
Паужетские горячие воды на Камчатке



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ

ПАУЖЕТСКИЕ
ГОРЯЧИЕ ВОДЫ
НА КАМЧАТКЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1965

УДК 551.23(571.66)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

член-корреспондент АН СССР

Б. И. ПИЙП

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в ряде стран, на территории которых развита современная вулканическая деятельность, началось использование природных высокотермальных вод и паров для выработки электроэнергии. Пионером в этой области была Италия, где первый турбогенератор на подземном паре заработал еще в 1905 г. По данным Организации Объединенных Наций, созывавшей в 1961 г. в Риме специальную конференцию по новым источникам энергии, мощность геотермальных электростанций на 1960 г. составила: в Италии — 330 тыс. *квт*, в Новой Зеландии — 150 тыс. *квт* (проектная мощность — 270 тыс. *квт*), в США — 12,5 тыс. *квт* (проектная мощность — 100 тыс. *квт*). Создание геотермальных электростанций запланировано в Японии, Мексике, Сальвадоре.

Обращение энергетики к подземному теплу в настоящее время вызвано не столько «энергетическим голодом», сколько тем обстоятельством, что в благоприятных природных условиях геотермальные электростанции вырабатывают очень дешевую электроэнергию. Даже на хорошо освоенных территориях геотермальные электростанции примерно вдвое экономичнее обычных тепловых электростанций. Что же касается удаленных и плохо освоенных районов, лишенных местной топливной базы и гидроэнергоресурсов, но располагающих большими запасами высокотермальных вод и паров на относительно малой глубине, то строительство здесь геотермальных электростанций не только экономически целесообразно, но часто единственный выход при решении энергетической проблемы.

В таком положении в Советском Союзе находятся некоторые районы Камчатки и Курильских островов. Стоимость электроэнергии, вырабатываемой здесь маломощными электростанциями, очень высока. Использование местных гидроэнергоресурсов часто невозможно из-за того, что реки Камчатки охраняются как нерестилища ценных лососевых рыб. В то же время наличие мощной гидротермальной деятельности, протекающей в ряде случаев вблизи поверхности земли, на глубине первых сотен метров, можно рассматривать как необходимую природную предпосылку для создания в таких районах геотермальной энергетики. Геотермальные электростанции на Камчатке будут вырабатывать энергию с себестоимостью в десятки раз дешевле, чем при существующем положении.

Учитывая перечисленные выше обстоятельства, на Камчатке, на базе Паужетских термальных источников в 1957 г., были начаты работы по созданию первой в Советском Союзе опытно-промышленной геотермальной электростанции мощностью 5000 *квт*. Выбор Паужетских источников в качестве первоочередного объекта для строительства такой электростанции был сделан по следующим соображениям. Во-первых, Паужетские источники, впервые обследованные в середине XVIII в. С. П. Крапенинниковым, обладающие большим дебитом и выделяющие большое количество пара, действуют непрерывно и не снижают своей активности. По единодушному мнению всех специалистов, источники можно было рекомендовать как реальный природный объект для получения здесь с помощью бурения вод и паров с температурой выше 100°. Во-вторых, по сравнению с другими

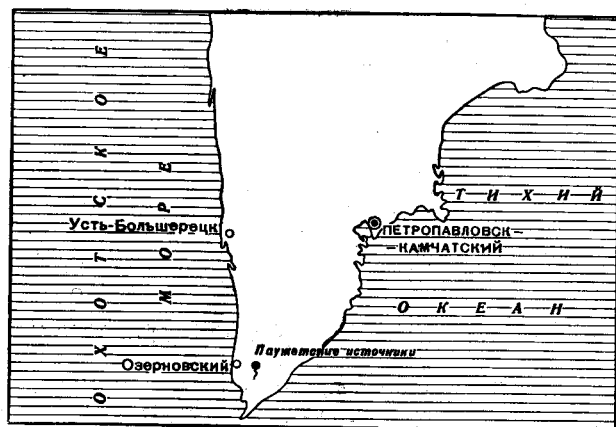


Рис. 1. Местоположение Паужетских источников на Камчатке

кипящими источниками Камчатки, они находятся в относительно легко доступной местности. Наконец, в третьих, всего в 30 км от источников находится один из самых крупных и перспективных на западном побережье Камчатки Озерновский рыбокомбинат, который будет потребителем как электроэнергии, так и «отработанных» термальных вод для нужд теплофикации (рис. 1).

Месторождения современных гидротерм, эксплуатируемые для выработки электроэнергии, разделяются на два основных типа: к первому принадлежат месторождения природного пара, ярким примером которого может быть Лардерелло в Италии; ко второму — более распространенному — относятся месторождения, в недрах которых вода, хотя и имеет температуру значительно выше 100°, находится в условиях относительно высокого давления и поэтому существует в жидкой фазе. Это, как правило, напорные воды, способные к самоизливу. Продукция скважин на таких месторождениях представлена пароводяной смесью, образующейся за счет вскипания воды при ее восходящем движении по стволу скважины. Из зарубежных месторождений второго типа наибольшей известностью пользуется Вайракей в Новой Зеландии. К этому же типу принадлежит и район Паужетки.

Для выяснения вопроса о возможности создания геотермальной электростанции на Паужетке был намечен и осуществлен большой комплекс геологических, гидрогеологических, геотермических и других исследований, проводившихся на базе бурения. Они показали, что Паужетская термальная площадка входит в состав крупного месторождения высокотермальных вод. Уже в 1958 г. в процессе бурения первой скважины были получены первые обнадеживающие данные. Было установлено, что в недрах Паужетского месторождения на глубине первых сотен метров циркулируют воды с температурой, достигающей почти 200°. Из скважины ударил пароводяной фонтан, но производительность ее оказалась недостаточной. При дальнейшем разбуривании месторождения ресурсы гидротерм неперестанно наращивались. В 1961 г. их цифра превысила 150 кг/сек пароводяной смеси, что обеспечивало необходимое количество пара для работы электростанции на 5000 квт.

Разведочные работы завершились опытной эксплуатацией месторождения. В 1962—1963 гг. десять наиболее продуктивных скважин более года безостановочно работали в условиях эксплуатационного режима, доказав тем самым возможность создания на Паужетке опытно-промышленной геотермальной электростанции.

Следует отметить, что при разведке высокотермальных вод пришлось столкнуться с весьма существенными трудностями. Высокие температуры

чрезвычайно осложняют процесс бурения, создают большие помехи при геофизических исследованиях в скважинах, а опробование пароводяных скважин во многих отношениях сложнее обычных гидрогеологических испытаний и отличается от них по своим способам. В ходе разведки Паужетского месторождения впервые в нашей стране были разработаны и освоены как технология бурения пароводяных скважин легкими колонковыми станками, так и методика их опробования. Опыт, приобретенный на Паужетке, может быть использован на других разведываемых месторождениях высокотемпературных гидротерм.

Результаты работ в районе Паужетских источников далеко выходят за рамки чисто технических достижений в области разведки. Не меньшего внимания заслуживают данные общегеологического значения, полученные в ходе исследований. Паужетское месторождение можно рассматривать как природную лабораторию гидротермальных процессов, вызывающих интенсивное изменение пород с образованием новых минералов. Благодаря тому, что здесь было пробурено большое число скважин, геологи и минералоги получили возможность не только умозрительно восстанавливать обстановку протекавших процессов, но и судить о ней на основании прямых данных. Образование минеральных ассоциаций, изученных в керне, можно было рассмотреть в непосредственной связи с температурой, давлением, характером движения гидротерм и их химизмом. Поэтому без преувеличения можно сказать, что скважины, которые бурятся на месторождениях современных гидротерм, являются золотым фондом для геологов, изучающих гидротермальный процесс и связанные с ним месторождения полезных ископаемых.

Предлагаемая вниманию читателя монография состоит из двух частей. В первой — дана общая характеристика Паужетского месторождения. Во второй части детально характеризуется методика исследований, включая технологию бурения при высоких температурах, и приводятся результаты опытной эксплуатации Паужетского месторождения.

Необходимо особо отметить, что все материалы, использованные при составлении монографии, были получены в результате исключительно добросовестного и самоотверженного труда большого коллектива рабочих и техников Паужетской гидрогеологической партии Камчатского геологического управления и Паужетской геотермальной экспедиции Института вулканологии СО АН СССР. Авторы выражают им свою искреннюю благодарность. Необходимо также отметить большой вклад, внесенный в изучение Паужетских источников до начала разведочных работ Б. И. Пийпом, В. В. Ивановым, Т. А. Голевой и С. И. Набоко.

* * *

Инициатором изучения Паужетских источников с точки зрения их энергетического использования выступила Лаборатория вулканологии АН СССР, направившая в 1955 г. на Паужетку геотермальную экспедицию (начальник экспедиции А. Е. Святловский, гидрогеологи В. В. Иванов, А. С. Нехорошев), которая собрала необходимые материалы для начала здесь буровых работ.

Выбор Паужетских источников в качестве первоочередного объекта для строительства геотермальной электростанции был утвержден в 1956 г. комиссией Президиума АН СССР под руководством академика М. А. Лаврентьева.

С 1957 г. разведка и исследование Паужетского месторождения проводились совместно Государственным геологическим комитетом и Академией наук СССР. Подготовительные работы по разведке и бурению первых скважин были выполнены Паужетской гидрогеологической партией Камчатского геологического управления под руководством инженеров

Н. А. Антипова, Ю. В. Кожина, геолога Л. Ф. Тыщенко и старших буровых мастеров В. П. Воробьева и С. В. Тарасова. Начиная с середины 1959 г. все работы партии проводились под руководством инженера В. М. Дудченко. Ведущими исполнителями работ были гидрогеологи Ю. А. Краевой и Е. Л. Краевая, геофизики Л. Г. Пастух и Г. П. Яроцкий, старшие буровые мастера Э. П. Рябко и В. И. Крещеновский.

По линии Академии наук работы велись в основном Институтом вулканологии СО АН СССР и возглавлялись Б. И. Пийпом. Гидрогеологические исследования проводились под руководством В. В. Аверьева (1957—1960 гг.) и В. М. Сугрובה (1960—1963 гг.). Активное участие в исследованиях приняли научные сотрудники А. А. Гавронский, В. И. Белоусов, С. И. Набоко, А. Н. Разживина, Н. В. Воронкова и Н. Г. Сугрובה. Ценную помощь в изучении месторождения оказали в 1957—1958 гг. В. В. Иванов и К. П. Флоренский.

Общая редакция монографии выполнена В. В. Аверьевым и С. И. Набоко.

Часть первая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА
ПАУЖЕТСКОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЙОНА

Бассейны рек Озерной и Паужетки начали изучаться в геологическом отношении с 30-х годов. Первые работы проводились экспедициями СОПСА и Дальневосточного геологического треста. Некоторые из них, имея узко-поисковое задание, охватывали съемкой незначительные участки района.

В 1937 г. экспедицией СОПСА, возглавляемой Б. И. Пийпом, была проведена маршрутная съемка в районах р. Озерной, вулканов Ильинского, Желтовского, восточного склона Гольгинского хребта и далее на север. Этими работами было положено начало возрастного деления вулканических и осадочно-вулканогенных пород, слагающих район.

В 1952 г. Пятое геологическое управление начало систематическое изучение геологического строения южной оконечности Камчатского полуострова. Работы велись двумя партиями, возглавляемыми геологами А. Г. Тимофеевым и В. М. Чапышевым, давшими в своих отчетах первую характеристику структуры района.

В последующий этап, в связи с конкретным изучением Паужетских термальных источников в энергетических целях, были проведены более детальные геологические работы на ограниченной площади, в пределах бассейна р. Озерной и ее левобережных притоков.

Так, в 1955 г. экспедиция Лаборатории вулканологии АН СССР под руководством А. Е. Святловского попутно с гидрогеологическим обследованием района Паужетских термальных источников изучала его геологическое строение. А. Е. Святловским была составлена схематическая геологическая карта и описана структура района, где основной упор сделан на выделении структурного трога.

В 1958 г. В. В. Аверьев на основании своих маршрутов и по материалам предыдущих исследований составил схематическую геологическую карту, более подробную по сравнению с предыдущей. В результате этих работ были получены дополнительные данные о породах и структуре района от Охотского побережья до восточного берега Курильского озера. При составлении карты был использован материал, полученный при бурении 800-метровой роторной скважины (Аверьев, 1961; Аверьев и Святловский, 1961).

Летом 1959 г. Камчатским геологическим управлением была поставлена геологическая съемка. Партией, возглавляемой С. Е. Апрельковым, был собран большой фактический материал, на основании которого составлена геологическая карта.

В итоге работ в районе выделены отдельные стратиграфические комплексы, границы которых были прослежены на всей рабочей площади. Для возрастной характеристики пород была сделана попытка использовать спорово-пыльцевой анализ. В целом по району он не дал положительных результатов, так как споры и пыльца в образцах были плохой сохранности или вообще отсутствовали. Исключение составили данные спорово-пыльцевого анализа по образцам, отобраным из керна роторной скважины В. В. Аверьевым и выполненного в спорово-пыльцевой лаборатории кайнозойских отложений Института геологии АН СССР. Возрастная корреляция осадочно-вулканогенной толщи производилась в районе р. Саван, где была обнаружена фауна третичного возраста.

В 1960—1961 гг. В. И. Белоусовым проводились маршрутные исследования к северу и востоку от оз. Курильского и в районе мыса Сивучьего на юге.

В результате этих маршрутов были выяснены в общих чертах взаимоотношения пород на всей площади от Охотского моря на западе до бухты Вестник на востоке и от широты вулкана Желтовского на севере до широты вулкана Кошелевского на юге.

В настоящем разделе суммируется фактический материал, собранный в основном сотрудниками Лаборатории вулканологии АН СССР, а также данные по съемке С. Е. Апрелькова.

ПОРОДЫ, СЛАГАЮЩИЕ РАЙОН

Изученный район сложен в основном осадочно-вулканогенным комплексом пород. Большая часть площади покрыта эффузивными и пирокластическими образованиями основного, андезитового или дацитового состава. Осадочные образования, являясь главным образом продуктами разрушения лавового и туфового материала, занимают большей частью пониженные формы рельефа по долинам рек и в прибрежной полосе Охотского моря, Тихого океана и Курильского озера (рис. 2).

Третичные образования (анавгайская серия Pg—N₁)

Наиболее древние отложения района относятся А. Е. Святловским, В. В. Аверьевым (1961) и С. Е. Апрельковым к третичному возрасту. Они обнажаются на Охотском побережье в верховьях небольших рек, в основании западного борта долины Паужетки, на востоке они слагают хр. Беляева, а на севере — Гольгинский хребет. Породы представлены туфами, туфобрекчиями, лавами андезитов и базальтов. В низах этой толщи преобладает пирокластический материал; в верхней же части разреза глав-

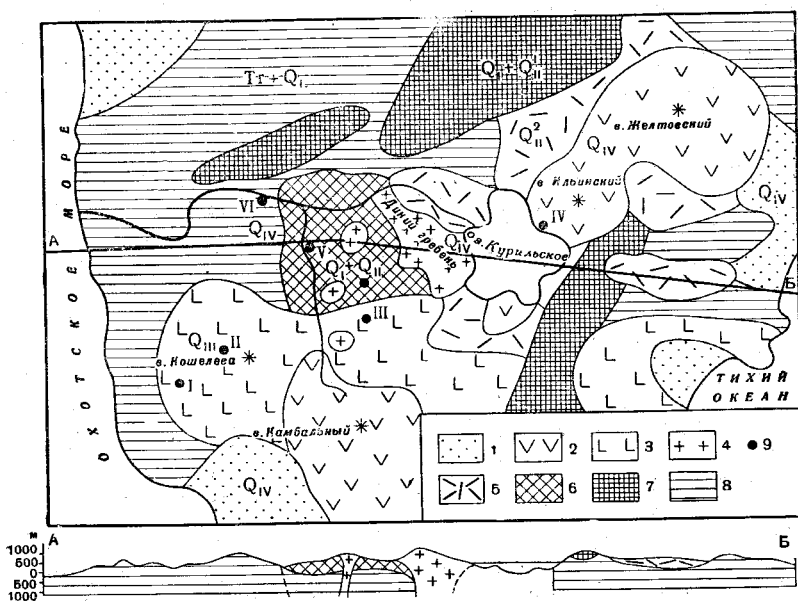


Рис. 2. Схема геологического строения района Паужетских источников

1 — современные прибрежно-морские отложения, 2 — современные эффузивные пирокластические образования; 3 — верхнечетвертичные эффузивные и пирокластические образования; 4 — лавы и экструзии дацитового состава; 5 — пемзовые образования; 6 — туфы Паужетской свиты; 7 — спекшиеся туфы и игнимбриты Гольгинского горизонта; 8 — эффузивные и пирокластические образования анавгайской и алнейской серий; 9 — источники: I — Нижнекошелевские, II — Верхнекошелевские, III — Камбальные, IV — Курильские, V — Паужетские, VI — Озерновские

ную роль играют лавовые потоки. Такая закономерность особенно хорошо прослеживается в разрезах Голыгинского хребта. На Охотском побережье третичные породы представлены в основном лавовыми потоками базальтов. Среди толщи пирокластических пород третичного возраста широко распространены лавовые потоки оливиновых и плагиоклазовых базальтов. Мощность лавовых потоков обычно не выходит за пределы нескольких десятков метров. Часто встречаются дайки также базальтового состава.

В месте выхода Паужетских термальных вод третичные отложения залегают, по данным бурения, на глубине 650 м и представлены полимиктовыми песчаниками. Полимиктовые песчаники отмечены в Камбальном хребте, на восточном берегу Курильского озера, а также в разрезе хр. Беляева, где они наклонены на 5—7° на северо-восток. Эти песчаники имеют явно осадочное происхождение. Для них характерна равномерная зернистость, что обусловлено хорошей сортировкой материала, слоистость и полимиктовый состав обломков.

В 1963 г. на восточном склоне Камбального хребта, в нижнем течении р. Хакыцын, Г. А. Карповым собрана коллекция морской фауны палеоципод. К настоящему времени она еще не отработана, но по предварительным данным относится к миоцену.

Видимая мощность эффузивного комплекса третичных пород составляет около 1200 м. Мощность осадочных образований наверняка превышает 150 м, но точных данных об их истинной мощности не имеется. С. Е. Апрельковым третичные образования района датируются как нижне-среднемиоценовые и объединяются в курильскую свиту. Для всей толщи третичных пород характерен палеотипный облик. Лавы разбиты густой сетью трещин. Огромные поля пород переработаны гидротермальными процессами и превращены во вторичные кварциты и глины. Особенно большие поля вторичных кварцитов находятся в отрогах Голыгинского хребта. Они фиксируются также в полосе вдоль западного борта долины Паужетки. Отдельные пятна гидротермально измененных третичных пород отмечены на Охотском побережье.

На западном побережье в районе Кошелевского вулкана, где третичные породы представлены в основном лавами базальтов, развиты процессы глинизации. Среди глин (вероятно, монтмориллонитовых или нонтронитовых)¹, окрашенных бурыми окислами железа, сохранились огромные глыбы переработанных базальтов. Визуально не отмечаются какого-либо уменьшения объема материала, которое могло бы происходить за счет неравнообъемного замещения первичных минералов вторичными. Подобного же рода изменения характерны для хр. Беляева, только в меньших масштабах.

Значительно более широкое распространение имеет другой тип вторичных изменений, характеризующийся образованием широких полей кварцсерицитовых, серицито-кварцевых пород и вторичных кварцитов. Такие породы встречаются в западном борту долины Паужетки, в Голыгинском хребте и на хр. Беляева. Макроскопически они представляют собой мономинеральные или биминеральные прочные породы серого цвета часто с синеватым оттенком, обогащенные, как правило, густой вкрапленностью пирита. Поля измененных пород хорошо выделяются визуально по светло-бурому цвету обнажений.

Часто изменение третичных пород выражается в образовании больших количеств халцедона. Обычно он встречается в пирокластических образованиях в виде вторичного цемента. На хр. Беляева зафиксированы крупные кварцевые жилы, достигающие мощности 1 м. В жилах отмечается образование друз горного хрусталя.

¹ Точных определений не производилось.

Древнечетвертичные (?) отложения (алнейская серия $N_1^3 - N_2$, по С. Е. Апрелькову)

Образования, относимые нами предположительно к древнечетвертичным отложениям, пользуются в районе исключительно широким распространением. По своим литологическим особенностям они отчетливо подразделяются на три фациальные группы пород. Первая группа представлена андезито-базальтовыми лавами и туфобрекчиями, вторая — спекшими туфами дацитов и игнимбритами и, наконец, к третьей группе относятся псефитовые пемзовые туфы дацитов. Эти три группы пород соответствуют выделенным С. Е. Апрельковым свитам: алнейской, голыгинской и паужетской.

Андезито-базальтовые лавы и туфобрекчии. Из древнечетвертичных отложений породы этой свиты пользуются в районе наиболее широким распространением. Пространственно они связаны с третичными эффузивами и занимают большие площади как на Охотском, так и на Тихоокеанском побережьях.

В западной части района древнечетвертичные образования представлены эффузивным комплексом пород: туфами, туфобрекчиями, лавами андезитов и базальтов. В нижней части разреза преобладает туфовый материал, переслаивающийся с маломощными потоками базальтов, в верхней части разреза — лавы, в основании представленные оливиновыми и плагиоклазовыми базальтами и выше — андезитами. Мощность отдельных лавовых потоков не превышает первых десятков метров. Обычно породы имеют свежий облик, слабо трещиноваты.

Лавовые потоки сохранили свою первоначальную форму. Для них характерно периклинальное залегание, по которому можно восстановить первоначальные очертания древних вулканических массивов, в западной и юго-западной частях района. Склоны гор, сложенных древнечетвертичными образованиями, расчленены редкой речной и овражной сетью.

В восточной части района, восточнее Курильского озера, образования древнечетвертичного возраста представлены менее широко. В разрезе хр. Беляева они залегают на третичных песчаниках и представлены в основном 200-метровой туфовой толщей, в которой отмечаются маломощные лавовые потоки базальтового состава. Вверху толща туфов перекрывается туфобрекчией, в свою очередь перекрытой мощной толщей андезитовых лавовых потоков.

Разрез древнечетвертичных отложений в обнажениях тихоокеанского побережья у мыса Филюшова и устья ручья Уступного сложен вулканогенно-осадочными породами. Эта слоистая осадочная толща представляет собой частое чередование аргиллитов, алевролитов и песчаников с редкими лавовыми потоками базальтов. Разрез завершается лавами андезитов. Эта толща образует моноклираль, падающую в северо-восточном направлении под углом $10-15^\circ$.

Мощность эффузивно-осадочной толщи основных пород составляет около 800—1000 м в западной и 700—800 м в восточной части района.

Спекшиеся туфы и игнимбриты (голыгинский горизонт N_2 по С. Е. Апрелькову).

Кристалловитрокластические спекшиеся туфы и игнимбриты дацитового состава в пределах исследуемого района слагают обширные площади к северу от р. Озерной и к востоку от Курильского озера. Они залегают на эффузивных образованиях третичного и древнечетвертичного возраста практически горизонтально и образуют выровненные поверхности, в редких случаях имеющие слабый наклон.

Строение толщи довольно однообразное. Низы сложены плотным спекшимся туфом светло-серого цвета. В отдельных разрезах толща начинается типичным игнимбритом с лепешечками темного вулканического стекла (фьямме), ориентированными в горизонтальной плоскости. В туфах встре-

чаются редкие обломки лав базальтов. Обломочная часть туфов и игнимбригов представлена обломками кристаллов плагиоклаза и кварца, реже роговой обманки. Большая часть породы сложена обломками, рогульками вулканического стекла. Цементирование произошло за счет спекания частиц вулканического стекла. В игнимбригах наблюдается сваривание. В верхней части разреза правого борта р. Озерной увеличивается количество и размер обломков кристаллов кварца, плагиоклаза и наблюдается уменьшение вулканического стекла, в результате чего туф быстро выветривается и образует своеобразные скульптурные останцы, имеющие большей частью грибообразную форму.

В долине Паужетки спекшиеся туфы были вскрыты бурением на глубине 380 м. Ниже, начиная с глубины 570 м, залегает туфобрекчия андезитов и базальтов, межобломочный материал, который близок по химическому составу к спекшимся туфам. Мощность спекшихся туфов и игнимбригов определяется в пределах 150—300 м.

Псефитовые пемзовые туфы (паужетская свита N_2^3 — Q_1 , по С. Е. Априлкову).

Фашия псефитовых пемзовых туфов распространена на ограниченной и сравнительно небольшой по размерам площади. Выходы ее имеются в верхней части долины р. Озерной, у юго-западного подножия вулкана Дикий Гребень и в северной части Камбального хребта. Она была вскрыта также скважинами в долине Паужетки.

Псефитовые туфы дацитов — это легкая, пористая, прочно сцементированная порода с литовитрокластической структурой, где обломки в большинстве своем представлены пемзой. Заполняющая масса состоит из пепловых частиц. Цвет туфа светло-бурый. В разных частях района псефитовые туфы, хотя и объединяются в общую свиту, не однородны по возрасту и условиям накопления. У юго-западного подножия вулкана Дикий Гребень и в долине р. Озерной толща, вероятно, является первично отложенной. Следов какой-либо слоистости не наблюдается. Привнос материала другого состава (обломки андезитов, базальтов) отсутствовал. Локальное развитие псефитовых туфов дацитов, отсутствие сортировки материала и текстурные признаки позволяют говорить об эксплозивном характере образования описанной толщи. В противовес этому, на севере Камбального хребта и его северо-западном склоне, а также в долине Паужетки алевропелитовые и псефитовые пемзовые туфы переотложены. Для толщи характерно грубослоистое строение. Как удалось установить в одном из обнажений, в ней наблюдается два полных ритма. В низах разреза обнажается псефитовый туф. Вверх по разрезу он довольно резко сменяется алевропелитовым туфом, на котором в свою очередь залегает подобного же рода пачка, состоящая в низах из псефитовых туфов и вверху из плотных алевропелитовых туфов.

В обнажениях по правому нижнему притоку р. Паужетки переотложенные туфы подстилаются песчаниками третичного возраста. В северной части Камбального хребта, под Пиком Скалистым они залегают на непрерывно отложенных псефитовых пемзовых туфах дацитов.

Туфы паужетской свиты, залегающие на западном склоне Камбального хребта, падают на северо-запад под углом 10—20°. Такое же падение они сохраняют в долине Паужетки. На восточном склоне хребта их падение меняется на восточное и северо-восточное.

Мощность паужетской свиты в целом оценивается в 450—500 м.

О датировке древнечетвертичных (?) отложений.

В настоящее время по поводу возраста образований, отнесенных условно к древнечетвертичным, существуют разногласия. Согласно представлениям авторов, описанные выше вулканогенные образования имеют молодой — четвертичный возраст. Другая точка зрения — о более древнем, третичном возрасте этих пород — выдвинута С. Е. Априлковым.

Разногласия обусловлены отсутствием находок фауны и флоры в пределах района, без которых нельзя провести четкую границу между четвертичными и третичными образованиями. Однако ряд фактов, как нам кажется, косвенно указывает на четвертичный возраст большинства образований района.

Одним из характерных признаков молодости большинства образований является их свежесть, слабая трещиноватость, слабая метаморфизация или полное ее отсутствие. Многие лавовые потоки сохранили свой первоначальный облик и слабо подверглись эрозионным процессам.

О четвертичном возрасте большинства осадочно-вулканогенных образований свидетельствуют данные спорово-пыльцевого анализа, полученные при исследовании образцов переотложенного псефитового туфа из роторной скважины.

