

О РОЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ПРОЦЕССЕ СТАНОВЛЕНИЯ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ В ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Понятие «геологическое строение гидротермальных систем» охватывает широкий круг вопросов. По мнению автора, главными из них являются: водовмещающие породы и водоупоры; тектоника участков; вторичное минералообразование; фациальные переходы.

Фактический материал, полученный при исследовании районов современных термопроявлений в СССР и за рубежом, позволяет сделать некоторые обобщения по отдельным факторам, составляющим основу геологических структур гидротермальных систем в областях современного вулканизма.

Водовмещающие породы и водоупоры

Фильтрационные свойства водовмещающих пород являются основными характеристиками, определяющими динамику гидрогеологических систем. Эти свойства обусловлены особенностями литологических структур, цементацией и степенью трещиноватости пород.

В категорию водовмещающих входят как осадочные, так и изверженные горные породы, различающиеся между собой характером и объемом свободного пространства.

Породы, обладающие низкими коэффициентами проницаемости даже для термальных вод, относятся к разряду водоупоров.

По строению водовмещающих толщ изученные современные высокотемпературные гидротермальные системы можно подразделить на два типа: Паужетско-Вайракейский и Лардерелло.

Паужетско-Вайракейский тип. Водовмещающие породы гидротермальных систем этого типа представлены псефитовыми туфами дацитового или андезитового составов. Обычно они слагают горизонты, которые в пределах толщ чередуются с горизонтами алевропелитовых или алевропсаммитовых туфов. Общая мощность толщ измеряется несколькими сотнями метров.

Псефитовые туфы, как правило, характеризуются высокой пористостью, величина которой может быть оценена из объемного веса скелета грунта. Последний для образцов, взятых из Паужетской свиты, в среднем составляет около $2,0 \text{ г/см}^3$. Цементация псефитовых туфов очень слабая. Часто это лишь слабоуплотненные породы. Однако активная пористость их крайне низка. Так, например, коэффициенты проницаемости паужетских псефитовых туфов колеблются в пределах 0,5—1,0 миллиарда¹.

¹ Коэффициенты проницаемости определялись в экспериментальной лаборатории Института вулканологии СО АН СССР.

Для водоносных толщ этого типа характерна слабая трещиноватость. На 1 пог. м разреза обычно приходится не более двух трещин. Чаще всего — это трещины скола с ровными краями. Исключение составляют участки интенсивных зон дроблений. Сеть крупных разрывных нарушений тоже разрежена. Так, в очаге разгрузки Паужетской гидротермальной системы, на протяжении 1,5 км, отмечаются три зоны нарушений. Каждая из зон имеет несколько разломов, расположенных в непосредственной близости один от другого. Подобная же картина наблюдается в строении Вайракейской гидротермальной системы.

В зонах дроблений скорости фильтрации термальных вод возрастают в несколько раз, что доказывается резким увеличением дебитов скважин, вскрывших зоны нарушений. Так, например, дебит скважин, не вскрывших зоны дроблений на Паужетке, составляет несколько килограммов в секунду, в то время как скважины, вскрывшие зоны нарушений, имеют расходы от 20 до 40 кг/сек. Коэффициенты проницаемости псефитовых туфов, вычисленные по данным откачек из скважин, расположенных вне зон дроблений, на порядок меньше коэффициентов проницаемости сильнотрещиноватых туфов, но не превышают 0,03 дарси (Сугробов, 1965).

В верхней части разрезов присутствуют прослои, сложенные, породами с плохими фильтрационными свойствами. В разрезах Паужетской свиты роль верхнего водоупора играют горизонты алевропелитовых туфов, в Вайракейской — горизонты формации Хука, представленные сланцами, пемзовым песчаником и диатомитом. Мощность их по разрезу меняется от 0 до 100 м на Паужетке и от 70 до 150 м в Вайраки. Микроскопические определения алевропелитовых туфов Паужетки позволяют прийти к выводу об их высоких водоупорных свойствах. Алевропелитовые и пелитовые туфы плотные, сильноолитифицированные, имеют раковистый излом. Они слабо затронуты процессами гидротермального метаморфизма, что можно объяснить слабым водообменом между активными растворами водоносного горизонта и поровыми растворами алевропелитовых и пелитовых туфов².

