепла в недрах гидрогеологической системы вулканической постройки. Наиболее высокие температуры в близповерхностных условиях обязаны возникновению естественных ловушек — водоупорных горизонтов, образованных в результате переотложения глинистых минералов.

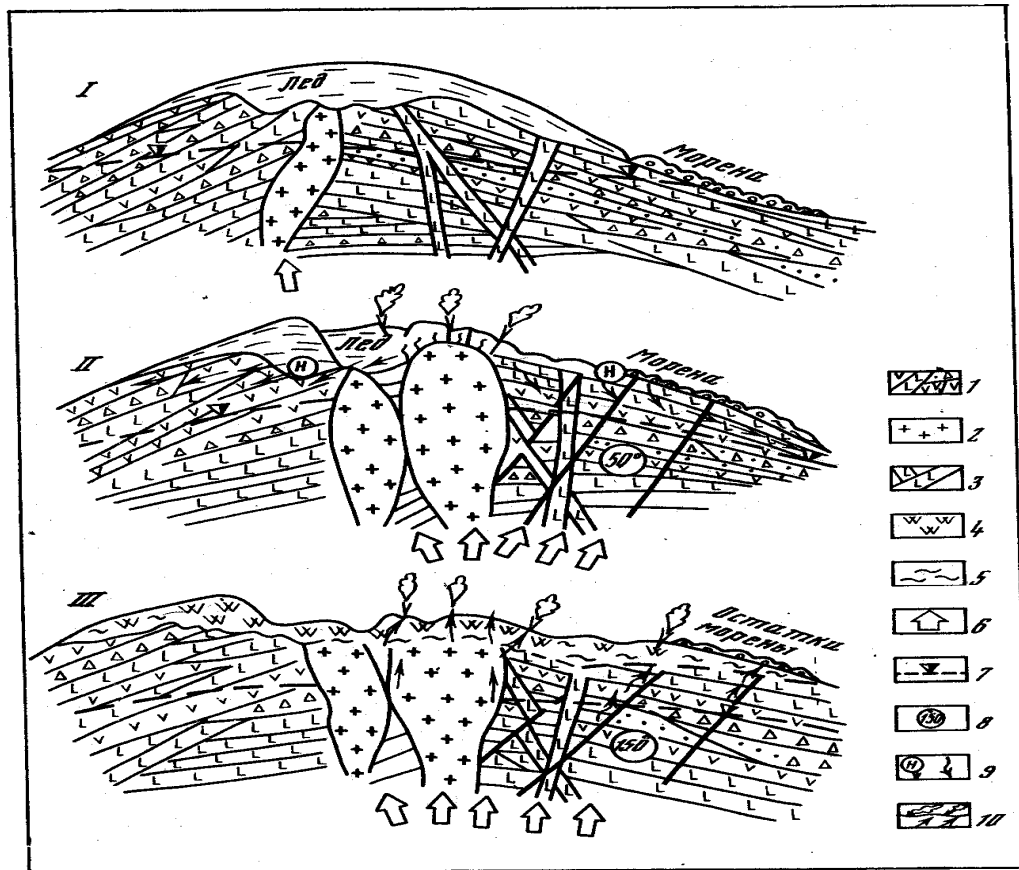


Рис.15 Схема геологического развития гидротермальных структур Кошелевского типа. Составил В.И. Белоусов

I - предполагаемая геологическая структура до внедрения экструзивного купола; II- схема взаимодействия нагретого экструзивного купола с ледником; III -схема образования высокотемпературных условий в недрах вулканической постройки после образования чехла гидротермальных пород; 1- лавово-пирокластический комплекс пород вулканической постройки; 2 - экструзия кислого состава; 3 - дайки базальта; 4 - опал-алунитовые породы; 5 - глины; 6 - аномальный тепловой поток, сопровождающий внедрение экструзивного купола; 7 - уровень подземных вод вулканической постройки; 8 - вероятные температуры гидротерм; 9 - инфильтрация конденсатных и смешанных кислых вод; 10 - пути миграции паров и газов, образовавшихся при внедрении экструзивного купола и при кипении гидротерм в недрах сформированной гидротермальной системы таких структур происходит внедрение экструзий дацитового состава.

Эти участки аналогичны ловушкам, образованным сводовыми или блоковыми тектоническими поднятиями подошвы верхнего водоупора в ранее описанных типах геологических структур гидротермальных систем: Паужетско-Вайракейском, Лардерелло, Паратунском.

В этих ловушках гидротермальных систем Кошелевского типа создаются условия для перегрева и подземного вскипания гидротерм с проявлением на поверхности Земли над ними паровых струй, парящих и прогретых площадок. Часть пара, отделившегося от горизонта термальных вод, конденсируется на глубине в несколько десятков метров с образованием

кислых поровых растворов, которые разлагают лавово-пирокластические породы на уровне конденсации до каолинитов. Последние, обладая хорошими водоупорными свойствами, увеличивают площадь ловушки.

К Кошелевскому типу геологических структур современных гидротермальных систем на Камчатке мы относим Северо-Мутновскую, Кипиныхскую и вулкан Бурлящий (Большой Семячик).

2.0 Геотермия на Камчатке.

2.1 Использование геотермальной энергии в народном хозяйстве (Диаграмма Линдела)

Потенциальные геотермальные ресурсы в мире огромны, но как было показано Гудмундсоном (Gudmundsson, 1988), имеется ряд ограничений возможного их использования в народном хозяйстве. Эти ограничения могут быть технического, экономического характера или специфики места локализации (удалённости от потребителя). Месторождения геотермальных ресурсов играют важную роль с точки зрения их использования. В случаях геотермальных электростанций реальность их строительства совершенно очевидна; все такие электростанции строятся в местах нахождения геотермальных ресурсов. Однако в случаях непосредственного использования геотермального тепла этот аспект реализации менее ясен. Геотермальные ресурсы, находящиеся в городской среде, наиболее вероятно будут использоваться, в отличие от тех гидротерм, которые удалены на небольшие расстояния. Совместимость геотермальных месторождений и пользователя становится менее важным, когда стоимость энергии влияет на выполнимость проекта.

Прямое использование энергии имеет значительный потенциал в большинстве стран, где есть геотермальные ресурсы. Во-первых, хотя производство электричества технически выполнимо при низких и средних температурах геотермального теплоносителя, имеется экономический предел температуры гидротерм для рационального производства электроэнергии. Во-вторых, низко- и среднетемпературный нагрев за счёт высококалорийных ископаемых топлив, приводит к низким эксплуатационным характеристикам энергетического оборудования. Вовлечение геотермальных ресурсов в систему тепловых потребностей может привести к лучшему использованию энергоресурсов. В-третьих, большая доля необходимых ресурсов во многих странах связана с нагревом низко- и среднетемпературного теплоносителя.

Требуемые средние температуры гидротермального теплоносителя в промышленно развитых странах были оценены Reistad (1975). Верхний предел 250°C оценивался для потенциального применения геотермальной энергии. Все виды энерго потребностей в США, рассчитанные от 25°C до этого температурного предела, колебались в пределах $50\text{-}250^{\circ}\text{C}$. Было определено, что значительная доля общего количества энергии используется ниже 120°C . Расход энергии на нагрев помещений $50\text{-}75^{\circ}\text{C}$ температурным теплоносителем составлял 50% от общего расхода тепла ниже 250°C . Результаты Рейстада схематически показаны на Рис.16, который иллюстрирует распределение используемого тепла.

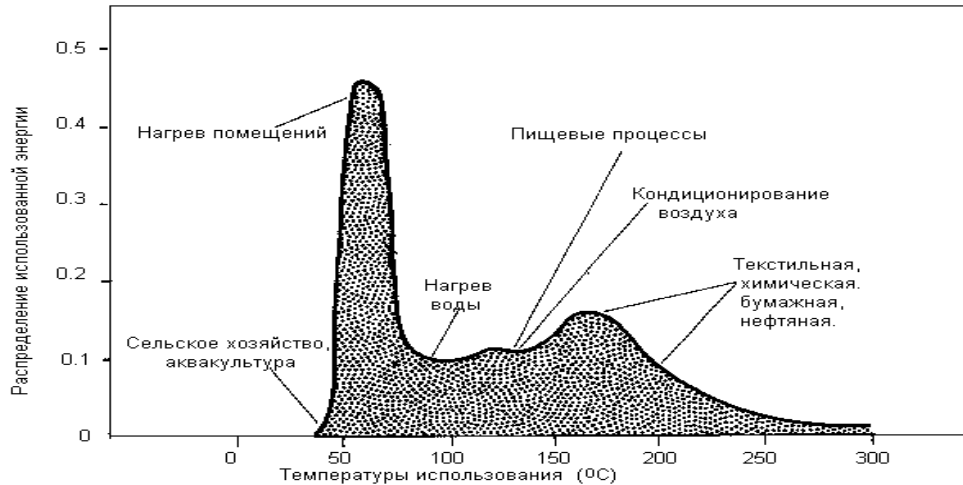


Рис.16 Распределение используемой энергии

Около трети общих энергозатрат во Франции приходится на теплоноситель с температурой ниже 100°C (Lejeune, Varet, 1981). В Исландии отопление помещений составляет около 45% общих энергетических расходов (Gudmundsson, 1983,a), из которых большая доля удовлетворяется за счёт геотермальной энергии. Предполагается, что в будущем прямое использование геотермальных ресурсов будет сосредотачиваться на местах, расположенных вблизи геотермальных месторождений.

Диаграмма Линдела. Многие виды потребления геотермальной энергии легко иллюстрируются диаграммой Линдела (Lindel, 1973; Gudmundsson et al.,1985; Рис.17.) Диаграмма показывает примеры настоящего и будущего употребления геотермальной энергии в значениях используемых температур. Широко известное использование включает: рыбопродукционное производство; плавательные бассейны и бальнеологию; нагрев зданий и теплиц; сушка, выпаривание и производство электрической энергии. Имеется много примеров этих и других видов прямого использования геотермальной энергии. Она охватывает температурный интервал гидротерм от 20°C до почти 200°C . В верхнем температурном пределе насыщенный пар используется в генераторах электростанций. Однако прямое употребление охватывает весь температурный интервал диаграммы Линдела.

Диаграмма Линдела подчёркивает два встречно направленных аспекта природы прямого употребления геотермальных ресурсов: а) каскадное и комбинированное употребление предполагает возможность усовершенствования выполняемых геотермальных проектов, б) температура эксплуатируемых гидротерм может ограничить набор возможного вида их потребления. Однако изменение цели существующих тепловых процессов может в некоторых случаях сделать данные гидротермы, пригодные к использованию.

2.2 Использование геотермальных ресурсов в России (Kononov et al., 2000).

В России энергетическая промышленность базируется, в основном, на использовании ископаемых видов топлива (уголь, нефть, газ) и при эксплуатации ядерных и гидроэлектростанций. Вклад геотермальной энергии относительно небольшой, хотя в наличии имеются значительные геотермальные ресурсы.

В настоящее время экономическая ситуация не способствует развитию геотермальной энергетики. Наличие топливных и транспортных трудностей отягощает проблемы энергетического обеспечения в северных и восточных регионах страны. В особенности ситуация ухудшилась после августовского кризиса 1998 г. на Камчатке, где до настоящего времени геотермальные ресурсы использовались в очень ограниченном масштабе по сравнению с потенциальными возможностями.

Кроме Курило-Камчатского региона, который изобилует современными вулканическими проявлениями и высокотемпературными гидротермальными системами, другие гидрогеологические провинции России также содержат значительные геотермальные ресурсы. Среди них следующие: 1) Кавказский сегмент альпийского тектонического пояса, 2) современная Байкальская рифтовая зона, 3) эпигерцинская Скифская плита Предкавказья, 4) Западно-Сибирская плита эпигерцинского возраста (Рис.18) Последние два региона содержат термальные воды ($T=100-200^{\circ}\text{C}$) в осадочном покрове, тогда как в двух других районах геотермальные ресурсы размещены в водовмещающих комплексах трещиноватых пород. Кроме того, часть геотермальных ресурсов находится в дорифейских образованиях Восточно-Европейской и Сибирской платформ, в палеозойских складчатых поясах Урала, Алтая и Саян, а также в мезозойском вулканическом поясе Чукотка-Катазия. Эти регионы менее перспективны на геотермальные ресурсы; они содержат поровые и трещинные гидротермальные системы с температурами $50-70^{\circ}\text{C}$ на глубине примерно 3 км. Геологическая структура, гидрологические условия и геотермические характеристики этих районов описаны более детально в работах Кононова (1992) и Кононова и др. (1995).



Рис.17. Диаграмма Линдела



Рис.18 Геотермальные районы России

Производство электрической энергии. Тепловые электростанции, работающие на органическом топливе, недавно производили 69% всей электроэнергии в России. Гидроэлектростанции и атомные электростанции давали 20% и 11% соответственно. Геотермальные электростанции дают лишь 0.06%, несмотря на увеличение их количества и их мощности по сравнению с предыдущими периодами (табл.3)

Таблица 3

Планируемое производство электроэнергии

	Геотермальн		Тепловые		Гидро		Атомные		Другие		Общее	
	Мощ- ность	Валов	Мощ- Ность	Валов	Мощ- ность	Вало в.	Мощ- ность	Валов	Мощ- ность	Валов. прод	Мощ- ность	Валов. прод.
В работе на январь	23	85	15100 0	558 000	43600	15500 0	21200	10800 0			21600 0	822000
Строится на январь 2000 г 2000 г.	93	400	1200	2800	530	460					1770	3420
Всего проектируется использовать на 2005	171	700	15500 0	58000 0	45000	16250 0	24200	12400 0			22430 0	867 000

Разведка геотермальных ресурсов для электростанций началась в 1957 г., когда была пробурена первая скважина на Паужетском геотермальном поле, расположенном на юге Камчатки. В последующие годы значительные геотермальные ресурсы были открыты на полуострове в результате усилий многих исследователей. Однако скорость и масштаб промышленного освоения геотермальных ресурсов ниже как потенциала Камчатки, так и экономических потребностей в электрической и тепловой энергий.

Паужетская электростанция начала работать в 1967 г. В это время установленная мощность была 5 МВт. В последующем она была увеличена до 11 МВт. Семь скважин извлекали 250кг/с пароводяной смеси с энтальпией 760-800 кДж/кг. Всего на этом геотермальном поле было пробурено 79 продуктивных скважин которые могли обеспечить увеличение мощности до 18 МВт.

Высокотемпературное Северо-Мутновское термальное поле длительное время рассматривалось в качестве важного объекта для строительства электростанции на Камчатке. Его поверхностные проявления, так называемые Дачные источники, были описаны в 1960 г. Эксплуатационное бурение началось в 1979г. Было пробурено 82 скважины, глубиной от 255 до 2266 м. Пародоминирующий резервуар, содержащий гидротермальный пар с энтальпией 2100-2700 кДж/кг, был вскрыт в интервале глубин 700-900 м. Он перекрывается резервуаром, преимущественно с жидкими гидротермами, энтальпии которых 1000-1500кДж/кг ($T=250-310^{\circ}\text{C}$).

В настоящее время могут эксплуатироваться 17 скважин с общим расходом 330кг/с гидротерм со средней энтальпией 1600кДж/кг. Строительство электростанции планировалось закончить в 70-х годах, но этот план начал реализовываться лишь в 1990 годах. Сейчас на верхнем секторе Северо-Мутновского геотермального поля, названного Верхне-Мутновским введены в строй три действующих 4-х МВт турбины, изготовленные на Калужском турбостроительном заводе. Два других турбогенераторных блока, один мощностью 3 МВт и другой с бинарным циклом 6 МВт, строится в этом секторе. В 1999 г построена линия электропередачи от электростанции к потребителю.

Для сектора Дачного того же Северо-Мутновского поля был разработан проект строительства Мутновской электростанции, мощностью до 300 МВт. Проект поддерживается заёмом (99.9 млн US \$) Европейского банка Реконструкции и Развития. Кроме того, этот заём даётся для поддержания буровых скважин и дополнительных геофизических исследований по уточнению геотермальных ресурсов этого сектора.

Кроме Паужетского и Северо-Мутновского геотермальных полей на Камчатке имеется ряд высокотемпературных геотермальных систем (Рис.19) Частично разведанное Нижне-Кошелевское термальное поле является очень перспективным местом, содержащим в своих недрах гидротермы с энтальпией до 2800кДж/кг. Оно располагается недалеко от Паужетского поля. Эксплуатация обоих этих геотермальных объектов могла бы стать важной энергетической базой для камчатской экономики. Другим важным местом такого же типа является Больше-Банное поле, где

естественная тепловая разгрузка оценивается в 79 МВт. Это поле уже разведано, общая разгрузка кипящих терм оценивается в 285 л/с.

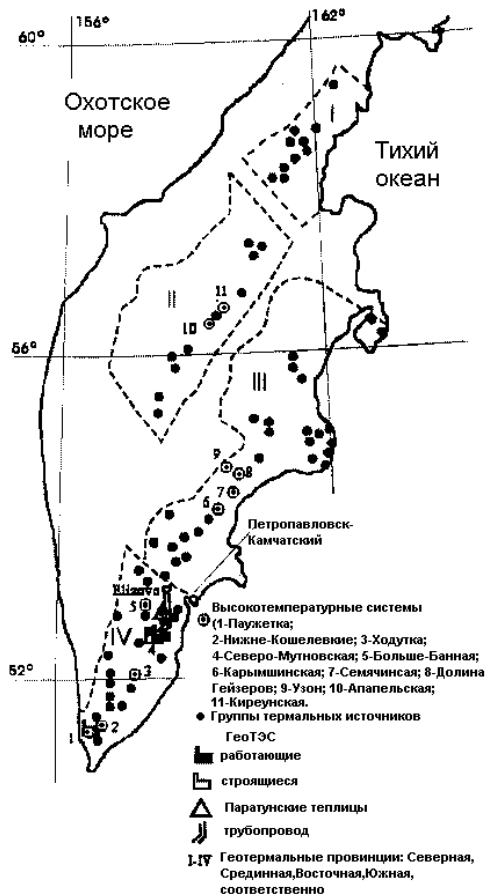


Рис.19 Геотермальные ресурсы Камчатки.

Киреунское термальное поле, расположенное в северной части Центральной Камчатской депрессии, также разгружает кипящие термы, тепловая мощность которых оценивается 24 МВт. Кроме того, имеется Семячинское поле, расположенное в Кроноцком заповеднике, которое включает знаменитую Долину Гейзеров. Строго ограниченное использование Семячинского поля (для строительства небольшой электростанции, мощностью 5 МВт) могло бы помочь развитию туризма в заповеднике. С учётом геотермальных ресурсов Кроноцкого заповедника на Камчатке можно построить электростанции, общей мощностью 1130 МВт э. (Sugrobov, 1995).

Кроме высокотемпературных гидротерм с энтальпией более 700кДж/кг, низкотемпературные горячие воды с пластовыми температурами до 150⁰С могут использоваться для электростанции с бинарным циклом, в которых используются теплообменники с низкокипящими жидкостями.

Экспериментальная геотермальная электростанция с установленной мощностью 800 киловатт, была построена в 60-х годах на Паратунской низкотемпературной системе.

Курильские острова имеют благоприятные геотермальные условия для производства электроэнергии. На острове Итуруп Океанская геотермальная электростанция проектируется на 30МВт (Рис.18). Здесь 9

скважин готовы к эксплуатации. Две другие электростанции будут строиться на островах Парамушир и Кунашир.

Другим районом, где имеются данные для строительства геотермальных электростанций, является Северный Кавказ. В этом районе выделяется две геотермальные провинции. Первая включает ороген Большого Кавказа вместе с Предкавказским прогибом, вторая располагается в структуре эпигерцинской скифской плиты. Осадочный чехол плиты и прогибов вмещает значительные объёмы горячих вод. Поскольку эти гидротермы высокоминерализованы, то они могут использоваться лишь в бинарном цикле с закачкой отработанного теплоносителя обратно в водоносные горизонты. В настоящее время разрабатывается проект такой электростанции, мощностью 3 МВт. Однако высокая минерализация гидротерм (>100г/кг), относительно низкая температура (150-170⁰С), большая глубина (>4000 м) и необходимое высокое давление при закачке отработанного теплоносителя (7МПа) делает реализацию этого проблематичной.

Прямое использование геотермальных ресурсов. Гидротермы в России используются в подавляющем большинстве случаев для обогрева помещений. Они используются в сельскохозяйственных целях (теплицы, нагрев почвы, в рыборазведении, животноводстве, хлебопечении), в различных промышленных процессах (ткачество, промывание шерсти, бумажном производстве, сушке шерсти, извлечение нефти), а также в бальнеологии и для отдыха. Прямое использование земного тепла наиболее распространено в Курило-Камчатском и Северо-Кавказском регионах, а также в Западно-Сибирской и Кавказской провинциях. (Табл.4).

На Камчатке имеется около 150 групп термальных источников и 11 высокотемпературных гидротермальных систем (Рис.18). Они располагаются в вулканотектонических депрессиях, грабенах и кальдерах, служащих в качестве резервуаров для термальных вод поровой и трещинной циркуляции. За исключением Кроноцкого Заповедника, геотермальные ресурсы Камчатки могут дать 1345 МВт тепловой энергии в течение, по меньшей мере, 100 лет.

Таблица 4

Районы	Максимальное					Мощность	Головое		
	Расход (кг/с)	Температура		Энтальпия			Расход	Энергия	КПД
		Вход	Выход	Вход	Выход				
Камчатка	532	85	30			122	372	2701	0.7
Кунашир						20			
Северо-Кавказский Платформенная									
	370	80	30			77	222	1465	0.6
	60	100	30			18	36	335	0.6
Республика Алтайская	49	80	30			10	25	162	0.5
Республ. Кабардино-	70	70	30			2	6	33	0.5
Республика	339	80	30			71	203	1 340	0.5
Республ. Карачаево	25	65	30			4	13	58	0.5
Республика Осетия	21	60	30			3	10	41	0.5

	>1 466					327	>888	>6135	
--	--------	--	--	--	--	-----	------	-------	--

На основании природных (геологоструктурных) условий на Камчатке выделяются следующие гидротермальные субпровинции: Северная, Срединная, Восточная, Южная провинции и провинции больших структурных депрессий (последние являются перспективными с точки зрения промышленного освоения геотермальных ресурсов).

Северная субпровинция включает 16 групп термальных источников. Среди них Тимлатские, Паланские и Русановские источники являются наиболее привлекательными для использования.

В Срединной субпровинции имеется 24 гидротермальных проявления. Среди них, Эссовские и Анавгайские источники уже используются и две высокотемпературные системы (Киреунская и Апапельская) предположительно обладают большим энергетическим потенциалом. Около одной трети всех источников расположено в Восточной субпровинции. Источники, находящиеся в долине р. Налычева, наиболее перспективны для сельскохозяйственных и бальнеологических целей. Карымская, Семячинская, Узонская высокотемпературные системы и Долина Гейзеров входят в эту субпровинцию. Последние три системы находятся в границах Кроноцкого заповедника, где запрещена любая промышленная и сельскохозяйственная деятельность. И, наконец, 55 разнообразных гидротермальных проявлений, сопряжённых частично с Паужетской, Нижне-Кошелевской, Северо-Мутновской и Больше-Банной высокотемпературными системами размещаются в Южной субпровинции. Несмотря на такое обилие геотермальных ресурсов, экономика Камчатки испытывает острый недостаток энергетической и тепловой энергии.