Среди комплекса пыльцы травянистых растений встречаются: *Rumex*, *Artemisia*, *Umbelliferae* и др.; зерна пыльцы *Juglans*, *Myricaceae* (off. *Myrica*), *Rhus*, *Carpinus*¹. Такие сочетания могут свидетельствовать либо о переотложении более древних видов в период седиментации четвертичных осадков, либо о более древнем, чем четвертичный возраст изучаемой толщи. Генезис осадков, по мнению Е. Д. Заклинской, исключает возможность переотложения.

Однако выше уже было изложено, что толща псефитовых туфов, вскрытых скважинами, имеет осадочное происхождение, т. е. породы претерпели перенос и переотложение. Таким образом, нельзя сделать вывод о плиоценовом возрасте этих образований, а нужно судить о возрасте толщи по спорам и пыльце четвертичных форм. Количественные соотношения третичных и четвертичных спор и пыльцы могут быть разными. Так, например, установлено, что в современных осадках Охотского моря присутствует около 50% спор и пыльцы третичного возраста.

В пределах четвертичного периода возраст толщи переотложенных псефитовых туфов, вероятно, не является древним, так как в спектрах спор и пыльцы этой толщи имеются отдельные формы: *Betula sect. Nanae*, *Alnus* sp., *Umbelliferae*, *Graminaceae*, *Polypodiaceae*, которые входят в спектры спор и пыльцы заведомо молодых образований, слагающих правобережную террасу нижнего течения Паужетки. По определению Е. Д. Заклинской, они относятся к верхним горизонтам четвертичной системы.

По нашему мнению, толщу псефитовых переотложенных туфов можно отнести к самым верхним горизонтам в комплексе древнечетвертичных пород. Положение этой толщи позволяет, конечно, с большой долей условности, экстраполировать возрастные определения на другие смежные осадочно-вулканогенные образования, учитывая условия залегания и соотношения в разрезе различных типов пород и толщ, которые они слагают.

Среднечетвертичные образования (пемзовые отложения)

В районе исследования пользуются большим распространением мощные толщи пемз. В целом они тяготеют к восточной части района и концентрируются в верховьях р. Озерной, к северу и к югу от Курильского озера, а также на водоразделе между Курильским озером и Тихим океаном. Пемзы залегают на породах различного возраста. Так, в верховьях р. Озерной (рис. 3) пемзовые отложения залегают на толще агломератовых пемзовых туфов. По р. Хакыцын они подстилаются спекшими туфами. В русле р. Ильинской пемзовые отложения налегают на базальтовый лавовый поток, а в районе хр. Беляева установлено, что они прислонены к третичным эффузивам. Общая же тенденция такова, что пемзы развиты в тех местах, где имеются сходные с ними по химическому составу псефитовые и

¹ Определение произведено Е. Д. Заклинской.

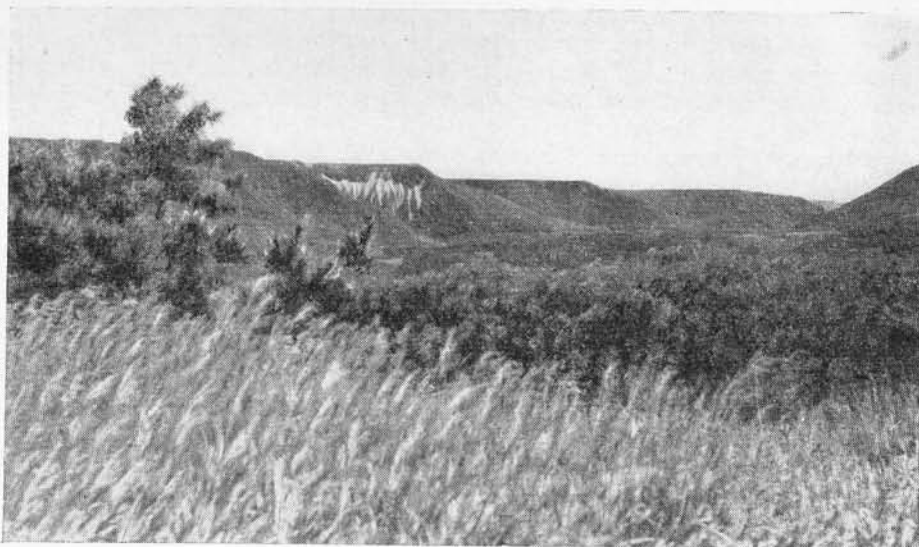


Рис. 3. Пемзовые террасы в верховьях р. Озерной.

Фото В. В. Аверьева

спекшиеся туфы дацитов. Главная масса пемз приурочена к пониженным, межгорным участкам территории.

Пемзовые отложения однородны в своем строении. В толще наблюдаются редкие обломки или гнезда и линзы обломков лав базальтов, андезитов и дацитов, но они играют очень незначительную роль. Пемза дацитового состава пористая, легкая, часто имеющая волокнистое строение.

Мощность пемзовых отложений определяется величиной от нескольких десятков метров до 150—200 м.

Образование таких мощных и обширных отложений пемз, вероятно, произошло в водной обстановке, так как без этого трудно себе представить, чтобы породы явно эксплозивного происхождения имели мощность, выдержанную на большие расстояния, и образовывали единую ровную поверхность.

Верхнечетвертичные и современные эффузивные образования

В настоящем комплексе трудно выделить более дробные стратиграфические единицы. Образование и развитие большинства современных вулканических форм происходило на протяжении последних этапов четвертичного периода, и этот вулканогенный комплекс целесообразнее рассматривать в целом, не вводя условное возрастное деление.

Верхнечетвертичные и современные отложения слагают существующие в настоящее время вулканические массивы: Желтовский, Ильинский, Камбалыный, Кошелевский, Дикий Гребень. Они развиты также в юго-восточной части Камбалыного хребта, в виде лавовых и экструзивных образований.

Образования выделенного вулканогенного комплекса перекрывают породы разного возраста. На Охотском побережье лавы Кошелевского вулкана залегают на третичных и древнечетвертичных пирокластических и лавовых образованиях. В северной части Камбалыного хребта лавы базальтов, андезитов и их брекчии залегают на переотложенных псефитовых и алевропелитовых туфах древнечетвертичного возраста. Лавовые и пирокластические отложения вулканов Ильинского и Желтовского залегают на спекшихся туфах и пемзах.

Большинство вулканов сложено базальтами, андезитами и их шлаками. Из них по своему составу выделяется Дикий Гребень, образованный лавами дацитового состава. Вероятно, в связи с составом материала, вулкан имеет своеобразную форму: это большой однородный по составу купол, от которого в субширотном направлении распространяются лавовые потоки.

Среди эффузивного комплекса пород верхнечетвертичного возраста заслуживают внимания экструзивные образования, сложенные дацитами и прорывающие толщу осадочных пород. Они располагаются на западном склоне Камбального хребта, где в настоящее время проявляется гидротермальная деятельность и выходят паровые струи. Экструзивные куполы, прорвавшие осадочную толщу алевропелитовых и псефитовых туфов, дали небольшие лавовые потоки. С ними пространственно и, вероятно, генетически связаны кристалловитрокластические спекшиеся туфы северного склона хребта, имеющие мощность порядка 200—250 м и залегающие на псефитовых и алевропелитовых туфах.

Верхнечетвертичные и современные аллювиальные образования

Аллювиально-озерные осадочные отложения верхнечетвертичного возраста наиболее полно представлены в районе впадения р. Паужетки в р. Озерную. Озерные образования состоят из алевролитов, которые вверх сменяются переотложенной горшковой пемзой. Часто между ними имеются маломощные линзы конгломератов и прослойки глин, обогащенных органикой, местами глины, обогащенные органикой, переходят в слой торфа.

Современные аллювиальные образования развиты по долинам рек и морскому побережью. Представлены они аллювиальным валуно-галечным материалом и морскими песками, слагающими береговые валы. На восточном побережье в междуречье рек Ильинской и Уральской за береговыми валами получили распространение торфяники.

СОВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА РАЙОНА И ПУТИ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

В современной макроструктуре района наиболее видная роль принадлежит четвертичным вулканическим сооружениям. Андезито-базальтовые вулканы — Кошелевский, Камбальный, Ильинский и Желтовский, а также центр извержения кислых лав — вулкан Дикий Гребень занимают все вместе около одной трети общей территории и по высоте господствуют над окружающей местностью.

Кошелевскому и Камбальному вулканам присуще особое строение — в виде хребтов. Желтовский и Ильинский вулканы конусовидной формы. Вулкан Дикий Гребень морфологически отличен от них. Лавовые потоки его имеют своеобразную «морщинистую» поверхность. Центр вулкана — гора Неприятная не имеет ничего общего с конусами андезито-базальтовых стратовулканов, представляя собой однородный дацитовый купол. Объясняется это своеобразием физико-химическими свойствами извергавшегося материала.

Особое положение в структурном плане района занимает Камбальный хребет. Северная часть его, сложенная переотложенными туфами, перекрытыми лавами и брекчиями древнего Камбального вулкана, в настоящее время тектонически приподнята и представляет собой антиклиналь. На западном склоне хребта выступают хорошо выраженные морфологически дацитовые куполы. Структурной особенностью района является то, что молодые четвертичные вулканы не наращивают древний фундамент, а наоборот — располагаются на тех участках, где древние породы (в частности, третичные) не выходят на дневную поверхность. Участки, сложенные третичными и древнечетвертичными (?) породами и как бы окружающие молодые вулканические сооружения, имеют различную конфигурацию

и строение. На Охотском побережье, в пределах развития древних пород, выделяются обособленные друг от друга массивы, представляющие собой останцы древних вулканических аппаратов.

У многих из них еще сохранились ровные поверхности лавовых потоков. Однако вершинные части бывших вулканов разрушены эрозионными процессами. Лавовые потоки западного борта долины Паужетки образуют куэстовые поверхности (в западной части Гольгинского хребта, на востоке хр. Беляева, южнее Курильского озера). Обширное поле третичных пород в северной части района не может быть дифференцировано с такой же четкостью и выглядит как единое целое.

Крупная отрицательная структура района — впадина Курильского озера, дно которого в отдельных местах находится на 200 м ниже уровня моря. Судя по распространению пемзовых террас, тяготеющих к озеру, современный водоем размером 10×9 км наследует часть более древнего и обширного бассейна, имевшего неправильные очертания и, возможно, соединявшегося с морем. Современные берега озера образованы лавами молодых вулканов, и лишь в юго-восточной части современная береговая линия примерно совпадает с границей древнего бассейна.

Вторая впадина, выраженная, правда, не столь резко, находится в районе сочленения долин Паужетки и Озерной. Она стала местом накопления перетолженных туфов и озерных отложений.

Некоторые дополнительные сведения о структуре района дает анализ геофизических материалов, в частности аэромагнитной карты Л. А. Ривоша, интерпретация которой составлена Г. А. Карповым и Г. П. Яроцким,

На карте изодинам отчетливо отбиваются вулканические аппараты (положительные аномалии высокого порядка). Наблюдается прямая зависимость поля от состава пород, морфологии и высоты сооружения. Конусовидные стратовулканы Желтовский и Ильинский, имеющие основной состав лав, характеризуются положительными аномалиями высокого порядка изометричной формы. Вулканы Кошелева и Камбальный, тоже сложенные преимущественно породами основного состава, но представляющие собой хребты широтного и меридионального направления, отбиваются изодинамами этого же направления и формы.

Интересная особенность отмечается для вулканического сооружения Дикий Гребень. Высокий порядок аномалии, наблюдаемый над ним, свидетельствует об основном составе слагающих вулкан пород (учитывая общие закономерности, подтвержденные по другим вулканам района). Однако геологические данные позволяют говорить о кислом характере покровов и экструживного купола, венчающего сооружение. Интерпретируя геофизические данные, удалось установить, что кровля тела, вызывающего положительную магнитную аномалию, находится на глубине порядка 700—800 м. Сравнение порядка аномалии над этим вулканом с порядком аномалий над вулканами Желтовским и Ильинским с достоверно-основным составом изверженного материала обнаруживает большое сходство в значениях. Естественно предположить, что у Дикого Гребня на глубине 700—800 м находятся магнитоактивные породы основного состава. Следовательно, дацитовая экстружия явилась последним пароксизмом в деятельности вулкана, прикрывшим более основные образования древних извержений.

Отрицательные аномалии в районе Курильского озера связываются с отрицательным рельефом, так как аэромагнитная съемка очень четко отражает морфологические особенности местности, а озеро имеет значительную глубину (порядка 300 м).

Отрицательные аномалии на третичных отложениях на участке к западу от устья р. Паужетки и положительные аномалии на отложениях того же возраста и состава на Гольгинском хребте не противоречат общим закономерностям, установленным для района. Они вполне объяснимы, если учесть, что для третичных образований вообще характерна широкая вариация

ция магнитной восприимчивости от практически немагнитных до магнитных. Участки и зоны пород, подвергшиеся интенсивным изменениям, могут быть или насыщены магнитоактивными компонентами (привнос и перетолжение) и тогда будут характеризоваться положительной аномалией, или процесс выщелачивания приводит к полному обеднению магнитными компонентами и вторичному окварцеванию (формация вторичных кварцитов), что, естественно, дает отрицательную аномалию магнитного поля. Участок к западу от устья Паужетки как раз и представляет собой зону интенсивного вторичного окварцевания. Таким образом, общая структура района характеризуется мозаичным строением и, по всей ведомости, еще далека от консолидации. История формирования структуры трактуется по-разному. А. Е. Святловский и В. В. Аверьев (1961) большую роль придают резко дифференцированным движениям в земной коре, благодаря которым в древнечетвертичное время на южной оконечности Камчатки образовались глубокие впадины, ставшие впоследствии ареной молодой вулканической деятельности. Участки, сложенные третичными и древнечетвертичными породами, рассматриваются, согласно этой концепции, как отщипки более древней структуры, не вовлеченные в прогибание.

Существование опусканий с большой амплитудой подтверждается бурением. Установлено, что древнечетвертичные спекшиеся туфы в долине Паужетки залегают в настоящее время на глубине от 280 до 470 м ниже уровня моря, в то время как образование этой фации могло произойти, вероятней всего, только в наземных условиях. Однако в этих построениях имеются уязвимые места, так как выделенные зоны прогибания не находят своего продолжения на севере, а их действительные очертания мало похожи на те правильные формы, которые им вначале приписывались («структурный трог», по А. Е. Святловскому).

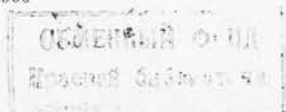
С. Е. Апрельков по основным моментам придерживался концепции, выдвинутой А. Е. Святловским и В. В. Аверьевым (1961), но высказался в общих чертах за идею существования кальдеры третичного щитового вулкана. По его мнению, выходы третичных вулканогенных толщ представляют не что иное, как ее останцы. Центральная часть заполнена Паужетской свитой, которая впоследствии была прорвана кислыми экструзиями. Летом 1963 г. в этом районе Камчатским геологическим управлением проводилась гравиметрическая съемка, данные которой позволили исследователям высказаться в поддержку гипотезы о существовании кальдеры в изученном районе. С. Е. Апрельков образование игнимбритов и спекшихся туфов связывает с ее образованием.

В. И. Белоусов рассматривает теорию развития района с иных позиций. Согласно его представлению, массивы, сложенные древними породами, представляют собой вулканические острова, некогда существовавшие в древнечетвертичном море. С течением времени вулканизм захватывал все большую и большую площадь в межостровном пространстве, а продукты его деятельности — лавы и туфы — заполняли морские впадины, наращивая таким образом континент.

В целом вопрос о формировании структуры района требует дальнейшей разработки. Весьма вероятно, что наиболее рациональной схемой явится синтез изложенных концепций.

Краткая характеристика гидротермальной деятельности в районе

Южная оконечность Камчатки характеризуется исключительно интенсивной и разнообразной гидротермальной деятельностью. Помимо Паужетских кипящих источников, здесь известны выходы теплых и горячих вод с углекислым газом и сероводородом, а также многочисленные газопаровые струи.



Краткое представление о мощности гидротерм района дает помещаемая ниже табл. 1.

Приведенные в таблице данные о дебите по степени точности далеко не равноценны. У источников он замерен с большой тщательностью, а у паровых струй — либо весьма приблизительно, либо вообще оценен только визуально. Тем не менее, даже такие ориентировочные данные позволяют констатировать следующее.

Таблица 1

Тепловая мощность гидротерм на южной оконечности Камчатки

Источники	Место выхода	Высота выхода, м	Температура, °С	Энтальпия, ккал/кг	Дебит, кг/сек	Тепловая мощность, ккал/сек
Углекислые						
Сивучинский	Подножие Кошелевского вулкана	250	48	48	0,4	20
Медвежий	Подножие Камбального вулкана	700	26	26	7	180
Тепловские	Подножие Камбального вулкана	200	20	20	15	300
Курильские	Подножие Ильинского вулкана	100	23		Незначит.	Незначит.
Сероводородные						
Озерновские	Среднее течение р. Озерной	50	84	84	8	670
Азотно-углекислые						
Паужетские	Северо-западное подножие Камбального хребта	100	100 на входе, до 200 на глубине	150	100 (в естеств. усл.)	15000
Сероводородно-углекислые паровые струи						
Восточно-Паужетские	Северо-западный склон Камбального хребта	300	98	639	До 1	640
Северо-Камбальные	Осевая зона Камбального хребта	700—1000	97—98	639	Около 4—5	3200
Южно-Камбальные						2500
Нижне-Кошелевские	Сомма Кошелевского вулкана	750	98	639	Около 15	9600
Верхне-Кошелевские		1400	94—124	639	Около 25	16000

Вынос тепла (имеется в виду вынос тепла гидротермами) в исследуемом районе осуществляется главным образом паровыми струями, на долю которых падает более 60% тепловой мощности, и кипящими Паужетскими источниками (около 30% в естественных условиях до начала бурения). В выносе горячих водных масс ведущая роль принадлежит Паужетским источникам (примерно 50% от общей суммы) и паровым струям (около 30%). Суммарная мощность высокотемпературных гидротерм превышает 90% в выносе тепла и 80% в выносе горячих водных масс. На этом фоне роль источников с температурой ниже 100° выглядит совершенно незначительной.

Выходы высокотемпературных гидротерм приурочены к двум крупным структурам: массиву Кошелевского вулкана и Камбальному хребту. По сравнению с другими четвертичными вулканами — Ильинским, Желтовским, Диким Гребнем — эти образования характеризуются длительной и сложной историей. Мощная гидротермальная деятельность возникла здесь на последних этапах развития вулканов.

Однако о связи гидротерм с вулканизмом можно говорить лишь в самом общем плане. Эти связи, как отмечает С. И. Набоко (1959), имеют парагенетический характер и обусловлены единым, общим источником тепла и эндогенных эманаций. Что же касается самих вулканических аппаратов, то они не играют сколько-нибудь существенной роли в формировании гидротерм. Характерно, что выходы гидротерм в исследуемом районе резко разобщены с эруптивными центрами. Это относится как к Кошелевскому вулкану, так и особенно к Камбальному хребту, вся северная часть которого не является вулканической, а образовалась в результате тектонического поднятия.

На Кошелевском вулкане имеются две мощные, концентрированные группы паровых струй. Одна из них — Нижне-Кошелевская — находится на внешнем западном склоне старой соммы, располагаясь на отметке 750 м. Дебит пара здесь составляет не менее 15 кг/сек. Вторая группа представлена Верхне-Кошелевскими фумаролами, выходящими в чашеобразном углублении к северо-западу от многоглавой вершины вулкана. Высота их выхода около 1400 м. Это самая мощная группа паровых струй в районе. Выход пара оценивается здесь величиной порядка 25 кг/сек.

На Камбальном хребте гидротермальная деятельность сосредоточена в его осевой зоне. Здесь, на высотах от 700 до 1000 м, протягивается почти 10-километровая полоса с большим числом рассредоточенных выходов паровых струй.

Условно они объединяются в две обширные группы: южную и северную. Суммарный вынос пара на Камбальном хребте ориентировочно равен 10 кг/сек.

Продолжение термальной зоны фиксируется в северо-западной части хребта на его склоне, где на отметке 300 м выходят Восточно-Паужетские паровые струи. Наконец, у северо-западного подножия хребта располагаются кипящие Паужетские источники. Само Паужетское месторождение будет подробно описано в последующих разделах.

Для паровых струй района характерны следующие особенности. В подавляющем большинстве случаев температура пара на выходе равна 97—98°, т. е. близка к точке насыщения. Лишь в одной мощной паровой струе на Верхне-Кошелевских фумаролах В. М. Сугрбовым была замерена температура 124°, что свидетельствует о перегретом состоянии пара. В большинстве струй пар насыщен. Это объясняется тем, что почти всюду мы имеем дело не с «первичным», а с «вторичным» паром. Последний либо представляет собой продукт профильтровывания первичного пара через водосодержащие горизонты, либо образуется в результате кипения высокотермальных грунтовых вод, приобретших высокую температуру за счет поглощения первичного пара¹.

«Вторичный» пар распространен наиболее широко. Именно поэтому выходы пара локализуются по большей части в оврагах, ложбинах, к которым стягиваются грунтовые воды. В местах дренажа происходит их вскипание и отделение вторичных паровых струй. В процессе кипения в паровую фазу переходят растворенные в воде газы, принесенные вместе с первичным паром. В составе газов преобладает CO₂, концентрация которого

¹ Употребляя по отношению к пару термин «первичный», мы не вкладываем в него какого-либо генетического смысла. Этот пар является первичным лишь по отношению к тем паровым струям, которые выходят на поверхность.

достигает нескольких $г/кг$ пара. Во всех паровых струях фиксируется также сероводород (десятки $мг/кг$), а также аммиак, азот и инертные газы. Депарированная вода собирается в термальные ручьи, известные почти на всех fumarольных полях. Дебит их достигает десятков литров в секунду. В ряде случаев, правда, термальные ручьи имеют иное происхождение и образуются при поверхностном смешении холодных снеговых ручьев с конденсатами пара на термальной площади.

Поскольку развитие овражной сети связано с высотным положением местных базисов эрозии, то и в расположении паровых струй также наблюдается определенная этажность. В частности, в районе Камбального хребта отчетливо выделяются верхний этаж на отметках 700—800 м, нижний — на 100—200 м и менее определенно промежуточный на отметках 300—400 м. С этими уровнями связаны не только выходы пара, но и участки гидротермально измененных пород.

Вопросы происхождения и формирования гидротерм в настоящее время еще нельзя считать всесторонне разработанными. Единое мнение по этим вопросам отсутствует. В то же время работы по использованию гидротерм вулканических областей в энергетических целях повлекли за собой ряд исследований, которые в какой-то мере приблизили нас к пониманию процессов формирования гидротерм, позволив отказаться от ряда устаревших представлений.

Исследования последних лет показали, что мощные гидротермальные системы Камчатки и других вулканических областей приурочены к интенсивным тепловым аномалиям с удельным выносом тепла, в десятки и даже сотни раз превышающим средние показатели для Земли. В этом отношении район Паужетки не является исключением. Если отнести суммарный вынос тепла гидротермами к площади структур, на которых происходит их формирование, то удельный вынос тепла составит около $1000 \text{ ккал/сек} \cdot \text{км}^2$. Эта величина почти на два порядка выше средних показателей для Земли ($12 \text{ ккал/сек} \cdot \text{км}^2$).

В верхних горизонтах земной коры перенос тепла с такой интенсивностью может быть реально обеспечен только с помощью пара. Этот вывод в настоящее время разделяется также многими зарубежными исследователями (Banwell, 1957; White, 1961), хотя происхождение этого глубинного пара трактуется по-разному. Признается также, что глубинный (или, как его большей частью называют, «эндогенный») пар является носителем газов и даже, как полагает Уайт (White, 1961), солей, таких, как хлористый натрий. Формирование гидротермальных систем происходит в результате смешения эндогенных эманаций с инфильтрационными водами в рамках конкретных гидрогеологических структур (рис. 4).

Подъему глубинного пара, по-видимому, немало способствуют зоны смятия и трещиноватости пород, которые фиксируются вдоль оси Камбального ядра и, вероятно, имеют место на Кошелевском вулкане. Однако можно предполагать, что фронт поднимающихся снизу горячих эманаций в общем значительно шире по площади, чем зона его поверхностного проявления. При приближении к поверхности, в неоднородных условиях по пути движения, происходит «дробление» единого фронта эманаций на отдельные потоки.

Для проявления парогидротермальной деятельности решающее значение имеет соотношение между количествами поступающего снизу пара и холодных инфильтрационных вод, с которыми он смешивается. Для того, чтобы могли существовать вторичные паровые струи, необходимо, чтобы количество первичного пара было не меньше $1/6$ по отношению к массе холодных вод. В противном случае температура смеси будет ниже 100° и вторичный пар образовываться не сможет. Это условие выдерживается в вершинных частях вулканических массивов и горных хребтов, т. е. на тех участках, где площадь водосбора ограничена и где отсутствуют мощ-

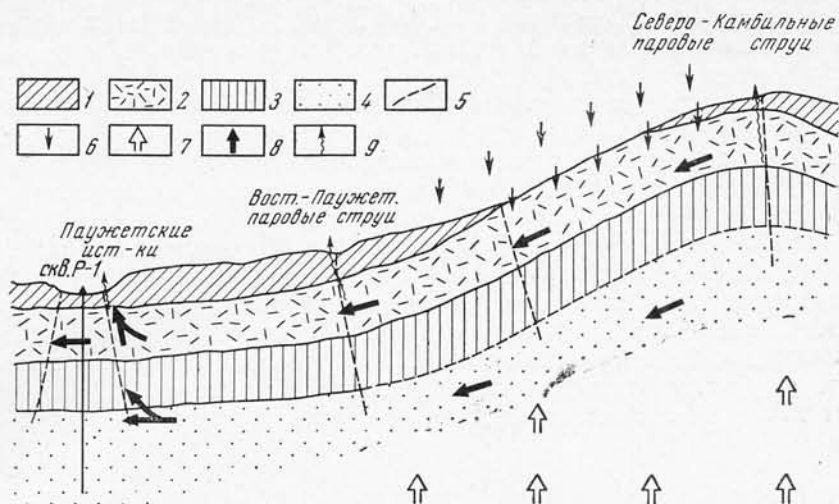


Рис. 4. Схема формирования и разгрузки Паужетских гидротерм

1 — алевропелитовый чехол; 2 — псефитовые туфы; 3 — спекшиеся туфы; 4 — туфопесчаники; 5 — разломы; 6 — инфильтрационные воды; 7 — эндогенный пар; 8 — высокотемперальные воды; 9 — паровые струи

ные грунтовые потоки. Поэтому парогидротермальная деятельность проявляется наиболее интенсивно на высоких отметках. Это относится как к Камбальному хребту, так и к Кошелевскому вулкану (рис. 4).

Другим важным фактором, определяющим формирование высокотемпературных гидротерм, является состав пород и строение геологического разреза. Высокотемпературные гидротермы приурочены по большей части к комплексам пород с относительно низкими фильтрационными свойствами. В этих условиях не может происходить внедрение мощных потоков холодных инфильтрационных вод, которые охладили бы систему. Так, на Камбальном хребте паровые струи выходят лишь в тех местах, где отсутствует покров молодых трещиноватых лав. Последние содержат большое количество трещинных холодных вод, через которые пар не может пробиться к поверхности.

С другой стороны, вмещающим высокотемпературных гидротерм могут быть и породы с хорошей проницаемостью, если только они надежно изолированы от проникновения холодных вод вышележащими водоупорными слоями. Подобную роль верхнего водоупора играют алевропелитовые туфы Паужетской свиты на северо-западном склоне Камбального хребта, где они перекрывают псефитовые туфы, в которых циркулируют хлоридно-натриевые воды с температурой до 200°. Не случайно, по-видимому, на северо-восточном склоне хребта, где алевропелитовый чехол отсутствует, выходов термальных вод не наблюдается.