К Паужетско-Вайракейскому типу относится большинство известных в настоящее время высокотемпературных гидротермальных систем мира: Гейзерная, Узонская (Камчатка), Вайотапу (Новая Зеландия), Оникобе (Япония) и многие другие. Геологическое строение их во многом идентично — это водовмещающие слабопористые, слаботрещиноватые, с низкими коэффициентами проницаемости толщи, перекрытые водонепроницаемыми горизонтами плотных пород. Если нет полной идентичности в литологическом составе, то аналогия сохраняется для фильтрационных свойств.

Тип Л а р д е р е л л о. Водоносные толщи этого типа имеют существенно иной характер. В Лардерелло они представлены «ангидритовой серией» (главным образом известняки мезо-кайнозойского возраста с небольшим количеством ангидрита). Одной из характерных особенностей продуктивного горизонта является сильная трещиноватость. Такие толщи имеют высокие коэффициенты проницаемости, хотя какие-либо количественные оценки отсутствуют, указывается лишь на крайне незначительный перепад температур термальных вод по глубине в водоносном горизонте (Фасса, Tonani, 1964). Такой характер распределения температур обусловлен быстрым конвективным теплообменом, что возможно лишь при хороших фильтрационных свойствах водоносных толщ. «Ангидритовая серия» перекрывается мощным чехлом сланцеватых глин (в пределах 200—800 м).

В настоящее время известна еще одна гидротермальная система подобного типа — это Большие Гейзеры Калифорнии (США). Отличи-

² Коэффициенты проницаемости алевропелитовых туфов из водоупорного горизонта Паужетской гидротермальной системы не превышают $4 \cdot 10^{-5}$ дарси.

тельной особенностью ее является литологический состав водоносной толщи, которая представлена терригенно-осадочными образованиями юрского возраста. Но, как и в Лардерелло, продуктивный горизонт здесь сильно трещиноватый (McNitt, 1961). На водоносной толще с угловым и стратиграфическим несогласием залегает горизонт песчаников с прослоями плотных сланцев. Коэффициент проницаемости пород этого горизонта менее 1 миллиарда.

Тектоника участков

Условия питания и разгрузки гидротермальных систем в значительной степени определяются особенностями тектоники участков. По характеру тектоники выделяются те же два типа — Паужетско-Вайракейский и Лардерелло.

Паужетско-Вайракейский тип. Геологическая история районов гидротермальной деятельности современных вулканических областей характеризуется массовыми внедрениями экструзий различного состава, от риолитов до андезитов. Прорывая туфогенные или туфогенно-осадочные толщи, они производят местные нарушения в их залегании. Эти толщи распространяются на незначительные расстояния от купола экструзивного тела. Как правило, вблизи экструзивного купола нарушения туфогенных и туфогенно-осадочных толщ выражаются в разрыве сплошности слоев. В одних случаях на теле купола экструзии наблюдаются крупные блоки прорванных пород, в других — толщи у контакта с экструзивным куполом «поставлены на голову». По мере удаления от купола углы падения толщ уменьшаются. Так, например, в районе Гейзерной гидротермальной системы (Камчатка) по контакту экструзий с туфогенно-осадочной толщей угол падения составляет 55° , а на расстоянии 500 м от контакта — 20° .

При изучении районов развития гидротермальных систем устанавливается, что контакты в направлении от купола преимущественно имеют небольшие углы падения. Это позволяет предполагать, что в процесс поднятия не только вовлекаются участки, тяготеющие к экструзии, но происходит поднятие и более крупных сопредельных районов.

Прослеживание отдельных маркирующих горизонтов в туфогенно-осадочных толщах позволяет установить амплитуду поднятия, которая иногда достигает 800—1000 м. В результате таких подъемов образуется моноклиналиное залегание. Если вершинные части экструзивных тел располагаются в виде полукруга или полуэллипса и внутри них находится блок туфогенно-осадочных или осадочных пород, возможна другая модификация моноклинали — с центриклиналиным замыканием. Так, для Паужетки и Узона характерно моноклиналиное залегание водовмещающих пород, а для Долины Гейзеров — центриклиналиное. Для Вайракейской гидротермальной системы (Grindley, 1961) характерна «моноклиналиль» с пологими углами наклона. В западной части района Вайраки под псефитовыми туфами встречены субповерхностные интрузивные тела. Эта часть района характеризуется более густой сетью разломов по сравнению с другими участками. Один из таких разломов образовался в 20-х годах нашего столетия (Grange, 1955).