В настоящее время хлоридно-натриевые термы с $T=80-100^{\circ}\text{C}$ и минерализацией 1-5г/л используются для нагрева помещений в населённых пунктах (Паратунка, Паужетка, Эссо и Анавгай). Проблема теплоснабжения Петропавловска-Камчатского остаётся в фокусе постоянного внимания. Одним из возможных решений могло бы быть строительство трубопровода примерно 80 км длиной для передачи отработанных гидротерм Северо-Мутновских геотермальных электростанций. Сельскохозяйственное применение геотермальных ресурсов испытывалось на тепличном комбинате в посёлке Термальном на базе Паратунских гидротерм, площадью 60000 м². Теплицы меньшей площадью действуют в Эссо, Анавгае и Паужетке. Начинские и Нижне-Паратунские водолечебницы завершают полный список геотермальных объектов, используемых на Камчатке.

На Курильских островах прямое использование геотермального тепла развито на островах Кунашир и Парамушир для нагрева помещений (г.г. Южно-Курильск, Северо-Курильск, соответственно).

Платформенная геотермальная провинция Северного Кавказа включает несколько артезианских бассейнов. Гидротермы содержатся в многослойных водовмещающих системах, заключённых в мезокайназойском осадочном чехле. Термы содержат растворённые соли HCO_3 – Na или Cl – Na; их минерализация варьирует от 0.5 до 65 г/кг, температура колеблется до $80-110^{\circ}\text{C}$ на глубинах 1-2 км (табл.5).

Таблица 5

Районы	Максимальное использование					Мощность МВт т	Годовое использование		
	Расход (кг/с)	Температура(°С)		Энтальпия кДж/кг			Расход (кг/с)	Энергия Тдж/г	КПД
		Вход	Выход	Вход	Выход				
Камчатка	532	85	30			122	372	2701	0.7
Кунашир (курильские о-ва)						20			
Северо-Кавказский регион									
Платформенная провинция									
Краснодарский край	370	80	30			77	222	1 465	0.6
Ставропольский край	60	100	30			18	36	335	0.6
Республика Адыгея	49	80	30			10	25	162	0.5
Альпийская провинция									
Республ. Кабардино-Балкария	70	70	30			2	6	33	0.5
Республика Дагестан	339	80	30			71	203	1 340	0.5
Республ. Карачаево- Черкессия	25	65	30			4	13	58	0.5
Республика Осетия	21	60	30			3	10	41	0.5
Общее	>1 466					327	>888	>6135	

Вода используется, в основном, для сельскохозяйственных и промышленных целей. В селении Мостовском Краснодарского края, термы с температурой 75⁰С используются в многоцелевой системе, включающей теплицы (180000м²), нагрев зданий (для 10000 жителей), животноводческие фермы и птицефабрику, а также изготовление бетонных блоков и сушку шерсти. И, наконец, отработанные термы 20-30⁰С используются в купальных бассейнах и рыбообразных прудах.

Альпийские краевые прогибы Северного Кавказа также содержат многослойные водовмещающие системы с аналогичными HCO₃ – Na и Cl – Na термами в мезо-кайназойских осадках. Минерализация гидротерм колеблется от 0.9-2.1 г/кг (район Ханкалы) и 3-8 г/кг (район Махачкалы) до 100-200 г/кг (район Кайзулы и Тарумовка). Температура колеблется от 70-85⁰С (район Махачкалы) до 150-170⁰С (район Кайзулы). В Дагестане термы обычно используются для нагрева помещений и других видов прямого употребления. Гидротермальными ресурсами этой республики пользуются 200000 жителей. Кроме того, на них работают теплицы в Махачкале (60000 м²) и Кизляре (20000 м²). Эти теплицы используются для выращивания огурцов и цветов. Термы применяются в животноводстве.

На конец 1999 года общее количество гидротермальных скважин для прямого использования достигло 306 на Северном Кавказе и Камчатке. Из них 200 скважин – продуктивные, 16 реинжекционные, 90-наблюдательные. Половина извлекаемых терм используется для нагрева помещений и прямого использования, 33 % для теплиц, 12.8 % для различных промышленных процессов и 2.2% для животноводства и рыбообработки. Наконец, 2.0 % этих ресурсов используется в водообменниках и 40 заводов разлива термальной и минеральной воды.

Западно-Сибирская плита является перспективным районом для прямого использования геотермальных ресурсов. Осадочный чехол этой эпигерцинской плиты, площадь которого 3 x 10⁶ км², содержит артезианский бассейн термальных вод. По границам бассейна водоносные горизонты с высоким гидростатическим давлением, температурами 35-75⁰С и минерализацией 1-25 г/кг имеют мощность до 3 км и продуктивность 180м³/с. Однако до настоящего времени эти

геотермальные ресурсы используются в очень недостаточном объёме. Гидротермами обогреваются лишь несколько небольших населённых пунктов и несколько зданий в городах Тюмень и Омск. Эти термы также используются для нагревания нефтесодержащих горизонтов с целью уменьшения вязкости нефти и увеличения добычи, и для извлечения иода и брома, содержащихся в термальных рассолах, а также для рыбозаведения.

Этот регион очень богат природным газом и нефтью, которые препятствуют широкому использованию геотермальных ресурсов в настоящее время.

Имеется много термальных источников и несколько геотермальных скважин около озера Байкал и вдоль Байкало-Амурской магистрали. Эти термы используются локально для обогрева помещений, а также для бань и купален.

В системах обогрева гидротермами также могут быть использованы тепловые насосы. Успешный эксперимент этого рода был проведён в 1999 году в селе Филиппово Ярославской области. Грунт с температурой 5-6⁰С глубиной 40 м служил в качестве низкопотенциального теплового источника. Восемь тепловых насосов, изготовленных на Рыбинском инструментальном заводе нагрели воду, обогревающую школу на 160 учеников до 60⁰С. Кроме того, планируется использовать воду, нагретую тепловыми насосами, в аквапарке в Москве.

2.3 Экономические особенности использования геотермальной энергии.

Экономическая целесообразность использования геотермальных ресурсов зависит от многих обстоятельств. Одними из главных особенностей этого аспекта развития геотермальной энергетики является цена на традиционные виды топлива в местах расположения гидротермальных ресурсов, развитость инфраструктуры, сильно влияющей на капитальные затраты, как геолого-разведочных работ и эксплуатационного бурения, так и на строительство самих геотермальных электростанций и обустройство промыслов. Все названные факторы изменяются во времени и, естественно, экономическая целесообразность должна рассчитываться весьма конкретно для каждого проекта. Невозможно сделать вывод об абсолютной выгодности того или иного геотермального проекта. Однако следует отметить наличие некоторых экономических особенностей в использовании геотермальных ресурсов.

Так, например, экономическая целесообразность строительства геотермальных электростанций характеризуется сравнительно высокими затратами на капитальное строительство. Подавляющую долю в расходной части сметы занимает финансирование строительства геотермальных скважин. Поскольку условия бурения часто зависят от плохо прогнозируемого процесса проходки ствола скважины и возможных притоков геотермального теплоносителя с почти неизвестными термодинамическими параметрами, то и стоимость конструкций скважин колеблется в широких пределах.

В литературе часто называются средняя стоимость оборудования геотермальных скважин в пределах 1-10 млн. долларов. При этом следует

понимать, что средняя стоимость скважины зависит от конкретной гидротермальной системы. По-видимому, следует учитывать и развитость той или иной страны, что определяет уровень заработных плат конкретной страны, которые входят основной долей затрат.

Известно, что стоимость геотермальной скважины сопоставима со стоимостью газовых и нефтяных скважин.

Стоимость геотермального пара составляется из стоимости программы разведочного и эксплуатационного бурения и стоимости строительства паропроводов. Подавляющая часть стоимости пара определяется его эксплуатационными параметрами, которые зависят от гидрогеотермических характеристик термальных вод конкретной геотермальной системы, а также сроками амортизации, которые влияют на капитальные затраты по производству геотермального пара. В связи с этим продолжительность периодов амортизации является важной расчётной единицей, влияющей в итоге на полную стоимость электрической энергии вырабатываемой ГеоТЭС. Предполагается целесообразным включить в эти расчёты расходы на разведку в тот же период и таким образом будет оцениваться период амортизации продуктивных (эксплуатационных) скважин. При этом в расчётах должны учитываться изменения качества геотермального пара и геологические условия, которые влияют на закладываемую в расчёт продолжительность эксплуатации скважины, разные для различных геотермальных объектов, которые трудно порой сопоставить в разных странах. На первых этапах развития геотермальной энергии из-за недостаточного количества эмпирических данных, в связи с небольшой продолжительностью эксплуатации геотермальных скважин, принимались волевые решения в оценке их продуктивной активности. Кауфман (Kaufman, 1970) использовал в расчётах 20 летний период работы геотермальных скважин. Хайесида (Hayashida, 1970) считал, что они работают 10 лет, а для исландских скважин Рагнерс и другие (Ragnars et al., 1970) принимали в расчётах 7 летний период жизни геотермальных скважин. Выбор этой величины важный момент в составлении геотермальных проектов, так как продолжительность активного периода продуктивной скважины определяет экономическую целесообразность любого геотермального проекта. Опыт работы многих ГеоТЭС во всём мире на протяжении нескольких десятков лет показал, что продолжительность эксплуатации геотермальных скважин составляет десятки лет. Таким образом, срок амортизации оборудования значительно меньше, чем продолжительность жизни геотермальных скважин, в связи с чем, цена электроэнергии, вырабатываемая ГеоТЭС, падает до очень низкого уровня. Однако ещё есть значительный элемент недоверия к геотермальным скважинам, но это в большинстве случаев вызвано низким качеством конструкции геотермальных скважин. Этот факт большей частью компрометирует реализацию геотермальных проектов.

На раннем этапе развития геотермальной энергетики принимался слишком осторожный подход в оценке продолжительности жизни геотермальных скважин. Разведка геотермальных месторождений попадала в экономически невыгодные условия по сравнению с другими источниками энергии. В связи с чем, она могла никогда не начаться.

Следующая статья расходов, входящих в стоимость геотермального пара, это расходы на аренду или покупку земли, необходимой для площадок под скважины и системы паропроводов. Как показал Хаясида (Hayashida, 1970), эта часть стоимости геотермального пара зависит от минимального расстояния между скважинами, которая является функцией гидравлического взаимодействия между скважинами. Этот автор подготовил кривые, показывающие взаимосвязь между расходом скважины, расстоянием между скважинами, стоимостью земли и средней стоимостью киловатт-часа. Они показывают, что при стоимости земли 16200 долларов за гектар, при интервале между скважинами 150-200 метров, для скважин средней мощностью 3 МВт, стоимость электроэнергии может увеличиться на 1.8 тысячную доллара за киловатт-час.

Колебания стоимости, обусловленные расходами на транспортирование геотермального пара, очень небольшие и состоят, в основном, из расходов на эксплуатацию скважин и паропроводов, которые в определённой степени, будут зависеть от коррозионных свойств гидротерм. Присутствие минерализации в некоторых высокотемпературных гидротермальных системах создаёт проблему отложения кальциевых минералов в скважинах, чем обусловлено уменьшение продуктивности скважин и, следовательно, продолжительности её жизни. Эти отложения можно удалять разбуриванием и частота таких ремонтных работ будет зависеть от химического состава гидротерм. Хайясида и Езима (Hayashida, Ezima, 1970) делают ссылку на эксперимент, выполненный на геотермальном поле Отаке в Японии, где производилась закачка 5000 кг соляной кислоты в скважину, заросшую кальцитом, в результате чего продуктивность её восстановилась до 100%.

Кроме того, стоимость пара может также увеличиваться в связи с необходимостью продолжать выполнение программы непрерывного бурения, нацеленную на поддержание качества и количества пара.

До начала детального проектирования электростанции необходимо рассмотреть экономически оптимальное давление пара, при котором проектируемая ГеоТЭС будет работать. Джемс (James, 1970) изучил различные факторы, входящие в эту тему. По существу, с понижением проектируемых давлений, приходится сталкиваться с двумя противоречивыми эффектами: первый – это необходимость увеличить расход пара на турбинах, работающих при низких давлениях, а другой – заключается в том, что первый фактор побуждает извлекать большие количества пара из геотермальной системы, что приводит к снижению конечного давления в них. Используя различные базовые расходы в предполагаемых условиях геотермальных резервуаров, автор приходит к выводу, что конечное давление в скважинах с сухим паром не должно превышать 75 фунтов/кв.дюйм (~6 ати). Предполагается общий вывод, что для геотермальных полей с сухим паром, значения оптимального эксплуатационного давления не являются чувствительными к первоначальному давлению закрытого резервуара, ни к объёму вулканических пород, связанных с этим паром.

В результате изучения теоретической модели современной системы Вайракей Джеймс (James, 1970) пришёл к выводу, что оптимальное давление на турбине, преследующее максимальную продолжительность жизни геотермального поля, находится в пределах 40-60 фунтов/кв.дюйм. Оказалось, что реальный опыт Вайракея подтвердил этот теоретический вывод и был сделан расчёт стоимости для 150 МВт электростанций в Н. Зеландии.

Другим важным параметром, необходимым при проектировании геотермальных электростанций, является вакуум на конденсаторе. Увеличение давления на конденсаторе увеличивает плотность пара и допускает увеличение потока пара через турбину. Таким образом, увеличивает общий расход за счёт более высокого удельного расхода пара. Дополнительная энергия уменьшается из-за увеличения плотности неконденсируемых газов, а также из-за повышения температуры конденсации пара, который теряет охлаждающую способность. Однако возросший удельный расход пара влияет на общий расход пара. Извлекаемого из геотермального месторождения и вынуждает бурить дополнительные скважины и удлинять паропроводы, тем самым, увеличивая стоимость проекта.

Джеймс (James, 1970) рассчитал типичный проект геотермальной станции с предельными концентрациями неконденсируемых газов с точки зрения установления вакуума в конденсаторах, дающего самые низкие капитальные затраты и производство энергии. Из графика, данного в этой статье, видно, что минимальные капитальные расходы обеспечиваются колебаниями вакуума в пределах 5-10 дюймов ртутного столба. Оказалось, что на основании этих оценок, 5 дюймовый вакуум должен соответствовать минимальным полным расходам, где содержания неконденсируемых газов не превышает 25 %.

Некоторые авторы указывали на аналогичность стоимостной структуры между геотермальными и гидравлическими электростанциями. Увеличение стоимостей обоих видов энергетических систем практически нулевое. Однако не все гидроэлектростанции могут работать при высоких нагрузках, тогда как все геотермальные станции могут подвергаться перегрузкам, чтобы эксплуатировать их при очень низких ценах.

По-видимому стоимость разведки и бурения, капитальные затраты геотермальных электростанций являются функцией как оптимальной производительности, так и периода амортизации. Поскольку значительная часть оборудования геотермальных электростанций аналогична конструкциям тепловых электростанций, то периоды амортизации того же порядка-25 лет.

Во многих работах указывается на значительные различия между геотермальными и тепловыми электростанциями, что касается их экономичности. В тепловых электростанциях имелась возможность получить впечатляющее уменьшение средней стоимости за счёт значительного увеличения мощности электростанции. Этот эффект достигался использованием очень высоких параметров пара и нескольких стадий его прогрева. Эти факторы позволили изготавливать сравнительно малые паровые турбины.

В геотермальном энергопроизводстве паровой теплоноситель обычно обладает низкими давлениями и температурами с малым перегревом или отсутствием такового. При данных условиях удельный расход пара относительно высокий, что требует увеличения размеров турбин и другого комплексного оборудования. Кауфман рассчитал, что для ГеоТЭС 80 МВт турбины будут наиболее экономичными с точки зрения их оптимальных размеров.

Геотермальные турбины не могут приблизиться по своему масштабу к турбинам тепловых электростанций, но Armstead (1970) показал, что в пределах размеров геотермального оборудования может достигаться определённый эффект его использования. Это подтверждено Мак Миланом (McMillan, 1970), который приводит полную стоимость капитальных затрат в пределах от 147 \$ на киловатт для 13.5 МВт турбин до 105 \$ на киловатт для 55 МВт конденсирующих машин. Не конденсационные турбины менее дорогие по капитальным затратам и Рагнерс и др. (Ragnars et al., 1970) рассчитали, что при турбинах в пределах 5-10 МВт капитальные затраты составляют порядка 90-130 \$ на киловатт. Сравнение конденсирующих электростанций производилось в Италии Леардини (Leardini, 1970). Он привёл цены 190 и 80 долларов на киловатт соответственно для 15 МВт станций. Капитальные затраты 300 долларов на киловатт приводятся Хайясида и Езима (Hayashida, Ezima, 1970) для Отаке и 286 долларов на киловатт Накамура (Nakamura, 1970) для Матцукава. Эти высокие стоимости частично связаны со стоимостью прокладки дороги в гористой местности, а также со значительным разбросом скважин. Вообще стоимость сравнительно небольшой геотермальной электростанции мало отличается от стоимости тепловой электростанции мощностью 300-400 МВт.

Для некоторых геотермальных электростанций, по-видимому, необходимо исследовать проблему эксплуатации вакуумных конденсаторов, в связи с высокими концентрациями неконденсируемых газов. Если количество таких газов невысокое, то используются обычные паровые эжекторы, как показал Макмиллан (McMillan, 1970) для Гейзерной ГеоТЭС. Однако наличие высоких концентраций влияет на износ ротора, который значительно превышает расходы как на ремонт, так и на инвестиционные затраты. Поскольку фактически нет увеличения в стоимости эксплуатации геотермальных установок, то средняя стоимость энергии будет изменяться обратно пропорционально количеству выработанной энергии и, следовательно, фактору нагрузки. Таким образом, уменьшение коэффициента нагрузки геотермальной электростанции приведёт к пропорциональному росту средней цены. Армстид (Armstead, 1970) показал, что возможно использовать различие относительного смещения стоимости станции и фактора нагрузки, чтобы получить наиболее экономически выгодный рабочий режим геотермальной электростанции. В идеальном случае, увеличение средней цены, поднимающейся по мере уменьшения нагрузок, могло быть большим, чем компенсация за счёт экономии, полученной в результате использования турбин больших размеров. Этот аргумент заслуживает внимание в том, что увеличение оптимальных возможностей работающей геотермальной электростанции

при коэффициентах нагрузки меньше, чем в условиях базовой нагрузки. Из анализа, данного Армстидом (Armstead, 1970), получается, что должен быть экономический минимум коэффициента нагрузки, ниже которого, по видимому, не может экономично работать тепловая конденсационная электростанция. Однако этот автор указывает на дополнительную возможность использования не конденсирующих турбин, работающих при низких коэффициентах нагрузки, с низким расходом капитальных затрат.

Случаи, при которых производство энергии турбинами без конденсаторов могут использоваться, являются не только вопросом стоимости станций, поскольку возросшая удельная стоимость пара должна превысить возможность сохранения геотермального источника тепла.

Как показал Кауфман (Kaufman, 1970), при экономическом сравнении гидро и геотермальных электростанций (где нет необходимости экономить топливо), последние могут иметь некоторые трудности в соревновании с гидроэлектростанциями.

Из информации, данной в нескольких статьях, очевидно, что имеющиеся в наличии геотермальные станции были способны эксплуатироваться при очень высоких нагрузочных коэффициентах. Накамура (Nakamura, 1970) приводит 90% нагрузочный коэффициент, тогда как Хаясида и Езима (Hayashida, Ezima, 1970) приводили коэффициенты более 97% в течение двухлетнего периода. Большой опыт обобщён Леардини (Leardini, 1970) для Лардерелло, где показано, что средние коэффициенты нагрузки превышают 98% для большинства установок.

Простота, которую можно достичь на работающих ГеоТЭС, в особенности при постоянной нагрузке, возможна при некотором внимании к проблеме автоматического контроля. Так, например, геотермальный турбогенератор в Намафьялле в Исландии, мощностью 3.5 МВт управлялся с гидроэлектростанции, расположенной в 12 км от неё. На Паужетской ГеоТЭС многие обычные функции были автоматизированы. Макмиллан (McMillan, 1970) сообщает об автоматическом управлении до 16 часов каждый день 12 МВт установки в Гейзерах Калифорнии.

Для обычного обслуживания станций на ГеоТЭС в Лардерелло Леардини (Leardini, 1970) считает необходимым 1.2 человека на 1 МВт установленной мощности. Если учитывать весь штат, участвующий в производстве электроэнергии, то эта величина составит 1.8 человека на 1 МВт.

Помимо капитальных расходов, наиболее значительной долей стоимости электроэнергии, производимой ГеоТЭС, являются ремонтные работы. К этим работам относится чистка оборудования от отложений солей. Коррозия может вызываться высокими концентрациями неконденсируемых газов в гидротермах. Иногда приходится устанавливать химические насосы для контроля рН в охлаждающей системе для того, чтобы нейтрализовать серную кислоту.

Большинство ГеоТЭС, использующих пароводяную смесь, работают в режиме прохождения этой смеси через сепаратор, в котором высокопараметрический пар поступает на турбину, а отделившаяся вода обычно закачивается в реинжекционные скважины. Джеймс (James, 1970) в своей работе обсуждает трудности использования этих больших

геотермальных ресурсов. Однако имеются примеры их применения для нагрева помещений и других целей, согласно диаграммы Линдела. Проекты более глубокого использования энергии этого теплоносителя базируются на применении теплообменников, в которых циркулируют легкокипящие теплоносители. Такие опыты производились впервые в мировой геотермии на Паратунской ГеоТЭС (800КВт).

Загрязнение окружающей среды в различных частях мира, связанное с освоением геотермальных ресурсов, вызывает большое беспокойство. Загрязнение воздушной среды повышается, если газы, такие как сероводород, попадают в воздушные слои и требуется дополнительное финансирование для решения этой проблемы. Кроме того, большинство гидротерм содержат соли и такие вещества, как мышьяк, фтор и бор, а также другие минеральные элементы. Поскольку геотермальная энергетика в настоящее время развивается вдали от больших промышленных центров, которые создают наибольшие экологические проблемы, загрязняющие выбросы её отходов не являются сейчас главной проблемой. Но, несомненно, это не служит причиной о снятии вопроса о ликвидации отработанных отходов.

Там, где геотермальные электростанции располагаются вблизи моря, обычно проблемы ликвидации отходов геотермального производства нет. Но там, где их попадание в речную сеть является реальным, то возникает проблема загрязнения пресных вод. Несмотря на малые концентрации большинства химических компонентов в гидротермах, некоторые из них могут наносить значительный ущерб окружающей среде. Так, например, бор в концентрации 2 части на миллион уничтожает растения.

Расчётами было показано на примере одной из ГеоТЭС в Южной Америке, что во влажный период наблюдается сильное разбавление отработанных гидротерм, но в сухой сезон концентрация бора могла подниматься до опасного уровня. В настоящее время в практике эксплуатации геотермальных ресурсов предусматривается всеми проектами закачка отработанных гидротерм и конденсатов с растворёнными неконденсируемыми газами обратно в водоносный комплекс. Это увеличивает стоимость электрической энергии, вырабатываемой геотермальными станциями.

Кауфман (Kaufman, 1970) рассчитал, что кроме затрат на бурение

скважин для закачки отработанных гидротерм, стоимость реинжекционной системы может составить 100 долларов на 1000 галлонов (~ 4 метрических тонны). В связи с этим стоимость киловатт-часа повышается на 3-4 тысячных долей доллара.

2.3 Итоги первого этапа реализации геотермальных программ на Камчатке. Негативное воздействие на окружающую среду.