Потоки горячих эманаций, которые при подъеме вверх попадают в условия сильной обводненности пород, полностью поглощаются холодными водами и часто не могут быть обнаружены. При более благоприятных соотношениях они дают начало теплым углекислым источникам, выходящим на склонах вулканических массивов. Таковы источники Сивучинский и Медвежий, у подножия Кошелевского вулкана, и Тепловодские — у подножия вулкана Камбального. На северном склоне Кошелевского вулкана теплые источники отсутствуют. Однако здесь имеется ряд выходов холодных трещинных вод, обогащенных CO_2 , что, по-видимому, является следствием поглощения ими газопаровых эманаций. Максимальная концентрация CO_2 — до 500 мг/л наблюдается в Средне-Паужетских источниках, имею-

щих огромный дебит — около $1 \text{ м}^3/\text{сек}$. Температура воды в них — 7°C , т. е. несколько выше, чем в пресных холодных источниках, и не испытывает сезонных колебаний.

У северо-восточного подножия Камбального хребта, на оз. Витаминном, выходят холодные газовые струи, состоящие, в основном, из CO_2 с примесью сероводорода. Их можно рассматривать как косвенное проявление существующей на глубине гидротермальной деятельности.

Таким образом, цифры о масштабах гидротермальной деятельности в районе исследования, приведенные в табл. 1, следует расценивать как минимальные. Они относятся лишь к видимым и легко обнаруживаемым проявлениям процесса и совершенно не учитывают скрытые формы его существования. В действительности гидротермальный процесс протекает в значительно больших масштабах. Следовательно, Паужетское месторождение располагает мощными потенциальными тепловыми ресурсами, достаточно надежно обеспечивающими перспективы его эксплуатации.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Паужетская термальная площадь входит в состав большой зоны термальных проявлений, тянущейся вдоль осевой зоны Камбального хребта и продолжающейся на его северо-западном склоне (рис. 5). По сути дела вся эта зона представляет собой единую гидротермальную систему, в которой, в зависимости от геолого-структурных и геотермических условий, гидротермы проявляются либо в виде струй пара, либо в виде пароводяных источников. Однако, исходя из соображений чисто практического порядка, под собственно Паужетским месторождением понимают обычно не всю зону, а более или менее ограниченный ее участок. Он включает термальную площадку Паужетских источников и непосредственно примыкающую к ней территорию, в пределах которой на глубине первых сотен метров находятся высокотермальные воды, пригодные для энергетического использования (рис. 5).

В настоящее время территория распространения высокотермальных вод в долине Паужетки оконтурена с юго-запада, запада и севера. По направлению на юго-восток она смыкается с термальными проявлениями на склоне Камбального хребта, в частности, с Восточно-Паужетскими паровыми струями и продолжается, по-видимому, еще дальше. Таким образом, Паужетское месторождение представляет северо-западную периферию уже упоминавшейся термальной зоны Камбального хребта.

В геолого-структурном отношении Паужетское месторождение находится у северо-западного подножия антиклинальной структуры Камбального хребта. Северо-западное крыло ее сложено туфами преимущественно дацитового состава, общей мощностью до 450 м, перекрытыми в отдельных местах кислыми лавами экструзивных куполов. Характерной особенностью северо-западного крыла является двучленное строение туфовой толщи. В нижней ее части залегают псефитовые туфы, а сверху — плотные алевропелиты (рис. 6). Алевропелитовый чехол мощностью до 100 м, тянущийся от осевой зоны хребта до долины Паужетки, играет, по-видимому, очень важную роль, предохраняя термальные воды, циркулирующие в псефитовых туфах, от разбавления холодными поверхностными водами.

Факка и Тонани (Facca, Tonani, 1964, 1962), анализируя данные по нескольким гидротермальным системам вулканических зон земного шара, пришел к выводу, что чехол из плотных пород, подобных алевропелитовому слою Паужетского месторождения, — необходимая составная часть структуры гидротермальной системы.

Ниже толщи псефитовых туфов разрез сложен андезитовыми туфобрекчиями, спекшимися туфами и игнимбритами, которые подстилаются третичными вулканомиктовыми песчаниками.

Северо-западное окончание Камбального хребта представляет моноклинал, наклоненную на северо-запад под углом 10—20°. Сравнительно простое строение моноклинали осложнено вторжением экструзивных тел дацитового состава и разрывными нарушениями взбросового типа.

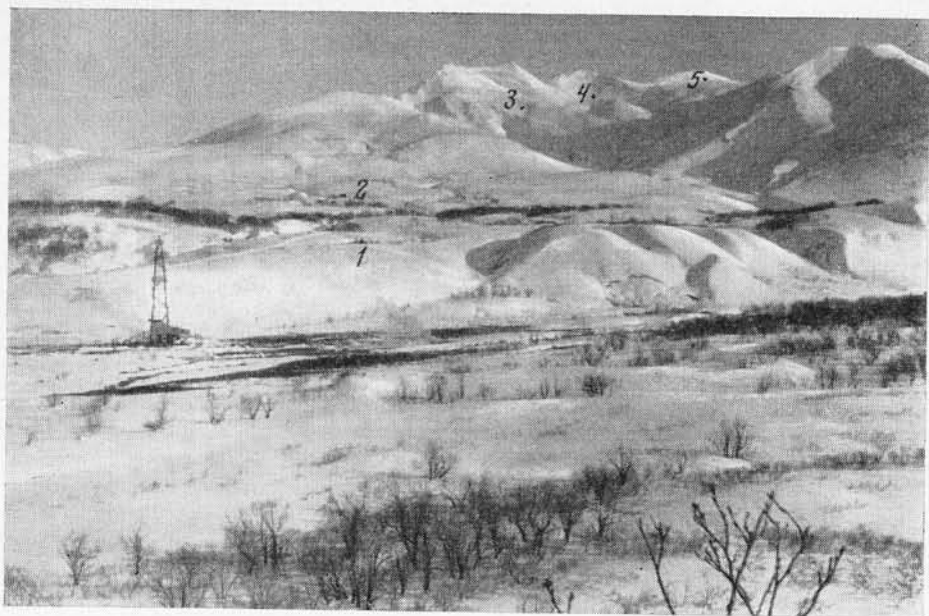


Рис. 5. Северо-западные отроги Камбального хребта. На переднем плане термальная площадка в долине Паужетки

1 — Верхнее термальное поле; 2 — Восточно-Паужетские паровые струи; 3 — 5 — Северо-Камбальные паровые струи. Фото В. М. Сугрובה

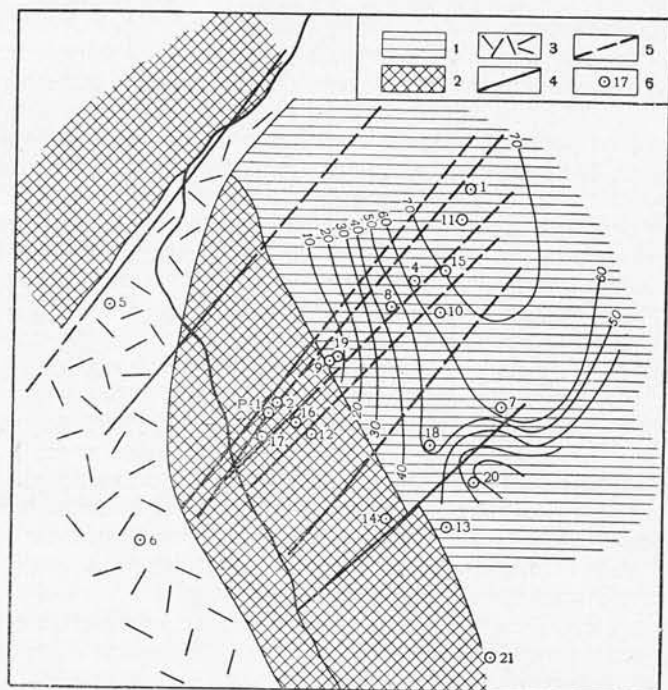


Рис. 6. Геологическая карта очага разгрузки Паужетских терм (верхний аллювиально-делювиальный чехол снят)

1 — алевропелиты; 2 — алевропсаммитовый туф; 3 — псефитовый туф; 4 — предполагаемые разрывные нарушения; 5 — предполагаемые разрывные нарушения под алевропелитами; 6 — скважины. Линии с цифрами — изопахиты. В алевропелитах даны изолинии равных мощностей через 10 м

Разрывные нарушения имеют в основном северо-восточное простирание (рис. 6). Амплитуда их сравнительно небольшая — в пределах 2—3 десятков метров.

Разрывные нарушения фиксируются в долине Правой Паужетки, существование которой во многом предопределено молодым разломом, а также в районе выходов Паужетских источников. Сочетание тектонической раздробленности подножия моноклинали с глубоким эрозионным врезом обусловило локализацию разгрузки гидротерм в ее современных очертаниях.

ПОРОДЫ, СЛАГАЮЩИЕ ПАУЖЕТСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ

К наиболее древним породам, вскрытым бурением на Паужетском месторождении, принадлежит толща вулканомиктовых песчаников, относимая С. Е. Апрельковым к анавайской серии ($Pg + N_1^1$). Толща эта залегает на глубине более 650 м.

Вулканомиктовый песчаник средней плотности, однообразный, зеленого цвета, среднезернистый, сложен обломками лав базальтов и андезитов, кристаллами плагиоклазов, авгита. Цемент хлоритовый. Развита процесс вторичного минералообразования: хлоритизация и цеолитизация. Валовой химический состав указывает на то, что породы, которые разрушались и служили поставщиком материала, были, вероятно, основного состава.

Над песчаниками залегает туфобрекчия, которая в свою очередь перекрывается спекшимся туфами дацитов. Мощность туфобрекчий 80 м (рис. 7).

Спекшиеся туфы дацитов по стратиграфической схеме, взятой за основу в настоящей работе, датируются древнечетвертичным возрастом (Q_1^1). Они прочно сцементированы, массивные, светло-серого цвета, с кристалловитрокластической структурой. Туфы сложены в основном обломками кристаллов плагиоклаза, кварца, роговой обманки, авгита и рогульками вулканического стекла. Межобломочное пространство выполнено вулканическим стеклом и мелкими пепловыми частицами, которые еще в размягченном состоянии спекались между собой. В туфах рассеяны редкие обломки базальтов и иногда — андезитов. Обломки пород округлые. Размеры их достигают 4—5 см. Химический состав спекшихся туфов отвечает составу дацитов.

Толща спекшихся туфов имеет мощность 190 м. Полностью они были пройдены одной роторной скважиной. Скважинами колонкового бурения вскрыта только верхняя часть толщи и то не на всем разведанном участке.

Выше по разрезу залегает туфобрекчия андезитов, которая также датируется древнечетвертичным возрастом (Апрельков, 1961, паужетская свита $N_2^3 - Q_1$).

Это плотная, массивная порода, состоящая из обломков лав андезитов и реже — базальтов. Обломки слабо округлые. Размер их различный: от 1—2 см до нескольких десятков сантиметров в поперечнике. Заполняющая межобломочное пространство масса состоит из обломков пород и кристаллов размером от алевритовых до песчаных частиц. Цемент карбонатно-хлоритовый. В туфобрекчиях по трещинам развиты кальцит, цеолит. По кристаллам плагиоклазов развивается хлорит и кальцит. В валовом химическом составе туфобрекчий содержание кремниевой кислоты составляет 51—52%.

Толща андезитовых туфобрекчий вскрыта многими скважинами. По данным бурения, ее мощность в пределах месторождения колеблется от 70 до 140 м, уменьшаясь в сторону Камбальего хребта (рис. 7).

Выше туфобрекчий залегает толща псефитовых туфов. При разведке на термальные воды эта толща была наиболее детально изучена с помощью колонкового бурения, так как она оказалась наиболее водообильной, что в значительной степени обусловлено ее текстурными и литологическими

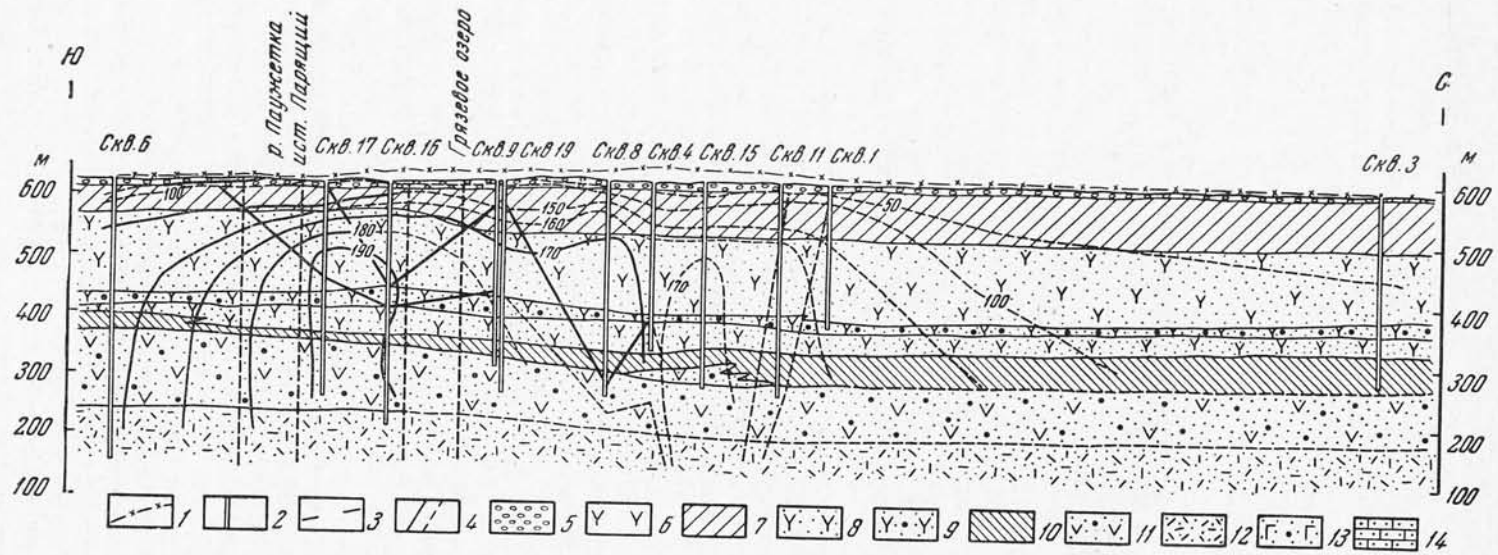


Рис. 7. Геолого-гидрогеологический разрез по линии I — I

1 — пьезометрический уровень термальных вод; 2 — разведочные скважины; 3 — геозотермы; 4 — тектонические нарушения, установленные и предполагаемые; 5 — аллювиальные отложения; 6 — лавы и лавобрекчии андезито-дацитового состава; 7 — чередующиеся прослойки пемловых, псаммитовых и псефитовых туфов дацитового состава; 8 — туфы псефитовые пемзовые дацитового состава; 9 — туфобрекчии; 10 — чередующиеся прослойки псефитовых, псаммитовых и алевролитовых туфов; 11 — туфобрекчии андезито-дацитового состава; 12 — спекшиеся туфы дацитового состава; 13 — туфы и туфобрекчии основного состава; 14 — песчаники

особенностями. В связи с этим целесообразно привести подробное описание ее разреза. Во многих скважинах в основании этой толщи обнаруживается мало мощная пачка слоистых песчаников.

В вертикальном разрезе толща псефитовых туфов неоднородна, и в ней выделяются пять горизонтов (рис. 7, 8). Снизу вверх:

1. Сложен псефитовым туфом дацитов литовитрокластической структуры, слабо сцементированным цеолитовым цементом. Мощность его в центре разведанного участка достигает 85 м.

2. Представлен туфобрекчией, резко сменяющей псефитовые туфы. Туфобрекчии прочно сцементированы цеолитовым и карбонатным цементом. Обломки представлены андезитами и базальтами, земзой, кристаллами плагиоклаза, авгита. Мощность этого горизонта колеблется в значительных пределах, уменьшаясь в восточном направлении, но не превышает 35 м.

3. Представлен псефитовым туфом. Переход от туфобрекчии к туфам происходит постепенно. Агломеративные туфы дацитов третьего горизонта имеют серовато-зеленый цвет и обладают литовитрокластической структурой. Они слабо сцементированы цеолитовым цементом. Обломки в туфах в основном представлены базальтом, андезитом, пемзой, кристаллами плагиоклазов. Межобломочное пространство выполнено пепловыми частицами и вторичными минералами. Мощность горизонта 50—60 м.

4. Представлен туфобрекчией, весьма сходной с вышеописанным вторым горизонтом. Здесь также преобладают обломки лав базальтов и андезитов. Однако мощность этого горизонта меньше и не превышает в пределах разведанной площади 15 м. Он четко прослеживается в разрезах разведочных скважин.

Как и в предыдущем случае, нижняя граница туфобрекчии выражена резко, а верхняя отбивается нечетко.

5. Сложен псефитовым туфом, причем в нижней половине горизонта обломочная составляющая представлена мелкими обломками лав базальтов, андезитов и пемзы. Обломки лав базальтов и андезитов рассеяны по всей породе более или менее равномерно. Постепенно вверх их содержание уменьшается и большее значение приобретают обломки пемзы.

Межобломочное пространство выполнено пепловыми частицами, процентное содержание которых также увеличивается вверх по разрезу.

Верхняя половина пятого горизонта сложена псефитовым пемзовым туфом дацитов, зеленовато-серого цвета, литовитрокластической структуры, слабо сцементированным цеолитовым цементом. Полный разрез этого горизонта имеет мощность 70—80 м.

Мощность толщ псефитовых туфов в пределах разведанного участка колеблется от 180 до 240 м. Она сокращается в южном направлении. В северо-восточной части наблюдается уменьшение мощности пятого горизонта псефитовых пемзовых туфов за счет древней эрозии (см. рис. 7, 8).

Характер продуктивной толщ Паужетского месторождения во многих чертах сходен с продуктивными толщами месторождений высокотермальных вод, таких, как район Гейзеров на Камчатке, Вайракей и Вайотану в Новой Зеландии. По-видимому, подобного типа толщ являются тишичными, а может быть и необходимыми при формировании высокотермальных вод.

Как уже выше отмечалось, толща псефитовых туфов перекрывается чехлом плотных алевропелитовых и алевропсаммитовых туфов, являющихся водоупором как для холодных, так и для высокотермальных вод. По простиранию этот чехол не однороден. Если в центральной части участка, где происходит поверхностная разгрузка термальных вод, алевропелитовые и алевропсаммитовые туфы как бы венчают толщу псефитовых туфов и являются ее естественным продолжением, то в северной части формирование чехла происходило в более позднее время и генетически не связано с толщей псефитовых туфов. Первые из них сильно трещиноватые, подвержены процессам вторичной переработки гидротермальными растворами, а более молодые имеют свежий облик и резко увеличивают мощность в северном направлении. Их залегание не нарушено трещинной тектоникой, и в верхней части разреза алевропелитовые и алевропсаммитовые туфы имеют четкую слоистость. Разрез толщ подобного типа вскрыт скважинами и в юго-восточном направлении.

На алевропелитовых и алевропсаммитовых туфах залегают небольшие по мощности слои пемзовых агломератовых туфов, гравелитов и грубозернистых песчаников.

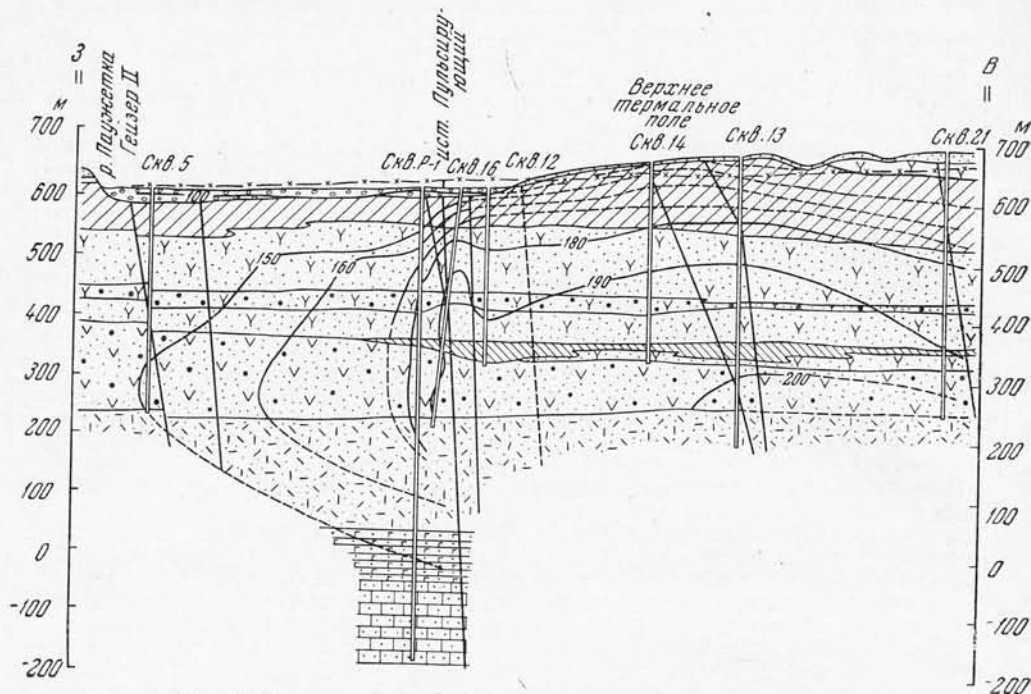


Рис. 8. Геолого-гидрогеологический разрез по линии II — II

Условные обозначения см. на рис. 7

В долине Паужетки разрез венчается аллювиальными отложениями. В северном направлении наблюдаются довольно резкие фациальные изменения. Об этом можно судить по самой северной скважине. Ее разрез, общей мощностью более 300 м, представлен переслаивающимися псефитовыми и пепловыми туфами с песчаниками.

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Как уже указывалось, Паужетское месторождение находится у северо-западного подножия антиклинальной структуры Камбального хребта. Толща туфов залегает здесь со слабым наклоном на северо-запад. Мощность отдельных слоев туфов, туффитов и туфобрекчий в продуктивной толще не выдержана и варьирует на незначительных расстояниях. Это обычное явление в областях накопления пирокластического материала. Характер пород в толще псефитовых и алевропелитовых туфов (туффитов) меняется в пределах небольших участков. Соответственно изменяются и условия обводненности.

Толща пород в области разгрузки гидротерм разбита системой трещин. На разведанном участке прослеживаются три крупные зоны дробления. Каждой зоне в отдельности присущи свои характерные особенности, но имеются общие признаки для всех зон.

Зоны нарушения, выделенные в очаге разгрузки Паужетских термальных вод, молоды, и поэтому они ярко выражены в рельефе, прослеживаясь на поверхности в виде уступов террас. Кроме того, зоны дробления на поверхности фиксируются естественными выходами высокотемпературных

вод. Зоны нарушений представляют собой вытянутые в северо-северо-восточном и северо-восточном направлении системы разломов сбросового типа. Направление отдельных разломов в зоне нарушений может в точности не совпадать с направлением зоны. Помимо сбросов в зонах дроблений развиты трещины без смещений и оперяющие разломы. Детали строения каждой зоны в отдельности удастся установить далеко не всегда, и в понимании их структуры имеет место значительная доля условности и допущений.

Первая зона нарушений проходит по левому борту долины Паужетки у самого русла. На юге зона нарушения протягивается вдоль современного русла Левого Паужетки. На поверхности она выражается в виде обрыва высотой 25—30 м. Падение зоны юго-восточное. Угол падения очень крутой — порядка 75—80°. Сброшено восточное крыло. Вдоль сбрасывателя отмечается тектоническая брекчия. Следует отметить, что непосредственно под аллювием и в аллювии поднятого крыла обнаружена галька агломератовых туфов, не затронутая процессами вторичного минералообразования, тогда как в разрезе скв. К-5 на опущенном крыле верхняя часть горизонта псефитовых туфов дацитов подвергнута обработке гидротермальными растворами.

О трещиноватости в этой зоне нарушения трудно судить по данным одной скважины и из-за слабой обнаженности. Некоторые факты подтверждают ее наличие. Толща псефитовых туфов разбита редкой системой трещин, и при бурении с некоторых интервалов глубин (от 25 м до 50 м) не был получен керн.

В левом борту долины Паужетки алевропелитовые туфы разбиты также редкой системой трещин, с сочащимися выходами теплых вод. Трещины по характеру относятся к трещинам отрыва без смещения с неровными краями и являются, по-видимому, оперяющими.

Вторая зона нарушений проходит по правому борту долины Паужетки у подножия высокой террасы. Эта зона наиболее детально разведана скважинами колонкового бурения. Общее направление зоны северо-восточное. Падение юго-западное с углом падения 75—80°.

Зона представляет собой систему разломов сбросового типа. Как указывалось ранее, направление каждого разлома различное, но контролируется общим направлением зоны нарушения. Падение отдельных разломов также контролируется падением зоны нарушения. На основании данных бурения выделяются два наиболее крупных разлома, по которым произошло поднятие узкого вытянутого участка, расположенного у подножия правобережной террасы. Эти разломы фиксируются несколькими скважинами по косвенным признакам. К ним относятся данные по выходу керна и по поглощению промывочной жидкости во время бурения. При вскрытии наиболее крупных разломов или участков дробления происходили выбросы пароводяной смеси в процессе бурения. Некоторые из них были аварийными, что не позволило продолжать бурение.

Ослабленные зоны или зоны сильной трещиноватости устанавливались также по скорости проходки, а на скв. 11 наблюдалось свободное падение бурового инструмента на 20—30 см.

На участке выхода естественных источников при бурении и пробных выпусках пароводяной смеси из скважин отмечалось уменьшение их расходов. Кроме того, зона нарушения вырисовывается при построении продольных и поперечных разрезов по резкому изменению мощностей. Трещиноватость в этой зоне, судя по керну, очень интенсивная. Наибольшей трещиноватостью характеризуются алевропелитовые и алевропсаммитовые туфы в юго-западной части зоны нарушения. Трещины имеют ровные края и относятся к трещинам скалывания. В алевропелитовых туфах в северо-восточной части месторождения трещиноватость редкая. В толще псефитовых туфов мелкая трещиноватость менее интенсивная, но широко развиты жилки и прожилки, выполненные минералами.

Разломы, по-видимому, усложнены большим количеством сколовых и обрывных трещин типа оперяющих. Падение некоторых из них не совпадает с падениями разломов.

Важнейшей особенностью структуры очага разгрузки является то, что в его южной части разломы нарушают всю туфовую толщу, в то время как в северо-восточной части участка разломы проходят только в толще псефитовых туфов, не захватывая выпележащих алевропелитов.

В соответствии с этим естественные выходы термальных вод в зоне нарушений обнаруживаются только в южной части участка, а на северо-восточном продолжении зоны их не наблюдается.

Третья зона нарушений располагается далее на юго-восток. На поверхности она проявляется в виде невысокого уступа на правобережной террасе Паужетки и фиксируется выходами паровых струй.

По результатам, полученным при бурении скважин, в зоне прослеживается один крупный разлом сбросового типа. Восточное крыло его опущено, западное приподнято.

Разлом в скважине фиксировался мощной зоной окремнения в алевропелитовых туфах, выбросами пара и полным поглощением промывочной жидкости. По данным новозеландских геологов, разрывные нарушения на месторождении Вайракей также характеризуются зонами окремнения. По-видимому, это вызвано большим перепадом температур, имеющим место при парообразовании в зонах дроблений, в результате чего растворимость кремнезема понижается и часть его отлагается на уровне парообразования.