В результате крупных подвижек, при которых скорость движения одного участка относительно другого заметно отличается, возможно формирование крупноблоковой структуры. «Моноклиналии» и «центриклиналии» разбиты сетью крупных трещинных нарушений, и блоки толщ смещены относительно друг друга. Наибольшие амплитуды наблюдаются вблизи экструзий. На удалении от них амплитуды сбросов затухают и в некоторых случаях измеряются несколькими метрами, по существу являясь зонами дроблений.

Тип Лардерелло. Согласно данным итальянских исследователей Факка и Тонани (1961), тектоника участка этих гидротермальных систем характеризуется структурой типа горста. В пределах приподнятого блока терригенные и хемогенные образования геосинклинального типа мезозойского возраста смяты в пологие складки. Сеть региональных разрывных нарушений ориентирована вдоль главного направления складчатости. Несогласно на невыровненную поверхность мезозойских известняков «ангидритовой серии» залегает толща сланцеватых глин.

Интенсивность теплового питания [И. Т. П.] гидротермальных систем и теплоперенос

На платформах и древних геосинклинальных областях замеренные среднеземные значения тепловых потоков составляют $1,2 \cdot 10^6$ ккал/см²сек. В условиях среднеземных значений температурного градиента, в соответствии с законом Фурье, стоградусная изотерма находится на глубине около 3 км. В вулканических областях на участках развития гидротермальных систем такие температуры наблюдаются на поверхности. В недрах некоторых гидротермальных систем на сравнительно небольших глубинах температуры достигают 200° С и более. На Паужетке на глубинах 300—400 м максимальные температуры близки к 200° С, в Вайотапу—295° С, в Калифорнии в одной из скважин замерена температура 270° С, а на глубине 1600 м предполагается 370° С (White et al., 1963).

Сравнительная характеристика геологической обстановки различных районов приводит к выводу, что современная гидротермальная деятельность в близповерхностных условиях должна обеспечиваться тепловыми потоками высокой плотности. Учитывая сложность геологических структур на пути движения теплового потока, следует предполагать возможность существования горизонтального сноса тепла за пределы участка с аномальными тепловыми потоками. До близповерхностных водных масс доходит лишь часть теплового потока, которая и питает гидротермальную систему. Эта часть теплового потока названа нами «интенсивность теплового питания гидротермальных систем». Замеренные значения И. Т. П. для некоторых гидротермальных систем, расположенных в различных вулканических областях, по данным В. В. Аверьева, F. Durr и автора, составляют: для Долины Гейзеров $2 \cdot 10^3$ — $2,4 \cdot 10^3$ ккал/км²сек (Averiev, 1964); для Паужетки — $1,4 \cdot 10^3$ ккал/км²сек; для Верхне-Жировских источников— $1,4 \cdot 10^3$ ккал/км²сек; для Санаторного ручья и Северо-Восточного фумарольного поля на вулкане Менделеева (о-в Кунашир, Курильские острова)— $1,7 \cdot 10^3$ ккал/км²сек и для геотермального поля Ahuachapan (Сальвадор)— 10^3 ккал/км²сек (Durr, 1961). Данные замеров И. Т. П. гидротермальных систем превышают среднеземные значения тепловых потоков в 100—200 раз и более.

Теплопередача в земной коре может осуществляться или через молекулярную (кондуктивную) теплопроводность, или же за счет конвективного переноса. В последнем случае перенос тепла осуществляется за счет перемещения масс теплоносителя, скорость передвижения которого находится в прямой зависимости от фильтрационных свойств водовмещающих толщ. Таким образом, теплоперенос в случае конвективной теплопередачи является функцией коэффициента фильтрации, теплоемкости теплоносителя и температуры.