Как уже отмечалось в разделе 1, на начальном этапе освоения геотермальных ресурсов на Камчатке был разработан проект развития геотермальной энергетике на базе Паужетских горячих (кипящих) источников на южной оконечности Камчатского полуострова, в 30 км от Озерновского рыбокомбината. Целью проекта было строительство

опытно-промышленной геотермальной электростанции с установленной мощностью 5 МВт. Проект был подтверждён специальным Постановлением Совета Министров СССР и предусматривал бурение двух 500 метровых скважин роторного бурения с оборудованием промышленных площадок и применением специального противовыбросного (превенторов) и пароотделительного (сепараторов) оборудования.

Разведочная модель Паужетского месторождения горячих вод базировалась на ортомагматической концепции их происхождения. Предполагалась, что кипящие термальные источники, расположенные у борта долины реки Паужетки, непосредственно связаны с магматическим очагом и являются конденсатами магматических флюидов.

Проходка первой скважины и опытные выпуски и термометрические измерения в ней показали ошибочность предложенной разведочной модели. Оказалось, что кипящие источники располагаются в конце подземного потока гидротерм, стекающего по водоносным горизонтам (комплексам) по северо-западному склону Камбального хребта, входящего в сложную структуру одноимённого долгоживущего вулканического центра.

Уточнение разведочной модели данного геотермального проекта казалось бы должно было сопровождаться изменением стратегии геолого-разведочных работ и необходимостью ведения бурения скважин в направлении вверх по северо-западному склону. Из-за недостаточного финансирования проекта было принято решение бурить геотермальные скважины станками колонкового бурения по сетке. Первые же скважины вынудили геолого-разведчиков заниматься поиском термовыводящих разломов. Методом проб и ошибок было принято считать термовыводящими дренами тектонические разломы северо-восточного простирания, которые якобы являлись естественным водозабором по отношению к потоку гидротерм, стекающим вдоль северо-западного склона Камбального хребта. Было пробурено 20 скважин глубиной до примерно 500 метров и 1 роторная скважина глубиной 800 м. Основываясь на данных одиночных и кустовых опытных выпусках продуктивных скважин, были оценены геотермальные ресурсы на фронтальной части верхнего водоносного горизонта со средневзвешенной энтальпией 170 ккал/кг. Общий вынос тепла этим потоком оценивался примерно 80000 ккал/с, что считалось достаточным для строительства планируемой геотермальной электростанции. Было принято решение об окончании геолого-разведочной стадии работ и переходе к стадии бурения эксплуатационных скважин. Однако руководство предпочло форсировать строительство Паужетской ГеоТЭС и пришли к выводу о возможности использования большей части разведочных скважин в качестве эксплуатационных. Поскольку средний единичный расход скважин был небольшой, то протяжённость паропроводов и ручьёв, дренирующих гидротермы после сепараторов, занимали значительную площадь. Программой строительства ГеоТЭС не планировалось использование паровых турбин с эксплуатационными параметрами, приспособленными к низким параметрам извлекаемого теплоносителя, а были взяты турбины с более высокими эксплуатационными параметрами. Это привело к

неполной выработке электрической энергии из добываемого теплоносителя. Установленная электрическая мощность ГеоТЭС составила лишь 3МВт. Задача доведения мощности Паужетской ГеоТЭС до проектного задания была выполнена уже другой организацией, которая входила в состав Министерства газовой промышленности. По инициативе Института Вулканологии ДВНЦ АН СССР и Камчатэнерго Министерство газовой промышленности приняло решение продолжить бурение с до разведкой Паужетского месторождения горячих вод. Работы были распространены на нижнюю часть северо-западного склона Камбального хребта, так как предыдущая разведочная модель оказалась состоятельной. В результате этих работ начали извлекать более высокопараметрический пар. Мощность Паужетской ГеоТЭС была доведена до 11 МВт. Однако следует отметить, что на полную мощность она никогда не работала из-за отсутствия потребителей в данном районе. Попытки стимулировать расширение геолого-разведочных работ как на Паужетском геотермальном поле с переходом на осевую часть Камбального хребта, где ожидается значительное приращение геотермальных запасов с более высокопараметрическим теплоносителем, так и на Нижне Кошелевском месторождении геотермального пара, натолкнулись на упорное неприятие этой идеи со стороны Камчатэнерго. Последние были нацелены на строительство атомной и тепловых электростанций на привозном мазуте. Главным аргументом против освоения геотермальных ресурсов южной Камчатки являлось не экономичность протяжённой линии электропередач от места производства электрической энергии к главным потребителям, располагающимся в г. Петропавловске-Камчатском.

Длительная эксплуатация Паужетской ГеоТЭС наглядно подтвердила рациональность использования геотермальных ресурсов для получения электрической энергии на Камчатке. Не вызывает сомнений, что в отсутствие развитой инфраструктуры, в которой главным недостатком является полное отсутствие дорожной сети на Камчатке, геотермальная энергетика реализуется с большими трудностями и неоправданными непроизводительными затратами, которые ложатся тяжёлой ношей на стоимость киловатт-часа производимой ГеоТЭС электрической энергии. Отсутствие в социально-экономических программах и программах развития производительных сил на Камчатке целенаправленного строительства дорожной сети предполагает и в дальнейшем нелёгкую реализацию энергетического обеспечения на Камчатке, в том числе и за счёт геотермальных ресурсов. Кроме того, эти работы сопровождаются сильным воздействием на окружающую среду, в значительной степени усиленное безхозяйственным, а порой варварским отношением к природным объектам и экосистемам.

Однако практика эксплуатации Паужетской ГеоТЭС показала, что нарушение экологической обстановки вокруг объекта могут быть сведены к минимуму, а промысловые участки могут быть рекультивированы с созданием рекреационных зон и зон сельскохозяйственного землепользования (строительство теплиц, использование терм в животноводстве и в отопительных системах, как жилищно-коммунальных, таки производственных предприятий).

Из ущерба, нанесённого геолого-разведочными, строительными и эксплуатационными работами, следует отметить, что было погублено несколько стволов Камчатской берёзы и ольховый кустарник. Они во время опытных выпусков в атмосферу пароводяной смеси покрылись золями кремнекислоты.

Далее, за счёт понижения гидростатического уровня верхнего водоносного комплекса исчезли поверхностные термопроявления (источники Парящий 1, Парящий 2, Пульсирующий и Пятиминутка). Произошло тепловое загрязнение ручьёв Быстрого, температура которого повысилась за счёт сброса термальных вод после сепарирования на скважинах, расположенных на его бортах каньонообразной долины. В ложе стоков гидротерм с температурой около 100°C из сепараторов вплоть до ручья отложился гейзерит.

Кроме того, от конденсаторов ГеоТЭС к реке Паужетке тянется ручей с разбавленным конденсатом. Несомненно, от этого ручья и других сточных термальных вод происходят испарения растворённых газов CO_2 и H_2S .

Наиболее ощутимым нарушением воздушной среды является шум, издаваемый расположенным на подводящем паропроводе регулятором расхода пара, в особенности в ночное время, когда потребление электрической энергии, вырабатываемой ГеоТЭС, снижается.

Несомненно, нарушением окружающей среды является выемка под автомобильную дорогу, вдоль которой в настоящее время наблюдаются эрозионные процессы в поверхностном элювиально-делювиальном чехле, сложенном рыхлой пирокластикой.

Геолого-разведочные работы на Паратунской геотермальной системе, расположенной в долине реки Паратунки и её притока Карымшине, а также Больше-Банной геотермальной системе происходили не планомерно, без какого-либо единого геотермального проекта. Они должны были обеспечить ближайшие населённые пункты пресной водой. Финансирование этих исследований проводилось спорадически по статьям. Поскольку оно было недостаточным и предназначено под иные задачи, то геолого-разведочные работы оценивались не по объёмам извлекаемого теплоносителя, а по погонным метрам проходки колонковых разведочных скважин. Порочность этого способа разработки геотермальных ресурсов очевидна, так как частота расположения скважин на разведываемой гидротермальной системе необоснованно завышена и здесь ни о какой экономической целесообразности буровых работ не приходится говорить. Соответственно такому подходу к освоению геотермальных ресурсов и нанесённый ущерб окружающей среде.

В настоящее время экологический ущерб минимизировался естественным путём. После прекращения геолого-разведочных и буровых работ восстановился гидростатический уровень гидротерм в недрах гидротермальных систем. На Паратунской гидротермальной системе извлечение термальных вод производится за счёт гидростатического напора самоизливом – это наиболее щадящий режим эксплуатации подземных гидротерм низкотемпературных гидротермальных систем. Карымшинская и Больше-Банная системы в настоящее время не

эксплуатируются и их источники и скважины используются для бассейнов, которые посещаются, в основном неорганизованными туристами. Все вышеизложенные негативные замечания по разработке геотермальных ресурсов некоторых гидротермальных систем Камчатки относятся в полной мере к реализации геотермального проекта на Северо-Мутновском геотермальном поле. Поскольку первые этапы этого проекта выполнялись геолого-разведочной организацией Министерства Геологии РСФСР, которые не имели возможности использовать буровое оборудование нефтяного ряда, реальных результатов не было достигнуто. На следующем этапе были привлечены организации Министерства нефтяной и газовой промышленности и буровые работы производились тяжёлыми станками, которые достигали необходимых проектных глубин. Однако, как и на первом этапе геолого-разведочных работ, подход к освоению геотермальных ресурсов Северо-Мутновской системы не отличался высокой организацией работ, элементы системного подхода в реализации геотермального проекта отсутствовали. Основным недостатком этих работ приходится считать слабую научную и экологическую проработку проекта и главной бедой - реализация его, несколькими не связанными единой программой, организациями которые, к тому же имеют разные цели. Геологические работы преследовали цель пробурить как можно больше метров проходки скважин (оплата производилась по расценкам бурения на нефть) Энергетики преследовали цель построить электростанцию на извлекаемом геотермальном паре. Инфраструктура района работ развивалась стихийно и при участии различных организаций, не связанных единым проектом. Экологическая часть проекта в проработанном виде отсутствовала. Некоторые мероприятия, такие, например, как реинжекция, находятся в стадии становления и проводятся в рамках технологического процесса реализации геотермального проекта, который определяется требованиями организации, финансирующей строительство Верхне-Мутновской ГеоТЭС.

Глава 3. Опыт реализации геотермальных проектов за рубежом. Примеры.

На заре человеческой цивилизации геотермы использовались в виде купален в естественных термопроявлениях и горячих источников для приготовления пищи, для бань и отопления. Имеются археологические доказательства, что индейцы в Америке и айны на Камчатке (Паужетка) селились вблизи термальных источников, а индейцы восстанавливали силы после войн ещё 100000 лет назад. Во многих устных легендах описываются эти места и другие вулканические явления. Письменные описания, упоминающие использование терм, имеются в истории Древнего Рима, Японии, Турции, Исландии, стран Центральной Европы и у народа Маори в Новой Зеландии, где они использовались для бань, приготовления пищи и обогрева. Бани в Римской империи, в Среднем Царстве Китая и Османской империи использовались в качестве бальнеологических лечебниц, где культ здорового тела, гигиены и обсуждение событий было ежедневным общественным событием. Этот обычай был распространён в местах локализации термопроявлений в Японии, Германии, Исландии, Австро-Венгрии, Америке и Н. Зеландии.

В древней истории известно промышленное использование геотермальных ресурсов в виде извлечения солей и минералов из гидротерм в районе Лардерелло в Италии. Серьёзная промышленная деятельность в этом районе началась после открытия борной кислоты в горячих прудах в 1777 году. Первая попытка использования этих минералов была сделана в 1810

году. С 1816 по 1836 годы было построено 9 фабрик по добыче этого сырья. Расцвет этого производства был в начале 1900 годов.

Развитие геотермальной энергетики в 20 столетии с целью получения электрической энергии началось в Италии с опытных работ, которые проводил принц Джионори Конти в 1904-05 г.г. Первая электростанция (250 киловатт) была введена в эксплуатацию в 1913 году в Лардерелло. Эти работы в 1958 были продолжены в Вайракее в Н. Зеландии, в 1959 году построены опытные станции в Пате в Мексике и в 1960 году в Гейзерах в США.

Первое международное совещание по использованию геотермальных ресурсов было проведено в Риме в 1961 году в рамках Конференции ООН по новым источникам энергии. На этом совещании обсуждались результаты разработки геотермальных ресурсов в Италии, Н. Зеландии, США и Исландии (Smith, 1964). В это время строилась электростанция в Хварагерди, а об опытной электростанции в Пате в Мексике ничего не было известно. Информация об этом была представлена в 1970 году в Пизе на симпозиуме ООН по развитию и использованию геотермальных ресурсов (Фасса, 1970). На основании этих докладов и последующих докладов, представленных на 2-ой симпозиум ООН по разработке и использованию геотермальных ресурсов в Сан-Франциско в 1975 г. (Armstead, 1975, a), ежегодных совещаний Совета по Геотермальным ресурсам (1981, 1985, 1990; Di Pippo, 1981, 1985; Hutterer, 1990) и на всемирном Геотермальном конгрессе во Флоренции в 1995 (Hutterer, 1995) и вместе с докладом, представленным на Всемирном Геотермальном Конгрессе 2000 в Японии (Hutterer, 2000) развитие геотермальной электрической энергетики представлено в таблице 6.

Таблица 6

Мировое производство электрической энергии на геотермальных ресурсах.

Годы	Установленн я мощность ГеоТЭС, МВт	Производств о электрическо й энергии на ГеоТЭС	Число стран,имеющ их ГеоТЭС	Страны
1940	130	-	1	Италия

1950	293	-	1	Италия
1960	386	2600	4	+Н. Зеландия, Мексика, США
1970	678	5000	6	+Япония, СССР
1975	1310	-	8	+Исландия, Сальвадор
1980	2100	-	14	+Китай, Кения, Индонезия, Тур- ция, Филиппины
1985	4764	-	17	Португалия +Греция, Фран- - ция, Никарагуа
1990	5832	-	19	+Таиланд, Аргентина, Австрия- Греция
1995	6797	-	20	+Коста-Рика
2000	7974	49261	21	+Гватемала, Эфиопия- Аргентина

К сожалению не были сделаны оценки энергии, произведённой за период с 1975 по 1995 годы. Также оказалось, что данные разных авторов отличаются по установленным мощностям геотермальных электростанций.

Скорость роста установленной мощности геотермальных электростанций вначале была небольшой (5.6% - ежегодно с 1940 по 1960 г.г.), и производство электричества за счёт геотермальных ресурсов снизилось во время Второй Мировой войны. С 1960 по 1970 г.г. скорость роста производства геотермального электричества достигала 5-8% ежегодно, а затем резко увеличилась до 12.0% в 1979-80г.г. В 1980-90г.г. составила 10.7%. С 1990 г. наблюдалось падение роста производства геотермального электричества до 3.2% в год вследствие влияния мирового экономического кризиса, особенно в юго-восточной Азии. Средний ежегодный прирост производства электроэнергии на геотермальных электростанциях в течение последних 30 лет составил 8.6%.

На Римской конференции 1961 года были сообщены следующие стоимости геотермальной электрической энергии (Smith, 1964).

Геотермальные Поля	Цена киловатта \$	Цена киловатт-часа (в сети \$)
-----------------------	----------------------	-----------------------------------

Гейзеры Калифорнии (США)	152	0.0025
Вайракей, Н. Зеландия	227	0.0046
Лардерелло, Италия	138	0.0012
Исландия (предполагаемая)	364	0.0079

В то время эти данные сравнивались со стоимостью 117\$ установленного киловатта и 0.0012 дол./кВт-час для 150 МВт электростанции, работающей на “традиционном топливе”.

Ди Пиппо (Di Pippo, 1998) рассчитал, что современные капитальные расходы на геотермальных электростанциях США следующие:

Геотермальное поле или тип ГеоТЭС	Период	Стоимость установленного КВт \$
Гейзеры Калифорнии	1980-83	414-780*
Одноступенчатое использование	1984-88	2500-3000
Двухступенчатое использование	1985-88	1900-2700
Бинарная ГеоТЭС	1987-93	3030-4000

*Стоимость КВт на Гейзерах Калифорнии включает лишь расходы на строительство станции, все остальные включают расходы на извлечение геотермальных ресурсов в целом

Оценки стоимости электрической энергии, производимой геотермальными станциями следующие (Lund, 2000):

Гейзеры Калифорнии США		1.5 – 2.5 центов/КВт час
ГеоТЭС с одинарным циклом		2.0 – 4.0 центов/КВт час
Бинарная ГеоТЭС		3.0 – 5.0 центов/ КВт час
ГеоТЭС новой конструкции		5.0 - 6.5 центов/КВт час

Прямое использование геотермальной энергии имеет более длительную историю использования, чем производство электричества за счёт геотермальных ресурсов, но оценки количества используемой геотермальной энергии в этом случае менее надёжные. Трудность получения достоверных оценок заключается в большом разнообразии количества используемого геотермального тепла в банях, бассейнах и бальнеологии.

Одним из крупнейших потребителей геотермальной энергии прямого использования является Китай. Получение надёжной информации оттуда было затруднено из-за политической ситуации. В этих оценках не было данных из США, хотя известно, что прямое использование геотермальной энергии установлено в Бойзе штат Айдахо с 1890 года, и, где в 1930 годах на водопадах Кламат были пробурены геотермальные скважины. Наконец, имеется масса мелких рассеянных пользователей термальных вод, которых сложно учесть.

В 1961 г. на Римской конференции были приняты оценки прямого использования геотермальной энергии лишь по Исландии, Н. Зеландии, Японии и Кении (Bdvarsson, 1964). В этом докладе приводились примеры использования гидротерм прямого

использования, обогревающих 45000 домов в Рейкьявике, теплиц площадью 95000м² в Исландии, использование 1000 скважин в Роторуа (Н. Зеландия) для обогрева помещений. Производство 21000 тонн соли в год, для бумажного производства в Каверау (Н. Зеландия), в химической промышленности в Италии и т. д. Данные в таблице 7 приведены по информации из докладов, представленных в 1970 году на конференции ООН в Сан-Франциско и других опубликованных материалов.

Начиная с 1995 года вопрос о геотермальных тепловых насосах, был включён в доклады и в настоящее время потребление ими геотермальной энергии составляет её значительную долю.

Большое увеличение потребления геотермальной энергии прямого использования в 1980-85 г.г. является следствием включения расходов тепла на нагрев бассейнов в Японии и появление первых данных из Китая. Ежегодный рост прямого потребления геотермальной энергии в 1970-80 г.г. составил 9.3%, в 1980-90 г.г. – 15.2 % (сильно повлияли данные по Японии и Китаю) и в 1990-2000 г.г. – 4.9 %. Общее увеличение потребления в течение 30 лет составило в среднем 9.7 % в год. Недавнее уменьшение прямого потребления геотермальной энергии с 1990 по 2000 г.г. связано с теми же факторами, которые характерны для ГеоТЭС.

Таблица 7
Мировое развитие прямого потребления геотермальной энергии.

Год	Установленное потребление энергии МВт Млд КВт-час/год	Ко ли ч. ст ра н	Страны - участники
1960	-	5	Исландия, Италия, Н.Зеландия, Япония, Кения
1970	800 2200	6	+Венгрия и СССР- Кения
1975	1300	10	+Франция, Турция, Филиппины , США + Австрия
1980	1950 -	14	+Австрия, Германия, Чехословак ия, Тайвань

1985	7072 23960		24	+Австралия , Канада, Китай, Колумбия, Дания, Мексика, Польша, Румыния, Свазиленд, Югославия
1990	8064 -		30	+Алжир, Бельгия, Болгария, Эфиопия, Греция, Гватемала, Таиланд, Тунис и др.
1995	8664 31236		30	Аргентина, Грузия, Израиль, Македония, Сербия, Словакия, Швеция и др.
2000	12965 43746		55	(см. Lund, Freeston, 2000).

Цена производства геотермальной энергии для использования
Общая стоимость для пользователя

0.30 – 0.48 долларов за ГИГАкалорию (0.026 – 0.041 цента за киловатт час)
4.0 доллара за ГИГА калорию (около 60% стоимости тепла, полученного при сжигании нефти) (0.344 цента/КВт час)

В округе Кламат Фолз в штате Орегон в США стоимость киловатт часа тепловой энергии при её прямом использовании составляет 1.6-2.0 цента. Это составляет 50-80% стоимости природного газа, цена произведённой электрической энергии при сжигании которого составляет 5.5 центов за киловатт – час.

В таблице 8 приводятся данные общего потребления геотермальной энергии в 60 странах мира в 2000 году.

Таблица 8

Вид использованная	Установленная энергия	Ежегодное потребление геотермальной энергии	Коэффициент использования	Количество стран
		Млрд КВт-час		
Электрическая энергия	7974	49.261	0.71	21
Прямое использование геотермальной энергии	17175	51.428	0.34	55

По-видимому, показанные количества производства электрической энергии являются довольно точными, однако, в некоторых странах ежегодные значения производства электричества оцениваются лишь в 0.5% от всего производимого электричества в данной стране. Указанное количество прямого использования геотермальной энергии менее надёжное и эта ошибка составляет примерно 20%. Детальная характеристика современного потребления геотермальной энергии по регионам представлена в таблице 9.

Энергосбережение при использовании геотермальной энергии составляет 12.5 млн. тонн нефти в год. При этом выброс углекислого газа в атмосферу существенно меньший. Прямое использование геотермальной энергии с помощью тепловых насосов эквивалентно сжиганию 13.1 млн. тонн нефти в год.

Решение проблемы загрязнения атмосферы при использовании геотермальной энергии является одним из важных аргументов её активного использования. Считается, что количество CO₂, выделяемое при производстве электроэнергии геотермальными электростанциями, было бы меньше на 40.2 млн. т, а при прямом использовании на 42 млн т. Получены соответствующие цифры для природного газа и угля 9.5 и 46.9 млн т при производстве электроэнергии и 9.9 и 49.0 млн.т CO₂ при прямом использовании (35% КПД). Похожие количества для природного газа, нефти и угля определены по уменьшению выбросов окислов серы (Sox) и окислов азота (Nox) – 0.025 и 0.26 млн. т и 2.2? 7.6 и 7.6 тысяч т, соответственно при производстве электрической энергии, и 0.026 и

0.28 млн. т и 2.3, 7.9 и 7.9 тыс.т соответственно при прямом использовании геотермальной энергии (Goddard, Goddard, 1990).

Итак, в настоящее время известно, что некоторые геотермальные электростанции выделяют весьма ограниченные количества различного вида загрязнений; однако, они уменьшаются почти до нуля, там, где газ

Таблица 9

Суммарное потребление геотермальной энергии по регионам в 2000 году.