Разлом, как следует из данных бурения соседних скважин, заданных за его пределами, по-видимому, осложнен оперяющими трещинами. Наличие их можно предполагать по данным замеров расхода температур и теплоемкости в скважинах. Выявляются и интервалы сосредоточенного водопритока, что, вероятно, обусловлено трещинным питанием.

Мелкая трещиноватость довольно интенсивно развита в туфобрекчиях. Имеются трещины со следами слабого смещения пород и признаками сдавливания, что фиксируется зеркалами скольжения. Большинство мелких трещин выполнено вторичными минералами: кальцитом, вторичным кварцем и адуляром.

В отличие от предыдущих зон нарушения эта зона омоложена более молодыми подвижками, так как она прослеживается в молодых алевропелитовых туфах.

Выделенные зоны нарушений не являются изолированными друг от друга. Пространства между зонами разбиты трещинами и, вероятно, достаточно крупными, чтобы в них происходили аккумуляция и дренаж термальных вод. Не исключено также, что между выделенными зонами имеются и крупные разрывные нарушения.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ТЕРМОПРОЯВЛЕНИЯ НА ПАУЖЕТСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

ВЫХОДЫ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Естественные термоявления в долине Паужетки сосредоточены на площадке размером 500×1000 м, вытянутой в северо-северо-западном направлении. Характер термоявлений и их распределение по площади в значительной мере контролируются геолого-структурными особенностями месторождения.

Основное вместилище высокотермальных вод на месторождении — толща псефитовых туфов, перекрытая сверху алевропелитовым чехлом, играющим роль относительного водоупора. Сосредоточенные термоявления в виде мощных кипящих источников и паровых струй находятся в южной части термальной площадки, там, где водоупорные отложения разбиты крупными трещинами. В северо-западной части площадки водоупор, как указывалось, отсутствует, и псефитовые туфы перекрыты непосредственно аллювиальными отложениями (рис. 6). В этом месте наблюдается преимущественно рассредоточенная разгрузка, дающая начало большому числу мелких источников, многие из которых имеют температуру ниже точки кипения, благодаря примеси холодных грунтовых вод (рис. 9).

Первые сведения о Паужетских источниках относятся к 30-м годам XVIII столетия. С. П. Крашенинников (1949), посетивший источники в то время, так описывал виденное: «Ключи бьют во многих местах как фонтаны по большей части с великим шумом в вышину на один и на полтора фута. Некоторые стоят как озера в великих ямах, а из них текут маленькие ручейки, которые, соединяясь друг с другом, всю помянутую площадь как на острова разделяют, и нарочитыми речками впадают в означенную Пауджу».

К числу наиболее крупных кипящих источников относятся Парящий I, Парящий II, Пульсирующий, Южный и Грязевое озеро. Все они располагаются в юго-восточной части площадки.

Источник Парящий I расположен на пойме у подножия I правобережной террасы Паужетки. Воронка источника имеет диаметр около 1 м. Она заполнена валунами, между которыми выбивается клокоцущая, кипящая вода, поднимая столб брызг на высоту около полуметра. Над источником стоят клубы пара. Валуны вокруг источника сцементированы кремнистыми отложениями, образуя у восточного борта грифона гладкую поверхность. На отдельных камнях гейзерит образует налеты, натеки и друзы. Площадка источника никогда не покрывается снегом.

Дебит источника отличается стабильностью и составляет 10—11 л/сек.

Парящий II — второй по величине источник Паужетской группы. По рассказам старожилов существует с 1947—1948 гг. Источник расположен почти у самого русла Правой Паужетки, на правом ее берегу, в 160 м к юго-западу от источника Парящий I. В паводки он заливается речной водой.

Воронка источника не оформлена. Кипящая вода выбивается из речного галечника и поднимает фонтаны брызг на высоту до 0,3 м. Вокруг источника галька покрыта легкими налетами гейзерита. В небольших

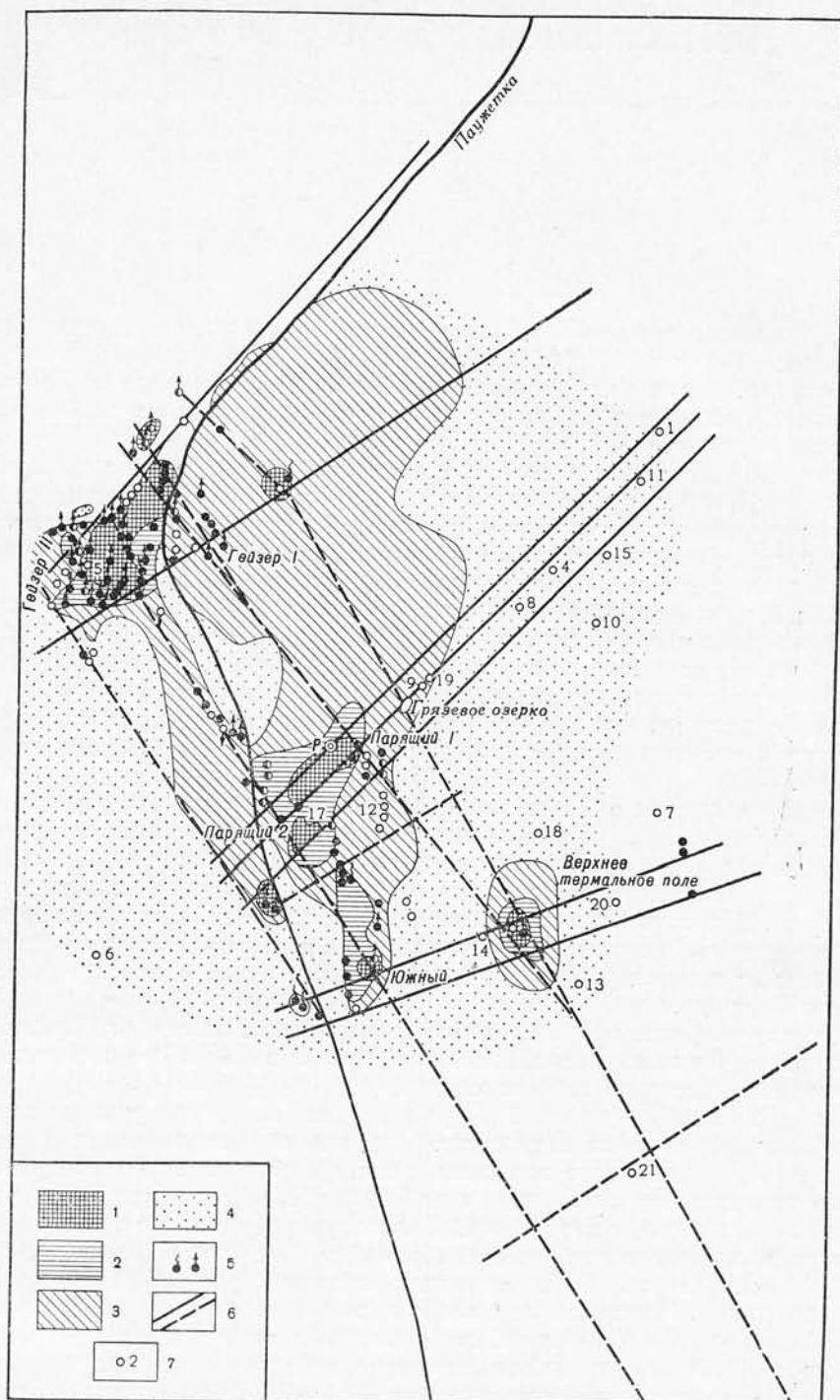


Рис. 9. Гидротермометрическая карта Паужетской термальной площади
 Участки с температурой пород на глубине 1 м: 1 — от 70 до 100°; 2 — от 50 до 70°; 3 — от 20 до 50°; 4 — меньше 20°; 5 — термальные источники; 6 — тектонические нарушения; 7 — номера скважин

песчаных лунках из мельчайших отверстий выбиваются паровые струйки. Дебит источника в среднем равен $4,5 \text{ л/сек}$.

Температура в пароводяных источниках соответствует точке кипения при атмосферном давлении, т. е. $99-100^\circ$. В этом отношении все кипящие Паужетские источники похожи друг на друга. Однако соотношение между паром и водой в них различное, что указывает на различную температуру поступающих с глубины вод, так как паросодержание строго контролируется исходной температурой воды.

Определение паросодержания и расчет температур были проведены В. В. Аверьевым и К. П. Флоренским в 1957 г. на обоих Парящих источниках. На Парящем I содержание пара составило более 9 вес. % от общего выхода пароводяной смеси, на Парящем II—7%. Это соответствует температуре воды до вскипания в первом случае около 150°C и во втором — 137°C . Меньшая температура воды, питающей грифон Парящего II, по-видимому, не случайна и объясняется влиянием холодных подрусловых вод, охлаждающих исходные высокотермальные воды.

При определении паросодержания был применен метод заливки грифонов кипящих источников холодной водой. Холодная вода подводилась к источнику и заливалась его тонким слоем так, чтобы пузырьки пара оказывались полностью сконденсированными. В процессе измерений велся контроль за расходом холодной воды и за расходом смешанной воды на выходе из воронки источника, которая представляла собой сумму расходов холодной и горячей воды и сконденсированного пара. Кроме того, измерялась температура холодной воды и температура на выходе из воронки источника. Дополнительно велся гидрохимический контроль.

Расход пара — D_n (в весовом выражении) можно было рассчитать по прямому приросту расхода:

$$D_n = D \text{ суммарный } (D \text{ холодной воды} + D \text{ горячей воды до заливки}).$$

Этот расчет, однако, дает заниженные значения паросодержания, так как при наливе холодной воды кипящий источник, как правило, немного «задавливается», и выход горячей воды из грифона в момент замера в действительности бывает меньше того значения, которое подставляется в расчет.

Чтобы исключить из расчетов эффект «задавливания», более правильно пользоваться уравнениями теплового или химического баланса. В первом случае рассчитывается непосредственно энтальпия пароводяной смеси и соответствующая ей температура воды до вскипания

$$i_{\text{пвс}} = \frac{Q_{\text{сум}} - Q_{\text{хол}}}{D_{\text{сум}} - D_{\text{хол}}},$$

где $i_{\text{пвс}}$ — энтальпия пароводяной смеси; Q — вынос тепла.

Во втором случае по уравнению химического баланса определяется концентрация какого-либо химического компонента в пароводяной смеси. В условиях Паужетки был выбран хлор-ион, так как он содержится в минимальном количестве в холодной воде и в максимальном — в горячей

$$CCl'_{\text{пвс}} = \frac{\Sigma CCl'_{\text{сум}} - \Sigma CCl'_{\text{хол}}}{D_{\text{сум}} - D_{\text{хол}}},$$

где $CCl'_{\text{пвс}}$ — концентрация хлор-иона в пароводяной смеси; $\Sigma CCl'$ — вынос хлор-иона.

Найденная концентрация хлор-иона в пароводяной смеси была меньше, чем его концентрация в горячей воде, так как пар при низком давлении практически не содержит солей. Последнее обстоятельство бралось за основу при расчете

$$X = \frac{CCl'_{\text{гор}} - CCl'_{\text{пвс}}}{CCl'_{\text{гор}}} \cdot 100,$$

где X — паросодержание в вес. %.

Поскольку паросодержание в кипящих источниках относительно невелико (до 10, редко до 20%), контроль за всеми компонентами, входящими в расчет, должен вестись с большой тщательностью, и ошибка в измерениях не должна превышать 1—2%.

Пульсирующие источники находятся в 30 м к югу от Парящего I в протоке Паужетки. Источники представляют собой две воронки, вытянутые вдоль правого берега протоки, разделенные тонкой стенкой уступа I надпойменной террасы. Диаметр каждой воронки около 6 м. Ва-

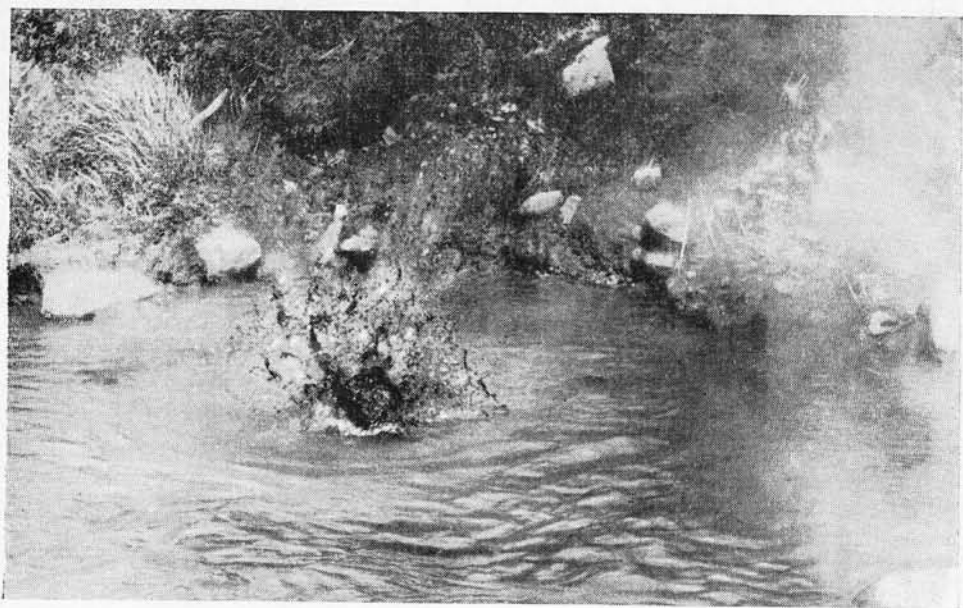


Рис. 10. Источник Пульсирующий

Фото В. М. Сугрובה

луно-галечниковые отложения, окружающие источники, превращены в цветные глины.

Оба пульсирующих источника представляют собой кипящие котлы. Верхний по течению протоки котел не обнаруживает бурного кипения и выбросов, но характеризуется частыми периодическими пульсациями всего объема воды, что свидетельствует о периодическом образовании в его подводном канале больших паровых пробок. В нижней по течению воронке почти непрерывно со дна поднимаются струи горячей воды, неся за собой песок, в результате чего воронка имеет вид грязевого котла. Над поверхностью котла периодически выбрасывается грязная вода в виде небольшого фонтана (рис. 10).

В августе-сентябре 1955 г. А. С. Нехорошевым были проделаны опыты по определению дебита верхнего и нижнего Пульсирующих источников. После отвода холодной воды ручья дебит верхней воронки был равен 2,26 л/сек (в августе) — 2,46 л/сек (в сентябре), дебит нижней воронки 4,58—5,31 л/сек. Средний дебит верхнего источника в 1957 г., рассчитанный по непосредственным наблюдениям с июля по ноябрь, оказался равным 3,4 л/сек.

При наблюдениях за Пульсирующими источниками в 1959 г. впервые было установлено прямое взаимодействие источников со скважинами. После того, как на скв. К-2 произошел выброс с глубины 38 м, продолжавшийся несколько суток, уровень воды в Пульсирующем источнике резко понизился, и источник прекратил свою деятельность. Когда скважина кончила работать, источник быстро вошел в свой прежний режим. Такая прямая связь ствола скважины с источником, безусловно, свидетельствует о трещинном характере его питания. Можно предполагать, что и другие многодебитные концентрированные выходы также имеют трещинное питание, тем более что фильтрационные свойства пород на Паужетке, как будет показано ниже, явно не достаточны, чтобы обеспечить большие дебиты источников только за счет порового питания.

На Паужетской термальной площадке в числе многих источников имеются два небольших гейзера. Дебит их не велик, однако они заслуживают отдельного рассмотрения как яркое доказательство перегретости вод на глубине.

Гейзер I расположен на правом берегу Правой Паужетки, на ровной пойменной площадке. Он представляет собой воронку диаметром 1,5 м, образованную в валунно-галечниковых отложениях. Вокруг воронки — измененная порода, красноватая глина. Воронка наполнена водой, которая через определенные промежутки времени начинает пузыриться, кипеть, выбрасывая фонтаны брызг.

О существовании гейзера известно со времени посещения его С. П. Крашенинниковым. Характер деятельности гейзера с того времени значительно изменился. По описанию Д. И. Александрова в 1934 г., Б. И. Пийпа в 1937 г., В. В. Иванова в 1950 г., Г. А. Гонсовской в 1951 г. и С. И. Набоко в 1953 г. после фонтанирования следовал период понижения уровня воды в котле, ее ухода вниз, а затем наполнения. В настоящее время вода не уходит из воронки после фонтанирования и очень незначительно меняет свой уровень. В настоящее время в деятельности гейзера отмечаются два периода: фонтанирования и покоя. Периодичность работы гейзера со временем также существенно изменилась, о чем свидетельствует приводимая ниже таблица 2:

Таблица 2

Изменения в режиме извержений Гейзера I

Год обследования	Исследователь	Продолжительность цикла, мин
1934	Д. И. Александров	16—17
1937	Б. И. Пийп	16—17
1950	В. В. Иванов	4 мин 50 сек
1951	Г. А. Гонсовская	4 мин 54 сек
1953	С. И. Набоко	4 мин 40 сек
1955	А. С. Нехорошев	2 мин 29 сек
1961	В. М. Сугробов	2 мин

В настоящее время средняя продолжительность цикла равна 2 мин. Причем около 1 мин 10 сек приходится на период покоя и 50 сек — на извержение. Средний дебит, рассчитанный по времени наполнения емкости в 180 л (с учетом и времени покоя), равен 0,39—0,40 л/сек. Существенных изменений в среднем дебите за последние 5 лет не отмечено.

Гейзер II расположен на правобережной поймелевой Паужетки, в 30 м от берега. Место выхода имеет вид блюдцеобразного углубления диаметром 1,0—1,5 м и глубиной 30 см. Канал гейзера завален; по данным предыдущих исследований, он имел глубину несколько метров.

Гейзер был посещен и описан рядом исследователей. С. И. Набоко наблюдала действие гейзера с 18 по 21 августа 1953 г. За это время произошло 5 извержений. Длительность каждого цикла менялась: 15 час 45 мин, 22 час 15 мин, 11 час 30 мин, 18 час 10 мин, больше 26 час. Работа гейзера происходила при этом по стадиям: фонтанирование, бурное выделение пара, спокойное выделение пара, покой, наполнение, нагрев воды. В 1955 г. за периодичностью действия гейзера проводил наблюдения А. С. Нехорошев.

В настоящее время замечено, что в работе гейзера большие периоды покоя, исчисляющиеся несколькими сутками, сменяются периодами активной деятельности. Последняя продолжается от нескольких часов до суток.

и состоит из ряда циклов. Каждый цикл работы гейзера имеет все выше-названные стадии. Максимальный расход во время фонтанирования составляет 2 л/сек.

Рассредоточенные выходы термальных вод приурочены в основном к пониженным частям рельефа. Их многочисленные проявления наблюдаются по берегамлевой и Правой Паужеток. Воды разбрызгаются и в русле Паужетки, но не заметны из-за большого по сравнению с источниками расхода реки. Однако в случаях, когда река после сильного половодья изменяет несколько русло, или в летнюю межень падает уровень воды в реке, на обнаженных участках дна наблюдаются мелкие источники с горячей водой и паровые струи.

Наибольшее число источников приурочено к краевым частям площадки: северо-западной и юго-восточной. Северо-западная часть площадки расположена близ слияниялевой и Правой Паужеток. Вся площадка, представляющая собой поверхность высокой поймы, сильно прогрета и изобилует многочисленными выходами вод и паровых струй. На водораздельных участках ручьев и реки площадка покрыта глинами красного цвета.

Большая часть источников имеет вид мелких, диаметром в несколько миллиметров, грифончиков с температурой от 80 до 100°. Дебит их замерить трудно. Сток отдельных источников ничтожный, но в сумме они дают начало теплым ручьям со значительным дебитом — до 10—12 л/сек. Почти всюду вокруг источников кремнистые натёки. Кремнистые выделения цементируют породу вокруг источников, образуя гейзерные площадки, кальматируют выходные каналы, вызывая миграцию источников. В отдельных местах натёки гейзерита изолируют источник, ранее сообщавшийся с водами реки или ручья. Так, например, на правом берегулевой Паужетки, в русле реки кремнистыми отложениями была цементирована глыба из валунов и изолированы источники, находящиеся под ней. На вершине глыбы действует восходящий источник с температурой 75°, в нижней части глыбы, выше уровня воды в реке — другой источник с температурой 32°. На правом берегу Правой Паужетки, близ слияния ее слевой Паужеткой, — аналогичные выходы термальной воды с температурой 72—97° находятся на выступе, далеко выдающемся в русло, и изолированные от реки. Сам выступ сложен валунно-галечниковым материалом, цементированным кремнистыми отложениями.

Источники, расположенные по берегам рек у уреза воды, имеют обычно температуру меньшую 70°, вследствие того, что заливаются водой реки. Обнаруживаются они часто лишь по клочкам зеленых водорослей. Почти все источники восходящего типа. Среди источников часто встречаются паровые струи, выходящие из отверстий диаметром до 0,5 см или из мелких воронок, заполненных конденсатом пара.

В юго-восточной части площадки расположен второй участок с интенсивной гидротермальной деятельностью. Вся площадка пронизана большим количеством выходов термальных вод в виде мелких источников, но их все-таки меньше, чем на северо-западном участке. Основная часть источников расположена в правобережной протоке Паужетки. По сравнению с северо-западом здесь больше паровых струй. Вся площадка сильно прогрета и ее валунно-галечниковая суглинистая почва во многих местах превратилась в глинистую массу красного цвета. Зимой площадка почти не покрывается снегом.

Кроме двух описанных больших участков в пределах термальной площадки имеются относительно изолированные небольшие пятна с проявлениями гидротермальной деятельности. Так, на левом берегу Правой Паужетки, к югу от Парящего II источника, расположена группа восходящих очень мелких источников с температурой 99°. Вода из-за ничтожного расхода вся испаряется, сток отсутствует. Здесь же выходят несколько паро-

вых струй. Выходы воды и пара образовали гейзеритовую площадку. В 150—170 м ниже по течению, на том же берегу, — еще одна группа восходящих источников с температурой 92°.

Особо должны быть охарактеризованы выходы паровых струй на термальной площадке, сконцентрированные в трех пунктах. В настоящее время, после проведенных разведочных работ, можно с полным основанием говорить о том, что они представляют собой паровые дериваты, отделившиеся от горячих паужетских вод при подземном кипении.

Южный источник расположен в 330 м к югу от Парящего I, в основании склона высокой правобережной террасы. Источник представляет собой группу паровых струй. Пар вырывается из рытвин, расположенных ступенчатообразно на склоне. Из многочисленных отверстий в небольших лунках, заполненных конденсатом, пробиваются паровые струи. Температура у выхода их составляет 97°. Конденсат пара здесь непрерывно кипит, что создает видимость мощного излива воды, вероятно поэтому этот выход пара называли источником. На самом деле стока воды почти нет, из-за ничтожного расхода пара. Поверхность террасы близ выходов пара сильно заболочена и покрыта воронками с конденсатом пара. Температура воды в них 95°.

Паровые струи Грязевого озера. Грязевое озеро расположено на поверхности I надпойменной террасы в 100 м к северо-востоку от источника Парящего I. Озеро представляет собой вытянутую вдоль склона пару воронок, разделенных перемычкой, и имеет общую длину 25 м и ширину 7—8 м. Глубина воронок 2—5,5 м. Вода озера представляет собой конденсат паровых струй, смешанный с дождевыми и снеговыми водами. Излива воды из озера никогда не происходит вследствие малого притока ее. В летнее время озеро сильно мелеет. Зимой от таяния снега, окружающего его, вода стоит на уровне с краями. Температура при этом сильно понижается и достигает в центре озера 35—40°. Летом температура на дне воронки достигает 100° С. Почва вокруг озера глинистая, вязкая, тошкая.

Паровые струи Верхнего термального поля. В 350 м к юго-востоку от источника Парящий I, на поверхности высокой правобережной террасы, расположено еще одно термальное поле площадью 100 × 200 м (рис. 9). Гидротермальная деятельность проявляется здесь в виде паровых струй. Поверхность поля покрыта красными глинами, на глубине пестрыми, образовавшимися под воздействием газов, паров и их конденсатов. В настоящее время паровые струи сосредоточены на восточном краю поля. В дождливое время и при таянии снега вся площадка покрывается водой, в сухое время — площадка сухая, покрыта трещинами усыхания.

Глины, покрывающие площадку, — своего рода покрытия, под которыми находится небольшая залежь пара. В 1957 г. К. П. Флоренским здесь были пробурены две ручные скважины, которые, пройдя 2-метровую толщину глин, вывели струи пара со значительно большим расходом, чем в естественных выходах.

Выход пара в долине ручья Быстрого. На левом крутом склоне долины — группа высокотемпературных источников нисходящего типа, с температурами 89—93°. Источники являются дериватами пара, смешивающимися иногда с поверхностными водами.

У основания склона — кипящие котлы с паровыми струями. Длина термального поля — 35 м. Зимой площадка не покрывается снегом и парит.

Таблица 3

Химические анализы воды источников

Место и дата отбора пробы	Катионы, г/л, мг/экв, мг/экв %					Анионы, г/л, мг/экв, мг/экв %				Недиссоциированные молекулы		рН	Общая минерализация г/л	Формула солевого состава	Аналитик	
	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	H ₂ SiO ₃	HBO ₂					
Парящий I, 31.III 1961	0,0002	0,9699	0,0737	0,0560	0,0023	1,5846	0,0767	0,0018	0,0222	0,2275	0,1548	8,2	3,1697	M _{3,2}	$\frac{Cl_{95}SO_3^4}{Na_{90}Ca_6K_4}$	Т. В. Ренне
	0,01	42,17	1,89	2,80	0,19	44,69	1,60	0,03	0,74							
	0,02	89,61	4,02	5,95	0,40	94,97	3,40	0,06	1,57							
Парящий II, 31.III 1961	0,0002	0,9740	0,0740	0,0540	0,0035	1,5916	0,0782	0,0037	0,0204			8,2	3,2001	M _{3,2}	$\frac{Cl_{95}SO_3^4}{Na_{90}Ca_6K_4}$	Т. В. Ренне
	0,01	42,35	1,90	2,70	0,29	44,88	1,63	0,06	0,68	0,2457	0,1548					
	0,02	89,64	4,02	5,71	0,71	94,99	3,45	0,12	1,44							
Пульсирующие, 31.III 1961	0,0002	0,5044	0,0258	0,0290	0,0023	0,7854	0,0591	0,0525	He обн.	0,1579	0,0769	7,3	1,6935	M _{1,7}	$\frac{Cl_{19}SO_5^4HCO_3^4}{Na_{90}Ca_6K_3}$	Т. В. Ренне
	0,01	21,93	0,66	1,45	0,19	22,15	1,23	0,86								
	0,02	90,48	2,72	5,98	0,78	91,38	5,07	3,55								
Гейзер I, 31.III 1961	0,0002	0,9837	0,0747	0,0560	0,0035	1,6124	0,0800	0,0073	0,0156	0,2164	0,1573	8,1	3,2071	M _{3,2}	$\frac{Cl_{95}SO_3^4}{Na_{89}Ca_6K_4}$	Т. В. Ренне
	0,01	42,77	1,92	2,80	0,29	45,48	1,67	0,12	0,52							
	0,02	89,49	4,02	5,86	0,61	95,17	3,49	0,25	1,09							
Скважина верхнего термального поля (конденсат), 25.X 1957	0,0100	0,0069	0,0058	He опред.	0,0050	He обн.	0,061	—	—	He обн.	8	0,0887	M _{0,09}	$\frac{HCO_3^3Cl_{12}}{NH_{48}Na_{26}Ca_{25}}$	И. Х. Забелышинская	
	0,55	0,30	0,29		0,14		1,00									
	48,30	26,30	25,40		12,20		87,80									
Источник «Южный», 1.IX 1957	0,0080	0,0927	0,0135	0,0058	0,0139	0,2323	0,0244	—	0,1355	То же	5,8	0,5261	M _{0,52}	$\frac{SO_4^4HCO_3^3Cl_7}{Na_{72}Ca_{12}Mg_8NH_8^4}$	Е. П. Рябичкина	
	0,44	4,03	0,68	0,48	0,39	4,84	0,40									
	7,81	71,59	12,08	8,52	6,93	85,97	7,10									
Грязевое озеро, 12.IX 1957	0,0090	0,0688	0,0464	0,0188	0,0209	0,3010	0,0305	—	0,1495	То же	5,6	0,6449	M _{0,64}	$\frac{SO_4^4Cl_8HCO_3^7}{Na_{41}Ca_{32}Mg_{21}NH_7^4}$	Е. П. Рябичкина	
	0,50	2,99	2,32	1,55	0,59	6,27	0,50									
	6,80	40,60	31,60	21,00	8,00	85,20	6,80									
Источник на левом склоне ручья Быстрого, 80 м вверх от скв. К-7, 22.VI 1961	0,0018	0,0455	He обн.	0,0172	0,0017	0,0180	0,0206	0,1037	0,0132	0,0936	То же	8,2	0,3153	M _{0,32}	$\frac{HCO_3^3Cl_{17}SO_4^4}{Na_{64}Ca_{28}Mg_5}$	Т. В. Ренне
	0,10	1,98		0,86	0,14	0,51	0,43	1,70	0,44							
	3,25	64,28		27,92	4,55	16,56	13,96	53,19	14,29							

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИСТОЧНИКОВ И ПАРОВОДЯНЫХ СТРУИ ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Воды преобладающего числа Паужетских источников по химическому составу — хлоридно-натриевые. Таковы источники Парящие, Пульсирующие, гейзеры. Состав вод всех источников идентичен (табл. 3). Содержание хлора колеблется в пределах от 1,4 до 1,67 г/л, в среднем около 1,58 г/л. Содержание сульфатов довольно низкое — от 0,07 до 0,086 г/л. Содержание кремниевой кислоты до 250 мг/л, метаборной кислоты — до 176 мг/л. Величина рН — 8,0—8,2. Общая минерализация составляет 3,0—3,2 г/л.