Молекулярная теплопередача осуществляется через передачу тепловых импульсов молекулам минеральных составляющих пород. Интенсивность такой теплопередачи зависит в основном от температурного напора, и в меньшей степени — от строения минеральных составляющих, которые оцениваются коэффициентом теплопроводности, имеющим сравнительно небольшие колебания для разных горных пород.

Оценить значение необходимого температурного напора при кондуктивной теплопередаче для теплопотока определенной плотности позволяют расчеты, проделанные по формуле Фурье $q = \lambda T/H$, где q — тепловой поток, λ — коэффициент теплопроводности, T/H — температурный градиент. Так, например, если взять для расчета замеренные значения И. Т. П. гидротермальных систем и коэффициенты теплопроводности, характерные для терригенно-осадочных пород, то значения температурных градиентов составят 2,5–5,0°С/м. При таких температурных градиентах на глубинах 200–400 м были бы тысячеградусные температуры.

Исходя из известных температур в недрах большинства гидротермальных систем и значений И. Т. П., следует предполагать существование конвективного теплообмена при передаче тепла из глубин на поверхность. В самом деле, в отличие от приведенных выше расчетных температур в недрах всех гидротермальных систем замеренные температуры ниже 295°С. Это, естественно, заставляет предполагать, что тепловой поток, питающий гидротермальную систему, в пределах последней переносится за счет конвективного движения термальных вод. Основное отличие конвективного переноса от молекулярной теплопроводности заключается в том, что в первом случае тепловой поток той же плотности переносится при более низких значениях температурного напора. Судя по данным замеров температурных градиентов, в водных потоках гидротермальных систем следует предполагать большую долю конвективного теплопереноса по сравнению с теплопереносом за счет молекулярной теплопроводности.

Роль геологоструктурного фактора в определении энергетического режима теплоносителя и теплового баланса гидротермальных систем

Приведенные значения интенсивности теплового питания гидротермальных систем, несмотря на значительные колебания, имеют один и тот же порядок величин, т. е. аномальные значения теплового потока в различных районах развития гидротермальных систем близки. Однако теплофизические характеристики теплоносителя даже в пределах одной гидротермальной системы резко отличаются. Так, например, на о-ве Кунашир на склонах вулкана Менделеева в ручье Санаторном энтальпия воды не достигает и 100 ккал/кг, в то время как энтальпия пара на Северо-Восточном фумарольном поле того же вулкана равна 639 ккал/кг. В других случаях встречается пар с энтальпией, близкой к 670 ккал/кг.

Такие колебания в энергетическом уровне теплоносителя не могут быть объяснены лишь различием плотности И. Т. П. гидротермальных систем. Следовательно, колебания значений энтальпий теплоносителя в близповерхностных гидротермальных системах в значительной степени обусловлены их геологическим строением.

Приток тепла в систему определяется величиной И. Т. П. Теплопотери в близповерхностных высокотемпературных гидротермальных системах могут осуществляться несколькими путями, а именно: разгрузка термальных вод в жидкой фазе; через молекулярную теплопроводность; разгрузка термальных вод в газообразной фазе. В зависимости от того, какими путями происходят теплопотери, будет определяться тепловая схема гидротермальных систем. Выделенные нами два типа высокотемпературных гидротермальных систем — Паужетско-Вайракейский и Лардерелло имеют следующее строение расходной части теплового баланса: Паужетско-Вайракейский — теплопотери осуществляются за счет выноса термальных вод в основном в жидкой фазе, а также газообразной и через молекулярную теплопроводность; Лардерелло — теплопотери осу-

существляются за счет выноса термальных вод в газообразной фазе и через молекулярную теплопроводность.

К Паужетско-Вайракейскому типу гидротермальных систем можно применить тепловую схему, известную в теплотехнике под названием «конвективный перенос тепла в условиях вынужденного потока»³, причем частный вариант этой схемы выглядит несколько сложнее, так как водный поток неизотермический. Если в изотермической среде при ламинарном характере течения перенос тепла в поперечном сечении осуществляется лишь за счет молекулярной теплопроводности, то в условиях неизотермической среды на ламинарное движение влияет естественная конвекция, вызванная температурной неоднородностью в поперечном разрезе. Характер распределения температур по глубине водного потока, низкие коэффициенты фильтрации в условиях напорной гидротермальной системы позволяют сделать вывод о применимости вышеизложенной схемы переноса тепла к системам Паужетско-Вайракейского типа.