Район	Электрическая энергия				Прямое использование			
	МВт эл.		Млрд Вт час/год	%	Млрд т теп. единиц		Млрд т теп. единиц	
<u>Африка</u>			396.5	0.8	1210		4917	

<u>Аме рики</u>				2 3 3 4 1 9	4 7 4	5 9 5 4 5	7 2 6 5 9
цент раль ная				2 1 9	3 5	4 2 5	3 4 8
севе рная *				9 2 1 9 0 9 2 1 1 5 1 0 0 1 5 3 5 0 9 5 7 4 4 6	5 5 5	0 5 8 0 5 0 5 8 0 5 3 0 5 3 2 0 5 6 3 0 4 4 4 6	7 0 1 2 9 0 2 2 5 3 2 0 0 1 9 0 8 9 5
южн ая				9 2 1 1 5 1 0 0 1 5 3 5 0 9 5 7 4 4 6	3 5 5	2 2 5 0 5 8 0 5 6 3 0 4 4 4 6	3 4 8 7 0 1 2 9 0 2 2 5 3 2 0 0 1 9 0 8 9 5
<u>Азия</u> **				9 2 1 1 5 1 0 0 1 5 3 5 0 9 5 7 4 4 6	3 5 5	2 2 5 0 5 8 0 5 6 3 0 4 4 4 6	3 4 8 7 0 1 2 9 0 2 2 5 3 2 0 0 1 9 0 8 9 5
<u>Евро па</u>				9 2 1 1 5 1 0 0 1 5 3 5 0 9 5 7 4 4 6	1 1 7	5 6 3 0 5 8 0 5 6 3 0 4 4 4 6	1 9 0 8 9 5

центральная / восточная				0				4 0 5 4 . 9 1 1 0 3 6 . 0
запа дная/				5 6 5 9 . 6				3 4 5 5 . 6
севе рная ***				8 5 . 0				3 4 5 5 . 6
<u>СНГ</u> ****				8 5 . 0				3 4 5 5 . 6
<u>Океа ния</u>				2 2 6 8 . 9	4 . 6			2 0 4 8 . 7
<u>Всег о</u>				4 9 2 6 1 . 4				5 1 4 2 7 . 8

- Включая Мексику
- ** Включая Турцию
- *** Включая Азорские острова и Гваделупу
- **** Включая Россию и Грузию

закачивается в пласт, как это происходит в бинарных электростанциях. Поскольку при реализации большинства проектов прямого использования геотермальной энергии отработанные термы закачиваются в пласт, то выше упомянутые загрязнения, по существу, отсутствуют.

3.1 Геотермальная энергетика Италии.

В последние годы возростала потребность в производстве возобновляемых видов энергии в связи с подписанными многими странами соглашению по уменьшению выбросов CO₂. В Италии была учреждена компания ERGAS.P.A. (ЭРГА), входящая в группу Enel, (ЭНЕЛ), которая предназначалась для разработки возобновляемых источников энергии (геотермальной, малых гидроэлектростанций, ветровой и солнечной).

Сочетание электростанций и исследовательских лабораторий, построенных ЭНЕЛ, образует солидную базу на полевых объектах производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Компания будет эксплуатировать и управлять 1560 МВт мощностью, исключительно за счёт возобновляемых ресурсов: ею управляются 273 мини электростанции, 31 геотермальная электростанция, 4 парка ветровых электростанций и 3 солнечных, соединённых линиями электропередач, фотоэлементных установок. В общей сложности эти электроустановки дадут примерно 8 млрд. квт. час электрической энергии для 4 миллионного населения.

Эрга сегодня является одним из мировых лидеров в этом сегменте энергетического рынка. Промышленное производство электроэнергии на базе геотермальных ресурсов началось в Италии в 1913 году с 250квт установки. Итальянский опыт производства электричества на эндогенном теплоносителе оставался примером в мировой практике до 1958 г., когда в Вайракее в Н. Зеландии был введён в строй первый электрогенератор. В это время в Лардерелло 300 МВт ГеоТЭС производила 1900 гигаватт в течение года.

На 31 декабря 1999 года общая установленная мощность геотермальных электростанций составила 788.5 МВт, из которых 38 МВт считаются, как “резервные мощности”, которые используются лишь во время ремонтных работ на других станциях. В 1999 году производство электроэнергии достигло 4403 Гигаватт-час. В январе 1995 года установленная мощность ГеоТЭС составляла 625.7 МВт. В течение пяти лет, начиная с 1 января 2000, планируется ввести в строй действующих электрические мощности порядка 390 МВт, из которых 245 МВт заменяет старое оборудование ГеоТЭС. На новых геотермальных полях будут введены мощности в 145 МВт.

Положительные результаты программ глубокого бурения и закачки отработанных гидротерм (реинжекция), которые начали реализовываться в конце 1970-х годов создали базу для переоценки потенциала геотермальных систем Италии и позволили определить, как развивать разработку геотермальных ресурсов, так и производить реконструкцию старых ГеоТЭС.

Детальная картина освоения геотермальных ресурсов Италии для получения электрической энергии приводится в таблице 10.

В Лардерелло (Тоскана) разведанная площадь составляет 250 км², где 180 скважин производят 830кг/с перегретого пара при давлениях 2-15 бар с температурой 150-260⁰С. Неконденсируемые газы составляют 1-15 вес. %. Установленная мощность 27 паровых турбин составляет 547 МВт.

В конце 1970-х годов здесь началась реализация программ глубокого бурения и реинжекции с целью поддержания или увеличения производства геотермального пара. Закачка конденсата пара обратно в геотермальный резервуар, в большинстве эксплуатируемых участков

Таблица 10

Использование геотермальной энергии для производства электричества на 31 декабря 1999г

В Италии

Место	Наименован	Год	Ко лич	Состо яние	Тип	Един ичн. мощн	Обща я мощн	Годов ое	План и-
-------	------------	-----	--------	------------	-----	----------------	-------------	----------	---------

Lardara	Valle Seccole	1001	2		D	60	120	800.7	
	Farinello	1005	1		D	60	60	401.2	
	Cobbre	1060	1		D	15	15	100.2	
	Nuova		1		D	20			20
	Castelnuovo	1946	1	N	D D	11 11	22	45.6	
	Nuova		1		D	20			20
	Serrazzano	1957	1 1	N	D D	12.5	40	159.9	
	Nuova	1057	1		D	12.5			60
	Nuova Sacco	1006	1		D	20	20	117.8	
	La Droia	1006	1		D	20	20	118.4	
	Montarotond	1058	1		D	12.5	12.5	54.6	
	Nuova		1		D	10			10
	San Martino	1085	2		D	20	40	208.6	
	Nuova San		1		D	40			40
	Lago	1960	1 1	N	D D	6.5	33.5	45.3	
	Nuova Lago		1		D	10			10
	LaZoni	1081	1		D	8	8	48.4	
	Cornio	1087	1		D	20	20	122.4	
	Cornio 2	1004	1		D	20	20	128.5	
	Molinetta 2	1082	1		D	8	8	52.4	
	La Lancia	1082	1		D	8	8	56.1	
	Nuova		1		D	20			20
	Carbali 1	1008	1		D	20	20	141.6	
	Carbali 2	1007	1		D	20	20	127.6	
	Salva 1	1007	1		D	20	20	20.6	
	Salva 2		1		D	20			20
	Montavardi	1007	1		D	20	20	22.0	
	Montavardi	1007	1		D	20	20	106.6	
	Sesto		1		D	20			20
SUBTO			26				547	2020.5	220
Travalc	Radicondoli	1979	2		D	15	30	204.8	
	Nuova		1		D	40			40
	Dio Ligano	1087	1		D	20	20	127.1	
	Denoia	1086	1		D	20	20	128.1	
	Denoia 2	1088	1		D	20	20	142.2	
	Travale 2		1		D	20			20
	Chiusdino 1		1		D	20			20
	Travale 4		1		D	20			20
SUBTO			0				00	612.2	100
Mt	Degnere 2	1062	1	D	D	2.5	2.5		5
	Nuova		1		IF	5			5
	Degnere 2	1008	1		IF	20	20	152.2	
	Degnere 4		1		IF	20			20
	Dionocastro	1060	1		D	8	8	26.4	
	Dolavista	1087	1		D*	20	20	105.2	
	Dionocastro	1000	1		D*	20	20	156.2	
	Dionocastro	1001	1		D*	20	20	154.8	
	Dionocastro	1004	1		D*	20	20	150.4	
	Dionocastro		1		D*	40			40
SUBTO			10				111.5	756.2	65
Latera	Latera	1999	2 2		2F B	20	40	13.6	5
SUBTO			4				40	13.6	5
Общее			59				788.5	442.7	390

увеличилось как давление в резервуаре, так и производство геотермального пара. Глубокая разведка показала наличие водопроницаемых горизонтов в метаморфическом фундаменте до глубин 3000-4000 м с давлением в резервуаре 70 бар и температурой 350⁰С. Гидротермы в этом резервуаре были представлены перегретым паром с большим содержанием летучих хлоридов. Был выбран особый режим работы электростанций, чтобы избежать проблемы коррозии эксплуатируемого оборудования, как в скважинах, так и конструкции парособирающих систем и турбин.

На разведанном месторождении Травале-Радикондоли, площадью 50км² эксплуатируется 15 скважин с общим расходом перегретого пара 140 кг/с при давлении 8014 бар, с температурой 190-250⁰С. Неконденсируемые газы колеблются в пределах 4-8 вес.%. Установленная мощность 90 МВт, производится 5 турбогенераторами.

Глубокое бурение показало наличие водоносных горизонтов в метаморфическом фундаменте на тех же глубинах и аналогичных термодинамических и химических характеристиках, что и в районе Лардерелло. По данным геолого-структурного анализа сделан вывод, что геотермальное месторождение Лардерелло и Травале-Радикондоли принадлежат одной и той же глубинной геотермальной системе, так как на глубине 3000 м 300-градусная изотерма объединяет оба участка и ограничивает площадь 400 км².

На основании данных глубокого бурения в южной части поля (скважина дала 70кг/с перегретого пара) разработана программа по бурению дополнительных скважин, которая предположительно позволит ввести в строй ещё 600МВт установленных мощностей ГеоТЭС. Первый из этих блоков в 20МВт уже эксплуатируется с марта 2000 года.

Геотермальный район Монте-Амиата (Тоскана) включает два геотермальных поля: Баньоре и Пьянкастаньяйо. Они открыты в конце 1950х-начале 1960 х годов. Здесь первые скважины вскрыли неглубокий водоносный горизонт в известняках. Программа глубокого бурения была успешно реализована и в метаморфическом фундаменте, который подстилает верхний геотермальный резервуар, были вскрыты трещинный коллектор на глубинах 2500-4000 м. Этот резервуар представляет собой вододоминирующую геотермальную систему с гидростатическим давлением 200 бар на глубине 3000 м и температурой 300-350⁰С. Извлекается двухфазная смесь, которая сепарируется на оголовках скважин при давлении 20 бар. Содержание неконденсируемых газов в паре составляет 80-15 вес. %. Общая мощность обеих ГеоТЭС составляет 111.5 МВт и в 2000году вводится на поле Баньоре ещё один блок-генератор мощностью 20МВт.

Геотермальное поле Латера (Лациум) располагается в вулканическом районе горы Волсини в северной части провинции Лациум. Вододоминирующий резервуар, размещённый в основном в карбонатной и карбонатно-кремнистой формациях, характеризуется температурами 190-240⁰С (средняя температура 210⁰С). Скважины извлекают пароводяную смесь с минерализацией 10-12 г/л и содержанием газов 4-5 вес % (98 % СО₂). Здесь пройдено 5 эксплуатационных и 4 реинжекционных скважин. В 1990 году введена в эксплуатацию ГеоТЭС мощностью 40 МВт. Электростанция, первая такого типа, базируется на двухступенчатом цикле. На отработанных термах работает ГеоТЭС с бинарным циклом (% МВт).

Значительный экономический эффект даёт дистанционное или автоматическое управление геотермальными установками с максимальной мощностью 60 МВт. В настоящее время все геотермальные электростанции контролируются дистанционно с единого пункта управления, который расположен в Лардерелло, где работает посменно 12 операторов.

Прямое использование геотермального тепла в Италии экономически не стимулировало исследования и разработки низкотемпературных ресурсов, т.к из недр геотермальных систем извлекался геотермальный пар, а жидкие гидротермы при такой технологии отсутствовали. Однако в период после 1995 года и по настоящее время в этой области имеется некоторый прогресс. Многие населённые пункты в районе Лардерелло отапливаются за счёт пара от геотермальных электростанций. В Лардерелло открыт плавательный бассейн, построены новые теплицы в Радикондоли. Применяются тепловые насосы. Современное состояние прямого использования геотермальной энергии в Италии показано в таблице 11.

3.2 Геотермальная энергетика в США.

США являются мировым лидером в развитии геотермальной энергии, а также в производстве электричества за счёт геотермальных ресурсов.

Геотермальная энергия в США составляет незначительную долю в общем производстве электрической энергии. В 1998 году эта доля равна 0.38%.

На уровне штатов геотермия играет важную роль в Калифорнии и Неваде и заметную в штатах Гавайи и Юта. Имеется потенциал в её использовании на Большом острове в штате Гавайи и возможно в будущем на Тихоокеанском северо-западе страны.

Наибольшее развитие геотермальная энергетика в США получила в 1980 годах (ежегодный прирост 11%). В 1990-98 годах средний рост геотермальной энергии составил лишь 0.14 %. В этот период наблюдалось снижение мощности ГеоТЭС в Гейзерах Калифорнии до 1140 МВт с уровня 1875 МВт в 1990 г. Таблица 12 показывает суммарное производство электроэнергии ГеоТЭС США по штатам.

Таблица 11

Использование геотермальной энергии в Италии для прямого нагрева на 32 декабря 1999 года

1) I = промышленные

процессы

C = кондиционирование

воздуха

A = сушка с/х продуктов

F = рыбозаводство,

животноводств

H = обогрев помещений

(кроме тепловых насосов)

B = бани и бассейны (включая

бальнеологию)

G = теплицы и парники

S = таяние снега

- 2) Энтальпия пара или пароводяной смеси
- 3) Мощность МВт = Мак. расход (кг/с) [входная температура (C⁰) - выходная температура (C⁰) x 0.004184 (MW=10⁶W)]
 = Мак. расход (кг/с) [(входная энтальпия (кдж/кг) - выходная энтальпия (кдж/кг)] x 0.001
- 4) Использование энергии = средний расход (кг/с) x [входная температура (C⁰) – выходная температура (C⁰) x 0.1319 (Тдж=10¹²дж)]
 = средний расход (кг/с) x [входная энтальпия (кдж/кг) – выходная энтальпия (кдж/кг)] x 0.03154
- 5) КПД = [Годовая потребление энергии Тдж/год) x 0.03171] / мощность (МВт)

Место	Ти П	Максимальное					Мощ	Головое		
		Flow	Т (C ⁰)		Энтальпия			Ave.		КПД
			Inlet	Outl	Inlet	Outl				
Piancastanaio	G	17.52	97	50	220	209	34.88	8.79	551.9	0.50
Larderello	I	5.60	160	95	278	308	13.34	1.89	141.9	0.34
Larderello	H	1.95	160	95	278	308	4.64	0.56	42.07	0.29
Larderello	B	0.50	200	80	286	335	1.26	0.05	3.98	0.10
Larderello SCI	I	3.91	200	80	286	335	9.88	2.37	188.7	0.61
INACASA	H	0.29	180	70	275	293	0.72	0.06	4.66	0.21
Montecerboli	H	1.39	180	80	280	293	3.49	0.28	22.14	0.20
Serrazzano	H	0.79	180	80	280	293	1.98	0.11	8.70	0.14
Lustionano	H	0.28	180	80	280	293	0.70	0.03	2.37	0.11
San Dalmazio	H	0.28	180	80	280	293	0.70	0.03	2.37	0.11
Castelnuovo	H	2.74	105	70	220	293	5.23	0.97	58.34	0.35
SassoPisano	H	0.99	110	70	264	293	2.33	0.24	17.77	0.24
Isolver	I	0.07	1.1	70	265	293	0.17	0.01	0.74	0.14
Δz Δσ	G	1.32	105	70	100	293	0.93	0.66	14.72	0.50
Δz Δσ	G	2.80	70	30	—	—	0.47	1.35	7.12	0.48
COSVIG	E	0.31	105	70	268	293	0.74	0.08	6.04	0.26
Δz Δσ	G	0.70	125	100	273	419	1.62	0.17	12.39	0.24
Monterotondo	H	0.95	170	70	275	293	2.33	0.40	31.00	0.42
Ecomilk Carboli	I	1.89	185	70	275	293	4.65	0.27	20.97	0.14
Le Serre	G	0.71	185	70	275	293	1.75	0.17	13.20	0.24
Fenara	H	129.61	98	68	—	—	16.27	58.13	230.0	0.45
Abano Terme	B/	580.00	78	37	—	—	90.50	200.0	1081	0.34
Montegrotto	B/	470.00	75	37	—	—	74.73	170.0	852.0	0.36
Battaglia Terme	B/	110.00	64	37	—	—	12.43	40.00	142.4	0.36
Galzignano	G	30.30	58	40	—	—	2.28	15.00	35.61	0.50
Civitavecchia	G	238.00	52	30	—	—	21.91	58.19	168.8	0.24
Canino	G	7.80	40	35	—	—	0.16	1.96	1.29	0.26
Banodi	H	25.00	40	18	—	—	2.30	15.02	43.59	0.60
Acqui Terme	H	9.50	70	35	—	—	1.39	5.98	27.61	0.63
Rodiao	G/	10.57	60	18	—	—	1.86	5.97	33.07	0.56
Общее							324.6		3767	

Таблица 12

Суммарная установленная мощность ГеоТЭС США

1995-2005 годы (МВт)						
Штат	Калифорния	Гавайи	Невада	Юта	Общее	
Год						
1995	2369	25	196	31	2621	
1996	2343	25	196	31	2595	
1997	2314	25	196	31	2566	
1998	2284	25	196	31	2536	
1999	2293	25	196	31	2545	
2000	2294	25	196	31	2546	
2005	2295	25	196	31	2547	
	90%	1%	8%	1%	100%	

Хотя роста установленной мощности геотермальных электростанций, судя по таблице 12, не наблюдается, однако в действительности в ряде штатов производилось бурение на геотермальные ресурсы. Подавляющее большинство геотермальных скважин находится в Калифорнии. За период с 1995-99 годы было пробурено 20 новых скважин (13 продуктивных и 7 реинжекционных). Так же велись активные буровые работы на Солтон Си и Коса. Пик буровых работ в Неваде пришёлся на 1991 год, когда была пробурена 31 скважина всех типов. В 1995-99 годах было пробурено 28 продуктивных скважин.

В начале 1990 годов на Гавайях были подтверждены геотермальные ресурсы, достаточные для работы 25 МВт электростанции, но после 1995 года была пробурена лишь одна геотермальная скважина.

В других штатах было пройдено несколько скважин с целью оценки перспектив развития геотермальной энергетики. Лишь одно место на острове Иналашка на Алеутских островах (штат Аляска) серьёзно рассматривалось с целью бурения 5 скважин для 15 МВт электростанции. Однако проект не был реализован. В штате Айдахо геотермальное поле на реке Рафт не использовалось, после того как 5 МВт пилотная бинарная ГеоТЭС была закрыта. Буровые работы в 1995-99 годах здесь не проводились, хотя попытки их проведения предпринимались.

В 1995-99 годы в штате Нью-Мексико в кальдере Вэллес и на Фелтон Хил работы не производились. Оба этих геотермальных поля активно разведывались в 1970 годах. Первый из них прекратили разрабатывать из-за низкой продуктивности скважин, связанной с низкой проницаемостью водоносных комплексов, а Фелтон Хил использовался в качестве полигона для разработки технологии извлечения геотермальной энергии из сухих нагретых пород. Испытания этой системы были проведены в начале 1990 годов. Проект был завершён в 1997 году.

В штате Юта была пробурена лишь одна скважина в течение 1995-99 годов на Сульфурдал Кове Форт.

Одной из характерных особенностей развития геотермальных исследований в США является очень широкий круг учёных, инженеров, технических работников, буровиков, менеджеров и аналитиков, участвующих в решении проблем, связанных с этими исследованиями. Это не только специалисты, входящие в Совет по геотермальным ресурсам, а и многие индивидуальные работники. Среднее количество геотермиков в США в 1995-99 годах, связанных с Советом по геотермальным ресурсам, - 661, плюс 128 человек привлекалось из других стран, т.е. всего 790 специалистов. Снижение активности в развитии геотермальной энергетики обусловлено уменьшением числа компаний, занимающихся геотермией и, как следствие, увеличением числа безработных. Предполагается, что на каждого специалиста, работающего в рамках Совета по геотермальным ресурсам, приходится 2-3 человека, связанных с геотермальными проектами, то общее число людей в США, занимающихся геотермальной энергетикой, составляет 3000-4000 человек

Предполагается, что если все планируемые мощности реально вступят в строй действующих, то общая установленная мощность геотермальных электростанций достигнет 3395 МВт в течение 2001 - 2005 годов. Большинство вводимых мощностей придётся на штаты Калифорнию и Неваду.

3.3 Современные проблемы использования геотермальной энергии для производства электроэнергии и прямого потребления в Новой Зеландии.

До конца 1980-х годов центральное правительство Н. Зеландии играло непосредственную и активную роль в программе производства электрической энергии. Энергетическая промышленность находилась под политическим влиянием, а не была сферой лишь экономических интересов. Этим самым определялась ограниченная ответственность компаний. Новая организация - Электрическая Корпорация Н. Зеландии структурировалась, как коммерческое предприятие с привлечением частного сектора. Управление находилось в руках правительства. Электрическая Корпорация ответственна за производство 95 % всех потребностей электрической энергии в Н. Зеландии. Такая структурная перестройка энергетической промышленности оказалась успешной. По сравнению со стоимостью электрической энергии в 1987 году, цена на электричество в 1995 году снизилась на 21 %.

В результате этих реформ в энергетике Н. Зеландии все геотермальные электростанции были приватизированы. После прихода к власти партии лейбористов и альянса в 1999 году дальнейшая приватизация была приостановлена.

Современное планируемое производство электрической энергии в Н. Зеландии обобщено в таблице 13.

Таблица 13

Современное и планируемое производство электрической энергии в Н. Зеландии

	Геотермальная		Неископаемое топливо		Гидро		Другие возобновляемые источники		Всего	
	Пр-во	ГВт.час/год	ГВт.час/год	ГВт.час/год	ГВт.час/год	ГВт.час/год	ГВт.час/год	Пр-во	ГВт.час/год	
Работа лов январе 2000							39(ветер) 8(биогаз) 40(сжигание деревьев)			3727 5

В стадии строите льства в январе 2000										
Выделе но финанс ирован ие, но не постро ено на январь 2000г.										
Всего на 2005г				1121 5						

Таким образом, производство электричества на базе геотермальных ресурсов составляет 6.5 5 от общего потребления и мощность ГеоТЭС – 5% от общей мощности всех электростанций страны.

В таблице 14 приводятся данные об использовании геотермальной энергии для производства электричества на 31 декабря 1999 года.

Таблица 14

Использование геотермальной энергии для производства электричества на 31 декабря 1999 года

ГеоТЭС	Состояние	Тип турбин	Общая устан. мощн. МВт эл.	Строится

			У Н С Н				Гвтчас/ год	Л И П Л А Н И Р У Е Т С Я С Т Р - В О
Т а у п с	Вайра кей	1958- 1963г.г	1 0 3	И а С Ш Л а Н Н .	-	1 0 2	1 2 0	1 5
Т а у п с	Макла нчлан	1 0 0 0	1	И а С Л а Н .	-	5 5	2 2 5	
И е п с И с	С а а Н К	1 0 8 0	4	И а С Л а Н	-	1 1 4	2 5 0	

И а н е н а у	Т а с м а н	1 0 0	1	И а н е н а у	И а н е н а у	1 0 0	0
И а н е н а у	И а н е н а у И а н е н а у	1 0 0	3	И а н е н а у	И а н е н а у	0	4
Т а с м а н	И а н е н а у	1 0 0	4	Комби а нр. цикл		2 5	2 5
И а н е н а у	И а н е н а у	1 0 0	2	И а н е н а у	И а н е н а у	9	3
Т а с м а н	И а н е н а у	1 0 0	7	Комб.ц икл		4 4	3 0

								15

В таблице 15 приводятся данные прямого использования геотермальной энергии на 31 декабря 1999 года.