Химический состав вод источников, которые представляют собой выход термальных вод, смешанных с холодными грунтовыми водами, верховодкой или атмосферными осадками, — это преимущественно нисходящие источники — отличался от состава кипящих источников меньшим содержанием хлора, кремневой и борной кислот, меньшей минерализацией. В том случае, когда холодные грунтовые воды при смешении с термальными преобладали, вода источников по химическому составу отвечала другому типу (смешанному) — обычно хлоридно-гидрокарбонат-сульфатному.

По газовому составу воды Паужетских источников — азотно-углекислые. Следует отметить, что в литературе до 1957 г. они характеризовались как азотные. Однако, как было выявлено работами К. П. Флоренского, это представление основывалось на несовершенной методике отбора газов, при котором не учитывался газ, содержащийся в паровой фазе. Анализ паровой фазы, в которую переходят в основной своей массе газы в процессе вскипания воды, обнаружил в ней значительные количества CO_2 — до 100 мг/кг пара в Парящем I. В незначительном количестве — до 10 мг/кг — в паре был определен сероводород. При пересчете результатов анализа в процентах по объему оказалось, что кипящие источники и паровые струи, описанные выше, характеризуются однотипным газовым составом (табл. 4). Это позволило К. П. Флоренскому справедливо отнести

Таблица 4

Содержание газовых компонентов в конденсате пара и состав газа
(по К. П. Флоренскому)

Источники	В мг/л конденсата				Объемные %				Объем газа мл/л конденсата
	CO_2	$\text{N}_2 + \text{i}$	CH_4	H_2S	CO_2	$\text{N}_2 + \text{i}$	CH_4	H_2S	
Гейзер I	52,9	10,6	0,53	6,0	75,6	15,2	0,8	8,4	70
Южный	305	34,4	10,0	16,0	83,6	9,3	2,7	4,4	365
Верхнее термальное поле	138	11	5,6	10	83,7	6,7	3,4	6,2	164

паровые струи источника Южного и Верхнего термального поля к паровым дериватам термальных вод, с которыми связаны Паужетские источники.

Впоследствии было выявлено, что термальные воды, разпружающиеся в естественных условиях, относительно дегазированы, благодаря предварительному вскипанию на глубине. Состав этих глубинных вод будет подробно охарактеризован в следующих главах.

При конденсации пара на поверхности образуются воды, имеющие принципиально иной состав по сравнению с хлоридно-натриевыми водами. В чистом виде конденсат пара, полученный из ручной скважины на Верхнем термальном поле, характеризуется гидрокарбонатно-аммонийным составом (табл. 4). Аналогичный тип химического состава типичен для воды

нисходящего источника в долине ручья Быстрого. Большая минерализация и концентрация компонентов в воде этого источника связаны с выщелачиванием пород на месте конденсации пара под делювиальным чехлом. Если на выходе паровой струи образуются котлообразные воронки, то значительная часть газов, таких, как CO_2 , CH_4 и H_2S , растворяется в конденсате и при окислении сероводорода получаются сульфатные воды низкой минерализации.

Характерные примеры таких вод — источники Южный, Грязевое озерко (табл. 3). Воды, которые образуются за счет конденсации пара на выходах паровых струй, подобных этим, характеризуются также сульфатным составом с $\text{pH} = 5,4-6,0$.

ТЕМПЕРАТУРА ТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Первые геотермические исследования на Паужетском месторождении были проведены в 1955 г. А. С. Нехорошевым. По данным замеров температур в грунте им была составлена мелкомасштабная термометрическая карта термальной площадки.

Летом — осенью 1957 г. В. В. Аверьевым и В. Г. Ренне была проведена площадная термометрическая съемка масштаба 1 : 1000. Замеры температур проводились на глубине 1 м по сетке через 40 м. Данные съемки корректировались наблюдениями в зимнее и весеннее время за проталинами в снегу. В результате была околонтурена термальная площадь в долине Паужетки с температурами больше 20° . На термометрической карте выделены участки с температурами от 20 до 50° , от 50 до 70° и от 70 до 100° (см. рис. 9).

Наиболее крупный прогретый участок с температурой от 70 до 100° был зафиксирован в северо-западной части месторождения близ слияния реклевой и Правой Паужеток. Такие же прогретые участки были встречены в южной части термального поля. В частности, в районе источника Парящего I был выделен участок с температурой $70-100^\circ$, вытянутый в северо-восточном направлении. К юго-востоку от источника Парящего II расположен еще один, меньший по размерам участок с подобными температурами. Значительный по площади высокотемпературный участок был выделен в районе источника Южного. Кроме этого, съемка околонтурела целый ряд высокотемпературных участков в виде относительно изолированных пятен: Верхнее термальное поле, площадка в овраге ручья Быстрого и др.

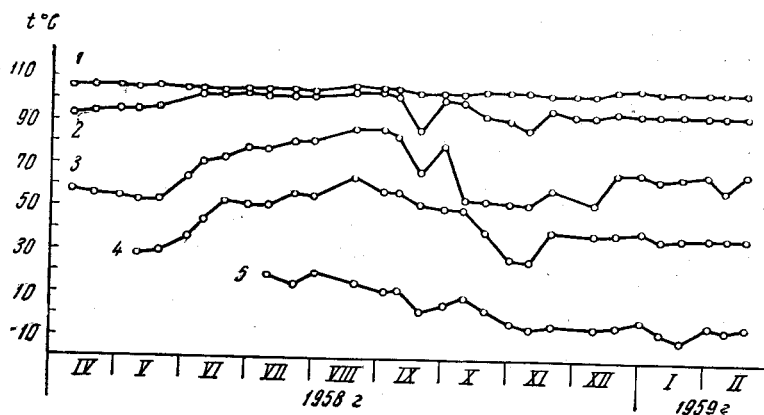


Рис. 11. График изменения температуры на разных глубинах во времени (пост. 1)

Глубина: 1 — 3,2 м, 2 — 1,6 м, 3 — 0,8 м, 4 — 0,4 м, 5 — температура воздуха

Расположение и конфигурация высокотемпературных участков дали возможность предполагать направление и характер трещиноватости пород, слагающих месторождение, и в дальнейшем проектировать места заложения пароводяных скважин.

В 1958—1959 гг. в районе термальной площадки с целью определения колебаний температуры в грунте было оборудовано четыре геотермических поста в южной части термальной площадки и проведен годичный цикл наблюдений.

Анализ наблюдений на термометрических постах показал, что основными факторами, определяющими температуру в поверхностной зоне термальной площадки, являются тепло циркулирующих здесь термальных вод, температура воздуха и холодные грунтовые воды. Наиболее стабильные температуры в грунте наблюдались в летнее и зимнее время, когда уровень термальных вод в аллювии также был стабильным. Судя по данным, полученным на посту 1 (рис. 11), на глубине 3,2 м амплитуда сезонных колебаний температуры составляет 3° , т. е. менее 3%. Наиболее резкое охлаждающее влияние на температуру грунта оказывают холодные грунтовые воды, подмешивающиеся к термальным водам в период сильных осенних паводков и при снеготаянии.

СУММАРНАЯ РАЗГРУЗКА ПАУЖЕТСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД И ВЫНОС ТЕПЛА В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Разгрузка термальных вод на Паужетке, учитывая дебит источников и теплых ручьев (термальная составляющая в последних рассчитана по выносу хлора), составляла до начала бурения 31 л/сек. Многочисленные выходы термальных вод в виде источников, дебит которых нельзя замерить, свидетельствуют о том, что величина разгрузки гораздо больше этой цифры. В мае 1958 г. в весеннюю межень В. В. Аверьевым была предпринята попытка установить полную разгрузку термальных вод, включая ее скрытую составляющую. Для этой цели был применен гидрохимический метод. Учитывалось поступление хлор-иона в реку на участке, где она протекала мимо термальной площадки, и затем — по отнесению его к концентрации хлор-иона в воде кипящих источников — суммарное поступление термальной воды в реку.

Результаты этих исследований, по данным за 20 мая 1958 г., приводятся ниже.

1. Сумма расходов правого и левого рукавов Паужетки после термальной площадки составляет $3,6 \text{ м}^3/\text{сек}$, в том числе по левому рукаву — $3,09 \text{ м}^3/\text{сек}$ и по правому рукаву — $0,51 \text{ м}^3/\text{сек}$.

2. Содержание хлор-иона в Правой илевой Паужетке выше термальной площадки составляет $0,0105 \text{ г/л}$, или $10,5 \text{ г/м}^3$. Таким образом, расход хлор-иона в Паужетке до термальной площадки составляет $10,5 \times 3,6 = 37,8 \text{ г/сек}$ (эта цифра немного завышена, так как расход реки выше термальной площадки несколько меньше, чем после термальной площадки).

Содержание хлор-иона в правом рукаве Паужетки в $0,5 \text{ км}$ ниже гидроствора равно $0,1123 \text{ г/л}$, равно $112,3 \text{ г/м}^3$. Расход хлор-иона в правом рукаве равен $112,3 \times 0,511 = 57,5 \text{ г/сек}$.

Содержание хлор-иона в левом рукаве Паужетки в $1,5 \text{ км}$ ниже гидроствора равно $0,0421 \text{ г/л}$, равно $42,1 \text{ г/м}^3$. Расход хлор-иона в левом рукаве равен $42,1 \times 3,09 = 130 \text{ г/сек}$.

Суммарный расход хлор-иона в правом и левом рукавах Паужетки равен $130 + 57,5 = 187,5 \text{ г/сек}$.

3. Количество хлор-иона, которое получает Паужетка, протекая через термальную площадку, равно $187,5 - 37,8 = 149,7 \text{ г/сек}$. Принимая среднее содержание хлор-иона в высокотермальной воде за $1,58 \text{ г/л}$, получаем количество термальной воды, поступающее в районе термальной площадки в Паужетку: $149,7 : 1,58 = 95 \text{ л/сек}$ или, учитывая несколько завышенный расход реки выше термальной площадки, — около 100 л/сек .

Детальными работами было установлено, что из 100 л/сек термальной воды, поступающей в реку в районе Паужетских источников, более 95% разгружается в активной части термальной площадки, в полосе, имеющей ширину около 300 м и секущей долину с юго-запада на северо-запад.

Выше отмечалось, что на источнике Парящем I опытными работами было определено теплосодержание пароводяной смеси 150 ккал/кг. Поскольку в расчете суммарной разгрузки была использована концентрация хлор-иона, равная 1,58 г/л и характерная для кипящих источников, следует полагать, что величина 100 л/сек относится именно к высокотермальным водам с указанным теплосодержанием. Исходя из этого положения, можно оценить вынос тепла водными массами на Паужетском термальном поле в естественных условиях. Он равен $100 \times 150 = 15\,000$ ккал/сек.

Весной 1963 г. В. М. Сугробов повторил определение суммарной разгрузки паужетских вод. В это время на месторождении уже около года работали скважины, выводящие в сумме порядка 120 кг/сек пароводяной смеси со средним теплосодержанием 170 ккал/кг. В результате влияния скважин некоторые кипящие источники исчезли (Парящий II), другие (Парящий I) заметно снизили дебит. Величина суммарной естественной разгрузки сократилась от 100 до 78 л/сек. (Дебит скважин из расчетов был, разумеется, исключен). Кроме того, произошло существенное изменение контуров очага разгрузки. Если в 1958 г. к северу от активной термальной полосы разгружалось менее 5% термальной воды, то в 1963 г. доля этого участка возросла до 25%. Пробуренные здесь многодебитные скважины вызвали смещение потока термальных вод к северу. Это и повлекло за собой уменьшение дебита термальных источников, расположенных в южной части термального поля.

ТЕМПЕРАТУРА В НЕДРАХ НАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Измерение температур производилось в условиях, когда в верхних частях ствола разведочных скважин наблюдался прогрев за счет утечек воды и пара на устьях. Это было связано с недостаточной герметизацией колонны из-за плохого качества устьевого арматуры. Поэтому изотермы 50, 100 и даже 150° С на некоторых участках в приповерхностной зоне на разрезах (рис. 7, 8) проведены условно. Фактические замеры в скважинах на отметках положения изотерм превышали указанные значения температур.

Недостатки герметизации, однако, не повлияли на искажение температуры в толще обводненных пород. Знание температур именно в этой толще имеет большое значение для выяснения границ потока высокотермальных вод, выявления максимальных температур в ее пределах, а также для уточнения направления движения термальных вод и характера их циркуляции.

Термический режим изученного участка месторождения определяется главным образом условиями движения и разгрузки высокотермальных подземных вод. Исследования скважин показывают, что распределение температур с глубиной вполне закономерно и связано с литологическим составом пород, слагающих разведываемую площадь, и их проницаемостью.

Анализируя термограммы по разведочным скважинам (рис. 12), можно выделить два типа кривых изменения температуры с глубиной. Первый тип характерен для скважин, расположенных на северном участке месторождения (скв. № 8, 10, 11, 7, 18). Отличительной чертой термограмм этого типа является большая величина температурного градиента в интервале залегания водоупорных пород. В естественной обстановке температура в поверхностной зоне определяется двумя крайними значениями — температурой на поверхности, а в конце интервала — температурой термальной воды, циркулирующей в толще псефитовых туфов. Температура на устье скважин здесь во всех случаях, при условии герметичности скважины и длительного выстаивания, меньше 100° С. Нарушение герметичности колонны в скв. 4 было причиной значительного повышения температуры в верхней части ствола до 130° С, по сравнению с температурой пород в естественных условиях (по данным скв. 10).

Второй тип температурной кривой характеризуется меньшей интенсивностью нарастания температур от поверхности до глубины 60—120 м и получен по замерам температур в скважинах южного и юго-восточного участков (скв. 16, 12, 13, 14, 20 и 21), где, как уже указывалось, водоупорные отложения трещиноваты. При передвижении высокотермальной воды по трещинам в водоупоре приповерхностная зона сильно прогревается, что является причиной высокой температуры в верхней части ствола (160—176° С), превышающей температуру кипения при нормальном гидростатическом давлении. Поэтому приустьевая часть скважины заполнена паром.

Помимо описанного общего изменения температуры в зависимости от глубины скважин, следует отметить наблюдавшиеся отклонения от нормального хода кривой в пределах выделенных двух интервалов глубин.

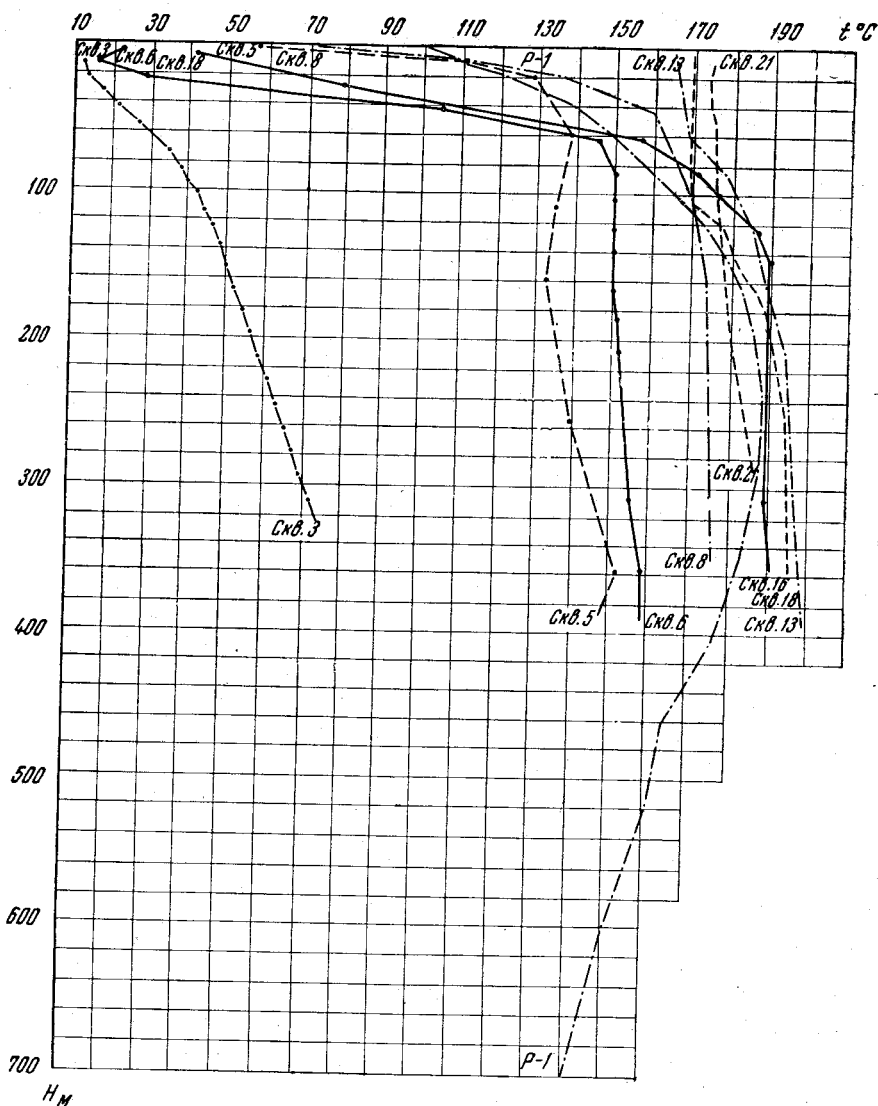


Рис. 12. Термограммы разведочных скважин после выстаивания

Колебания температур в зоне водонасыщенных пород, видимо, представляют больший интерес, потому что температура здесь, определяемая температурой термальных вод, приближается к истинной температуре, даже если термический режим скважины в целом нарушается под влиянием циркуляции воды в ней и конвекции. Такие отклонения были отмечены в скв. 5, 10 и 16.

В скв. 5 на глубине 150 м температура уменьшается на 6° , по сравнению с температурой на глубине 60 м, и на $19,5^{\circ}$ С по сравнению с максимальной температурой в скважине на глубине 350 м. Повышение температуры в интервале 30–100 м, где залегают рыхлые и трещиноватые, обогащенные пемзой, псефитовые туфы, происходит в связи с более интенсивным движением термальной воды на этой глубине.

В скв. 10 anomальное уменьшение температуры наблюдается на глубине 250 м. Температура здесь на $6,5^{\circ}$ С меньше значения ее на глубине 200 м и на 9° С — на глубине 300 м. Истинную причину изменения темпе-

ратуры на отмеченной глубине трудно указать, так как не производилось поинтервальное опробование водонасыщенных туфов. Принимая во внимание залегание в интервале 220—235 м туфобрекчий и плотных псефитовых туфов на глубине 235—250 м, следует предположить, что уменьшение температуры связано с худшей проницаемостью пород¹. Колебания температур, зафиксированные в скв. 16, пример влияния проницаемости отложений на распределение температур. Максимальная температура в ней отмечена на глубине 180 м, где скважина встретила трещинную зону. Вполне вероятно то, что выявленные аномалии характеризуют просто не установившийся термический режим и не имеют места в естественных условиях.

Следовательно, температура, замеренная в скважинах в интервале залегания обводненных пород, соответствует естественной температуре или весьма незначительно отличается от нее, а распределение ее по площади указывает на распределение и движение термальной воды, которая является носителем тепла, нагревающим породы.

Температура в скважинах и приповерхностной зоне, совпадающей в целом с водоупорными породами, превышает естественную температуру пород, что связано с прогревом ствола скважин. Температурные аномалии в этой зоне могут указывать на пути движения воды к поверхности, т. е. участки интенсивной разгрузки. Они хорошо также выявляются по температурным аномалиям, оконтуренным по данным термометрической съемки (см. гидротермометрическую карту, рис. 9).

Распределение температур по площади и глубине

Распределение температур по площади и глубине отражено на карте геоизотерм и гидрогеологических разрезах (рис. 7, 8, 13). Максимальные температуры в интервале водонасыщенных пород наблюдаются в юго-восточной части исследуемого участка Паужетского месторождения (скв. 7, 13, 14, 18 — температура 194—200° С) и в южной части, в долине Паужетки, где отмечаются выходы термальной воды в виде крупных кипящих источников: Парящий I, Парящий II, Пульсирующие (скв. 12, 16, 17, P-I). Температура здесь достигает 180—192° С.

В северном и северо-западном направлениях, по мере удаления от участка естественной разгрузки термальных вод и зоны повышенных температур, температура постепенно уменьшается и составляет 164—176° С в скв. 4, 8, 10, 11, 19, а затем понижается до 152—156° С на периферии разведываемой площади (скв. 5 и 6). В скв. 3, наиболее удаленной от зоны интенсивной разгрузки, температура на глубине 312 м была равна всего лишь 74° С.

В приповерхностной зоне температуры изменялись, как уже указывалось, в соответствии с условиями циркуляции термальных вод по трещинам в водоупоре и условиями измерения температур.

Распределение температур на глубине ниже 380 м дает термограмма по роторной скважине, пробуренной в 1958 г. до глубины 800 м. Термограмма ее показывает интенсивный рост температуры до 171° в верхнем интервале — до глубины 120 м. В интервале 120—400 м температурный градиент уменьшается, а температура на глубине 400 м составляет 186° С. В интервале 400—500 м температура понижается со 186° С до 162° С. На глубинах 500—800 м температуры первоначально не были замерены. Однако при гидрогеологическом опробовании этого интервала теплосодержание пароводяной смеси на устье, т. е. перегретой воды на данной глубине по данным В. В. Аверьева, составило 120—135 ккал/кг, что дало воз-

¹ Большая разница температурных отклонений по абсолютной величине, возможно, связана с ошибочными показаниями ТГБ-4.

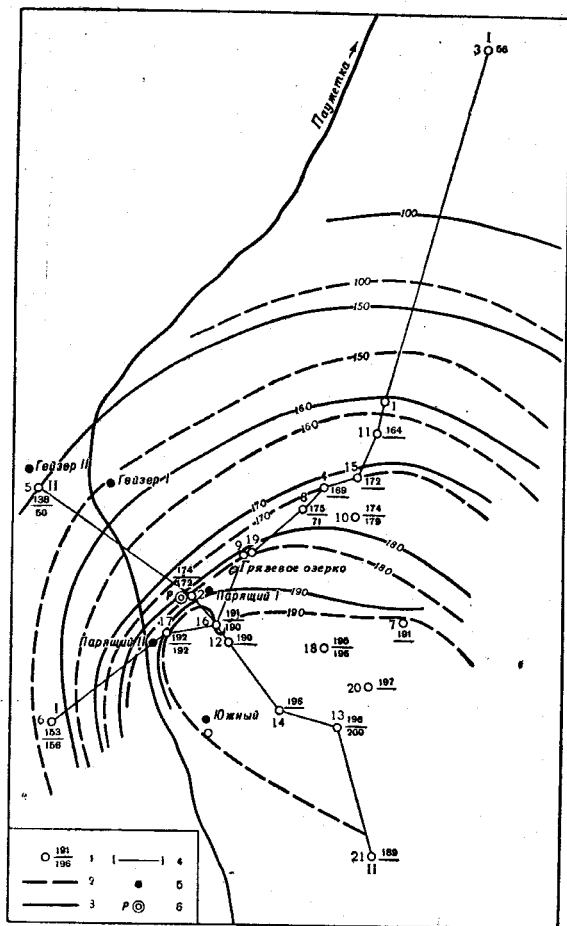


Рис. 13. Карта геоизотерм на абсолютных отметках — 100—200 м

1 — скважина. Слева — номер скважины, справа — в числителе температура на абсолютной отметке — 100 м, в знаменателе температура на абсолютной отметке — 200 м; 2 — изотермы на абсолютной отметке — 100 м; 3 — изотермы на абсолютной отметке — 200 м; 4 — линия геотермического профиля; 5 — источники; 6 — роторная скважина

не водонасыщенных отложений, показывает постепенное уменьшение температуры от юго-восточной окраины разведанного участка и местоположения термальных источников в северо-западном и южном направлениях в общем независимо от расположения трещинных зон.

Довольно резкое падение геоизотерм от скв. 16 на запад, показанное на рис. 13, свидетельствует об активном передвижении значительной массы термальной воды к поверхности по основной трещинной зоне.

Выравнивание температур по всей глубине залегания обводненных пород связано с тем, что теплопередача здесь осуществляется за счет циркуляции высокотермальных вод. Изменение температур по площади показывает направление их движения как теплоносителя. Высокая температура в толще водоупорных отложений может быть объяснена только передачей тепла за счет теплопроводности. На участках развития трещин в толще непроницаемых отложений теплопередача идет, вероятно, двойным путем: за счет циркуляции воды и теплопроводности.

возможность считать температуру не превышающей 150° С. В 1961 г. закаливающим ртутным термометром со шкалой до 250° С была измерена температура на глубине 680 м. Она оказалась равной 143° С. Таким образом, можно считать установленным факт уменьшения температуры ниже толщи туфобрекчий, подстилающих относительно проницаемые псефитовые туфы. Уменьшение температуры в роторной скважине в интервале третичных отложений можно объяснить только активной циркуляцией заключенных в них термальных вод с температурой, меньшей, чем температура подземных вод, содержащихся в толще псефитовых туфов.