Как уже говорилось выше, главные параметры водного потока определяются характером геологической среды. Распределение температур в водном потоке, схема теплопотерь, скорость движения термальных вод зависят от фильтрационных свойств водовмещающих пород и водоупоров, а также от тектоники водоносного горизонта.

Роль верхнего водоупорного горизонта в формировании высокотемпературных гидротермальных систем. В качестве примера разберем идеальную модель гидротермальной системы, дадим лишь качественную оценку роли верхнего водоупорного горизонта и оценим его возможности в формировании гидротермальных систем с высокотемпературным режимом теплоносителя.

Геологический разрез такой модели представим в виде двух горизонтов: нижний — водовмещающий, сложенный породами с хорошими фильтрационными свойствами; верхний — представлен плотными породами с крайне низкими коэффициентами проницаемости. Система подогревается снизу. Вода в водоносном горизонте находится в застойном режиме. Процесс нагревания в этой модели пойдет следующим образом.

Так как в первую очередь нагреваются нижние горизонты, поскольку термальная вода обладает меньшей плотностью, то создаются условия для действия архимедовых сил, в результате чего возникает передвижение воды из нижних горизонтов в верхние, к границе водоупорного горизонта. При хороших фильтрационных свойствах водовмещающих пород и большой удельной теплоемкости воды ($1 \text{ кал}/\text{г}^\circ \text{C}$) в единицу времени на единицу площади при весьма незначительных температурных напорах может быть перенесен значительной плотности тепловой поток. Теплоперенос в водоупорном горизонте будет происходить по другим правилам. В этом горизонте практически исключается теплопередача за счет конвективного переноса, а преобладает молекулярная теплопередача. Как следует из вышеизложенного, для переноса такого же количества тепла в этом случае требуется очень высокий температурный напор. Вследствие того, что в нижнем горизонте теплопередача обеспечивается за счет конвективного переноса, в разбираемой модели у нижней границы водоупорного горизонта температуры будут недостаточны, чтобы обеспечить передачу теплового потока той же плотности, которую имеет поток, поступающий с нижних горизонтов. Часть тепла останется в водоносном слое и пойдет на нагрев скелета грунта и воды. В результате этого произойдет повышение температуры у нижней границы водоупорного горизонта, что, в свою очередь, создаст в нем повышенный темпе-

³

Для гидротермальных систем Н. А. Огильви вводит новую терминологию: «фильтрационный поток» (1959).

ратурный напор, в связи с чем повысится интенсивность теплоотдачи от водного потока. Равновесное состояние наступит лишь в том случае, когда у нижней границы водоупорного горизонта температура воды достигнет температуры насыщения при том гидростатическом давлении, которое создает столб воды в водоупорном горизонте. Последующие порции тепла, поступающие из глубины, пойдут на парообразование. В результате кипения на границе водоносного горизонта с водоупорным отделившийся пар, как наиболее мобильный, за счет адиабатического расширения устремится вверх по мелким порам и трещинкам в водоупорном горизонте, унося с собой «излишки» тепла.

В разобранный выше модели не учтено влияние некоторых геологических факторов, имеющих место в реальных гидротермальных системах. Чтобы оценить их роль в процессе формирования и деятельности гидротермальных систем, ниже будет рассмотрено их влияние в комплексе.

Водовмещающие породы характеризуются плохими фильтрационными свойствами. Имеется верхний водоупорный горизонт. Водный поток находится в движении. Такие условия геологического строения характерны для гидротермальных систем Паужетско-Вайракейского типа. Из них хорошо изучена Паужетская гидротермальная система, которая является напорной системой. В связи с этим разгрузка водного потока осуществляется в долину р. Паужетки в виде большого количества источников, которые характеризуются следующими особенностями.