Таблица 15

Данные прямого использования геотермальной энергии на 31 декабря 1999 года.

М е испол сьзо- т ования *	Максимальное потребление						М о щ н о с т ь М В т	Годовое потребление		
	Рас ход Кг/с	Температу ра (C ⁰)		Энтальпия **кдж/кг		Сред ний расхо д (кг/с)				
		Вход ящ.	На выхо де	Вход ящ.	На выхо де					
К а в е р а у							210			

К а в е р а у							1 6			
К а в е р а у							> 0 . 0 8			
Р е г о р о а							9 . 1 4			
Р е г о р о а							4 . 1 4			
Б а й р а к е й							1 8 . 6			
Т а у п о							0 . 0 5 5			

Р о т о р у а							> 2 2			
И т о г о							2 8 0			

- I – промышленные процессы, нагрев; A – сушка с/х продуктов; F – рыбозаводство и животноводство; H – обогрев помещений; G – теплицы, парники.

** - энтальпия даётся лишь в случае использования пара или двухфазной смеси.

Более глубокое использование геотермальной энергии в Н. Зеландии обусловило и меньшее загрязнение отработанными гидротермами. Так, например, геотермальный конденсат в Каверау, который ранее сбрасывался в реку Таравера, в настоящее время собирается для повторного использования в бойлерах. В Вайракее отработанные горячие гидротермы, с температурой 60⁰С, от ГеоТЭС сбрасывались по ручью Вайракей в реку Вайкато. В настоящее время эти термы используются на ферме для подогрева воды в выростных прудах по выращиванию креветок, площадью 5.8 га. Большая часть низкотемпературных гидротерм используется многочисленными мелкими потребителями. В особенности это характерно для города Роторуа. Потребление таких гидротерм в этом городе на сегодня составляет 9500т/день.

3.4 Гидротермальная энергетика в Японии.

Первая опытная ГеоТЭС в Японии заработала в 1925 году в Беппу, префектура Оита. Исследования и разработка геотермальных проектов были возобновлены после 2-ой мировой войны. Первая промышленная ГеоТЭС была построена на геотермальном поле Матсукава в 1966 году. С этого времени началась геотермальная эра в Японии.

В 1960-70 годах делались первые шаги в области исследований, оценки ресурсов, конструирования и эксплуатации геотермальных энергоисточников. Этот процесс познания происходил при

строительстве ГеоТЭС в Отаке, Опума, Оникобе в течение 10 лет после ввода в строй ГеоТЭС в Матсукава.

В период 1970-1980 годов начали работать большие ГеоТЭС (класса 50МВт), основываясь на опыте приобретённом в предыдущее десятилетие. Таковыми были ГеоТЭС в Хатчобару, Какконде (турбина 1) и Мори. Два нефтяных кризиса ускорили эти работы. Это ускорение было также обусловлено прогрессом в геотермальной технологии. В этот период были начаты ряд национальных геотермальных проектов.

В течение третьего этапа развития геотермальной эры, который начался в 1980 году и продолжается в настоящее время, когда даже малые блоки стали экономически выгодными, благодаря усовершенствованию геотермальной технологии, успехам в буровом процессе и буровой технологии, а также более точных оценок геотермальных ресурсов. В течение тридцати лет после ввода в строй ГеоТЭС в Матсукава общая установленная мощность ГеоТЭС в Японии превысила 500МВт.

Японское правительство активно поддерживает разработку геотермальных ресурсов. В таблице 16 показана динамика общих инвестиций в геотермальную энергетику по линии Министерства промышленности и торговли.

Таблица 16.

Объём общих инвестиций в геотермальную энергетику Японии.

Период (годы)	Исследования и разработка Млн. долларов США	Полевые разработки, включая добычу Млн. долларов США	Всего Млн долларов США
1985-1989	493.7	233.6	727.3
1990- 1994	198.9	433.9	632.8
1995-1999	345.4	121.6	467.1

С другой стороны NEDO играет центральную роль в поддержании современного развития геотермальной энергетики. Эта организация, созданная в 1980 году, является юридическим представителем Министерства промышленности и торговли по развитию и внедрению новых источников энергии, кроме того, она исследует и разрабатывает новые технологии. Таким образом. Осуществляется внедрение геотермальной энергетики в качестве альтернативы нефти. NEDO проводит по всей стране за счёт правительственных субсидий первоначальные исследования перспективных геотермальных полей. Целью исследований, которые включают 3 стадии: А,

В и С, является оценка возможности производства электроэнергии за счёт геотермальных ресурсов. После начала реализации программы в 1980 году к концу 1998 года было исследовано 52 геотермальных объекта. В 1999 финансовом году исследования велись в следующих шести районах:

- исследование А (три года): главным образом, этими работами необходимо было определить и подтвердить наличие высокотемпературных зон площадью 100-300 км². Места с такими характеристиками являются Кумбатсу-даке (Хоккайдо) и Куваносава (Хонсю)
- исследование В (три года): главным образом этими работами необходимо было определить и подтвердить геотермальный резервуар площадью 50-70 км². Было изучено три таких района: Муза-даке (Хоккайдо), Тсуджино-даке (Кюсю, Кумаиси (Хоккайдо).
 - исследование С (четыре года): изучались районы 5-10 км² с целью оценки геотермальных ресурсов. В эту стадию изучена только локализация поля Анкиномийя (Хонсю).

Частная компания Кюсю электрик Пауэ проводит изучение на вулкане Кирисима в префектуре Кагосима на о. Кюсю. В 1999 году опытные выпуски показали наличие геотермальных ресурсов на изученном объекте.

Япония, имеющая небольшие природные ресурсы, более интенсивно разрабатывает геотермальную энергетику. При этом считается, что необходимо применять новейшие технологические схемы, которые предусматривали бы сохранность природы и охраняемых территорий. Эти работы проводятся в полном согласии с местными общинами. Считается, что геотермальная энергия является наиболее чистым видом с точки зрения выделения СО₂. Предполагается, что Япония применяет самые передовые технологии в развитии и использовании геотерм, по сравнению с другими странами.

Прямое использование геотермального тепла в Японии – это настолько естественный процесс, что в первых публикациях на международных совещаниях по геотермальной энергетике не считалось нужным докладывать. Однако в последние годы стали публиковаться явно неполные оценки использования гидротерм. Массовое использование гидротерм для бань и купален невозможно в полной мере учесть, так как они находятся в многочисленных местах отдыха и гостиницах. Охрана термальных источников – это национальная черта японского народа. Однако имеются примеры строительства тепловых станций для отопления. В таблицах 17, 18 эти примеры перечислены.

Таблица 17

Установленная тепловая мощность прямого использования геотермальной энергии

Pref.	H	C	G	F	I	S	B	0	
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	--

Hokkai	29.28	0.2	12.0	14.	0.1	19.1	16.9		91.71
Aomori	0.97		0.25	1.0	0.1	2.23	1.37		6.01
Iwate	5.88		3.21	0.1			1.52		10.78
Mivagi			0.04						0.04
Akita	2.33		1.84		0.7	1.96	0.69		7.55
Yamaga	1.24			0.4		1.71	2.09		5.46
Fukushi	4.17		0.20			0.25	0.16		4.78
Toehjgi	1.70						0.05		1.75
Gunma	5.01					3.57	0.13		8.71
Tokyo			0.25						0.25
Kanaga	1.25								1.25
Niigata	0.21			0.0	0.1		0.01		0.42
Toyama	0.10		0.42	1.4		0.49			2.41
Ishikaw	0.03		0.08	0.0		1.36	0.10		1.62
Fukui	0.24								0.24
Nagano	5.21		0.14		0.4		1.13		6.90
Gifu	11.55		0.05	2.4		1.15	0.10		15.34
Shizuok	5.34			0.1			0.22	1.7	7.40
Hyogo	0.35								0.35
Wakaya	0.03			0.1					0.15
Tottori	4.89								4.89
Okaya	0,14			0.0			0.08		0.23
Hiroshi	0.02						0.18		0.20
Kumam	0.17			0.4			0.41		1.00
Oita	40.69	1.2	13.6	2.8	0.6		3.65	1.0	63.74
Kagoshi	15.90	3.9	2-45	0.5			0.10		22.94
Всего	136.7	S.4	34.5	23.	2.1	31.8	28.9	2.8	266.1

H-обогрев помещений, включая водоснабжение;

C – кондиционирование воздуха;

G – нагрев теплиц;

F- рыборазведение;

I – промышленные процессы;

S – таяние снега;

B – плавательные бассейны;

O – другие.

Таблица 18

Геотермальное тепло, используемое непосредственно (напрямую)
(газовое потребление)

Pref.	H	C	G	F	I	S	B	O	Tota (MW)	
Hokkaid	22.63	0.06		9.11		9.14		0.06	61.8	1950
Aomori	0.73			0.10		1.05		0.11	3.77	
Iwats	1.75			0.74		0.10			3.90	
Miyagi				0.00					0.00	
Akita	1.09			1.38				0.07		
Yanaqa	0.61					0.58			1.78	
Fukushi	3.87			0.20					4.55	
Tochigi	1.25								1.28	
Cunma	4.25								6.07	
Tokyo	0.14								0.14	
Kanaqa	1.25								1.25	
Niigata	0.16					0.08		0.12	0.36	
Toyama	0.06			0.31		1.40			1.97	
Ishikawa	0.02			0.06		0.05			0.61	
Fukui	0.24								0.24	
Nagano	5.09			0.10				0.42	6.73	
Gifu	10.14			0.05		2.39			12.8	
Shizuok	5.34					0.06			7.34	
Hyogo	0.12								0.12	
Wakava	0.01					0.12			0.13	
Tottori	4.89								4.89	
Okayam	0.06					0.01			0.10	
Hiroshim	0.01								0.19	
Kumam	0.17					0.42			0.84	
Qita	23.00	0.25		7.79		2.81		0.58	36.7	1159.
Kagoshi	6.91	1.55		0.71		0.50			9.77	
Total(M	93.65	1.86		20.70		18.31		1.36	171.	
Total(TJ/	2953.35	58.66		652.80		577.42		42.89		5399
Capacity	0.69	0.34		0.60		0.77		0.64	0.64	
Factor	0.49	0.61		0.78						

3.5 Современное состояние и перспективы развитие геотермальной энергетики

в Мексике, на Филиппинах, в Индонезии и Исландии.

Использование геотермальных ресурсов в Мексике сосредоточено исключительно на производстве электроэнергии. Прямое использование гидротерм ограничивается банями и плавательными бассейнами. В настоящее время общая мощность геотермальных электростанций составляет 755 МВт, из которых в Серро Прието – 620 МВт, на Лос Азуфрес – 93 МВт и Лос Умерос – 42 МВт. Две ГеоТЭС в 2000 году находились в стадии строительства – Серро Прието IV (100 МВт) и Лас Трес Вирдженес (10 МВт). Ожидается, что первая должна войти в строй действующих в июле 2000 года, а вторая – в начале 2001 года и, таким образом, общая мощность геотермальных электростанций составит 860 МВт. Годовое производство геотермального пара составляет 56 млн. тонн, которые извлекаются 164 скважинами с глубины 600-3500 м. Общее производство электроэнергии на

геотермальных полях Мексики в 1999 году составило 5619 гигавайт-час. Производство электроэнергии в Мексике на геотермальных ресурсах составляет 3.2 % от общего энергопотребления.

Рекогносцировочные исследования геотермальных проявлений в Мексике закончились в 1987 году. Было выявлено 545 участков и обследовано 1380 точечных термопроявлений, включая источники, мелкие скважины, фумаролы, прогретые грунты.

В течение 1995-98 годов на ряде вулканических структур были проведены геологические, геохимические и геофизические работы и на некоторых из них пройдены разведочные скважины. Кроме того, уже на хорошо изученных и эксплуатируемых геотермальных системах за этот же период было пробурено 50 эксплуатационных скважин и 5 реинжекционных. Большая часть их них (42) бурилась на Серро Прието. На Лос Азуфрес были пройдены одна продуктивная и две разведочные скважины. Четыре эксплуатационных и одна реинжекционная скважины пройдены на геотермальной системе Лос Умерос.

Филиппины в настоящее время являются второй страной в мире по использованию геотермальных ресурсов с целью производства электрической энергии. В течение последних 7 лет мощности ГеоТЭС в этой стране увеличились более чем в 2 раза с 888 МВт в 1992 году до 1909 МВт в 1999 году.

В 1998 году доля геотермальных электростанций в общем производстве электроэнергии возросла до 21.52 %. В таблице 19 приводятся данные о мощности отдельных ГеоТЭС.

Разведочные работы с перспективой ввода новых мощностей геотермальной энергетики производятся на ряде геотермальных систем. Проектом, реализуемом на горе Лабо этими работами охвачено 93.34 км². В настоящее время здесь проводятся буровые разведочные работы. Бурится 8 скважин, выполнено геолого-структурное картирование.

Геотермальный проект Северный Негрос охватывает исследованиями 43310.84 гектаров, расположенных на острове Визайлес. Проектируется строительство ГеоТЭС мощностью 40МВт. Уже пробурено 8 разведочных скважин, две из которых вывели гидротермы, достаточные для строительства ГеоТЭС мощностью 8 МВт эл.

Таблица 19

Мощности отдельных ГеоТЭС.

Наименование геотермального поля	Установленная мощность МВт эл.
1. Тиви	330.0
2. Макбан	425.73
3. Тонгонан I	112.50
Тонгонан II	209.36
Тонгонан III	385.89
4. Со. Негрое Палинпион I	115.50

Палинпион II	80.00
5. Бакман I	110.00
Бакман II	40.00
6. Минданао I	52.00
Минданао II	48.00

Всего**1908.98**

Таблица 20

Проекты	Планируе мые мощности МВт	Год ввода в эксплу атацию
Северный Негрос	40	2002
Монтелаго	16	2002
г. Кабальян	110	2006
Амасан	40	2007
г. Лабо	20	2007
Батонг-Бухай	120	2007
Бугуйас-Тинос	120	2007
Бато Лунас	60	2008
Всего	526	

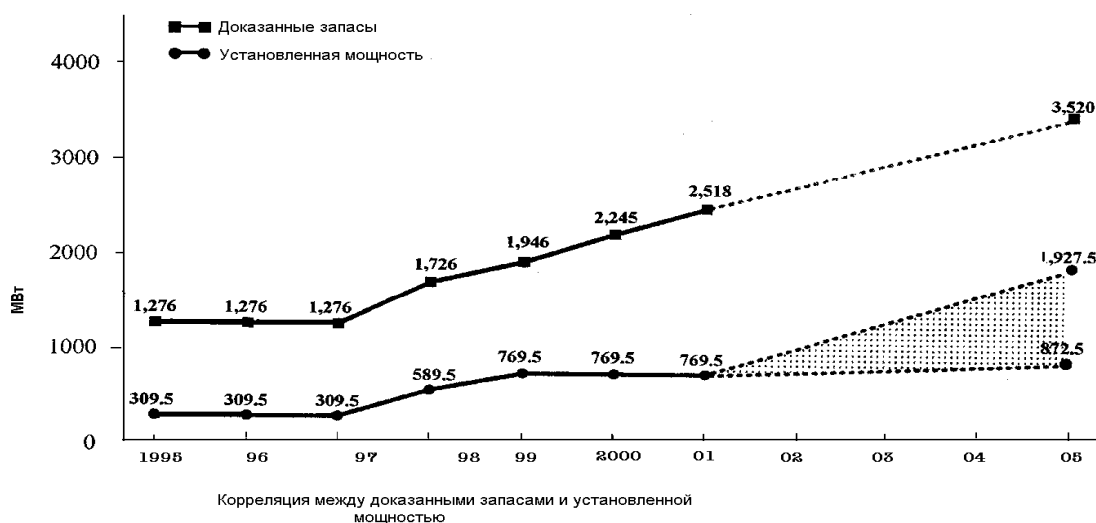
На горе Кабалиан геотермальным проектом предусматривается строительство ГеоТЭС мощностью 100 МВт, окончание которого планируется в 2006 году. В настоящее время пробурена лишь одна скважина, в которой температура гидротерм на забое 230⁰С. В перспективе планируется разработка геотермальных систем с высокопараметрическим геотермальным теплоносителем и введение дополнительных электрических мощностей на геотермальных ресурсах 574 МВт в течение 2002-2008 г.г. (таблица 20).

В 2008 году планируется производство электрической энергии за счёт геотермальных ресурсов в количестве 13.865 ГВт-часов. Для введения дополнительных мощностей необходимо будет пробурить 328 геотермальных скважин.

В последние годы в число стран с развитой геотермальной энергетикой выдвинулась Индонезия. На январь 2000 года установленная мощность всех ГеоТЭС в этой стране составила 769.5 МВт эл.

Доля производства электроэнергии геотермальными станциями составила 2.7 % от общего количества выработанной электроэнергии. К 2005 году планируется довести мощности геотермальных электростанций до 1907.5 МВт на базе получения геотермального теплоносителя на 15 геотермальных систем, общие запасы которых оцениваются в 3910 МВт. Детальными исследованиями геотермальных ресурсов показано, что они составляли на

1994 год – 20000МВт эл. Динамика роста запасов, подтверждённых геолого-разведочными работами показана на рис. 20. На этом же рисунке можно видеть динамику роста суммарной мощности геотермальных электростанций, в том числе и планируемых к введению в строй вплоть до 2005 года.



Геотермальная энергетика в общем энергетическом балансе Исландии играет важную роль. Она составляет 50 % общего количества потребляемой первичной энергии, в то время как электростанции – 18 %, нефть – 30 %, а уголь – 2 %. Подавляющая доля геотермальной энергии расходуется на обогрев помещений. Около 86 % тепла, извлекаемого из недр Исландии, используется на обогрев домов. Эта доля медленно увеличивается.

Резкое увеличение в энергетическом балансе страны доли геотермальной энергии в последние годы приходится на получение электрической энергии (Рис.21).

Геотермальные ресурсы Исландии тесно связаны с вулканизмом, который локализуется в глобальной системе Срединно-Атлантического хребта. Высокотемпературные гидротермальные системы располагаются в активной вулканической зоне, протягивающейся через всю страну, в основном находятся на флангах этой зоны. Две трети населения Исландии живёт в юго-западной части острова, где геотермальные ресурсы находятся в изобилии. В настоящее время зарегистрировано 250 отдельных проявлений низкотемпературных гидротерм с 600 горячих источников (температура более 200^С) и 26 высокотемпературных геотермальных систем с парогазовыми термопроявлениями. Высокотемпературные районы непосредственно связаны с активными вулканическими системами.

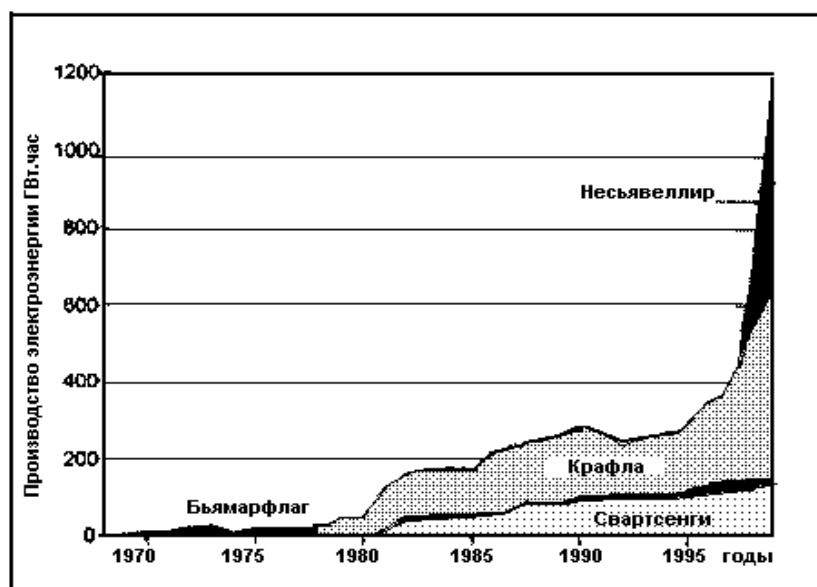


Рис.21 Производство электрической энергии на ГеоТЭС в Исландии в 1970-1999 годы.

Использование геотермальной энергии сильно повлияло на жизненные стандарты в Исландии. Экономический эффект от реализации геотермальных программ, в особенности, связанных с отоплением, значительный. Ежегодно экономится 100 млн. долларов США на сокращение импорта нефти. Кроме экономической выгоды, экономический эффект является наиболее важным. Он оценивается тем, что если бы отопление домов производилось теплом, полученным при сгорании органического топлива, то выделялось бы при этом углекислого газа столько же, сколько в настоящее время выделяется CO_2 в атмосферу Исландии от всех видов деятельности человека.

В 1998 году в Исландии начала реализовываться программа, рассчитанная на 2 года, по изучению, так называемых “холодных районов”, с целью получения тепла для обогрева домов. Выделено 800 тысяч долларов США для разведочного мелкого бурения (50-100 м) с целью изучения геотермических градиентов. Этот метод успешно применяется в разведочной технологии в Исландии. Получены первые результаты в районе Стиккишолмур. Считается, что возрастающее использование геотермальных ресурсов уменьшит расход электрической энергии на обогрев домов, который оценивается в 9 млн. долларов США в год.

Рейкьявинский теплоэнергетический округ, который является самым крупным из 26 муниципальных геотермальных систем Исландии, был образован в 1943 году. Здесь используются низкотемпературные гидротермы, локализующиеся вблизи Рейкьявика, а также гидротермы высокотемпературной системы в Несьявеллир, удалённой от Рейкьявика на 27 км. Эта теплоэнергетическая система обслуживает практически всё население Рейкьявика (160 тыс. человек) и 4 соседних общины.

На протяжении 10 лет в Рейкьявинском теплоэнергетическом округе наблюдался почти постоянный расход гидротерм в течение года. За это же время число людей, получающих отопление и общий объём отапливаемых домов увеличился на 15-20 %. Таким образом, удельный расход

потребляемой термальной воды, измеренной ежегодным потреблением на объём дома, значительно уменьшился.

Основной причиной этого является улучшение контроля за системами отопления, лучшей теплоизоляцией домов и улучшением энергетической образованности. Аналогичное уменьшение потребления термальных вод на отопление наблюдалось и в других геотермальных отопительных системах, как результат перехода тарифных систем от системы, основанной на ограничении максимального потока, к системе, основанной на измерение количества используемой воды.

Населённый пункт Стиккишолтур, где в 1999 году начала действовать окружная геотермальная отопительная система, является центром торговли и рыбной промышленности с населением 1300 человек. Он расположен в месте, где нет поверхностных термопроявлений. Здесь был применён метод, в основе которого лежит бурение неглубоких скважин и измерение в них геотермического градиента на площади 3 x 1 км. В результате было определено наличие геотермальных рассолов с температурой 87⁰С. Из-за высокой минерализации эти термы не могли быть использованы в отопительных системах, обычно применяемых в Исландии. Продуктивная скважина находилась в примерно 5 км от населённого пункта. Погружными насосами термальная вода подаётся по термоизолированным стальным трубам в центральный водообменник, расположенный в здании в центре населённого пункта. Установленная мощность системы 7 МВт т. Термальная вода из теплообменника используется в бальнеологических ваннах в муниципальном плавательном бассейне перед тем, как они поступят в океан. Второй контур теплообменной системы представляет собой замкнутую систему. Вода в этом контуре тщательно деаэрируется с целью избежания коррозии в трубопроводах и радиаторах. Горячее водоснабжение обеспечивается в результате нагревания питьевой холодной воды из магистрального водопровода небольшими теплообменниками, установленными в каждом доме.