На гидрогеологических разрезах (см. рис. 7, 8) отчетливо видно, что тепловой поток в интервале залегания водонасыщенных пород по положению изотерм направлен горизонтально с востока и юго-востока на запад и северо-запад. В приповерхностной зоне в толще водоупорных пород, судя по горизонтальному положению изотерм, тепловой поток направлен перпендикулярно напластованию пород. Плавный характер геоизотерм на срезках — по абсолютным отметкам — 100 м и 200 м (рис. 13), проведенных в зо-

Таблица 5

Значения температурного градиента в скважинах, в интервале верхнего водоупора и псефитовых обводненных туфов

№ скв.	Интервал температур, °С Интервал глубин, м			Температурный градиент, °С/м		
	водоупорных отложений	обводненных псефитовых туфов	измерения температур по всей скважине	в водоупорных отложениях	в обводненных псефитовых туфах	средний по скважине
2	$\frac{113-147}{0-51,2}$	$\frac{147-186}{51,2-260}$	$\frac{113-186}{0-260^*}$	0,665	0,187	0,28
3	$\frac{13-28}{5-52}$	$\frac{28-74}{52-311,9}$	$\frac{13-74}{5-311,9}$	0,32	0,178	0,198
4	$\frac{139-167,5}{0-90,1}$	$\frac{167,5-169}{90,1-275,9}$	$\frac{139-169}{0-275,9^*}$	0,317	0,0081	0,109
5	$\frac{59-131}{0-25}$	$\frac{131-139}{25-227}$	$\frac{59-149}{0-373}$	2,88	0,0396	0,251
6	$\frac{22-128}{0-52}$	$\frac{128-154}{52-248,6}$	$\frac{22-157}{0-385^*}$	2,04	0,132	0,351
7	$\frac{119-177}{0-65,7}$	$\frac{177-193}{65,7-219,8}$	$\frac{119-193}{0-219,8}$	0,885	0,103	0,337
8	$\frac{66-168}{0-83}$	$\frac{168-176}{83-313}$	$\frac{-66-176}{0-331^*}$	1,14	0,0348	0,332
10	$\frac{42-152}{0-85}$	$\frac{152-179}{85-319,5}$	$\frac{42-179}{0-326^*}$	1,29	0,115	0,42
11	$\frac{14-141}{0-64,5}$	$\frac{141-164}{64,5-244^*}$	$\frac{14-164}{0-244^*}$	1,97	0,128	0,615
12	$\frac{161-171}{0-43}$	$\frac{171-192}{43-260^*}$	$\frac{161-192}{0-260}$	0,233	0,098	0,119
13	$\frac{169-174,5}{0-90}$	$\frac{174,5-199}{90-349,8}$	$\frac{169-200}{0-375^*}$	0,061	0,0945	0,083
14	$\frac{164-173}{0-64,5}$	$\frac{173-195}{64,5-250^*}$	$\frac{164-195}{0-250^*}$	0,15	0,119	0,124
15	$\frac{109-122}{0-86,7}$	$\frac{122-172}{86,7-286^*}$	$\frac{109-172}{0-286}$	0,0346	0,25	0,22
16	$\frac{165-168}{0-45,6}$	$\frac{168-190}{45,6-270}$	$\frac{165-191}{0-345^*}$	0,066	0,098	0,075
17	$\frac{109-158}{0-51}$	$\frac{158-192}{51-261,1}$	$\frac{109-192}{0-336^*}$	0,96	0,162	0,247
18	$\frac{42,5-175}{5-90,5}$	$\frac{175-196}{90,5-337,4}$	$\frac{42,5-196}{0-349^*}$	0,38	0,085	0,153
20	$\frac{147-176,5}{0-116,2}$	$\frac{176,5-197,5}{116,2-287^*}$	$\frac{147-197,5}{0-287^*}$	0,254	0,123	0,176
21	$\frac{176,5-178,5}{0-145,1}$	$\frac{178,5-188,5}{145,1-290^*}$	$\frac{176,5-188,5}{0-290}$	0,0138	0,069	0,0415

* Температура не измерена по всему интервалу обводненной части скважины, в связи непрохождением гильзы термометра.

Основываясь на данных изменения температур по площади и разрезу, можно заключить, что движение высокотермальных вод происходит в горизонтальном направлении с юго-восточного участка на запад, к зоне разгрузки. Характер термограмм (вогнутость по отношению к оси глубин, т. е. уменьшение температурного градиента с глубиной) всех скважин, а также уменьшение температуры ниже толщи водосодержащих пород (данные роторной скважины) подтверждают этот вывод (табл. 5).

Следовательно, нагрев подземных вод осуществляется в стороне от описываемого участка, и температурная аномалия его обязана как бы наведенному тепловому полю.

О мощности теплового поля можно судить по выносу тепла термальными водами в зоне разгрузки и количеству тепла, теряемого путем теплопередачи через водоупорные породы на площади их распределения (за счет теплопроводности). Если принять естественный расход 100 л/сек и теплосодержание на глубине 150 ккал/кг , то получим количество тепла $15\,000 \text{ ккал/сек}$ или $4,73 \cdot 10^{11} \text{ ккал/год}$, т. е. $1,97 \cdot 10^{22} \text{ эрг/год}$ (по В. В. Аверьеву).

К сожалению, трудно оценить потерю тепла за счет теплопроводности, так как мы не знаем величину удельной теплопроводности (λ) и истинное значение температурного градиента (dt/dh).

Можно только приблизительно определить порядок этого количества тепла, взяв температурный градиент по скв. 11, наиболее благоприятный для измерения температуры в верхней части ствола. Он равен $1,97 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/см}$ (интервал $0-64,5 \text{ м}$). Значение λ примем равным $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ кал/см сек }^\circ\text{C}$ для сходной породы (песчаники). Тогда плотность теплового потока на данном участке составит: $q = \lambda \cdot dt/dh = 0,394 \cdot 10^{-4} \text{ кал/см}^2 \text{ сек}$.

Если считать, что плотность теплового потока приблизительно выдерживается на площади развития термальных вод на участке разведки ($\sim 0,7 \text{ км}^2$), то потеря тепла будет равна $2,76 \cdot 10^2 \text{ ккал/сек}$. Это на 1,5 порядка меньше, чем вынос тепла термальной водой в естественных условиях даже без учета больших количеств тепла ($33\,000 \text{ ккал/сек}$), дополнительно выведенного скважинами.

ОБВОДНЕННОСТЬ ПОРОД ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И УСЛОВИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

По результатам опробования роторной и первых колонковых скважин была принята следующая схема гидрогеологического разделения пород, залегающих в пределах месторождения. Аллювиальные валунно-галечниковые отложения заключают мощный грунтовый поток, за исключением небольших междуречных участков Паужетки, ее протоков илевой Паужетки, близ их слияния. Слабопроницаемые пепловые псаммитовые туфы и туффиты местами с небольшими прослоями псефитовых пемзовых туфов представляют собой верхний относительный водоупор. Нижележащие псефитовые туфы с прослоями слабопроницаемых туфобрекчий обводнены, характеризуются наибольшей водообильностью и образуют основной водоносный напорный комплекс. Все колонковые скважины вскрыли здесь высокотермальные воды и оказались в той или иной степени производительными. Снизу псефитовые туфы подстилаются весьма слабопроницаемыми, относительно водоупорными туфобрекчиями и спекшимися витрокристаллокластическими туфами голыгинского горизонта (N_2). Вулканомиктовые песчаники анавгайской серии ($Pg - N_1$), давшие незначительный водоприток в скважину, образуют второй водоносный комплекс.

Выделение в пределах месторождения обводненных пород подтверждено данными термометрии в скважинах (табл. 6). В интервале залегания непроницаемых пепловых псаммитовых туфов и туффитов температура быстро нарастает от поверхности до их подошвы. В толще туфов температура достигает наибольших значений, а перепад температур от кровли до подошвы незначительный, что связано с насыщением пор и трещин водой с высокой температурой.

ТРЕЩИННЫЕ ЗОНЫ И ВОДООБИЛЬНОСТЬ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В циркуляции высокотермальных вод в толще агломератовых туфов большая роль принадлежит трещинам, приуроченным, видимо, к тектоническим нарушениям. Уже первые исследователи Паужетских источников обратили внимание на закономерное расположение характерных выходов термальной воды, возможно, указывающих на положение тектонических нарушений. В. В. Иванов и А. С. Нехорошев предположительно выделили на основании термометрической съемки и расположения крупных кипящих источников и гейзеров два тектонических разлома. Первый, северо-восточного простирания, намечался по линии, соединяющей источник Парящий II, Пульсирующие, Парящий I и Грязевое озерко — аз. СВ 45° , второй — по линии, соединяющей Гейзер I и источник Парящий I — аз. СЗ 315° , причем предполагалось, что падение разломов крутое, приближающееся к вертикальному.

Роторная и некоторые колонковые скважины, заложенные вблизи пересечения двух намечаемых разломов, не пересекли плоскости нарушения

Результаты поинтервального опробования роторной и первых колонковых скважин
1, 2, 3

№ скв.	Интервал опробования, м	Породы, вскрытые в данном интервале	Характер водотока в скважину	Удельный дебит, кг/сек. м или дебит, кг/сек	Теплоемкость, ккал/кг
P-1	0—52	В интервале 0—10 м аллювиальные валунно-галечниковые отложения; с 10 до 52 м — пепловые туфы паужетской свиты	Водоприток происходит в интервале 0—10 м из поверхностной зоны растека термальных вод в очаге разгрузки. Интервал 10—52 м практически безводен	3,3—3,5	—
P-1	120—132	Туфы псефитовые андезито-дацитового состава паужетской свиты	Водоприток осуществляется по всему интервалу	0,46	—
P-1	120—196	Туфы псефитовые, внизу прослой туфобрекчий, состоящих из обломков андезитов паужетской свиты	То же	0,03 6,0	170
P-1	300—400	Туфобрекчи и спекшиеся витрокристаллокластические туфы голыгинского горизонта	То же	0,01	175
P-1	300—500	То же	То же	0,001—0,04	165—170
P-1	300—800	То же и туфобрекчи основного состава, песчаники анавгайской серии	В алнейской серии	0,39	120—135
K-1	24—102	Переслаивание пепловых и псаммитовых туфов, внизу плотные псефитовые туфы	Поступление воды по всему интервалу	0,003	—
K-1	100—237,5	Туфы псефитовые паужетской свиты	Поступление воды по всему интервалу	7,0	139
K-2	9,1—38	Туфы алевроитовые трещиноватые паужетской свиты	Вода поступает из крупной трещины на глубине 33 м	10,0	134
K-2	51,2—260	Туфы псефитовые паужетской свиты	Вода поступает со всего интервала	0,03 6,0	177
K-3	6—18	Аллювиальные валунно-галечниковые отложения, внизу туфы псефитовые паужетской свиты	Вода поступает преимущественно в интервале залегания аллювия до глубины 9,0 м	6,6	—
K-3	43—52	Туфы псефитовые, переходящие внизу в пепловые	Водоприток осуществляется по всему интервалу	0,03	—
K-3	52—311	Переслаивание псаммитовых и псефитовых туфов	То же	0,003	—

или крупных трещин, но вскрыли перегретые термальные воды. Это свидетельствовало о том, что термальные воды, видимо, циркулируют также по порам и мелким трещинам в псефитовых туфах. Только скв. 4, пробуренная у подножия правой высокой террасы, на продолжении линии разлома северо-восточного простирания вскрыла крупные трещины и оказалась наиболее производительной (дебит 40 кг/сек при свободном фонтанировании). На участке этой трещинной зоны расположено большинство разведочных скважин. Все скважины, заложенные здесь, оказались продуктивными, хотя дебит каждой из них явно зависел от вскрытия обводненных трещин. Результаты бурения и опробования их показывают, что полоса тектонических нарушений имеет вид сложной зоны дробления с развитием системы оперяющих трещин.

Места пересечения скважинами плоскостей тектонических нарушений, как показывает анализ данных по бурению и гидрогеологическому испытанию их, не всегда являлись основной зоной притока воды. Напротив, в ряде случаев наиболее обводнены были трещины, оперяющие или сопряженные с тектоническими нарушениями.

Например, концентрированный приток воды в скв. 14 происходил в основном из обводненной трещины на глубине 316,4 м, а плоскость нарушения была вскрыта в приповерхностной зоне. Об этом свидетельствует поглощение бурового раствора и плохой выход керна в интервале 316,4—331 м, а также последовавший вскоре после его проходки пароводяной выброс. Высокое теплосодержание пароводяной смеси на устье, приближающееся к максимальной температуре пород, подтверждает сосредоточенное поступление воды в скважину. Сква. 20, которая пересекла трещинную зону, как уже говорилось, на глубине 85—108 м, давала пароводяную смесь с энтальпией на устье больше, чем можно было ожидать по температуре, зафиксированной в ней на этом интервале (194 ккал/кг и 168—175° С).

О сложной системе трещиноватости, сопряженной с трещинными зонами, свидетельствует то обстоятельство, что скв. 2, находящаяся в стороне от основной термальной линии, пересекла плоскость первого тектонического нарушения на глубине 38 м в толще почти непроницаемых пепловых туфов. Дебит скважины, соответствующий свободному фонтанированию при опробовании интервала 0—38 м, оказался равным 10 кг/сек. Выброс пароводяной смеси сильно снижал уровень в грифоне источника Пульсирующего, что указывает на гидравлическую связь обводненных трещин. Сква. 10 не вскрыла непосредственно плоскость тектонического нарушения, но прошла ослабленные породы в интервале 130—160 м. Дебит скважины при свободном фонтанировании достигал 23,5 кг/сек.

Тот факт, что скважины, заложенные в пределах выделенных тектонических зон, характеризуются относительно высокой производительностью, дает возможность предполагать, что коллекторами термальных вод, обуславливающими водообильность таких участков, помимо самих тектонических нарушений, являются в основном трещины, сопряженные с ними. Системы трещин, видимо, не затрагивают толщу псефитовых туфов, залегающих между термальными линиями, что явилось причиной слабой водообильности пород таких участков. Удельный дебит скважин, пройденных в нетрещиноватых туфах, был самым низким — 0,02—0,03 кг/сек (скв. 6, 7, 12, 18). Водоприток в эти скважины происходит по порам и мелким трещинам в толще псефитовых туфов. Незначительные изменения по площади мощности водовмещающих пород не сказываются на производительности пароводяных скважин.

Скважины, совершенные и несовершенные по степени вскрытия водоносного комплекса, дают различные дебиты только в зависимости от характера водопритока (табл. 6). Показательна в этом отношении скв. 4, которая вскрыла крупные трещины в призабойной части ствола. В процессе

ее ликвидации удалось провести гидрогеологическое опробование после изоляции интервала, на котором скважина пересекла трещины (213—275,9 м). Дебит скважины практически во всем диапазоне давлений пара на устье уменьшился почти в 4 раза. Все это также подчеркивает исключительную роль трещиноватости пород в циркуляции термальных вод.

Для водообильности отдельных участков, кроме различной водопроницаемости водоносных отложений, связанной с расположением трещинных зон, большое значение имеют мощность водоупорных пород, степень их раздробленности трещинами и связанное с этим местоположение выходов термальной воды на поверхность.

Водонепроницаемые пепловые туфы и туффиты имеют максимальную мощность на севере и северо-востоке участка до 64—90 м (рис. 7, 8) и представлены наиболее плотными разностями. На южном участке мощность их достигает всего лишь 25—51 м. Скважины, расположенные на южном участке, перехватывают, видимо, лишь часть потока, в значительной степени разгружающегося по трещинам в маломощном водоупоре, и характеризуются низкими дебитами, даже если они вскрывают трещинную зону.

Для примера можно сравнить расходы скв. 16 и 4. Первая, пересекая трещинную зону на южном участке, имела расход 8,4 кг/сек при свободном фонтанировании; вторая, заложенная в такую же зону на северном участке месторождения, оказалась наиболее производительной на Паужетском месторождении с расходом 40 кг/сек пароводяной смеси при свободном фонтанировании. То же относится и к скважинам, не вскрывшим крупные обводненные трещины. Так удельный дебит скв. 8 составил 0,044 кг/сек, по сравнению со скв. 2—0,03 кг/сек (юг участка). Кроме того, скважины, заложенные здесь, характеризовались пульсирующим режимом (2, 12, 17). В этой связи интересно отметить, что там, где относительный верхний водоупор имеет небольшую мощность или отсутствуют пепловые туфы, наблюдаются многочисленнее, но очень малодобитные источники, располагающиеся довольно бессистемно (район скв. 5). Сосредоточенные же выходы термальной воды в виде кипящих источников с большим дебитом: Парящий I, Парящий II, Пульсирующие — отмечаются там, где распространены маломощные водоупорные отложения, разбитые крупными трещинами.

Следовательно, высокотермальные подземные воды в пределах разведанного участка Паужетского месторождения циркулируют в поро-трещинном коллекторе, проницаемость которого в большой степени связана с развитием трещин.

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ

Фильтрационные свойства пород, заключающих высокотермальные воды, изучены не в полной мере и только по данным опытных откачек (выпусков пароводяной смеси из скважин). Но так как большинство скважин опробовалось после вскрытия всего предполагаемого интервала водопритока, то полученные данные о проницаемости отложений почти всегда характеризуют всю толщу обводненных псефитовых туфов. Однако даже визуальный осмотр керна показывает, что они неоднородны по своим физическим свойствам, например, плотность их несколько увеличивается к подошве, места изменяется размер и количество обломков лав в туфах, что, конечно, влияет на фильтрационные свойства породы. Проницаемость образцов псефитовых туфов в лаборатории не определялась.

Коэффициенты проницаемости, определенные по данным пробных выпусков, характеризуют эффективную проницаемость водоносного пласта в целом с учетом пористости пород и их трещиноватости. В приводимой

ниже табл. 7 коэффициенты проницаемости, рассчитанные по данным выпусков скв. 2, 7, 8, не вскрывших крупных трещин, в какой-то мере характеризуют проницаемость собственно псефитовых туфов. Проницаемость отложений, разбитых крупными трещинами (такие породы вскрыты скв. 4, 10 и 11), почти в 10 раз больше проницаемости слаботрециноватых пород.

Т а б л и ц а 7

Коэффициент проницаемости псефитовых туфов по данным откачек

№ скв.	$K_{п}$, дарси	Интервал водопритока, для которого рассчитан $K_{п}$	№ скв.	$K_{п}$, дарси	Интервал водопритока, для которого рассчитан $K_{п}$
2	0,00324	51,2—260	8	0,0056	83—313
4	0,0350	90,1—275,9	10	0,0262	85—319,5
7	0,00248	865,7—219,8	11	0,0137	64,5—331

Но даже проницаемость трещиноватых пород, как следует из приведенных данных, очень мала. Сопоставимая с величинами коэффициента проницаемости, определенными по данным пробных выпусков, является его величина, рассчитанная по суммарной разгрузке высокотермальных вод ($Q = 8640 \text{ м}^3/\text{сут}$), если предположить, что последняя близка к расходу потока высокотермальных вод в границах обводненных псефитовых туфов паужетской свиты. Ширина потока (B), взятая по пьезоизогипсе в конце потока и не выходящая за створы, где измерялся вынос хлора, равна 1700 м. Тогда

$$K_{п} = \frac{Q_{\mu}}{Bm\gamma I} = 0,104 \text{ дарси,}$$

где m — мощность водоносных пород, 200 м; I — гидравлический уклон, 0,05; μ — динамическая вязкость, 0,16 сантипуаз; γ — объемный вес воды, 0,09 т/м³.

УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ И РАЗГРУЗКИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Высокотермальные подземные воды, приуроченные как к крупным трещинам, сопряженным с тектоническими нарушениями, так и к мелким трещинам и порам в толще псефитовых туфов, характеризуются единой пьезометрической поверхностью и образуют гидравлически единый водоносный комплекс (рис. 14).

Абсолютные отметки статических уровней в скважинах, заложенных в толщу туфов, закономерно изменяются на разведанном участке в соответствии с рельефом. Они уменьшаются к долине Паужетки и по ее падению. Статические уровни в скважинах, имеющих приблизительно одинаковые гипсометрические отметки устьев и располагающихся на одинаковых элементах рельефа, устанавливаются почти на равных абсолютных высотах в целом независимо от степени трещиноватости водоносных пород.

Статический уровень в скважинах, расположенных на низких террасах Паужетки, на 10—25 м превышает поверхность земли, за исключением скв. 3, заложенной за пределами термального потока, и скв. 6. В скважинах, пройденных на правой высокой террасе Паужетки, статические уровни установились ниже устья (табл. 8).

По данным измерения статического уровня, в скважинах построена карта пьезометрической поверхности водоносного комплекса паужетской свиты (рис. 14). При этом были использованы прямые замеры

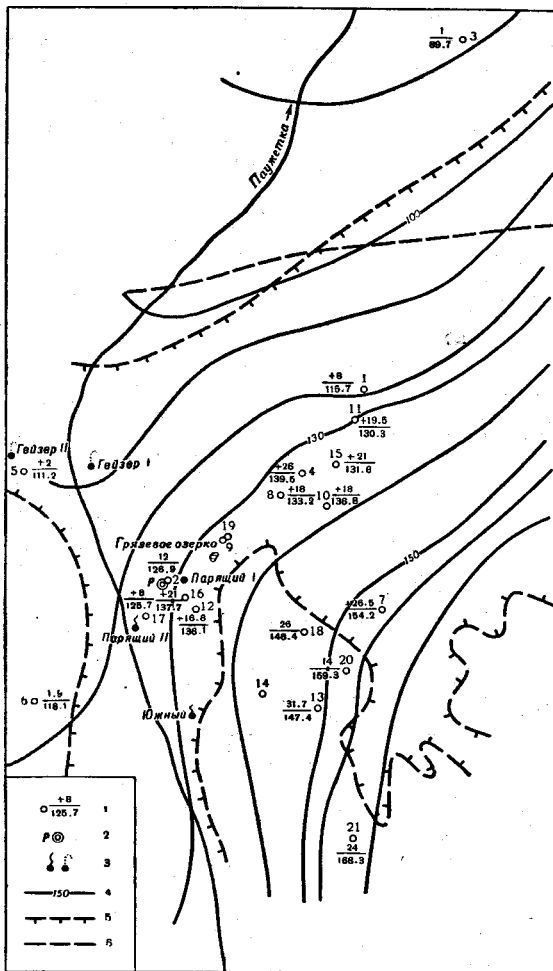


Рис. 14. Карта пьезоизогипс водоносного комплекса Паужетской свиты

1 — разведочная колонковая скважина: цифры слева — номер скважины, цифры справа: в числителе статические уровни относительно устья, в знаменателе — абсолютная отметка статического уровня; 2 — роторная скважина; 3 — кипящие источники и гейзеры; 4 — пьезоизогипсы; 5 — граница зоны самоизливающихся скважин; 6 — северная граница распространения термальных вод с температурой 100° С

Долина Паужетки является естественной дренажной по отношению к водоносному комплексу. Это доказывалось, кроме выходов термальной воды здесь, падением отметок пьезометров в скважинах к долине реки, выполаживанием (вогнутостью) пьезометрической поверхности на участке долины. Интенсивная разгрузка термальных вод происходит в южной части долины на разведанном участке месторождения, где наблюдаются многочисленные кипящие источники, гейзеры, паровые струи.

Направление движения термальных вод четко вырисовывается также на карте геоизотерм и геолого-гидрогеологических профилях по положению изотерм в вертикальном разрезе (см. рис. 7, 8, 13). Температура в скважинах в интервале водоносного комплекса уменьшается в северо-западном и западном направлениях, причем в роторной скважине установлено

статических уровней, определенные по статическому давлению или путем непосредственного измерения установившегося уровня воды хлопущкой, так как температура воды, вскрываемой скважинами, а следовательно, и объемный вес ее были приблизительно одинаковы. Сравнение статических уровней и построение карты пьезогипс на большой территории с распространением термальных и холодных подземных вод, характеризующейся различными объемными весами, очевидно, должно производиться по приведенным давлениям и приведенным уровням. Расчет приведенных давлений по скважинам Паужетского месторождения представляет известные трудности в связи с тем, что нельзя точно определить мощность интервала водопритока. Кроме того, отсутствие глубинных манометров не позволило определять пластовое давление.

Движение воды, как следует из положения пьезоизогипс, происходит с юго-востока на запад северо-запад, к долине Паужетки и затем на север по направлению падения долины (рис. 15). Гидравлический уклон, определенный по расстоянию между пьезоизогипсами, равен 0,05.

Таблица 8

Показатели водоносности псифитовых туфов паужетской свиты

№ скв. Глубина, м	Глубина залегания водоносного ком- плекса, м	Мощность водо- носного комплек- са, м	Статический уро- вень воды относи- тельно устья абсо- лютной отметки ста- тического уровня	Удельный дебит, кг/сек м	Температура на от- метке статического уровня, °С*	Температура на верхней и нижней границе водоносно- го комплекса, °С	Примечание
$\frac{1}{237,5}$	86,6	150,9**	$\frac{+8,0}{115,7}$	—	—	—	
$\frac{2}{271}$	51,2	208,8**	$\frac{+12}{126,9}$	0,03	—	—	
$\frac{4}{275,9}$	90,1	185,8**	$\frac{+26,0}{139,5}$	0,25	—	167,5— 163	Водоприток преимущест- венно по крупным трещинам в интервале 210—275,9 м
$\frac{5}{375}$	25,0	202,0	$\frac{+2,0}{111,24}$	0,058	59	131—139	
$\frac{6}{468,49}$	52,0	196,6	$\frac{1,9}{118,1}$	—	22	128—154	
$\frac{7}{219,8}$	65,7	154,1**	$\frac{+26,5}{154,2}$	0,02	119	177—193	Водоприток преимущест- венно в интервале 197—219,8 м
$\frac{8}{351,2}$	83,0	230,0	$\frac{+18,0}{133,15}$	0,044	66	168—176	
$\frac{10}{357,4}$	85,0	234,5	$\frac{+18,0}{136,8}$	0,33	42	152—179	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—216 м
$\frac{11}{352,9}$	64,5	266,5	$\frac{+19,5}{180,3}$	0,15	14	141—164	Водоприток преимущест- венно в интервале 89—204 м, предположительно вскрыта трещинная зона на глубине 89 м
$\frac{12}{305,69}$	43	246,2	$\frac{+16,8}{136,1}$	0,06	161	171—192	
$\frac{13}{488,73}$	90,0	259,8	$\frac{31,7}{147,3}$	—	169	174—199	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—170 м
$\frac{14}{341}$	61,5	271,0	На устье пар	—	164	173—195	Трещинная зона вскрыта на глубине 316—331,5 м
$\frac{15}{338,8}$	86,7	241,3	$\frac{+21,0}{131,8}$	0,23	109	122—172	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—224 м
$\frac{16}{407}$	45,6	224,4	$\frac{+21,0}{137,6}$	—	165	168—190	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—190 м. Трещинная зона вскрыта на глубине 176—178 м
$\frac{17}{355,6}$	51	210,1	$\frac{+8}{125,7}$	—	109	158—192	
$\frac{18}{423,6}$	90,5	246,9	$\frac{2,6}{148,4}$	—	42	175—196	
$\frac{19}{350,68}$	86,0	203,0	На устье пар	—	130	146—146, 167	Водоприток преимущест- венно по трещинной зоне в пеплово-пемзовых туфах на глубине 26—35, а также 71,5— 200 м

Таблица 8 (окончание)

№ скв. глубина, м	Глубина залегания водоносного ком- плекса, м	Мощность водо- носного комплек- са, м	Статический уро- вень воды относи- тельно устья абсо- лютной отметки ста- тического уровня	Удельный дебит, кг/сек м	Температура на от- метке статического уровня, °С*	Температура на верхней и нижней границе водоносно- го комплекса, °С	Примечание
20 446,1	116,2	237,4	14 159,3	—	147	147—1975	Водоприток преимущест- венно в интервале по тре- щинной зоне на глубине в 86,6—107 м и в интервале 185— 251 м
21 443,67	145,1	217,3	24 168,3	—	176	178,5— 188,5	Водоприток преимущест- венно в интервале 80—108 м

* Температура на отметке статического уровня для самоизливающихся скважин дана по измерению ее на устье. Она во всех случаях была больше температуры в естественных условиях.