Во-первых, значительная часть термальных вод разгружается в виде крупнодебитных кипящих источников. Как правило, дебит их составляет несколько литров в секунду. Самый крупный из них — Парящий I изливает воды 10—11 л/сек.

Во-вторых, эти источники имеют стабильный дебит. Самые крупные источники на Паужетской термальной площадке — Парящий I и Парящий II, за которыми велись длительные режимные наблюдения, характеризовались стабильностью дебитов.

В-третьих, значительная часть дебита этих источников выделяется в виде паровой фазы. Для источника Парящий I пар составляет 9%, Парящий II — 7%, т. е. ежесекундно из них выделяется 1,5—2,0 м³ пара.

Расходная часть теплового баланса Паужетской гидротермальной системы имеет следующую структуру:

- а) вынос тепла термальными водами в жидкой фазе — 15000 ккал/сек (по данным В. В. Аверьева, 1965);
- б) вынос тепла в парообразной фазе — 640 ккал/сек (Верхнее Сольфатарное поле. Данные Г. Н. Ковалева, личное сообщение);
- в) вынос тепла через молекулярную теплопроводность — 276 ккал/сек (в пределах очага разгрузки).

Как видно из расходной части теплового баланса Паужетской гидротермальной системы, основная доля тепла переносится за счет «конвективного переноса в условиях вынужденного потока».

Распределение температур в недрах определяется температурными градиентами. Наиболее характерные их значения для водоносного горизонта 0,10—0,15° С/м, для водоупорного — 1,3—2,0° С/м. Температуры у подошвы водоупорного горизонта колеблются в пределах от 130 до 180° С в различных местах очага разгрузки.

Схема движения тепла Паужетской гидротермальной системы, по вышеприведенным данным геологического строения и теплового режима, представляется нам следующим образом. Тепло, поступающее с нижних горизонтов земной коры в виде И. Т. П., равномерно подогревает близповерхностный водный поток, заключенный в псефитовых туфах. Последний под действием гидростатического напора движется к долине р. Паужетки. Так как поток неизотермический, то поступательное движение воды вдоль

водоносного горизонта осложняется передвижением водных масс в поперечном его сечении за счет свободной конвекции. Последняя приводит к выравниванию температур: к сглаживанию «неизотермичности». В связи с этим значения температурного градиента в водном потоке невелики. Весь тепловой поток, который подходит в результате свободной конвекции к подошве водоупорного горизонта в виду малого температурного напора, не может пройти через него. Большая доля его увлекается водным потоком к очагу разгрузки системы. Так как скорость движения вдоль водоносного горизонта невелика и ограничивается фильтрационными свойствами пород, то создаются условия для поддержания высоких температур в водоносном горизонте. Как правило, они приходят в соответствие с температурами у подошвы водоупорного горизонта, близкими к температурам насыщения при гидростатических давлениях, соответствующих высоте столба воды, которая контролируется мощностью водоупорного горизонта.

Особо следует остановиться на роли рельефа подошвы водоупорного горизонта, поскольку от этого фактора зависит дифференциация термальных вод по температурам. Так, например, если нагрев водного потока идет равномерно по всей площади, то наиболее нагретые водные массы стремятся занять самое верхнее положение в водоносном горизонте. А так как водный поток еще движется вдоль водоносного горизонта, то поток более высоконагретых вод будет поступать на участки, где подошва водоупорного горизонта имеет более высокие отметки. Подобное явление наблюдается на Паужетке и в Вайраки. Таким образом, положительные формы рельефа подошвы водоупорного горизонта играют роль «ловушек» высоконагретых вод. Иногда в «ловушках» температуры превышают температуру насыщения при данном гидростатическом давлении, и в таких случаях образуются локальные очаги тепловой разгрузки, которая осуществляется путем пароотделения при подземном кипении. Таким примером на Паужетской термальной площадке может служить Верхнее Сольфатарное поле и паровые струи на склоне Камбального хребта.

Кроме того, верхний водоупорный горизонт в высокотемпературных гидротермальных системах играет роль водоупора, который ограничивает интенсивность инфильтрационного питания системы (И. И. П.). Расчетные величины И. И. П. известных высокотемпературных гидротермальных систем близки к $10 \text{ кг/км}^2 \text{ сек}$. На основе этой величины можно определить оптимальные фильтрационные свойства, которыми обладают водоупорные горизонты реальных гидротермальных систем.