Общая стоимость описанного проекта около 6 млн. евро (5.9 млн. долларов США). Полный ввод в строй теплоэнергетической системы был осуществлён осенью 2000 года.

Весьма интересный опыт по реинжекции был проведён на геотермальной системе Лаугаланд на севере Исландии. Низкотемпературные термы этой системы используются для отопления домов в городе Акурейри, где проживает 15000 человек. Из-за низкой общей проницаемости и ограниченного модуля подземного стока после начала эксплуатации в 1977 году наблюдалось большое снижение давления. Однако большое количество тепла накапливалось в нагретых до 90-100⁰С породах системы. Целью закачки (реинжекции) была демонстрация того, что извлечение тепловой энергии из трещинной низкотемпературной геотермальной системы возможно увеличится в результате этой технологии.

Этот эксперимент делался при сотрудничестве нескольких компаний и институтов Исландии, Швеции и Дании, частично поддержанный Европейским Союзом. Закачивалось 6 и 21 кг/с воды в две реинжекционные скважины. Всесторонняя программа мониторинга, включая сейсмические наблюдения, была реализована в качестве части реинжекционного проекта, кроме некоторых дополнительных испытаний проводился каротаж скважин.

Результаты эксперимента показывают, что производительный потенциал системы Лаугаланд и ожидаемые результаты по реинжекции являются важной частью управления резервуаром Лаугаланд в прошедшее десятилетие.

Со времени заселения Исландии 1100 лет назад до начала XX столетия, использование геотермальной энергии ограничивалось банями, стиркой белья и приготовления пищи. Эти виды потребления геотермального тепла и плавательные бассейны являются третьим по важности типом потребления геотермальной энергии после обогрева помещений. Имеется около 100 публичных плавательных бассейнов, около 30 бассейнов в школах и институтах с общей поверхностью 2700м². Каждый год в постоянном пользовании созданы плавательные бассейны на воздухе. Общее ежегодное потребление гидротерм для плавательных бассейнов оценивается в 6000000 м³, которые соответствуют расходу 1100 Тераджоулей в год.

В последние 15-20 лет в Исландии геотермальная энергия широко используется для таяния снега. Горячая вода распределяется по пластиковым трубам. Гидротермы из домов с температурой около 35⁰С обычно используются для борьбы с оледенением тротуаров и мест парковки автомобилей. В большинстве систем смешиваются отработанные термы с горячими термами (80⁰С) во время высокой нагрузки. При интенсивном ремонте улиц в нижней части Рейкьявика несколько лет назад была установлена система снеготаяния под тротуарами и дорогой. Общая площадь обогрева 40000м². Средняя теплопотеря с квадратного метра этой площади составляет 180 Ватт.

Общая площадь, охваченная системами снеготаяния в Исландии оценивается в 350000м², из которых 250000 м² в Рейкьявике. Годовое потребление зависит от погодных условий, но в среднем составляет 325 киловат. час/ м². Две трети составляют отработанные термальные воды после отопления домов и треть – 80 градусные термы. Общий расход геотермального тепла составляет 410 тераджоулей в год (тераджоуль = 10¹² джоулей).

Промышленное использование геотермального пара в большом масштабе началось в Исландии в 1967 году с эксплуатации диатомовой фабрики в Миватн вблизи высокотемпературной системы Намафьялл. Эта станция является одним из крупнейших промышленных потребителей геотермального пара и производит ежегодно 20-30 тысяч тонн диатомовых фильтров на экспорт.

Геотермальный пар используется, в основном, для сушки, а также для подогрева нефти, помещений и других технологических процессов.

В Рейкхлар станция для сушки водорослей использует 28 л/с 107 градусной воды, которая охлаждается до 50⁰С. Годовое потребление геотермальной энергии станцией составляет 150 тераджоулей. На полуострове Рейкьянс до 1994 года работал завод по извлечению соли из морской воды, которая экспортировалась и использовалась местными рыбообрабатывающими предприятиями.

Недавно начала работать деревообрабатывающая фабрика в г. Хузавик, в которой производится распиловка и искусственная сушка леса из Северной Америки.

Начиная с 1986 года в г. Хаедаренди (округ Гримснес в южной Исландии) работает фабрика по выработке углекислого газа, которая использует

геотермальную систему с температурой гидротерм 160°C и содержанием газов до 1,4 вес.%. Газ, в основном CO_2 , содержание H_2S только 300ppm. Производство углекислого газа сопровождается отложением большого количества корочек кальцита, избежать которое удаётся погружением в скважину теплообменника, изготовленного из двух соосных стальных труб. Холодная вода закачивалась по внутренней трубе и возвращалась по внешней. В результате этого гидротермы охлаждались в нижней части скважины, а растворимость карбоната кальция значительно увеличивалась, что предотвращало отложение кальцита. В конце 1997 года производство CO_2 увеличилось с 40кг/час до 250 кг/час, что значительно превысило промышленные потребности Исландии (2000тонн в год). Углекислый газ из Хаедаренди использовался в теплицах, изготовлении газированной воды и в других видах пищевой промышленности.

Обогрев теплиц гидротермами в Исландии начался в 1924 году. До этого нагретые почвы использовались для выращивания помидоров и других овощей. В теплицах обычно выращиваются овощи и цветы. Общая площадь застеклённых теплиц достигла 183000m^2 . 55% из этой площади занято овощами и 45 % цветами. Кроме того, имеется 105000m^2 парников на гидротермах. Многие теплицы в настоящее время обогреваются водой, нагретой в теплообменниках.

В середине 1980 годов произошёл резкий рост количества ферм по выращиванию рыбы. В настоящее время на гидротермах работает 50 таких предприятий. Главным видом из рыб является лосось (70%), голец и форель. Термальные воды используются, в основном, для инкубационного периода. В Исландии существует три различных типа лососевых ферм: океанические, береговые, базирующиеся на прудах и плавающие рыбные садки. Океанические – основаны на подращивании молоди и выпуске их в океан, откуда взрослый лосось через 2-3 года возвращается на место рождения. Этот способ даёт возврат лишь 2-3%. Фермы на берегу занимаются выводением и подращиванием молоди на гидротермах. Затем вода постепенно меняется с пресной на морскую, в которой лосось достигает взрослой стадии (рыночного размера). Термальная вода обычно $20\text{-}50^{\circ}\text{C}$, используется для подогрева пресной воды через теплообменники до $5\text{-}12^{\circ}\text{C}$. Разведение рыбы в садках, плавающих вдоль берега, может производиться лишь в некоторых местах и только в ограниченный период года.

Береговые фермы требуют больших расходов как пресной, так и морской воды и это сильно увеличивает стоимость рыбы. В настоящее время были уменьшены расходы на электроэнергию за счёт снижения водообмена путём насыщения воды чистым кислородом.

Общая производительность рыбных ферм в Исландии увеличилось до 4000 тонн в год, хотя количество их уменьшилось с 70 до 50. Общий расход геотермальной энергии на рыборазведение оценивается в 650 тераджоулей в год.

В 1991-97 годах в Исландии в кооперации с некоторыми крупнейшими энергетическими компаниями проводились исследования о влиянии на окружающую среду развития геотермальной энергетики. Изучением были охвачены все высокотемпературные геотермальные системы. Этот проект стимулировал дальнейшее развитие геотермальной энергетики на этих системах с целью определения потенциала для получения электрической энергии. На базе этих работ были получены исчерпывающие данные о коэффициентах геотермальных ресурсов в породах исландского типа.

Проект также включает изучение влияния расположения реинжекционных скважин на работу геотермальных электростанций. Инвестиции на реализацию этого проекта составили в 1996 году 4.2 млн. долларов США. В эти работы включена разведка и регулярный мониторинг геотермальных полей.

Особенно интенсивно проводились буровые работы в 1995-99 годах. В это время пробурено 19 скважин на высокотемпературных системах с целью увеличения расходов пара для трёх главных геотермальных электростанций. Было пробурено около 40 скважин на низкотемпературных геотермальных системах и почти 200 мелких скважин для изучения геотермического градиента.

Начиная с 1979 года, в Исландии реализуется Геотермальная Тренинг программа в Университете ООН для подготовки кадров по вопросам развития геотермальной энергетики в развивающихся странах. На 2000 год прошло полный курс 227 учёных и инженеров из 35 стран.

Глава 4. Экологически непротиворечивые способы реализации программ по геотермальной энергетике.

4.1. Обзор экологически вредных способов решения проблемы энергетики и охрана окружающей среды.

До недавнего времени общее отношение к воздействию на экологию окружающей среды геотермальной энергетики, можно сказать, было попустительским. Причиной этого было почти полное незнание процессов, сопровождающих геотермальную деятельность в областях современного вулканизма. Предполагалось, что извлечение геотермального пара и горячей воды не может серьёзно изменить процесс естественной разгрузки гидротерм. Дилетантский подход при сравнении геотермальной энергетики с традиционными видами энергии был глубоко научно не обоснованным. Поскольку считалось, что источник геотермальной энергии находится в глубоких недрах Земли, то отбор части этой энергии воспринимался как процесс утилизации расходной части теплового баланса современных геотермальных систем. Полезность такого способа получения энергии земных недр не подвергалась сомнению и активно пропагандировалась инициаторами и апологетами этого вида энергии. Наблюдения за извержениями вулканов доказывали, казалось бы, неисчерпаемость его на протяжении многих лет развития цивилизации.

Первые шаги в развитии геотермальной энергетики в Италии, США, Новой Зеландии и СССР (Паужетка, Камчатка), со всей очевидностью показали, что эйфория энтузиастов беспочвенна. В местах разведки и извлечения парогидротерм и низкотемпературных терм производились работы, которые разрушали локальные экосистемы не только механическим способом природных ландшафтов, но и исследовательские работы, связанные с активными выпусками парогидротерм из скважин, наносили ущерб окружающему растительному покрову. Поскольку термальные воды имеют в своём составе растворённые соединения, химические элементы и газы, то отложения геля кремнекислоты из фонтанов парогидротерм рассеиваются на большой площади, которую занимает буровое и опытное оборудование и транспортные пути. Деревья, которые обволакиваются отложениями коллоидной кремнекислоты, погибают. Растворённые газы, в составе которых содержатся CO_2 , H_2S , а в некоторых гидротермальных системах и SO_2 , загрязняют атмосферу в долинах рек. Как правило, гидротермальные системы в областях современного вулканизма локализируются в местах с контрастным рельефом, то аккумуляция тяжёлых газов в отрицательных

формах рельефа способствует усилению этого эффекта на атмосферу глубоких долин рек, ручьёв и впадин.

Сброс больших объёмов жидких гидротерм в реки и ручьи, прежде всего, приводит к тепловому загрязнению. Повышение температуры водотоков, в которых находятся нерестилища и места кормовой базы промысловых рыб (в основном особо ценного лосося, как это имеет место на Камчатке) и других обитателей этих водоёмов, резко изменяло экосистему этих мест. Дно последних зарастало термофильными водорослями, резко снижающими содержание кислорода в этих водах, которое становилось недостаточным для развития пищевых организмов, икры и мальков рыб.

Однако отмечалось, что в условиях повышенных температур, молодь промысловых рыб становилась крупнее и более жизнестойкой. Однако подращивание её в термальных водах, содержащих мышьяк, приводило к его накоплению в теле рыбы.

Таким образом, некоторые микроэлементы, находящиеся в гидротермах, также таят опасность для экосистем, в которые вторгаются гидротермы.

Как известно, поверхностные термальные проявления являются привлекательным местом отдыха не только местного населения, а и любителей путешествовать. Уникальные формы выходов на дневную поверхность термальных вод представляют собой объекты созерцания и морального отдыха, являясь своеобразной формой проявления общения человека с дикой природой. Уникальность этих объектов заключается в их редкости и они служат особыми местами поклонения духам, управляющим данной природой. С незапамятных времён местное население поклонялось источникам, термальным озёрам и другим видам термальной активности. Возможно, это было связано и с особыми их бальнеологическими свойствами. Такие места служили не только прагматическим целям, но являлись региональными реликвиями и особо тщательно охранялись. Со временем некоторые из термальных проявлений приватизировались и обустроивались. В таких странах как Япония, которые характеризуются плотной заселённостью, вырабатывались не писанные природоохранные законы, касающиеся не только источников, но и вулканов, имеющих парогазовые выходы и прогретые парящие площадки. К ним прокладывались хорошо оборудованные дороги и маршруты обсаживались деревьями, а на обочинах этих транспортных путей устанавливались статуи Будды (Фото 1). Естественно добыча гидротерм из подземных водоносных горизонтов, питающих такие термальные проявления, приводили к перестройке очага разгрузки. Гейзеры или кипящие источники из-за понижения гидростатического уровня некоторых гидротерм, прекращали изливать воду и превращались в ямы и впадины, из которых выделялись струи пара. Гейзерит и травертин, которые окружали ранее существующие гейзеры и кипящие источники, разрушались. На их месте происходило образование красных глин (Фото 2., Гейзеры Вайракей). То есть, отмечалось снижение поверхностной активности гидротерм. Наоборот, вверх по течению подземных потоков гидротерм, там, где до их эксплуатации были небольшие прогретые площадки и слабая парогазовая (фумарольная) деятельность, образовывались значительные по площади (Вайракей ~ 4 га) глубокие грязевые котлы и обвалившиеся ямы со стенками, в которых обнажались отложения гидротермальных взрывов ранних этапов деятельности

современной гидротермальной системы. В этих глинистых ямах и котлах происходят бурные процессы химического и термического взаимодействия парогидротерм с породами, представляющие яркое, волнующее и запоминающееся зрелище. Такие изменения порой не вызывают возмущения многочисленных посетителей этих мест. Например, гейзеры Вайракейской гидротермальной системы в Новой Зеландии, когда они действовали, посещало 2-3 тысячи человек в год. В настоящее время после строительства ГеоТЭС эти гейзеры исчезли, а появилась обширная площадка с грязевыми котлами и другие индустриальные пейзажи (Фото.3.). Посещаемость увеличилась в несколько десятков и даже сотен раз. Здесь, по-видимому, сказалось влияние индустриальной инфраструктуры, которая способствовала массовому туризму, невозможному в условиях отсутствия хороших дорог и отелей.

Однако научные исследования, сопровождающие освоение геотермальной энергии, привели к познанию процессов, связанных с деятельностью гидротерм. В настоящее время хорошо изучен механизм формирования и деятельности фонтанирующих высокотемпературных источников-гейзеров. Из некоторых скважин на Паужетке происходило пульсирующее истечение пароводяной смеси, аналогичной гейзерным источникам с красивыми струями-факелами. В настоящее время реально подобрать любой режим извержения пароводяной смеси и создать разнообразные типы гейзеров: в большом периоде покоя между импульсами извержений, с коротким периодом покоя, пульсирующим в ритмичном режиме, фонтанирующим в почти постоянном (струйном) режиме. При тщательном регулировании истечения пароводяной смеси из устья скважины имеется возможность получить разную форму струи от узкой-столбообразной с развевающимся шлейфом выбрасываемой пароводяной смеси, до струй в форме пламени.

Не составит труда сконструировать оформление грифона и его окрестностей с образованием многослойного гейзерита с жемчужной поверхностью, так как частое омывание гидротермами, содержащими золи кремнекислоты, образует тонкую плёнку свежего коллоидного кремнезёма, обладающего специфическим жемчужным блеском.

Высокотемпературные гидротермы, имеющие в своём составе растворённый углекислый газ, дают возможность создать озёра, выделяющие пузырьки растворённого газа и отлагающие как гейзериты, так и травертины, которые слагают пористые русла термальных ручьёв с ваннами, заполненными углекислыми термами. Последние не только приятны для купания, но и обладают эффективными бальнеологическими свойствами.

Освоение геотермальных ресурсов обычно сопровождается шумом. Шум от геотермальных установок похож на шумы, генерируемые другими промышленными объектами. Если полевые испытания продолжаются длительное время, то уровень шума колеблется в соответствии с процессами производства опытных выпусков из скважин. Разработка геотермальных месторождений с низкотемпературными гидротермами (на дневной поверхности их температура не превышает 100°C) менее шумная, чем получение сухого геотермального пара с аналогичным общим расходом теплоносителя. Уровень шумов уменьшается по мере удаления от геотермального объекта и зависит от характера рельефа и состояния атмосферы и часто не отличается от нормального шумового фона

урбанизированной местности. Эксперименты на животных показали, что безопасный максимум уровня шумов оказался индивидуален для различных животных и имеется необходимость по составлению карт шумовых зон для каждого вида живых организмов.

Наиболее мощная генерация шумов связана с опытными выпусками пара после сепарации пароводяной смеси на геотермальных полях с высокотемпературными жидкими термами и на пародоминирующих геотермальных системах типа Лардерелло. Уменьшение уровня шумов этого типа источников производится с помощью глушителей, в которых создаются условия больших перепадов давления за счёт увеличения объёма выпускаемого пара. Как правило, в условиях эксплуатации геотермальных электростанций этот эффект достигается за счёт конденсирования отработанного пара в специальных конденсаторах. Большею частью генерация шумов во время эксплуатации ГеоТЭС связана с несовершенной схемой утилизации отработанного пара.

Одним из наиболее экологически вредных продуктов геотермальных месторождений с жидкими высокотемпературными термами является кремнезём. Подробная информация о нём приводится в главе I. Здесь следует отметить, что при сбросе отработанных гидротерм в поверхностные воды, кремнезём отлагается в русле ручьёв, как это, например, происходит на Вайракейской геотермальной электростанции в Новой Зеландии, и образует постоянно увеличивающиеся наросты гейзерита. Предприимчивость деловых новозеландских людей почти решает проблему очистки этого искусственного термального ручья, так как эти отложения аморфного кремнезёма продаются в качестве сувениров многочисленным туристам.

Однако, оценивая проблему возможного воздействия кремнезёма гидротерм на окружающую среду и в особенности на оборудование геотермальных промыслов и геотермальных электростанций, следует отметить её трудно разрешимость. По нашему мнению, это связано в большинстве случаев с тем, что ещё имеются теоретически нерешённые задачи, связанные с химизмом кремнекислоты в гидротермах. Как мы считаем, это, в основном, обусловлено сложностью поведения кремнекислоты, которая может находиться в водном растворе как в ионной, так и в коллоидной форме. Поскольку в химическом составе термальных вод присутствуют катионы и другие сложные соединения, находящиеся также в ионной и коллоидной формах, то они могут воздействовать на процессы флоккуляции, коагуляции, сорбции и десорбции коллоидной кремнекислоты. Эти взаимодействия, несомненно, усложняют процессы, происходящие с кремнистой кислотой и прогноз её режима в гидротермальном процессе в настоящее время задача, нерешённая.

Однако опыт работы по этой проблеме уже накапливается и реализуется в практической деятельности. Так, например, прежде чем закачивать отработанные гидротермы в водоносные горизонты (о чём будет сказано в следующем разделе настоящей главы) их пропускают (если позволяют условия) через кварцевый песок, в котором большая часть кремнекислоты осаждается, используя кварцевые зёрна в качестве ядер кристаллизации. В другом случае, в Новой Зеландии, была построена опытно-промышленная станция, в которой отработанные гидротермы, представляющие собой пересыщенный раствор кремнезёма, пропускался через гашёную известь, в

результате чего образовывались кальциевые силикаты, и происходила очистка терм от избыточной кремнекислоты. Кальциевые силикаты после сушки теми же термальными водами использовались в качестве строительного материала.

Интересные наблюдения за поведением кремнезёма при выбросах пароводяной смеси из фонтанирующих скважин свидетельствуют, что дисперсный кремнезём, образующийся в шлейфах пароводяных струй, рассеивается ветром на большие расстояния и может попадать в места обитания людей и животных (автомобили и в открытые окна жилищ) и, несомненно, повреждать лёгкие. О том, какой ущерб аэрозоли кремнезёма наносят окружающей растительности, мы уже описывали в начале раздела. Примеров такого воздействия на окружающую среду кремнекислоты, содержащейся в парогидротермах достаточно много (Паужетка, Мутновское месторождение, Вайракей и ряд других). Эта проблема обсуждалась в связи с эксплуатацией высокотемпературной гидротермальной системы Эль Сальвадор, где гидротермальные скважины находились среди кофейных плантаций. Считается, что ущерб этого типа обычно ограничивается небольшими площадками и должен приниматься в качестве неизбежных издержек эксплуатации геотермальных энергоносителей.

Важной проблемой, связанной с развитием геотермальной энергетики, является проседание земной поверхности. Извлечение больших объёмов гидротерм из недр высокотемпературных геотермальных систем с жидким теплоносителем (водой) приводит к образованию в напорном водоносном комплексе (горизонте), так называемой “депресссионной воронки”. Образно говоря, образуется зона пониженного гидростатического давления, в которой часть порового (трещинного) пространства, или не заполнена водой (зона аэрации), или же заполнена низкопараметрическим паром в смеси с неконденсируемыми газами (CO_2 , H_2S). В этой части месторождения происходит уплотнение пород (уменьшение свободного пространства), что проявляется в некоторых событиях, таких как наклон земной поверхности (проседание), которое сопровождается формированием зон напряжения в энергетическом оборудовании и возможными механическими его повреждениями. Хотя следует отметить, что большие дифференцированные подвижки в практике эксплуатации геотермальных месторождений редки. Наблюдались вертикальные смещения до 4.5 м в течение 10 лет на Вайракее и на 6 м после 1962 года. Кроме того, там же фиксировались горизонтальные подвижки до 0.225 м в течение 8 лет, в зоне максимального опускания, где производился наибольший отбор гидротерм. Ущерб от этих движений земной поверхности выразился в появлении трещин в дренажном канале, проходящем от Вайракейской ГеоТЭС к ручью Вайракей. Сама станция находится на значительном удалении от района максимального опускания. Геотермальные системы, где извлекается энергоноситель в виде сухого пара, не восприимчивы к такому воздействию отбора паротерм из недр.

На геотермальных системах, где извлекается жидкий теплоноситель, необходимо вести тщательные геофизические наблюдения. Вполне приемлемым методом формирования депрессионной воронки является повторяющаяся гравиметрическая съёмка. Имеется опасность, что иногда продолжительные откачки гидротерм из водоносных комплексов могут спровоцировать землетрясения, в особенности во время закачки

отработанных вод в зоны сильных напряжённых сдвигов, где могут быть большие перепады температур. Эта опасность реальна, поскольку все эксплуатируемые гидротермальные системы обычно находятся в районах сейсмотектонически активных. Такие события происходили в Колорадо, где довольно сильные сейсмические толчки наводились в результате закачки промышленных сточных вод. Наоборот, отбор гидротерм из водоносного горизонта (комплекса) может снизить опасный уровень сейсмической активности. В Италии был проведён контролируемый эксперимент. В течение 40 дней производились тщательные сейсмические и микросейсмические измерения до и во время закачки отработанных гидротерм (реинжекция). Никаких событий не наблюдалось.

В другом случае, когда извлекалось тепло нагретых горных пород путём закачки холодной воды в искусственные трещины, происходили сейсмические события.