** Вскрытая мощность водоносных отложений.

снижение температуры с глубиной. Данные термометрии в скважинах, с одной стороны, подтверждают направление потока, которое определено по положению пьезометрической поверхности; с другой стороны, уточняют направление движения и ширину потока наиболее нагретых вод. Этот поток ограничивается скв. 13, 14, 17, 19, 18, 7. Ширина его, видимо, опре-

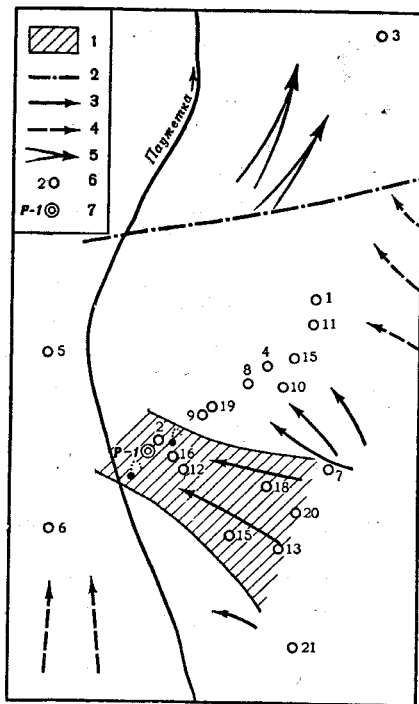


Рис. 15. Схема движения термальных и охлажденных вод на разведываемом участке месторождения

1 — поток наиболее нагретых термальных вод с высоким содержанием хлора, калия и кремнекислоты, движущийся к зоне интенсивной разгрузки; 2 — северная граница распространения высокотемпературных вод с температурой более 100°С; 3 — направление движения высокотермальных вод; 4 — направление движения холодных пресных вод; 5 — движение потока после смешения холодных пресных вод и перегретых минерализованных вод; 6 — разведочные скважины; 7 — P-1 — роторная скважина

деляется небольшой зоной активной разгрузки в долине Паужетки. По геоизотермам на геолого-гидрогеологическом профиле четко выделяется зона повышенных температур в приповерхностной части, совпадающая с участком выходов термальных вод особенно в пределах основной термаль-

ной линии. Изотермы здесь в толще псефитовых туфов смещаются вверх (район заложения скв. 16 и Р-1). Такое же повышение температуры в приповерхностной зоне отмечается по данным измерения температур в скв. 14, заложенной на участке выхода паровых струй в пределах Верхнего термального поля.

Скрытая разгрузка термальных вод, видимо, осуществляется и на северном участке долины Паужетки, как показывает положение пьезоизогипс, в значительно меньшей степени, чем на южном участке. Имея преимущество, по сравнению с холодными или менее нагретыми водами

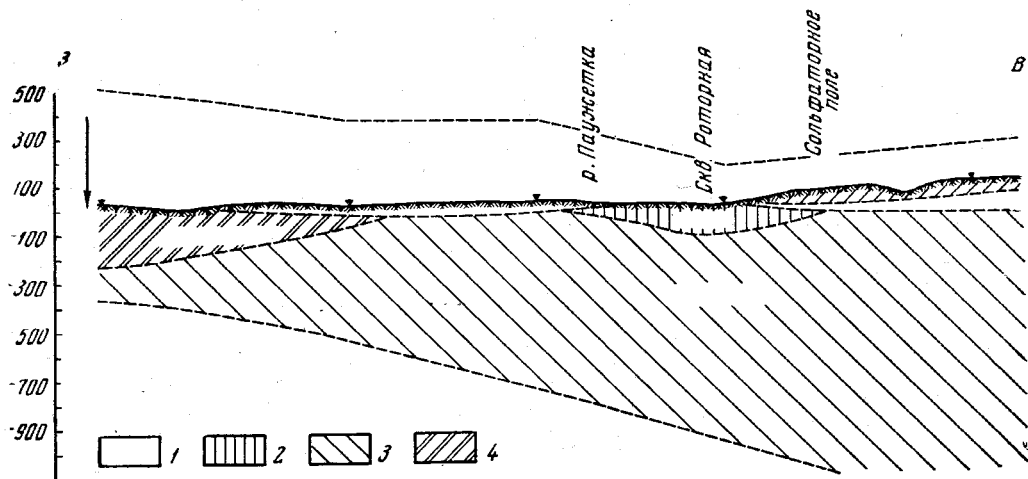


Рис. 16. Геоэлектрический разрез через долину р. Паужетки, по Г. П. Декину. Низкие сопротивления характеризуют зону циркуляции высокотермальных вод
Горизонты с сопротивлением: 1—1,2 ом.м, 2 — 3 ом.м, 3 — 10—15 ом.м, 4 — 75—85 ом.м.

в фильтрации по порам и трещинам, термальные воды здесь препятствуют разгрузке холодных или менее нагретых вод и сохраняют высокую температуру (рис. 16). На севере участка месторождения, несмотря на лучшие фильтрационные свойства водоносных отложений, приток термальных вод с высокой температурой незначителен, так как связан с трудностью разгрузки их через водоупорные отложения.

Уменьшение температур в зоне водовмещающих пород за пределами потока наиболее нагретых вод объясняется разбавлением их холодными пресными водами, которые, окружая поток высокотермальных вод, создают с ним единую гидродинамическую систему. Это доказывается скв. 3, пробуренной за северной границей месторождения, которая вскрыла слабо минерализованную воду с низкой температурой (74° С на абс. отм.— 221 м).

Водоносный комплекс паужетской свиты гидравлически связан с нижележащим палеоген-неогеновым водоносным комплексом. Подток термальных вод из последнего четко зафиксирован в период опытной эксплуатации по изменению химического состава и уменьшению теплосодержания пароводяной смеси в скв. 4 и 11, заложенных в толщу псефитовых туфов. Когда в скв. 4 была изолирована трещинная зона в призабойной части ствола, уходящая, видимо, к песчаникам анавгайской серии, увеличились теплосодержание пароводяной смеси и содержание хлора в воде. Концентрация хлора достигла величины 1600 мг/л, что характерно для высокотермальных вод толщи псефитовых туфов.

Очевидно, разгрузка термальных вод нижнего водоносного комплекса в долине Паужетки происходит в проницаемые псефитовые туфы, что пред-

полагалось ранее только по значительному превышению пьезометрического уровня этих вод относительно пьезометрической поверхности водоносного комплекса паужетской свиты.

Значительное превышение статического уровня над поверхностью земли в скважинах в пределах потока высокотермальных вод, обуславливающее интенсивную разгрузку в зоне дренирования, связано не только с пластовым давлением, но и с тем, что пластовое давление уравнивается большей высотой столба нагретой воды с объемным весом меньше единицы. Это подтверждается формулой расчета пластового давления.

$$P_{пл} = P_{ст} + \frac{h_{ст} \gamma}{10},$$

где $P_{ст}$ — избыточное давление на устье закрытой скважины, $h_{ст}$ — статический столб воды в скважине высотой от середины фильтра (интервал водопритока) до устья, γ — средний объемный вес воды в пластовых условиях.

Более точно пластовое давление определяется с учетом изменения объемного веса воды с глубиной, который в нашем случае зависит от температуры:

$$P_{пл} = P_{ст} + \frac{h_1 \gamma_1}{10} + \dots + \frac{h_n \gamma_n}{10},$$

где h_1, h_n — высота столба воды в скважине, для которого по данным термометрии и таблицы определено среднее значение объемного веса.

Например, в скв. 8 пластовое давление, если взять середину интервала водопритока на глубине 198 м и среднюю температуру 160°С ($\gamma = 0,907$), составит 19,7 атм. Если бы объемный вес воды был равен 1, то данному пластовому давлению соответствовал бы столб воды высотой 197 м, и статический уровень не доходил до дневной поверхности на 1 м (198 — 197 = 1). В действительности же статический уровень располагается на 18 м выше поверхности земли.

Кроме того, что высокая температура термальных вод способствует их выходу на поверхность, она обуславливает активную циркуляцию в пределах всей гидротермальной системы. По сравнению с холодными высокотермальные воды имеют значительное преимущество в скорости фильтрации. Так, при температуре 160—180° в интервале обводненных пород коэффициент динамической вязкости воды составляет 0,16 сантипуаз против 1,33 сантипуаз при 10°. При прочих равных условиях это увеличивает скорость фильтрации термальных вод в 6—7 раз в соответствии с формулой

$$V = K_n \frac{\gamma}{\mu} J,$$

где V — скорость фильтрации, γ — объемный вес воды, μ — динамическая вязкость воды, K_n — коэффициент проницаемости, J — гидравлический уклон.

Выше указывалось, что проницаемость водовмещающих пород на Паужетском месторождении очень низка. Циркуляция холодных подземных вод по ним исключительно затруднена, что подтверждается отсутствием крупных холодных источников из этой толщи. Однако, будучи практически непроницаемыми для холодных вод, эти породы оказываются относительно хорошо проницаемыми для вод с высокой температурой. Не будет преувеличением сказать, что своим существованием активная гидротермальная система обязана теплу в первую очередь.

Влияние высоких температур на динамику гидротерм ярко проявляется в верхней зоне очагов разгрузки, при выходе гидротерм на поверхность. В этих условиях в связи со снижением внешнего давления происходит вскипание воды и парообразование. Гидравлический эффект этого явления, получивший название парлифта, заключается в том, что глубоко про-

никающее парообразование резко снижает давление в канале источника или в стволе скважины. В результате поступление термальной воды из водовмещающих пород происходит под действием очень большого перепада давлений, отвечающего условиям откачки с понижением уровня до ста и более метров. На пароводяных источниках и скважинах идет непрерывная самопроизвольная откачка воды паром, чем, в частности, и объясняется их, как правило, большой дебит.

В районе Паужетской термальной площади, в активном очаге разгрузки, нижняя граница зоны парообразования в естественных условиях располагается в среднем на глубине около 120 м. Это следует из анализа термограммы роторной скважины и сопоставления температур на этой глубине с теплосодержанием пароводяной смеси источника Парящий I. Однако действительная картина значительно сложнее. Глубина парообразования находится в сложной зависимости от многих параметров, из которых главные — температура гидротерм и гидростатическое давление. С повышением температуры растет упругость насыщенного пара, что дает воде возможность вскипать на большей глубине. С другой стороны, глубина парообразования зависит от гидравлических сопротивлений по пути движения пароводяной смеси. Опытные работы на скважинах показали, что на Паужетском месторождении вскипание гидротерм в хорошо разработанных каналах и крупных трещинах может происходить значительно ниже 120 м и проникать до 200 м и глубже. В то же время по порам и мелким трещинкам процесс парообразования происходит очень неглубоко и лишь в непосредственной близости от поверхности земли или канала источника. Таким образом, зона парообразования в очагах разгрузки гидротерм имеет весьма сложные очертания, которые определяются в основном системой трещиноватости и степенью разработанности каналов движения.

Причины и условия возникновения гейзерного режима

В заключении настоящего раздела, посвященного условиям циркуляции высокотермальных вод, целесообразно остановиться на вопросе, который, судя по литературным данным последних лет, все еще остается дискуссионным. Речь идет о режиме гейзеров, представляющих собой одно из самых своеобразных и ярких явлений природы. На Паужетке, как уже отмечалось, известны только два природных гейзера; они очень малы и не могут идти ни в какое сравнение с гигантами, бьющими в «Долине гейзеров» на Камчатке, Йеллоустонском парке, Новой Зеландии и Исландии. Однако на Паужетском месторождении имелся целый ряд разведочных скважин, которые характеризовались гейзерным и пульсирующим режимом извержения пароводяной смеси, и масштабы их деятельности не уступали самым мощным природным гейзерам.

Исследования, проведенные на этих скважинах, дали ценный материал, позволяющий правильно интерпретировать причины гейзерного режима и одновременно отказаться от некоторых устаревших положений.

При гейзерном режиме извержение пароводяной смеси происходит периодически, причем каждое извержение — это цикл из нескольких стадий. В наиболее типичном случае извержение начинается с излива воды, сначала немного охлажденной, потом все более и более горячей (рис. 17). Поведение гейзера в эту стадию по существу ничем не отличается от действия обычных, некипящих источников. Расход воды в стадию излива очень незначителен. По прошествии некоторого времени равномерность в изливе нарушается. Из грифона гейзера начинают отдельные выплески воды, в перерыве между которыми излив прекращается. Иногда можно видеть, что выплески воды сопровождаются выделением большого парового пузыря, что говорит о начинающемся в канале гейзера вскипании. Постепенно частота выплесков усиливается и, наконец, наступает такой момент, когда

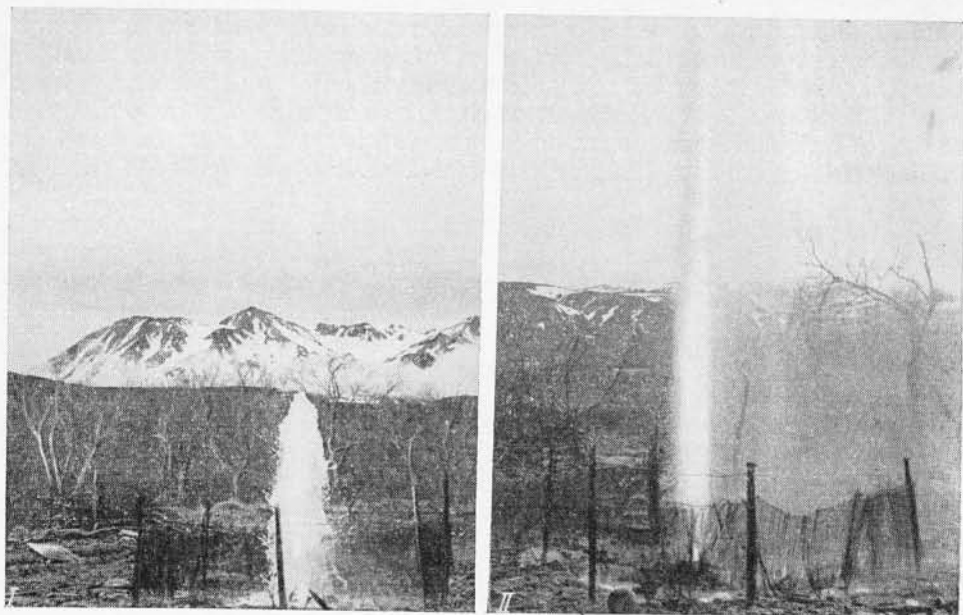


Рис. 17. Гейзерный режим извержения пароводяной смеси
 I — начальная стадия (излив воды); II — заключительная стадия извержения
 Фото М. П. Флоренского

очередной выплеск перерастает в мощный выброс. Он начинается с выталкивания большой водяной пробки, вслед за которой вырывается пароводяная смесь. Этот момент знаменует собой начало стадии фонтанирования, развивающейся очень бурно и эффектно. Струи воды и клубы пара из больших природных гейзеров, а также из скважин взлетают вверх на несколько десятков метров. Временные значения расходов при фонтанировании выражаются десятками литров в секунду. Именно эта стадия и представляет по существу само извержение. Оно может длиться более или менее продолжительное время, но затухает обычно в весьма короткий срок. После этого наступает стадия парения, постепенно уменьшающегося, и в конечном счете гейзер прекращает свою видимую деятельность. Однако в перерыве между прекращением парения и началом излива происходит заполнение канала гейзера или ствола скважины водой, которое также можно выделить в отдельную стадию (рис. 17, 18).

Таким образом, гейзеры представляют собой разновидность пароводяных, кипящих источников. Обязательным условием существования гейзеров является питание их термальными водами с температурой значительно выше 100° . Только в таком случае вода при своем приближении к поверхности может вскипать, а упругость пара будет достаточной для преодоления давления и выброса водяного столба в несколько десятков метров.

В то же время исследования на скважинах с пульсирующим и гейзерным режимом показали, что развитие извержения сопровождается существенными изменениями в величине паросодержания и энтальпии пароводяной смеси.

Наиболее резко в этом отношении отличаются друг от друга две крайние стадии цикла: стадия излива, в которой паросодержание равно нулю, и стадия парения, когда из скважины выходит только один пар. Между этими двумя крайними состояниями располагается стадия фонтанирования, при которой отмечается систематический рост паросодержания, достигающий максимума в конце стадии перед вступлением скважины

Расход и теплосодержание пароводяной смеси
на пульсирующей скважине К-2 (по данным 18 замеров)

Стадии цикла извержения	Средняя продолжительность стадии, мин.	Расход пароводяной смеси, кг/сек			Энтальпия пароводяной смеси, ккал/кг			Суммарный вынос пароводяной смеси, кг	Суммарный вынос тепла, ккал	Среднее теплосодержание пароводяной смеси за цикл	
		от	до	ср.	от	до	ср.				
Начальная	3			7,2			138	21,6	2984		
Средняя {	1 половина	9,5	3,3	3,7	3,55	164	183	170	33,7	5733	173,5
	2 половина	30	2,0	3,4	2,7	168	259	191	81,0	15 471	
Конечная	15	2,1	3,1	2,5	140	163	160	37,5	6000		
Итого . . .								173,8	30 185		

в стадию парения. Что же касается средней величины энтальпии пароводяной смеси, рассчитанной за весь цикл (табл. 9), то она не отличается от энтальпии, замеренной на той же скважине при постоянном режиме и характерной для данного водоносного комплекса. То же относится и к при-

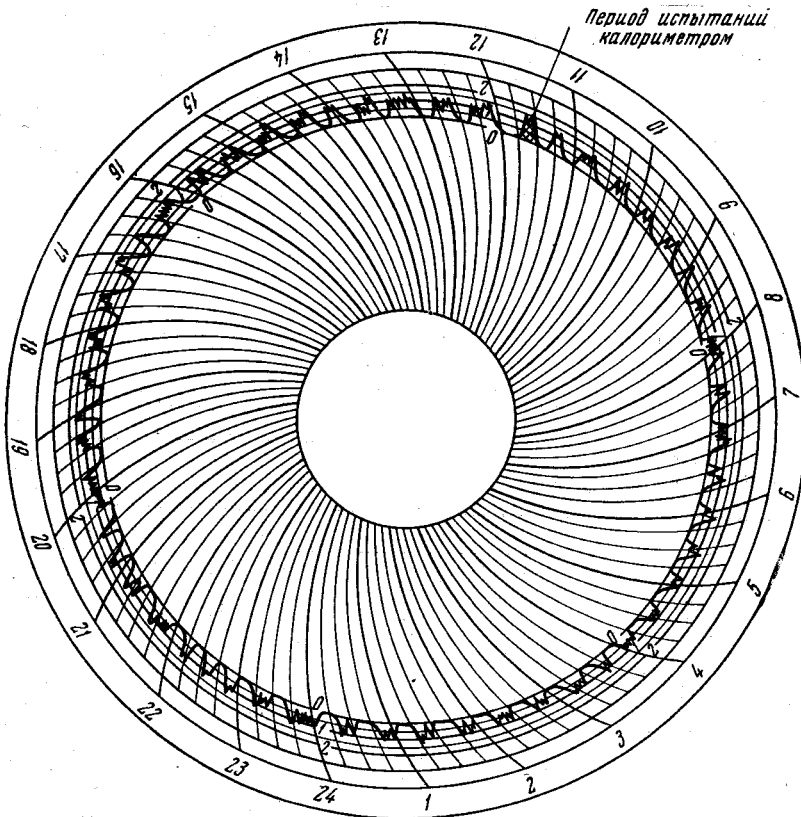


Рис. 18. Диаграмма давления пара на устье скважины К-1, обладающей гейзерным режимом

Режим прерывистый, прибор МГ-410, поставлено 20.IX 1959 г., снято 21.IX 1959 г.

родным гейзерам. Средняя энтальпия пароводяной смеси гейзеров имеет в общем такое же значение, как и на непрерывно действующих пароводяных источниках.

Следовательно, существование гейзеров никоим образом не связано с какими-то особыми, исключительными условиями их питания, например, как это иногда думают, с прорывами «глубинного» перегретого пара. В питании гейзеров участвует тот же самый водоносный комплекс, на котором базируются непрерывно действующие пароводяные источники и скважины. Процессы, приводящие к возникновению гейзерного режима, развиваются в стволе скважины или, если иметь в виду естественные источники, в их канале и связанных с ним трещинах.

В отличие от непрерывно действующих пароводяных источников, образовавшийся в канале гейзера пар в своем движении намного опережает породившую его воду. Этот эффект опережающего движения паровой фазы в канале источника или стволе скважины, как правильно отметил А. С. Нехорошев (1959), — ведущий в формировании гейзерного режима. В результате чего отстающая от пара вода не успевает в ходе извержения достигнуть устья скважины и присоединиться к первым порциям пароводяной смеси, вытолкнутой паром. Она остается на некоторой глубине в стволе скважины и продолжает еще некоторое время весьма интенсивно кипеть, выделяя пар в стадию парения. Но постепенно температура ее в результате кипения снижается до 100°C , и парение в конце концов прекращается. Новый цикл извержения начинается лишь тогда, когда депарированная и остывшая вода достигнет устья и сольется, дав место свежим, высокотемпературным порциям.

Из-за различных физических свойств вода и пар в канале гейзера движутся с разными скоростями. Пар движется значительно быстрее воды. Однако скорость пара весьма существенно регулируется как гидравлическими сопротивлениями по пути его следования, так и тем перепадом давления, которым вызвано движение.

С увеличением диаметра канала для движения пара создаются благоприятные условия. Не случайно поэтому грифоны всех гейзеров представляют собой более или менее обширные резервуары, а их каналы, уходящие в глубину, достигают иногда в ширину метра и даже больше. Уменьшение же диаметра канала, наоборот, затрудняет движение пара. Что же касается воды, то она в канале испытывает по сравнению с паром крайне незначительные сопротивления. В порции пароводяной смеси, образовавшейся при вскипании, вода, хотя и преобладает по весу, занимает очень небольшой удельный объем. Например, 1 кг пароводяной смеси, образовавшейся в результате вскипания 200°C воды и находящейся при давлении 3 *ата*, содержит всего 11 вес. % пара. Но это небольшое по весу количество пара занимает объем около 80 л, т. е. почти в 100 раз больше, чем вода. Ясно, что уменьшение проходного сечения в первую очередь ограничивает движение пара. Это положение доказывается тем, что скважины с гейзерным и шульсирующим режимом поддаются регулировке с помощью задвижки. В частности, уменьшив проходное сечение, удалось полностью ликвидировать пульсации на скв. К-2, а скв. К-1 перевести из гейзерного режима в режим непрерывного действия.

С другой стороны, скорость поступления воды в канал источника или скважину зависит от фильтрационных свойств водовмещающих пород. Характерно, что и скважины с гейзерным режимом и природные гейзеры, как бы эффективно они не выглядели, обладают небольшими средними дебитами, что указывает на затрудненные условия их питания. Это может быть связано с относительно высоким гипсометрическим положением гейзера. Еще Т. И. Устинова, впервые описавшая «Долину гейзеров» на Камчатке, отметила, что гейзеры там располагаются в среднем на значительно более высоких уровнях по сравнению с непрерывно кипящими источниками. По-

следние тяготеют к уровню реки и «перехватывают» большую часть разгружающейся высокотермальной воды.

Таким образом, причины гейзерного режима кроются в несоответствии между возможностями питания гейзера и несоразмерно большим диаметром выводящего канала. В природных условиях такого рода несоответствие встречается не так уж часто. Обычно для пароводяных источников характерно установившееся само собой равновесие между притоком воды в канал и извержением из него пароводяной смеси, что обуславливает непрерывность и равномерность их работы. Но даже на тех термальных площадках, где имеются мощные и многочисленные гейзеры, например в «Долине гейзеров» на Камчатке, основная масса термальной воды поставляется не ими, а непрерывно действующими источниками.

Продолжительность рабочих циклов и их частота, а также длительность отдельных стадий при гейзерном режиме зависит от конкретной гидрогеологической обстановки и конструкции скважины. Частота извержений разных источников и скважин варьирует в очень широком диапазоне. На Паужетском месторождении, например, наблюдались, с одной стороны, скважины, которые фонтанировали по 5—7 мин примерно 3 раза в час, и с другой — скважины с получасовой продолжительностью фонтанирования, возобновлявшегося каждые 6 часов. Еще более резкая разница наблюдается между деятельностью двух небольших природных гейзеров на Паужетке. В одном из них полный цикл деятельности уместается в 1 минуту, в другом же — периоды покоя измеряются 20-ю часами, а иногда и более.

Особенности гидрогеологической обстановки могут нарушать типичный гейзерный режим. На некоторых природных гейзерах практически отсутствует стадия парения, следующая за фонтанированием, так как заливающаяся в канал гейзера охлажденная вода прекращает кипение. Иногда не наблюдается стадия излива, что характерно для скважин и источников, где статический уровень термальных вод располагается ниже поверхности земли. Хотя в этих случаях уровень термальной воды и устанавливается неподвижно на некоторой глубине, движение в канале все же происходит. Этому способствует либо поглощение воды в верхних безнапорных горизонтах, либо интенсивная вертикальная конвекция, которая в конечном счете может стимулировать вскипание воды и начало фонтанирования.

Пульсирующий режим принципиально сходен с гейзерным. В нем также отчетливо выделяются отдельные циклы, во время которых отмечается рост паросодержания и интенсивности извержения. Однако при пульсирующем режиме в извержении не наступает перерыва, так как к концу очередного цикла в ствол скважины на уровень вскипания успевают поступить высокотемпературные порции воды, ранее не захваченные кипением.

Формирование гейзерного режима происходит в основном в приповерхностной зоне и, во всяком случае, не выходит из того водовмещающего комплекса, который дренируется в очаге разгрузки гидротерм. Это обстоятельство не позволяет считать гейзеры, как это нередко делается, исключительными индикаторами состояния гидротермальной системы. По изменению в их режиме нельзя судить о состоянии всей системы в целом. В частности, «затухание» гейзеров, переход их в непрерывно кипящие источники, никоим образом не свидетельствует о «затухании» или ослаблении всей гидротермальной деятельности. Для суждения о состоянии последней и ее изменении необходимы режимные наблюдения за всей массой воды, выходящей в очаге разгрузки, и за всей суммой тепла, которое ею выносится.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД, ВСКРЫВАЕМЫХ СКВАЖИНАМИ

Химический состав воды

Химическими исследованиями установлено, что состав термальных вод из паужетской свиты и третичных песчаников несколько различается, хотя в общем эти воды принадлежат к одному типу — хлоридно-натриевых вод.

Химический состав термальных вод, заключенных в толще вулканомиктовых песчаников анавгайской серии, характеризуется по данным бурения роторной скважины. Анализ воды, взятой на поверхности после сепарирования пароводяной смеси, приведен в табл. 10. Как видно, в составе воды наблюдается относительно повышенная концентрация сульфатов и обедненность ее хлоридами, низкое отношение — $Cl/SO_4 = 2,57$, что отличает ее от состава воды Паужетских источников.

Т а б л и ц а 10

Химический состав воды третичных отложений
(скв. Р-1, интервал 300—800 м)

Компоненты	г/л	мг-экв	мг-экв %
NH_4^+	0,0001	0,01	0,02
Na^+	0,6679	29,04	77,71
K^+	0,0310	0,79	2,11
Ca^{++}	0,1430	7,15	19,14
Mg^{++}	0,0046	0,38	1,02
Сумма	0,8466	37,37	100,00
Cl^-	1,0103	28,50	76,26
SO_4^{--}	0,3929	8,18	21,89
HCO_3^-	0,0043	0,07	0,19
CO_3^{--}	0,0186	0,62	1,66
Сумма	1,4261	37,37	100,00
H_2SiO_3	0,1788		
HBO_2	0,1009		
рН	8,2		

Общая минерализация 2,5524 г/л.

$$M_{2,5} = \frac{Cl_{76}SO_{22}^4}{Na_{78}Ca_{19}K_2}$$

Примечание. Проба взята 25.IX 1961.