Эффективный коэффициент проницаемости водоупорного горизонта можно определить по формуле:

$$K_n = \frac{Q\mu}{S \cdot \gamma \cdot j},$$

где Q — И. И. П. гидротермальной системы ($\text{м}^3/\text{сутки}$), j — гидравлический уклон (условно принят равный 1), μ — динамическая вязкость (сантипуазы), γ — объемный вес воды (т/м^3), S — площадь водозабора (м^2).

Величина расчетного коэффициента проницаемости для Паужетской гидротермальной системы (для водоупоров) составляет $8,5 \cdot 10^{-5}$ дарси.

Водовмещающие породы характеризуются хорошими фильтрационными свойствами. Имеется верхний горизонт водонепроницаемых пород. Водный горизонт характеризуется весьма медленным водообменом. Итальянские исследователи Г. Факка и Ф. Тонани (Фасса, Tonani, 1961, 1962, 1964) на основании данных эксплуатации и геологического строения гидротермальной системы Лардерелло сделали вывод о приме-

нимости к такого типа системам тепловой схемы, основанной на различии в типах теплопередач в водоносном и в водоупорном горизонтах. Однако, если ограничиться только этим условием как единственным, необходимым для формирования и деятельности высокотемпературной системы типа Лардерелло, без учета других геологических факторов, то как нам кажется, можно прийти к ошибочному пониманию теплового процесса в гидротермальной системе. В самом деле, если при тех же условиях, которые предполагают эти исследователи, допустить активную разгрузку термальных вод в жидкой фазе, как в гидротермальных системах Паужетско-Вайракейского типа, то при значительно больших скоростях фильтрации в водоносной толще гидротермальной системы Лардерелло, вода в ней не нагреется до тех температур, которые имеются в действительности.

В связи с этим, наряду с водоупорным горизонтом существенную роль играют тектоника участка и фациальные переходы в водоносных толщах. Важным условием в этом случае является невозможность активного водообмена.

В районах развития гидротермальных систем такого типа при бурении скважин установлено, что замеренные температуры термальных вод у подошвы водоупора находятся вблизи линии насыщения. Реальная картина поверхностной разгрузки выражается в существовании прогретых площадок, паровых струй, малодобитных источников, котлов, лагун. Как считают Факка и Тонани (1962), термальные источники образуются за счет грунтового потока, прогретого конденсатами паров, которые образуются при кипении нижележащего высокотемпературного водного горизонта.

ЛИТЕРАТУРА

- Огильви Н. А. Вопросы теории геотемпературных полей.— В сб.: «Проблемы геотермии», ч. I. М., 1959.
- Коллектив авторов. Паужетские горячие воды на Камчатке. Под ред. Б. И. Пийпа. Изд-во «Наука», 1965.
- Averiev V. V. Some qualitative indications of a recent hydrothermal process in volcanic areas.—Bull. volcanol., 1964, t. XXVII, B. V.
- Durr F. Review of geothermal activity in el Salvador C A.—U. N. Conf. on new sources of energy, 1961.
- Facca G., Tonani F. Natural steam geology and geochemistry.— U. N. Conf. on new sources of energy, 1961.
- Facca G., Tonani F. Natural steam exploration in U.S.A.— Boll. d. Geofisica Teorica ed Applicata, 1962, v. IV, No 14.
- Facca G., Tonani F. Theory and Technology of a Geothermal Field.— Bull. volcanol., 1964, t. XXVII, B. V.
- Grindley G. W. Geology of New Zealand geothermal steam fields.— U. N. Conf. on new sources of energy, 1961.
- Grange L. J. Geothermal stem for power in New Zealand. Wellington, 1955.
- McNitt J. R. Geology of the Geysers thermal area. California. U. N. Conf. on new sources of energy, 1961.
- White D. E., Anderson F. T., Grubbs D. K- Geothermal brine well: miie-deep drill hole may Tap ore-bearing magmatic warter and rocks undergoing metamorfism.— Reprinted from Science, 1963, v. 139, N 3558.