В связи с вышеприведенным описанием процессов, вызванных массивной откачкой геотермального энергоносителя, высказываются предположения, что в отдалённом будущем, когда этим процессом будут охвачены глубокие недра геотермальных систем и влияние процессов эксплуатации геотермальных ресурсов распространится на большие глубины, не исключено возникновение ситуаций, которые могут спровоцировать и сильные разрушительные землетрясения. Неконтролируемый отбор геотермального тепла, несомненно, приведёт к понижению средней температуры земной коры, что нарушит сложившуюся равновесную тепловую систему. Эти нарушения приведут к перестройке системы напряжений в земной коре, что чревато непредсказуемыми последствиями. Несмотря на то, что это долговременная проблема, необходимо тщательное её изучение.

В практике эксплуатации геотермальных электростанций, которые используют охлаждающие башни (градирни), отмечается образование туманов из этих градирен. Более серьёзное влияние могут оказывать большие объёмы выбросов пара и воды из глушителей и из регуляторов расхода пара, которые издадут раздражающий шум, такие как, например, установлены на Камчатке. В результате этих выбросов может образоваться туман..

И всё-таки, несмотря на выше описанное, порой негативное, воздействие развития геотермальной энергетики на окружающую среду, возможна рукотворная взаимосвязь инженерных работ с природными поверхностными термальными проявлениями. Этим разработкам уделяется особое внимание при развитии геотермальной энергетики в Японии (Tokita et al., 2000). Японские разработчики геотермальных программ придают этому аспекту большое значение, так как места освоения геотермальных ресурсов в Японии, как правило, являются местами паломничества многочисленных жителей данной местности и объектами поклонения. Поэтому важнейшим условием использования геотермальных ресурсов в энергетических целях является сохранение первозданных термальных проявлений и прогноз влияния эксплуатации геотермальных электростанций на близко расположенные горячие источники. Для взаимопонимания, сотрудничества и согласия между энергетиками и владельцами горячих источников, а также экологов, проводятся мониторинг (слежение) окружающей среды и мероприятия по сохранению горячих источников, основанные на научных

исследованиях, обязательных в Японии. Фонд по Новым энергиям разработал метод прогноза влияния эксплуатации геотермальных ресурсов на горячие источники путём применения и модификации методов, используемых в геолого-разведке, геохимических исследованиях и резервуарной инженерии. Процедура состоит из двух стадий. В первую стадию, основанную на крупномасштабной концептуальной модели, исходя из структурных позиций геотермальной системы, качественно оценивается взаимосвязь горячих источников и водоносного геотермального горизонта (комплекса, резервуара). С этой целью проводится геолого-структурный анализ и генезис гидротерм, который определяется по геохимическим данным. Во-вторых, производится числовое моделирование влияния эксплуатации геотермального резервуара на режим горячих источников.

Для того, чтобы гарантировать надёжность метода прогноза, проводились контрольные исследования на моделях двух хорошо изученных геотермальных полях: Вайракейской в Н. Зеландии и Палинпион на Филиппинах. Оба поля испытали понижение гидростатических уровней и изменения химических составов гидротерм в окружающих горячих источниках после начала эксплуатации. В результате этих контрольных исследований были разработаны концептуальная и числовая модели резервуаров, включающие горячие источники, с использованием ограниченной информации, полученной лишь во время стадии эксперимента. Затем были предсказаны возможные, выше упомянутые, изменения в окружающих горячих источниках после эксплуатации геотермальных ресурсов. Авторы исследовали, как в стадию качественной, так и в стадию количественного прогноза, тенденцию реальных изменений в горячих источниках, которые означали, что метод прогноза эффективен. Базируясь на контрольных исследованиях, было установлено два типа горячих источников: связанных и несвязанных с данным водовмещающим комплексом. Предполагается, что этот метод прогноза будет содействовать охране окружающей среды во время эксплуатации геотермальных ресурсов.

4.2 Закачка использованных гидротерм (реинжекция).

Закачка использованных гидротерм (в дальнейшем реинжекция) обратно в эксплуатируемый геотермальный горизонт в настоящее время является широко распространённым мероприятием, используемым при эксплуатации подземных гидротерм. Сама по себе реинжекция не представляет технических трудностей, в особенности, если гидростатический уровень напорных гидротерм находится существенно ниже дневной поверхности. Процедура не требует какого-либо специального высокотехнологичного и дорогостоящего оборудования. Основные финансовые расходы связаны с бурением скважин по контуру геотермального резервуара. Как правило, во время геологоразведочного и поискового бурения часть скважин оказывается непродуктивными и, некоторые из них могут быть использованы в качестве реинжекционных.

Реинжекция отработанных гидротерм в настоящее время имеет практическую значимость и решает ряд проблем, описанных в предыдущем разделе этой главы. Вместе с тем эта процедура порождает ряд новых проблем. Таким образом, сочетание положительного и негативного эффектов

этой технологии является важным элементом в освоении геотермальной энергии.

Несомненно, вызывают опасение большие инъекции остывших отработанных гидротерм в эксплуатируемый резервуар, так как несбалансированная закачка слишком охлаждённых гидротерм может снизить параметры извлекаемого теплоносителя и тем самым повлиять на снижение снимаемой тепловой энергии. Важным является баланс давлений, производимого на закачиваемую жидкость и пластового давления, что может привести к полному “задавливанию” эксплуатируемых гидротерм. Несомненно, необходимо исследовать процесс изменения проницаемости продуктивного горизонта в результате отложения минеральных новообразований. Существенной проблемой может быть появление поверхностных выходов реинжектируемых гидротерм, которые будут загрязнять окружающую местность. Одним из важных моментов в процессе закачки отработанных гидротерм является вероятность триггеринга сейсмических событий. Проблемы реинжекции были поставлены на Геотермальном симпозиуме ООН в Пизе в 1970 году, как заслуживающие внимания. В 1975 г в Сан Франциско на аналогичном симпозиуме были проведены важные количественные данные. Эти материалы позволили сделать вывод, что реинжекция часто могла быть превосходным решением экологических проблем в освоении геотермальных ресурсов. Однако и здесь имеются ограничения использования этого способа.

Эйнарсон и другие (Einarsson et al., 1975) описали успешные опыты, проведённые на геотермальном поле Ахиачапан в Сальвадоре, где наиболее серьёзная проблема ликвидации бороносных терм была решена реинжекцией. Во время эксперимента 2 млн. м³ гидротерм с температурой 153⁰С было закачено в скважину глубиной 952 м с расходом 164 л/с без насоса (водоносный горизонт обладает высокой проницаемостью), только самотёком за счёт силы гравитации и давления пара, выделявшегося при кипении гидротерм. При этом не отмечалось образование отложений и какого-либо заметного взаимодействия закачиваемых гидротерм с гидротермами в пласте. Эти авторы считают, что наиболее рациональная глубина реинжекционных скважин должна быть 1.5 км и более, по крайней мере, в условиях, аналогичным условиям поля Ахиачапан. Общая цена реинжекции в этом месте оценивалась ~ в 1 тысячную долю американского доллара на 1 киловатт час.

Кубота и Аосаки (Kubota, Aosaki, 1975) описали результаты закачки 8 млн т гидротерм в водовмещающий комплекс гидротермального месторождения Отаке в Японии в 1972 г через три реинжекционные скважины. Скорость закачки составила примерно 400 т/час. Этот расход позволяет избежать теплового и химического загрязнения окружающей местности. Реинжекционные скважины находились от продуктивных на удалении 150-800 м. Снижение температуры извлекаемых гидротерм или расходов продуктивных скважин не наблюдалось и не было никаких-либо сейсмических событий. Даже более того, авторы отмечают улучшение эксплуатационных параметров продуктивных скважин. Общая мощность электростанции увеличивалась до 11 МВт (по сравнению с 8.7 МВт) после начала реинжекции. Негативным процессом было отложение кремнезёма на стенках реинжекционных скважин (и возможно в близко расположенных

трещинах), которое повлияло на реинжекционную производительность этих скважин.

Грингартен и Саути (Gringarten, Sauty, 1975) описали эксплуатацию отопительных систем с обычными температурными градиентами во Франции. Здесь также поверхностный излив отработанных гидротерм приводил к химическому и тепловому загрязнению. Реинжекция решила эти проблемы и в то же время дала возможность поддерживать давление в пласте и ограничить опускание поверхности в месте извлечения гидротерм, а также обеспечить возврат как воды, так и тепла. Однако поскольку тепло непрерывно извлекается из водоносного комплекса, то должно происходить истощение эксплуатационной зоны. В связи с этим необходимо определить оптимальное расстояние между продуктивными и реинжекционными скважинами, чтобы продлить максимальную эксплуатационную жизнь продуктивной зоны. Авторы исследовали эту проблему с помощью математических методов и определили свойства водовмещающего комплекса, вывели серию кривых, показывающих ряд лет, в течение которых реинжектированные гидротермы могут достичь продуктивных скважин, и определили ожидаемую скорость уменьшения температуры с течением времени.

Частин (Chasteen, 1975) описал опыты по реинжекции на трёх геотермальных полях США. Этот автор считает, что целью реинжекции является частично восстановление теплопотерь, вызванных эксплуатацией и частично, размещение отработанных гидротерм или избыточного конденсата способом, который позволяет избежать загрязнения поверхностных вод. Реинжекция проводилась и проводится на Гейзерах и в Империял Вэлли в Калифорнии, а также на Кальдере Воллес в Нью Мексико. На пародоминирующем поле Гейзерс с 1969 по 1975 годы было закачено 4.2×10^9 галлонов жидких отходов. При установленной мощности ГеоТЭС 500 МВт, 4.7 млн американских галлонов закачивалось ежедневно. Жидкость содержала аммонит, бор и некоторые суспензии твёрдых веществ. Поток отработанных гидротерм направляется в бетонные tanks для отстоя нерастворённых веществ, а затем они распределяются в шесть реинжекционных скважин. Эти скважины ранее были продуктивными и давали энергетический пар. После исчерпания ресурсов пара в них произошло понижение гидростатического уровня эксплуатируемого водоносного горизонта и температуры глубинных гидротерм. Об этом свидетельствует факт, что гидротермы сливаются в реинжекционные скважины без употребления насосов, а только за счёт силы гравитации. Реинжекционные скважины по возможности удалены от эксплуатационного участка и имеют глубину, большую, чем продуктивные скважины (до 1600 м). В течение пяти лет взаимодействия между реинжекционными и эксплуатируемыми термами не было взаимодействия. Некоторые трудности в проведении эксперимента были связаны с уменьшением скорости закачки, вызванными зарастанием зоны трещиноватости самородной серой, но они были преодолены путём герметизации скважины, что привело к повышению температуры. Поскольку температура плавления серы оказалась ниже температуры гидротерм, то она расплавлялась и удалялась. Слежение за сейсмичностью и опусканием эксплуатационного участка показали, что ни сейсмичные события, ни деформация на геотермальном поле Гейзерс не

происходили. Геотермальные системы Кальдеры Воллес и Империял Вэлли в своих недрах имеют преимущественно жидкие гидротермы. 100 млн американских галлонов было закачено в течение года в первой системе и 126 млн американских галлонов в течение 1964-65 г.г. во втором случае. Гидростатическое давление на оголовках скважин в Империял Вэлли было достаточно высоким. В связи с этим закачка производилась насосами, но в дальнейшем в результате охлаждения гидротерм произошло понижение гидростатического уровня гидротерм в реинжекционных скважинах. Закачка производилась сливом за счёт силы тяжести гидротерм. Скорость закачки в Империял Вэлли составила 600 американских галлонов в минуту. Также успешно реинжекция проводилась на Лардерелло в Италии.

Следует отметить, что, как показала практика, использование реинжекции в качестве способа, который обеспечивает непротиворечивость применения геотермальных ресурсов для целей энергетики, требует его совершенствование и индивидуальные решения при проектировании конкретного объекта на геотермальном месторождении. Ярким примером этого является образование наростов кремнезёма на стенках реинжекционных скважин. В некоторых случаях скорость кальматации зон трещиноватости и зарастание обсадочных труб конструкции скважин может быть достаточно высокой в результате чего происходит быстрое снижение скорости закачки отработанных гидротерм, пересыщенных по отношению к аморфному кремнезёму. Это приводит к удорожанию процесса ликвидации отработанных гидротерм. В настоящее время, чтобы избежать зарастание конструкций скважин кремнезёмом, рекомендуется закачивать отработанные гидротермы с температурой не ниже 140-150⁰С.

Важным моментом в разработке геотермальных проектов является определение оптимальных расстояний между продуктивными и реинжекционными скважинами. Кроме того, необходимо исследовать проблему оптимально выбора глубины бурения реинжекционных скважин. Предполагается, что при большей глубине этих скважин можно будет достигать уровней, где находятся сухие горные породы. Закачка остывших отработанных гидротерм на эти уровни геотермальных систем может привести к возникновению глубокой их циркуляции и извлечению тепла из остывающих магматических очагов (интрузий). Несомненно, это перспективный путь освоения геотермальных ресурсов глубоких недр геотермально-магматических систем (см. гл I).

4.3. Рекультивация.

В последние годы развитие геотермальной энергетики с мощным прессом общественности, внимание которых сосредоточено на экологических проблемах. Как уже отмечалось, в первые годы развития геотермальной энергетики, она считалась экологически непротиворечивой, в связи с чем, мероприятия по охране окружающей среды практически не производились. Однако реальная ситуация оказалась сложнее. В настоящее время производятся большие работы по изучению геотермальных технологий, которые не только минимизировали бы ущерб, наносимый этой деятельностью, но и создавали бы дополнительные условия для благоустройства геотермальных полей, включённых в систему социально-экономического развития стран, осваивающих этот вид энергии.

Реализация геотермальных проектов повлекла за собой интенсивное развитие инфраструктуры этих районов. Хорошо развитая сеть дорог, строительство гостиниц, возможность использования гидротерм для отдыха, укрепление здоровья, энергообеспечения, улучшения структуры питания за счёт

круглогодичного выращивания овощей – всё это позволяет благоустроить ранее мало посещаемые, из-за труднодоступности геотермальные районы, районы активной вулканической деятельности для массового туризма.

Дороги, проложенные геологоразведчиками и строителями, позволяют сегодня посещать многочисленным любителям путешествий и жителям Петропавловска и Елизово, ранее недоступные вулканы Мутновский, Горелый и, естественно ожидать, что в недалёком будущем этот поток людей будет постоянно нарастать.

На наш взгляд, совершенно очевидно, что уже сейчас требуется проведение соответствующих мероприятий по благоустройству района развития геотермальной энергетики в окрестностях вулканов Мутновского, Горелого и Жировского. Это должно быть заботой местных властей, которым необходимо иметь проекты по благоустройству дорог, мест отдыха, развлечений и многих других действий, которые трудно предусмотреть в нашем коротком обзоре.

Однако нам представляется целесообразным учесть ряд особенностей освоения геотермальных ресурсов и при составлении программ и разработке проектов по благоустройству геотермальных районов Камчатки, а, в особенности, вблизи городов Петропавловска и Елизово и включить в программу ряда мероприятий. Так, например, при бурении геологоразведочных и эксплуатационных скважин по геолого-гидрогеологическим, или по техническим причинам может выбрасываться пароводяная смесь в гейзерном режиме со всеми признаками, характерными для природных гейзеров (Паужетские горячие воды, 1965). Как правило, такие термы имеют в своём химическом составе растворённый кремнезём. Когда гидротермы из фонтанов охлаждаются и в виде капель, содержащих пересыщенные концентрации кремнекислоты в виде суспензий, падают на окружающие породы, то этот кремнезём отлагается в виде корочек аморфного кремнезёма, который называют гейзеритом. Во время стадии самоизлива гидротерм из устья скважин образуются ручьи, в которых при быстром охлаждении отлагаются гейзериты. Таким образом, специально оформленные фонтанирующие в гейзерном или пульсирующем режиме скважины могут имитировать природные гейзеры, которые являются весьма редким экзотическим феноменом. Создание искусственной “долины Гейзеров” на Мутновском геотермальном поле может привлечь большие группы путешественников. Как правило, такие места массовых посещений, организованные с соответствующим комплексом услуг, являются доходным бизнесом. Привлечение дополнительного финансирования может в значительной степени изменить состояние геотермальных полей Камчатки, которые в настоящее время посещаются неорганизованными (дикими) туристами и результаты таких посещений весьма трагично сказываются на состоянии уникальных памятников природы, связанных с геотермальными полями.

Так, например, в таком беспризорном состоянии находится Больше Банные источники в верховьях реки Банной. Уникальность их очевидна и состоит она в том, что гидротермы этой системы буквально пересыщены углекислым газом. Высокие концентрации углекислоты в этих термах позволяют удерживать в растворённом состоянии, даже при высоких температурах в недрах системы кальций. Но при вскрытии этих глубинных

высокотемпературных растворов, при энергичной дегазации CO_2 , происходит интенсивное отложение минерала кальцита. Во время бурения скважин и выпуска паро-газовой водяной смеси из них ствол скважины быстро (в течение месяца) зарастает отложениями кальцита. В связи с этим, использование таких гидротерм для энергетических целей значительно удорожает произведённую электрическую и тепловую энергию. Однако в Н.Зеландии, на широко известном геотермальном поле Вайотапу, такие же по составу гидротермы образуют уникальные по своей красоте и экзотике поверхностные термопроявления. В результате гидротермального взрыва, который был связан с зарастанием минералами дренирующей трещины, что привело к накоплению тепловой энергии в этом месте и последующему парогазообразованию, образовалась глубокая воронка, расширенная к поверхности. Она заполнена гидротермами с температурой 73°C (озеро Шампанское, фото 4). Поскольку эта температура гидротерм не достигает точки кипения при атмосферном давлении, то этот источник не превратился в гейзер. Однако выделение углекислого газа происходит, что приводит к появлению массы пузырьков, которые поднимаются из глубины воронкообразного грифона и вода, как бы вскипает, аналогично газированным напиткам. При этом происходят процессы отложения кальцита и кремнезёма. Кремнекислота в этих термах находится в значительной части в виде коллоидной суспензии, которая опалесцирует в воде и при отложении на гейзеритах, что придаёт специфическую игру цвета воды и отложений кремнезёма. Вытекающий ручей гидротерм из озера Шампанского проходит по руслу, устланному травертинами в виде характерных террас, на которых образуются ванны, заполненные углекислыми термами. Последние широко используются в бальнеологии. По нашему мнению, на Больше-Банных источниках можно создать аналогичные искусственные поверхностные термопроявления при относительно небольших затратах.

Одним из важнейших способов рекультивации и окультуривания является создание систем бассейнов, ванн на базе отработанных гидротерм, которые имеют бальнеологические свойства.

Важнейшая роль обустройства мест реализации геотермальных проектов на Камчатке заключается в том, что такие мероприятия, несомненно, ослабят прессинг массового туризма на особо охраняемые уникалы природы, каковыми являются Долина Гейзеров и Кальдера Узон.

4.4. Формирование эталонных, особо охраняемых природных геотермальных ландшафтов и геотермальных систем.

По-видимому, нет необходимости доказывать уникальность таких объектов как Долина Гейзеров, Кальдера Узон, вулканический массив Большого Семячика, Карымской геотермально-магматической системы, в которую входит Кальдера Академии Наук. Как известно, эти объекты находятся в Кроноцком заповеднике и строго охраняются. Никаких работ по освоению их геотермальных ресурсов не производится и не планируется в будущем. Многие страны, в которых геотермальные поля включены в национальные парки, такие как, например, Йеллоустонская геотермальная система в США, Лос Азуфрес в Мексике. Многие геотермальные системы Японии также располагаются на территориях национальных парков. Однако прессинг энергетических проблем в настоящее время оказывает сильное влияние и уже на некоторых геотермальных системах проводится извлечение геотермальных ресурсов. На Лос Азуфрес в Мексике, как уже выше описывалось, построена сеть малых геотермальных электростанций (турбо-энергоблоки по 5-7 МВт) общей мощностью 91 МВт. Следует отметить, что как бы эти места аккуратно не эксплуатировались, избежать нарушений в функционировании геотермальных систем,

поверхностных термопроявлений, в специфическом ландшафте геотермальных и гидротермально-магматических систем не удаётся.

Конечно, аргументы сторонников промышленного освоения геотермальных ресурсов бьют по самым уязвимым местам в сознании людей. Стремление человечества к прогрессу неистребима сущность людей. Они обречены на такую деятельность, но наряду с этим у них есть интуитивное чувство самосохранения, которое связано с окружающей средой. Поэтому авторы полагают, что одной из острых экологических проблем в связи с развитием геотермальной энергетики на Камчатке является формирование эталонных, особо охраняемых геотермальных ландшафтов и геотермальных систем. Предполагается, что использование геотермальных ресурсов Камчатки наберёт мощност, в том числе и экспансия их промышленного освоения. Как ясно из настоящей работы, это будет приводить к изменению режимов геотермальных систем. Поскольку на деятельность этих систем оказывают влияние и природные процессы (землетрясения, извержения вулканов, климатические и т. д.), то появится необходимость выделять влияние антропогенного фактора. Проведение мониторинга как эталонных, так и на эксплуатируемых геотермальных системах, будет наиболее точно определять фактические флуктуации режимов функционирования тех и других геотермальных систем.

Нельзя исключить и особое влияние на человеческую психику дикой природы. Как отметил, всемирно известный учёный – физик, лауреат Нобелевской премии академик Пётр Леонидович Капица, будучи в сентябре 1972 года в Долине Гейзеров на Камчатке, что именно первозданная природа делает человека добрым.

4.5 Строительство малых геотермальных электростанций.

Опыт первых лет освоения геотермальных ресурсов учит, что строительство больших геотермальных электростанций, для которых необходимо создавать сеть протяжённых трубопроводов, занимает значительные площади (фото 5). Обустройство оголовков продуктивных скважин также связано с большим объёмом земляных работ, которые дополняются строительством дорожной сети на промысловой площадке. Всё это не только удорожает киловатт установленной мощности, но и создаёт экологические проблемы.

В Мексике на геотермальной системе Лос Азуфрес применён способ освоения геотермальных ресурсов строительством малых ГеоТЭС, мощность которых измеряется первыми (~5) мегаваттами. Как правило, на одной или двух, рядом расположенных продуктивных скважинах монтируется турбогенераторный блок комнатной конструкции, который сопряжён непосредственно с сепаратором, который разделяет пароводяную смесь из скважины на пар и воду. Вода по дренажной системе закачивается в ближайшую реинжекционную скважину, а отработанный пар выбрасывается в атмосферу. Производимая электроэнергия подаётся на повышающий трансформатор, после которого по линиям высоковольтной передачи подаётся в общую сеть.

В эксперименте малых ГеоТЭС участвуют 7 турбо-энергоблоков общей мощностью 35 МВт. Кроме того, на этом же геотермальном поле

эксплуатируется два блока с бинарным циклом по 1.5МВт каждый и один блок мощностью 50МВт с конденсационной башней.

Малые ГеоТЭС построены в границах национального парка, в котором необходимо было сохранять сосновый лес. Несомненно, в какой-то степени геотермальный проект, в котором использовался способ освоения геотермальных ресурсов малых ГеоТЭС, оправдался. Однако были опасения возможности загрязнения атмосферы неконденсируемыми газами, таких как CO_2 и H_2S . Комиссия Федерал Электрисидат в 1994 году начала производить мониторинговые исследования на Лос Азуфрес. Было определено, что концентрации в паровой фазе составили CO_2 340кг/час /МВт, и H_2S – 3 кг/час/МВт. Относительное выделение этих газов турбоэнергетическим блоком в 50 МВт, у которого пар поступал в градирню, было очень незначительным из-за высокой растворимости углекислого газа и сероводорода в конденсате.

Ежедневное опробывание дождевой воды в Лос Азуфрес проводилось с конца мая 1995 года до конца сентября 1995 года. Было отобрано 350 проб в восьми местах. Концентрации SO_4^{-2} , NO_3^- и Cl^- составили менее 5 ppm, кроме города Морелья в июне. Было установлено по изотопным анализам серы, что сульфаты в дождевую воду г.г. Морелья и Гвадалахара поступают из двух источников, но они не связаны с геотермальной системой ЛосАзуфрес. В результате анализа данных проб и возможных источников загрязнений был сделан вывод, что основные их выбросы связаны с промышленными регионами.

Таким образом, можно считать, что должен быть гибкий подход к реализации проектов развития геотермальной энергетики. Местные условия должны несомненно учитываться при проработке экологических проблем

4.6 Формирование системы рекреационных зон.

Обычно места расположения геотермальных систем являются превосходными местами массового отдыха и, как правило, хорошо обустроенные с развитым гостиничным комплексом, привлекают массового туриста.

Таким примером может служить город Одовара в Японии, массовый туризм которого базируется на геотермальной системе Хаконе. По существу этот город является местом паломничества мирового массового туризма и довольно доходного. Таким местом у нас на Камчатке могут быть долина реки Паратунки и долина реки Озерной и Паужетки. Конечно, главной задачей развития этих зон отдыха является развитая система дорог. Для этой цели необходимо построить систему дорог, которая имела бы форму замкнутых маршрутов.

Так, например, на южной Камчатке могло бы быть два таких маршрутных кольца: Большое маршрутное кольцо (Долина р. Паратунки –вулканы Мутновской группы – вулкан Асача – Ходутка -Ходуткинские источники) – кальдера Ксудач – Курильское озеро (Паужетско-Кошелевский район) – западное побережье Камчатки с выходом на Усть-Большерецк – Петропавловск-Камчатский; Малое маршрутное кольцо (Долина реки Паратунки -Мутновские вулканы - Толмачёв Дол - каскад Толмачёвских ГЭС - Большебанные источники – Петропавловск-Камчатский).

Обустройство необходимо сочетать со строительством спортивных сооружений, связанных с зимними видами отдыха (горные лыжи и т.д.)

Заключение

Экологические проблемы развития геотермальной энергетики Камчатки находятся в русле проблем, связанных с охраной окружающей среды при реализации программ освоения геотермальных ресурсов. Как было показано в нашей работе, наибольшим опытом в этой области обладают такие страны как Италия, США, Япония, Филиппины, Индонезия и Мексика.

На Камчатке, в настоящее время нет геотермальной системы, которая эксплуатировалась бы на полную мощность её ресурсов и поэтому нам приходится опираться на опыт эксплуатации геотермальных систем таких как Вайракейская и Охааки-Бродлэндс в Новой Зеландии, Лардерелло в Италии, Гейзерная в США и других. Результаты многолетней работы геотермальных электростанций на этих геотермальных полях показали, что они получают тепловую энергию с больших глубин. Корни геотермальных систем уходят в глубокие недра земной коры, а главный источник теплового питания располагается в мантии. На путях дренирования мантийная тепловая энергия претерпевает разного рода преобразования в связи с изменением условий теплопередачи, но, главным способом теплопередачи является теплоперенос. Этот вид теплопередачи реализуется или газо-водным или газо-магматическим теплоносителями. В тех случаях, когда происходит смена теплоносителя или способа теплопередачи, происходит накопление геотермальной энергии на разных уровнях земной коры или в виде резервуаров тепловой энергии, которые представляют собой водоносные комплексы, магматические очаги (резервуары), нагретые горные породы (интрузии и вмещающие их сухие горные породы), или образуются метаморфические минеральные комплексы, способные «самоокисляться» (самовозгораться).

При поступлении последующих порций глубинного высокотемпературного теплоносителя в зоны аккумуляции в земной коре происходит мобилизация этой запасённой энергии и активизация процессов теплопереноса на более высокие уровни земной коры вплоть до выноса больших масс геотермальной энергии в гидросферу и атмосферу.

Процессы теплопереноса в областях современного вулканизма, к каковым относится Камчатка, настолько энергонасыщены, что истощение ресурсов тепловой энергии геотермальным системам в результате их эксплуатации не угрожает. Влияние отбора геотермальных ресурсов в этом случае в целом очень незначителен. Основное направление геотермальной энергетики в настоящее время ещё только определяется и его разработка, вероятнее всего, должна реализоваться в опробовании различных технологических решений извлечения геотермального тепла. Представляется целесообразным совершенствовать технологические системы с глубоким использованием природных теплоносителей, как показано диаграммой Линдала. Реинжекция на данном этапе возможно является наиболее дешёвым и энергосберегающим способом извлечения глубинного тепла. Одновременно она решает большинство проблем, связанных с охраной окружающей среды.

Авторы полагают, что решение экологических проблем, связанных с развитием геотермальной энергетики Камчатки, находится в начальной стадии сбора и анализа материалов. Представляемое исследование является в некотором смысле пионерской работой, которая должна получить надлежащее развитие в будущем. Мы убеждены, что освоение геотермальных ресурсов Камчатки должно быть поставлено на плановую основу и может регулироваться развитым региональным законодательством.

Литература

Аверьев В.В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки. Тр. Лабор. Вулканол. Ан СССР. 1961. Вып. 19. С. 80-98.

Аверьев В.В. Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью. Современный вулканизм. М., Наука, 1966 С. 118-128.

Аверьев В.В., Белоусов В.И., Карпов Г.А. и др. Паужетские горячие воды на Камчатке. 1965. 208 с.

Белоусов В.И. О роли геологических факторов в процессе становления и деятельности гидротермальных систем в областях современного вулканизма. Вулканизм и геохимия его продуктов М.: Наука, 1967а . С. 42-50.

Белоусов В.И. Роль геолого-структурных факторов в формировании и деятельности гидротермальных систем в современных вулканических областях. Автореф. ... канд. Геол. - мин. наук. г. Петропавловск-Камчатский, 1967 б. 22с.

Белоусов В.И. К вопросу об образовании спекшихся туфов, расположенных в пределах гидротермальных систем. Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С.270-276.

Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с.

Белоусов В. И., Сугробов В.М., Геологическая и гидрогеологическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных районов и гидротермальных систем // 1976. Дальневост. кн. Изд. "Гидротермальные системы Камчатки" 2.0п.л.

Белоусов В.И., Сугробов В.М. О соотношении вулканизма и гидротермальной деятельности в гидротермальных районах Камчатки. Вулканизм островных дуг. М.: 1977. С.110-115.

Белоусов В.И., Кожемяка Н.Н., Огородов Н.В., Сугробов В.М. Кислый вулканизм и гидротермальная активность в Паужетском геотермальном районе. Тезисы докладов ХУ Генеральной ассамблеи МГГС. М.Наука, 1971. С.31-32

Белоусов В. И. , Сугробов В. М., Сугрובה Н. Г. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С.23-57.

Белоусов В.И., Гриб Е. Н., Леонов В. Л. геологические позиции гидротермальных систем долины Гейзеров и кальдеры Узон. Вулканол. и сейсмол. 1983. № 1. С. 65-79.

Белоусов В.И., Рычагов С.Н., Белоусова С.П., Кузьмин Ю.Д. Гидротермально-магматические (вулкано-гидротермальные) конвективные системы, комплексная модель: этапы развития, геолого-гидрогеологическая структура, механизмы функционирования. Минерало-рудобразование в вулканогенно-гидротермальных системах островных дуг: от модели к эксплуатации. Материалы Российско-Японского полевого семинара. Расширенные тезисы. П.-Камчатский, Россия, 25 июня-2 июля 1998 г. С.189-194.

Белоусов В.И., В.И. ,Рычагов С.Н., Кузьмин Ю.Д., Слопцов И.Б., Делемень И.Ф., Кирюхин А.В., Пушкарёв В.Г., Фазлуллин С.М., Белоусова С.П., Шульга О.В., Кузьмин Д.Ю. Адсорбционные свойства гидротермальных систем в областях современного вулканизма и перспектива их использования с целью консервации радионуклидов и других промышленных отходов. Экологическая химия. Т. 8, вып.4, 1999. С. 262-277.

Богданов Ю.А. Гидротермальные рудопроявления рифт Срединно-атлантического хребта. «Научный мир» М.1997, 167с.

Вакин Е.А. Гидрогеология современных вулканических структур и гидротермальных систем юго-восточной Камчатки. Автореф. Канд. дис. Москва. 1968.22 с.

Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района. В кн. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. Дальневост. Кн. Изд-во.1976.С. 85-114.

Василевский М. М. Прогнозная оценка рудоносных вулканогенных формаций. М. Недра. 1977. 296 с.

Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В., Бартенева А.М. основные режимы самовоспламенения и условия их реализации в горючих газовых смесях. Физика горения и взрыва, 1997, 33(2), 3-10.

Грейтон А.К. Предположение о вулканическом тепле. М., ИЛ. 1949, 166с.

Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Игнимбриты кальдеры Большой Семячик (Камчатка): состав, строение, условия образования. Вулканол. и сейсмол. 1992. № 5-6. С.34-50.

Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Игнимбриты Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии, Камчатка: сопоставление разрезов, состав, условия образования. Вул. сейсм., 1993, 5, 15-33.

Егоров О.Н. Центры эндогенной активности (вулканические системы) М. Наука. 1984. 166 с.

Иванов Б.В. 1990

Ковалев Г.Н. Метод измерения рассредоточенного выноса тепла на термальных полях. Бюл. вулканол. станций. 1966. № 42. С. 17-21.

Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М. «Наука», 1989, 104с.

Макдональд Г. Вулканы. М.: Мир. 431 с, 1975

Манухин Ю. Ф., Ворожейкина Л.А. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия её формирования. В кн. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. 1976. С. 143-178.

Некрасов Б.В. Основы общей химии. Т.1, М. «Химия», 1973, 656с.

Павлова И.Г. Медно-порфировые месторождения (закономерности размещения и критерии прогнозирования). Ленинград. Недра. 1978. 278 с.

Паужетские горячие воды, 1965.

Пилипенко Г.Ф. Гидрохимическая аномалия Узонского термального поля на Камчатке. В кн. Вулканизм и глубины Земли. М. Наука. 1971. С. 229-239.

Святловский А.Е. Очерки истории четвертичного вулканизма и тектоники Камчатки. М. Наука. 1967. 219 с.

Сережников А.И., Зимин В.М. Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на современную гидротермальную деятельность. В кн. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. 1976. С. 115-142.

Сидоров С.С. Геохимия гидротерм Курильской вулканической дуги. Автореф. Канд. дисс. Петропавловск-Камчатский. 1965. 22 с.

Сугробов В. М. Паужетские гидротермы Камчатки как пример высокотемпературной водонапорной системы. В кн. Гидрогеотермические условия верхних частей земной коры. М. Наука. 1964. С. 72-86.

Сугробов В.М. Геотермальные ресурсы Камчатки, классификация и прогнозная оценка. В кн. Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М. Наука. 1979. С. 26-35.

Трухина Ю.П., Петровой В.В. некоторые закономерности современного гидротермального процесса. М. Наука. 1976. 173 с.

Трухин Ю.П., Шувалов Р.А. Окислительно-восстановительные реакции, процессы газогенерации и вторичный разогрев на шлаковых конусах. Кн. Большое трещинное Толбачинское извержение. М. «Наука», 1984, 356-372

Туговик Г.И. Флюидно-эксплозивные структуры и их рудоносность. М. «Наука», 1984, 193с.

Хворова И.В. Кремненакопление в геосинклинальных областях прошлого. В кн. Осадкообразование и полезные ископаемые вулканических областей прошлого. М. Наука. 1968

Эйтель В. Физическая химия силикатов. ИЛ, М. 1962, 1055с, 1962.

Эллис А. Количественная интерпретация геохимических данных гидротермальных систем. В кн. Изучение и использование геотермических ресурсов. М. Мир. 1975. С. 272-298.

Эрлих Э. Н. Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца. М. Наука. 1973. 241 с.

- Armstead H. C. H. Geothermal power for non-base load purposes. U.N. Symp. Development Utilization Geothermal Resources. Pisa. 1970.
- Armstead H. C. H. Summary of section VIII – Electricity Production, Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, USERDAL& USGS, Washington, D.C.1975. P. ciii-cx.
- Bebii J., Schoonen M.A.A. Pyrite and phosphate in anoxia and an origin-of-life hypothesis. *Earth, Plan. Sc. Letters*, 171(1). 1999, 1-5
- Behar F., Vandenbrovne M., Teerman S.C., Hatcher P.G., Leblond C., Lerat O. Experimental simulation of gas generation from coals and a marine kerogen. *J. Chem. Geol.* 1995. Vol.126 (3-4). P.247-260.
- Belousov V.I, Geothermal structure of the hydrothermal systems of Kamtchatka. *Bull. volcanol.* 1967.XXX. P. 73-83.
- Bischoff G. L., Dickson F.W. Seawater-basalt interaction at 200°C and 500 bars: implication for the origin of sea-floor heavy metal deposits and regulation of seawater chemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975. 25. P. 385-397.
- Bodvarsson G. Utilisation of Geothermal Energy for Heating Purposes and combined schemes involving power generation, heating and for by-products, Proceedings of Conference on New Sources of Energy, Rom., 1961. 1964. Vol. 3, United Nations, № 4.P. 429-436.
- Botz R., Winckler., Bayer R., Schmitt M., Garbe-Schumberg D., Stoffers P., Kristjansson J.K., Origin the trace gases in submarine hydrothermal vents of the Kolbeinsey Ridge, north Iceland/ *Earth, Planetary Sc. Letters.*, 171(1), 1999, P. 83-93.
- Burgassi R. Prospection des champs géothermiques et recherches nécessaires à leur valorisation exécutés dans les diverses régions d'haline. U.N. Conf. New Sources Energy, Rome. 1961. G/65. 21p.1961;
- Casadevall T.J. Pre-eruption hydrothermal systems at Pinatubo, Philippines and El Chichon, Mexico: evidence for degassing magmas beneath dormant volcanoes. Japan-US cooperative science program magmatic contributions to hydrothermal systems 10-16 nov. 1991.P. 25-30.
- Corbett G. J., Leach T.M. Southwest Pacific Rim Gold Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization. Special Publication. 1998. №.6
- Christopher H., Armstead H. Summary of Section V Environment Factors and Waste Disposal. Second United Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. Washington.1976. Vol. I .P.xxxvii-xiv.
- Dawson G. B. The nature and assessment of heat flow from hydrothermal areas. *N. Z. J. Geol. and Geophys.* 1964. V.7. P. 155-171.
- Dawson G. B., Fisher R.G. Diurnal and seasonal ground temperature variations of Wairakei. *N. Z.J. Geol. and Geophys.* 1964. V.7. P.144-154.
- Di Pippo R. Geothermal power Plant: Worldwide Survey as of July 1981, Transactions of the Geoth. Res. Council, Davis, CA. 1981. P. 5-8.
- Di Pippo R. Electric Power, The State of the World-1985. Transaction of the 1985 international Symposium on Geoth. Energy, International volume, Geoth. Res. Council, Davis, CA.1985. P.3-18.
- Di Pippo R Geothermal Power Systems, Section 8.2 in Standard Handbook of Power Plant Engineering, 2nd edition. T.C. Elliott, K. Chen and R.C. Swanekamp, Editors, Macgraw-Hill. Inc., New York, NY.1998. P. 8.27-8.60

Facca G. The Status of World Geothermal Development, Proceedings of the United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. Vol. 1. Istituto Internazionale per Ricerca Geotermiche, Pisa, Italy. 1970, P.8-23.

Facca G., Tonani F. Natural steam geology and geochemistry. U.N. Conf. New Sources Energy, Rome.1961. G/67. 17p.

Facca G., Tonani F. Theory and technology of a geothermal field. 13th Gen. Assembly IUGG, California, Berkeley. 1963. 5p.

Facca G., Tonani F. The Self-sealing. Geothermal Field. Bull. Volcanol. 1967. V. XXX. P.271-273.

Giggenbach W. F. Variation in the Carbon, Sulfur and Chlorine contents of Volcanic Gas discharges from White Island, New Zealand. Bull. Volc. 1976. Vol.39. № 1. P.15-27.

Giggenbach W. F. Redox processes accompanying the deposition of minerals in volcanic-magmatic-hydrothermal systems. Rept. Geol. Survey. Japan. 1991. № 277. P.91-96.

Goddard W.B., Goddard C. B. Energy Fuel Sources and Their Contribution to Recent Global Air Pollution Trends, Transactions. Geothermal Resources Council. 1990. Vol. 14, Davis, CA. P.643-649.

Grande L.J. Geothermal steam for power in New Zealand. Wellington. 1955. 146 p.

Grindley G.W. Geology of New Zealand geothermal steam fields. U.N. Conf. New Sources Energy, Rome. 1961. 21 p.

Gudmundsson J.S. Geothermal electric power in Iceland: development in perspective. Energy. 1983. 8. P.491-513.

Gudmundsson J.S. The elements of direct uses Geothermics. 1988. Vol. 17. №10 1. P.119-136.

Gudmundsson J.S., Lund J.W. Direct uses of earth heat. Energy Res.1985.9. P.345-375.

Harper G.D., Bowman J.R., Kuhus R. A field, chemical and stable isotope study of subseafloor metamorphism of the Josephine ophiolite, California-Oregon. J.Geoph. Res. 1988. V.93.№B5.Pp.4625-4656.

Hayashida T. Cost analysis on the geothermal power. U.N. Symp. Develop. Utiliz. Geoth. Res. Pisa. 1970.

Hayashida T., Ezima Y. Development of Otake geothermal field. U.N. Symp. Development Util. Geoth. Res. Pisa. 1970.

Healy J. Volcanic mechanism in the Taupo volcanic Zone, New Zealand. N.Z.J. Geol. and Geophys. 1964. №1. P.6-23.

Healy J. Trends in New Zealand volcanology. N.Z.J. and Geophys. 1965. V.8. № 6 P. 1127-1138.

Hedenquist J. W., Houghton B. F. Epithermal gold mineralisation and its volcanic environments. Taupo volcanic zone, New Zealand, 15-21 november, 1987. 395 p.

Hochstein M.P. Crustal heat transfer in the Taupo Volcanic Zone (New Zealand): comparison with other volcanic arcs and explanatory heat source models. J. Vol. Geoth. Res. 1995, 68(1-3) 117-151.

- Houghton B.F., Nairn I.A. Complex interaction between hydrothermal activity and basic andesitic magma, White Island volcano, New Zealand 1976-1991 Magmatic Contributions to hydrothermal systems. Extended abstracts. 10-16 nov. 1991, Kagoshima, Ebina, Japan. 63-66.
- Humphris S., Zierenberg R., Mullineaux L., Thomson R. (eds) Seafloor hydrothermal systems: physical, chemical, biological interactions. Geoph. Monograph 91. Am. Geoph. Union, Washington. D.C. 1995
- Huttrer G.W. Geothermal Electric Power – A 1990 World Status Update, Bull. Geothermal Resources Council. 1990. Vol.19, № 7 (july/august), Davis, CA. P. 175-187.
- Huttrer G.W. The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000. Proceedings of the World Geothermal Congress, 2000. Japan. 2000.
- James R. The economics of the small geothermal power station. U.N. Symp. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa. 1970, a.
- James R. Power station strategy. U.N. Symp. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa. 1970, b.
- Janecky D.R., Seyfried W.F. Formation of massive sulfide deposits on oceanic ridge crests: incremental reaction model for mixing between hydrothermal solutions and seawater. Geochim. Cosmochim. 1984. Acta, 48. P.2723-2738.
- Kaufman A. The economics of geothermal power in United States. U.N. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa. 1970.
- Kononov B.I. Utilisation of Geothermal Energy in Russia. Geothermics. 1992. Vol.21. № 5/6. P.617-622.
- Kononov V. I., Kozlov B.m., Dyadkin Y. D. The present state of Geothermal energy utilization in Russia. Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, 1995. Vol. P.309-314.
- Kononov V.I., Polyak B., Kozlov B. Geothermal development in Russia: country update Report 1995-1999. Proceedings world Geoth. Congress.2000. P.261-266.
- Leardini T. Economic de l'énergie géothermique U.N. Symp. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa. 1970.
- Lejeune J.M., Varet J. Low enthalpy geothermal development in France: the situation in early 1982. Trans. Geoth. Res. Council. 1981. 5 P. 531-534.
- Lindal B. Industrial and other applications of geothermal energy. In Geothermal Energy (Edited by Armstead. H.C.H. UNESCO. Paris. 1973. P.135-148.
- McCollom T. M. Geochemical constraints on primary productivity in submarine hydrothermal vent plumes. J. Deep Sea Res. Part 1: Oceanographic Res. 2000, 47(1), 85-101.
- McMillan. Economics of The Geysers geothermal field, California. U.N. Symp. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa.1970.
- McNitt J.R. Geology of the geysers thermal area. California. U.N. Conf. New. Sources Energy. Rome. 1961.G/63. 12 p.
- Muffler L.J.P. The geological setting of coupled igneous –hydrothermal systems: A geothermal perspective. Japan. U.S. Seminars on Magmatic Contribution to Hydrothermal Systems. Kagoshima. Ebino. Japan. Extended Abs. 1991. 10-16. Nov. P.95-98.
- Nakamura S. Economics of geothermal electric power generation at Matsukawa. U.N. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa.1970.

Ohsawa S., Yusa Y., Oue K., Amita K. Entrainment of atmospheric air into the volcanic system during the 1995 phreatic eruption of Kujū volcano, Japan/ J. Vol. Geoth. Res. 2000, 96, 33-43

Ragnars K., Saemudsson K., Benediktsson S., Einarsson S. Development of the Namafjall area northern Iceland. U.N. Symp. Dev. Util. Geoth. Res. Pisa. 1970.

Reistad G.M. Potential for nonelectrical application of geothermal energy and their place in national economy. Proc. Scand U.N. Symp. Dev. Use Geoth. Res. San Francisco. CA. 1975. P. 2117-2126.

Sato T. Behaviours of oreforming solutions in seawater. Mining Geology, 1972, 22, 31-42

Seyfried W.E., Bischoff G. L. Experimental seawater-basalt interaction of 300°C, 500 bars, chemical exchange, secondary mineral formation and implication for the transport of heavy metals. Geochim. et Cosmochim. 1981. Acta. 45. P.135-149.

Smith J.H. Harnessing of Geothermal Electricity Production, Proceedings of the Conference on New Sources of Energy, Rome, 1961. United. Nations. 1964.Vol.3. № 4. P.3-26.

Sparks R.S.J., Wilson L., Hulme G. Theoretical modeling of the generation, movement, and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. J. Geoph. Res., 1978, 83(B4), 1727-1739.

Sugrobov V. M. Utilization of geothermal resources of Kamchatka prognostic assesment and future development // Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, 1995. 1995. Vol.3 P. 1549-1554.

Thorseth I.H., Torsvik T., Furnes H., Muehlenbachs K. Microbes play an important role in the alteration of oceanic crust. J. Chemical Geology, 1995, 126(2), 137-146

Vakin E.A., Polak B.G. Sugrobov V. M. Erlich E.N. Belousov V.I., Pilipenko G.F. Recent hydrothermal systems of Kamchatka. Geothermics CNR Pisa, Italiy. 1971.P. 1116-1133.

Wolff J.A., Worner G., Blake S. Gradients in physical parameters in zoned felsic magma bodies: implications for evolution and eruptive withdrawal. J. Vol. Geoth. Res., 1990, 43, 37-55