Термальные воды, образующие основной продуктивный водоносный комплекс в толще псефитовых туфов, по химическому составу идентичны воде Паужетских источников, характеризуются повышенным содержанием Cl -иона, низкой концентрацией сульфатов и, соответственно, высоким отношением $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 18 - 21$.

Данные анализов проб воды, взятых на устье колонковых скважин после разделения пароводяной смеси на пар и воду, приведены в табл. 11.

Надо полагать, что концентрация всех компонентов в воде на поверхности несколько больше их содержания на глубине, так как часть воды отделяется в виде пара. Очевидно, поэтому концентрация на глубине (считая, что отбор пробы производился при давлении 1,0 *ата*) уменьшится пропорционально величине паросодержания при данном давлении. Уменьшение концентрации компонентов в воде на глубине при полученных теплосодержаниях пароводяной смеси на устье скважины в 157—190 *ккал/кг* составит 11—15,5% от их содержания в воде при атмосферном давлении.

Однако здесь мы пользуемся данными, полученными при анализе воды, взятой на устьях скважин, руководствуясь следующим. Химический состав воды на глубине можно определить только расчетным путем, при котором нельзя учесть возможных изменений концентрации некоторых компонентов в результате парообразования, например, выпадение из воды кремния. При подсчете получаются небольшие ошибки, связанные с неточным определением теплосодержания пароводяной смеси на устье и возможностью частичной конденсации пара в момент отбора пробы воды. Кроме того, состав воды в пластовых условиях отличается от состава воды на поверхности лишь величинами концентрации компонентов, тогда как соотношения между ними, изменения их на площади в том и другом случаях практически одинаковы. В этом нетрудно убедиться, сравнив данные по содержанию характерных компонентов в воде на поверхности и пластовых условиях для некоторых скважин (табл. 11, 12).

Химический тип вод, заключенных в толще псефитовых туфов, определяют два основных компонента: хлор и натрий, содержание которых в воде достигает соответственно 95 и 90% *мг·экв*. Присутствие в составе воды значительных количеств борной и кремневой кислот придает им специфические черты в общей группе природных хлоридно-натриевых вод. Обращает на себя внимание высокая концентрация калия (50—100 *мг/л*) для вод данной минерализации.

Общая минерализация воды на исследуемой площади распространения высокотермальных вод изменяется в незначительных пределах — от 2,7 до 3,4 *г/л*. Тем не менее это изменение, а также колебания концентрации компонентов химического состава имеют большое значение для выяснения гидрогеологических условий разведанного участка месторождения.

Концентрация второстепенных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- и CO_3^{2-}) изменяется в очень небольших пределах, причем не отмечается какой-либо закономерности в изменении ее на участке исследований. Напротив, концентрации основных характерных компонентов химического состава: Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , борной и кремневой кислот — закономерно изменяются по площади, а колебания их концентраций относительно велики.

Изменение содержания отдельных элементов химического состава воды, по данным опробования скважин, видно на графиках (рис. 19).

Первое изучение графиков и анализов воды по скважинам показывает, что содержание Cl^- , Na^+ , K^+ и кремниескислоты аналогично изменяется по площади, а концентрация сульфат-иона остается постоянной при изменении содержания вышеназванных компонентов или значительно увеличивается в отдельных скважинах (5, 6, 8 и 10).

Максимальные концентрации первой группы компонентов наблюдаются в скважинах юго-восточного участка месторождения и в зоне интенсивной разгрузки термальных вод (скв. 16 и 17, 2, 12). От этой зоны концент-

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД, ВСКРЫВАЕМЫХ СКВАЖИНАМИ

Химический состав воды

Химическими исследованиями установлено, что состав термальных вод из паужетской свиты и третичных песчаников несколько различается, хотя в общем эти воды принадлежат к одному типу — хлоридно-натриевых вод.

Химический состав термальных вод, заключенных в толще вулканических песчаников анавгайской серии, характеризуется по данным бурения роторной скважины. Анализ воды, взятой на поверхности после сепарирования пароводяной смеси, приведен в табл. 10. Как видно, в составе воды наблюдается относительно повышенная концентрация сульфатов и обедненность ее хлоридами, низкое отношение — $Cl/SO_4 = 2,57$, что отличает ее от состава воды Паужетских источников.

Таблица 10

Химический состав воды третичных отложений
(скв. Р-1, интервал 300—800 м)

Компоненты	г/л	мг-экв	мг-экв %
NH_4^+	0,0001	0,01	0,02
Na^+	0,6679	29,04	77,71
K^+	0,0310	0,79	2,11
Ca^{++}	0,1430	7,15	19,14
Mg^{++}	0,0046	0,38	1,02
Сумма	0,8466	37,37	100,00
Cl^-	1,0103	28,50	76,26
SO_4^{--}	0,3929	8,18	21,89
HCO_3^-	0,0043	0,07	0,19
CO_3^{--}	0,0186	0,62	1,66
Сумма	1,4261	37,37	100,00
H_2SiO_3	0,1788		
HBO_2	0,1009		
рН	8,2		

Общая минерализация 2,5524 г/л.

$$M_{2,5} = \frac{Cl_{76}SO_{22}^4}{Na_{78}Ca_{19}K_2}$$

Примечание. Проба взята 25.IX 1961.

Термальные воды, образующие основной продуктивный водоносный комплекс в толще псефитовых туфов, по химическому составу идентичны воде Паужетских источников, характеризуются повышенным содержанием Cl -иона, низкой концентрацией сульфатов и, соответственно, высоким отношением $\text{Cl}/\text{SO}_4 = 18 - 21$.

Данные анализов проб воды, взятых на устье колонковых скважин после разделения пароводяной смеси на пар и воду, приведены в табл. 11.

Надо полагать, что концентрация всех компонентов в воде на поверхности несколько больше их содержания на глубине, так как часть воды отделяется в виде пара. Очевидно, поэтому концентрация на глубине (считая, что отбор пробы производился при давлении 1,0 *ата*) уменьшится пропорционально величине паросодержания при данном давлении. Уменьшение концентрации компонентов в воде на глубине при полученных теплосодержаниях пароводяной смеси на устье скважины в 157—190 *ккал/кг* составит 11—15,5% от их содержания в воде при атмосферном давлении.

Однако здесь мы пользуемся данными, полученными при анализе воды, взятой на устьях скважин, руководствуясь следующим. Химический состав воды на глубине можно определить только расчетным путем, при котором нельзя учесть возможных изменений концентрации некоторых компонентов в результате парообразования, например, выпадение из воды кремния. При подсчете получаются небольшие ошибки, связанные с неточным определением теплосодержания пароводяной смеси на устье и возможностью частичной конденсации пара в момент отбора пробы воды. Кроме того, состав воды в пластовых условиях отличается от состава воды на поверхности лишь величинами концентрации компонентов, тогда как соотношения между ними, изменения их на площади в том и другом случаях практически одинаковы. В этом нетрудно убедиться, сравнив данные по содержанию характерных компонентов в воде на поверхности и пластовых условиях для некоторых скважин (табл. 11, 12).

Химический тип вод, заключенных в толще псефитовых туфов, определяют два основных компонента: хлор и натрий, содержание которых в воде достигает соответственно 95 и 90% *мг·экв*. Присутствие в составе воды значительных количеств борной и кремневой кислот придает им специфические черты в общей группе природных хлоридно-натриевых вод. Обращает на себя внимание высокая концентрация калия (50—100 *мг/л*) для вод данной минерализации.

Общая минерализация воды на исследуемой площади распространения высокотермальных вод изменяется в незначительных пределах — от 2,7 до 3,4 *г/л*. Тем не менее это изменение, а также колебания концентрации компонентов химического состава имеют большое значение для выяснения гидрогеологических условий разведанного участка месторождения.

Концентрация второстепенных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- и CO_3^{2-}) изменяется в очень небольших пределах, причем не отмечается какой-либо закономерности в изменении ее на участке исследований. Напротив, концентрации основных характерных компонентов химического состава: Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , борной и кремневой кислот — закономерно изменяются по площади, а колебания их концентраций относительно велики.

Изменение содержания отдельных элементов химического состава воды, по данным опробования скважин, видно на графиках (рис. 19).

Первое изучение графиков и анализов воды по скважинам показывает, что содержание Cl^- , Na^+ , K^+ и кремниевой кислоты аналогично изменяется по площади, а концентрация сульфат-иона остается постоянной при изменении содержания вышеназванных компонентов или значительно увеличивается в отдельных скважинах (5, 6, 8 и 10).

Максимальные концентрации первой группы компонентов наблюдаются в скважинах юго-восточного участка месторождения и в зоне интенсивной разгрузки термальных вод (скв. 16 и 17, 2, 12). От этой зоны концент-

Химический состав термальных вод, вскрытых разведочными скважинами

Таблица 11

№ скв.	Дата отбора пробы	Катионы, г/л мг-экв % мг-экв					Анионы, г/л мг-экв % мг-экв				Недиссоциированные молекулы, г/л		Общая минерализация, г/л М	pH
		Na+	K+	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	NH ₄ ⁺	Cl	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	H ₂ SiO ₃	HBO ₃		
1	4.V 1960	0,8994	0,0375	0,052	0,0035	0,0003	1,4397	0,0783	0,0159	0,0168	0,2314	0,1378	2,9126	8,0
		39,1	0,96	2,60	0,29	0,02	40,60	1,63	0,26	0,56				
		91,00	2,23	6,05	0,67	0,05	94,31	3,79	0,60	1,30				
2	3.I 1961	0,9800	0,0903	0,0522	0,0035	0,0004	1,6124	0,0765	0,0018	0,0228	0,2541	0,1506	3,2452	8,2
		42,61	2,33	2,61	0,29	0,02	45,48	1,59	0,03	0,76				
		89,03	4,88	5,45	0,60	0,04	95,03	3,32	0,06	1,59				
4	4.V 1960	0,8082	0,0456	0,0424	0,0104	0,0010	1,3219	0,0700	0,0372		0,2310	0,1473	2,7150	7,3
		35,14	1,17	2,12	0,86	0,06	37,28	1,46	0,61	—				
		89,31	2,97	5,39	2,18	0,15	94,74	3,71	1,55					
5	8.IX 1962	0,7928	0,0486	0,0628	0,0022	0,0002	1,2643	0,1312	0,0061	0,0168	0,2171	0,1290	2,6711	8,2
		34,47	1,25	3,14	0,18	0,01	35,66	2,73	0,10	0,56				
		88,27	3,20	8,04	0,46	0,03	91,32	6,99	0,26	1,43				
6	1.VIII 1962	0,8319	0,0417	0,0772	0,0047	0,0003	1,3400	0,1473	0,0092	0,0144	0,2106	0,1490	2,8263	8,2
		36,17	1,07	3,86	0,39	0,01	37,80	3,07	0,15	0,48				
		87,16	2,58	9,30	0,94	0,02	91,09	7,40	0,36	1,15				
7	2.XI 1960	1,0164	0,0809	0,0424	0,0047	0,0004	1,6400	0,0802	0,005	0,0228	0,3303	0,1538	3,3771	8,1
		44,18	2,07	2,12	0,39	0,02	46,26	1,67	0,09	0,76				
		90,57	4,24	4,35	0,80	0,04	94,84	3,42	0,18	1,56				
8	6.X 1960	0,9322	0,0513	0,0522	0,0035	0,0004	1,4800	0,1129	0,0049	0,0168	0,2795	0,1468	3,0805	8,2
		40,53	1,31	2,61	0,29	0,02	41,77	2,35	0,08	0,56				
		90,55	2,93	5,83	0,65	0,04	93,32	5,25	0,18	1,25				
9	17.IX 1962	1,0035	0,0885	0,0558	0,0032		1,6554	0,0814	0,0104	0,0120	0,2730	0,1648	3,3480	8,0
		43,63	2,27	2,79	0,27	—	46,69	1,70	0,17	0,40				
		89,11	4,64	5,70	0,55		95,36	3,47	0,35	0,82				
10	20.XII 1960	0,9324	0,064	0,0522	0,005	0,0002	1,4947	0,1041	0,0024	0,0216	0,3048	0,1524	3,1323	
		40,54	1,64	2,61	0,29	0,01	42,16	2,17	0,04	0,72				
		89,91	3,64	5,79	0,64	0,02	93,5	4,81	0,09	1,16				

11	28.IV 1961	0,9718 42,25 92,88	0,0434 1,11 2,42	0,0444 2,22 4,84	0,0024 0,20 0,44	0,0002 0,01 0,02	1,5362 43,33 94,63	0,0813 1,69 3,69	0,0030 0,05 0,11	0,0216 0,72 1,57	0,2360	0,1462	3,0865	8,2
12	28.IX 1960	1,0007 43,51 87,67	0,0957 2,45 4,94	0,0654 3,27 6,59	0,0046 0,39 0,78	0,0002 0,01 0,02	1,6746 47,24 95,19	0,0794 1,65 3,32	0,0024 0,04 0,08	0,0210 0,70 1,41	0,3556	0,1710	3,4706	8,1
13	26.VI 1961	0,9508 41,34 89,51	0,0833 2,14 4,63	0,0502 2,51 5,43	0,0023 0,19 0,41	0,0002 0,01 0,02	1,5570 43,92 95,09	0,0778 1,62 3,51	0,0055 0,09 0,19	0,0168 0,56 1,24	0,2880	0,1615	3,1934	8,1
14	15.III 1961	0,9862 42,88 88,43	0,1047 2,68 5,53	0,0522 2,61 5,38	0,0035 0,29 0,60	0,0006 0,03 0,06	1,6332 46,06 95,00	0,0782 1,63 3,36	0,0037 0,06 0,12	0,0222 0,74 1,52	0,3939	0,1699	3,4483	8,2
15	9.I 1961	0,9448 41,08 91,49	0,0507 1,30 2,89	0,0444 2,22 4,94	0,0035 0,29 0,64	0,0004 0,02 0,04	1,5086 42,55 94,75	0,0789 1,64 3,65	0,0073 0,12 0,27	0,0180 0,60 1,33	0,2899	0,1728	3,1193	8,2
16	22.IV 1961	1,0069 43,78 88,68	0,1012 2,59 5,25	0,0540 2,70 5,47	0,0035 0,29 0,58	0,0002 0,01 0,02	1,6746 47,24 95,70	0,0829 1,73 3,50	0,0049 0,08 0,16	0,0096 0,32 0,64	0,3445	0,1697	3,4520	8,0
17	8.XII 1962	0,9911 43,09 88,82	0,0920 2,36 4,86	0,0552 2,76 5,70	0,0035 0,29 0,60	0,0002 0,01 0,02	1,6331 46,07 94,97	0,0802 1,67 3,45	0,0030 0,05 0,10	0,0216 0,72 1,48	0,3250	0,1824	3,3873	8,2
18	14.III 1962	1,0053 43,71 89,65	0,0799 2,05 4,20	0,0540 2,70 5,54	0,0035 0,29 0,59	0,0002 0,01 0,02	1,6400 46,26 94,88	0,0802 1,67 3,42	0,0055 0,09 0,18	0,0222 0,74 1,52	0,3296	0,1835	3,4039	8,2
19	9.VIII. 1961	0,9547 41,51 90,83	0,689 1,77 3,87	0,0444 2,22 4,86	0,0024 0,20 0,44	Следы	1,5362 43,33 94,82	0,0774 1,61 3,52	0,0012 0,02 0,04	0,0222 0,74 1,62	0,3113	0,1691	3,1878	8,2
20	4.IV 1962	0,9678 42,08 89,00	0,0888 2,28 4,82	0,0540 2,70 5,70	0,0024 0,20 0,42	0,0006 0,03 0,06	1,5935 44,95 95,06	0,0806 1,68 3,55	0,0293 0,48 1,01	0,0054 0,18 0,38	0,3224	0,1709	3,3157	8,1
21	1.II 1963	0,9621 41,83 80,21	0,0964 2,47 5,27	0,0473 2,36 5,03	0,0022 0,18 0,38	0,0010 0,09 0,11	1,5814 44,60 95,12	0,0823 1,71 3,65	0,0183 0,30 0,64	0,0084 0,28 0,59	0,3463	0,1512	3,2969	8,0

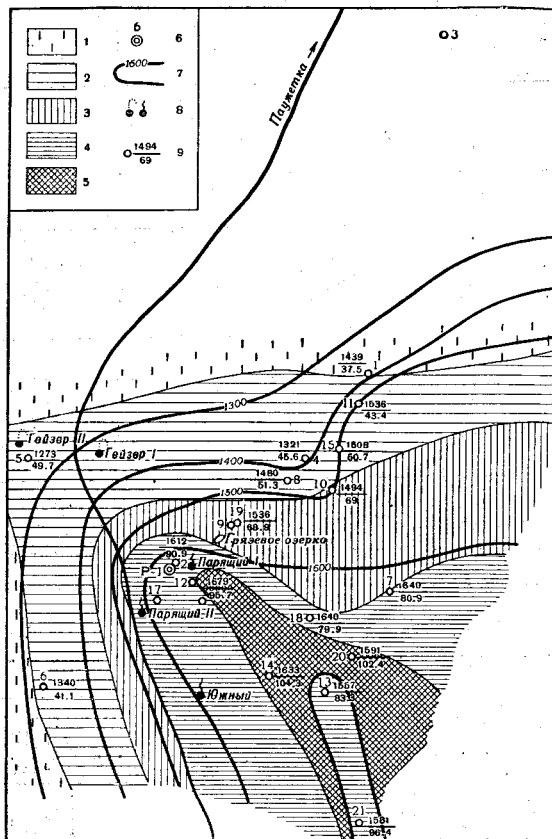


Рис. 19. Схема изменения концентрации хлора и калия в термальных водах

1 — распространение термальных вод с содержанием калия; 2 — более 100 мг/л; 3 — 80—100 мг/л; 4 — 60—80 мг/л; 5 — менее 60 мг/л; 6 — роторная скважина; 7 — изолинии концентрации хлора (в мг/л); 8 — источники и гейзеры; 9 — скважины, цифры справа — номера скважин; в числителе — концентрация хлора (в мг/л), в знаменателе — концентрация калия (в мг/л)

Уменьшение температуры термальных вод с одновременным уменьшением концентрации компонентов химического состава и общей минерализации, согласующееся с общим движением потока, свидетельствует о том, что причиной этих изменений может явиться смешение минерализованных термальных вод с охлажденными пресными или слабominерализованными водами. Это подтверждает и анализ зависимости концентрации характерных компонентов химического состава термальных вод от их температуры (рис. 20).

Рассмотрим отношения концентраций Cl/Na ; Cl/K ; Na/K (см. табл. 13); (рис. 21).

Отношение Cl/Na практически не изменяется на разведываемой площади, несмотря на изменение концентрации хлора, натрия и температуры термальных вод. Напротив, соотношения Cl/K и Na/K изменяются в значительных пределах. Причем наименьшие значения $Cl/K = 15,6 - 20,6$ и $Na/K = 9,4 - 12,6$ зафиксированы на юго-восточном участке, откуда термальные воды, согласно положению пьезоизогипс, направляются к долине Паужетки, и в зоне интенсивной разгрузки термальных вод. Здесь, как известно, были отмечены максимальные температуры в скважинах.

рация их равномерно убывает, за исключением иона K^+ и кремнекислоты, уменьшение содержания которых происходит более интенсивно. Максимальные концентрации компонентов химического состава, таким образом, отмечаются в пределах потока наиболее нагретых вод и уменьшаются по направлению потока к долине Паужетки.

Изменение по площади характерных ионов Cl^- и K^+ показано на схеме (рис. 19). По поведению хлора можно представить себе также изменение минерализации, поскольку последние пропорциональна концентрации хлора. Изолинии концентрации хлор-иона и зоны равных содержаний калия почти повторяют геоизотермы на абсолютных отметках — 100 м и 200 м, характеризующие температуры водовмещающих пород. Зона термальных вод с максимальным содержанием калия точно совпадает с потоком наиболее нагретых термальных вод (рис. 15), за пределами которого концентрация калия в водах резко и значительно уменьшается.

Таблица 12

**Концентрация характерных компонентов химического состава
термальных вод в пластовых условиях**

№ скв.	Концентрация, г/л					
	Na+	K+	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻⁻	H ₂ SiO ₃	HBO ₂
2	0,8400	0,0778	1,3800	0,0650	0,2175	0,1299
4	0,7160	0,0404	1,1710	0,0620	0,2050	0,1306
5	0,7570	0,0464	1,2090	0,1250	0,2074	0,1232
7	0,8620	0,0686	1,3900	0,0681	0,2803	0,1301
10	0,8190	0,0562	1,3130	0,0914	0,2780	0,1340
14	0,8190	0,0870	1,3570	0,0650	0,3270	0,1400
16	0,8500	0,0855	1,4150	0,0700	0,2910	0,1435
20	0,7976	0,0732	1,3120	0,0654	0,2660	0,1408

Примечание. Расчеты по данным теплосодержания с учетом пароуделения на поверхности.

На остальной площади значения этих отношений изменяются соответственно от 22,3 до 38,3 и от 13,8 до 24,0.

Таким образом, колебания концентрации хлора и натрия, с одной стороны, калия — с другой, изменяются в различной степени при изменении

Таблица 13

Отношения концентраций характерных компонентов в Паужетских термальных водах

№ скв.	Температура в пределах водоносного комплекса	Общая минерализация, г/л	Cl/Na	Cl/K	Na/K	Cl/SO ₄	H ₂ SiO ₃ (г/л)
Высокотемпературная, юго-восточная зона							
2*	147—186	3,2452	1,64	17,7	10,8	21,1	0,2541
7	177—193	3,3771	1,62	20,0	12,6	20,4	0,3303
12	171—192	3,4706	1,61	17,5	10,5	21,1	0,3556
13*	174—199	3,1934	1,64	18,7	11,4	20,0	0,2880
14	172—195	3,4488	1,65	15,6	9,4	20,9	0,3939
16	168—190	3,4520	1,66	16,6	10,0	20,2	0,3445
17*	158—192	3,3873	1,65	17,8	10,8	20,4	0,3250
18*	175—196	3,4039	1,63	20,6	12,6	20,4	0,3296
20*	176—197	3,3157	1,65	18,0	10,9	19,8	0,3224
21*	176—188	3,2969	1,65	16,4	9,8	19,2	0,3463

Относительно низкотемпературная, северная зона

1	—	2,9126	1,60	38,3	24,0	18,4	0,2314
4	167—169	2,7150	1,63	29,0	18,8	17,8	0,2310
5	131—139	2,6711	1,60	26,1	16,4	9,6	0,2171
6	128—154	2,8263	1,61	32,2	20,0	9,1	0,2106
8	168—176	3,0805	1,59	28,9	18,2	13,1	0,2795
10	152—179	3,1323	1,60	23,4	14,6	14,4	0,3048
11	141—164	3,0865	1,59	35,4	22,4	18,9	0,2360
15	122—172	3,1193	1,59	29,8	18,7	19,1	0,2899
19*	167	3,1878	1,61	22,3	13,8	18,8	0,3113

* Сквжины с пульсирующим режимом извержения пароводяной смеси.

температуры. Различная концентрация хлора в термальной воде в зависимости от ее температуры показывает, насколько высокотермальные воды, двигаясь к зоне разгрузки, изменили свой первоначальный состав за счет смешения с холодными менее минерализованными водами, так как хлор

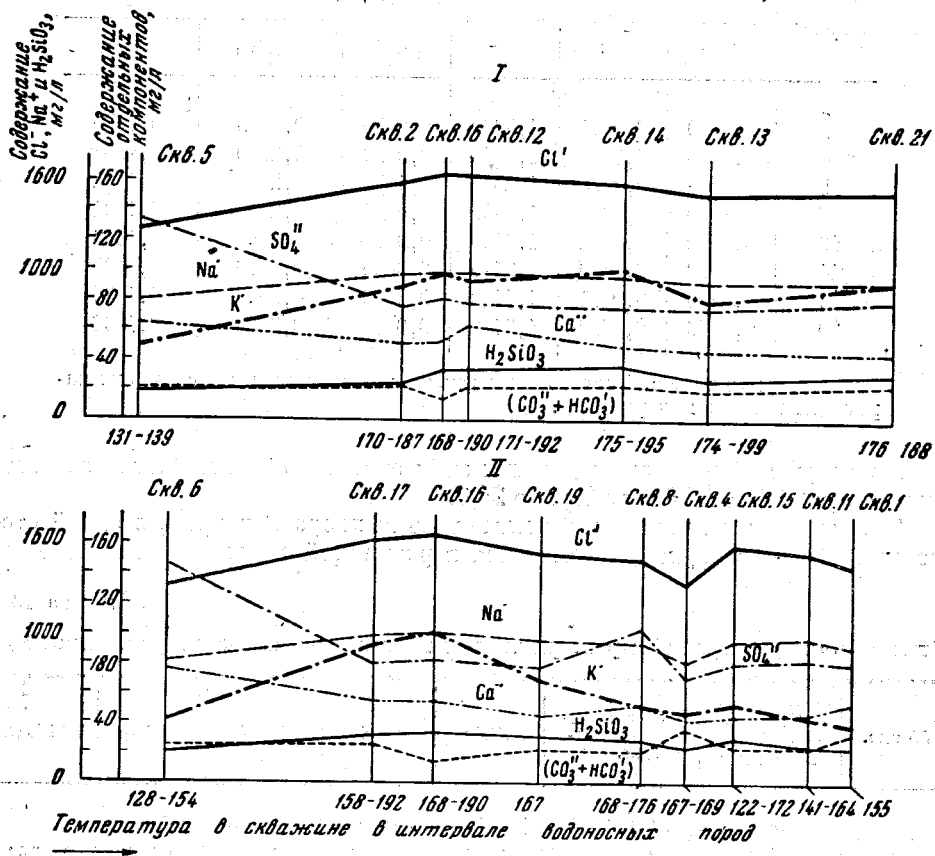


Рис. 20. Изменение концентрации характерных компонентов химического состава термальных вод. Профили I, II

не уходит из раствора при взаимодействии с окружающей породой. Постоянство отношения Cl/Na в водах указывает на то, что и концентрация натрия в данных условиях не изменяется при взаимодействии с породами. Следовательно, хлор и натрий — показатели целостности сформировавшегося потока термальных вод.

Изменение концентрации калия в пределах разведываемого участка происходит не только за счет смешения термальных вод с холодными водами, но главным образом при взаимодействии первых с водовмещающими породами, причем это взаимоотношение в значительной мере зависит от температуры.

Следовательно, катионы натрия и калия при высокой температуре воды в различной степени выщелачиваются из породы и выпадают из раствора при уменьшении температуры. Натрий, вероятно, остается в растворе в данных геотермических и гидрогеологических условиях во все стадии процесса формирования химического состава термальных вод, в том числе и при процессе длительного взаимодействия их с породами. Калий по мере уменьшения температуры выпадает из раствора, возможно, при образовании адюляра, развитие которого отмечается в низкотемпературной зоне

роторной скважины. Здесь же, по данным С. И. Набоко и Б. И. Пийпа (1961), отмечается обогащение породы калием.

О различном поведении Na и K в гидротермальном растворе при взаимодействии с породами указывается в работе С. И. Набоко (1959). В опубликованных статьях, рассматривающих результаты экспериментальных работ по изучению взаимодействия гидротермальных растворов с породами (С. И. Набоко, В. Г. Сильниченко, 1960; В. Г. Сильниченко, 1961), приводятся данные об изменении Na/K с ростом pH при температуре 100°С.

Там же имеется указание на увеличение N/K при уменьшении температуры в растворе хлоридов щелочей в процессе ионообменной реакции между синтетическими калиевыми и натриевыми полевыми шпатами.

Очевидно, что поведение натрия и калия в гидротермальных растворах вообще и в высокотермальных подземных водах различно. На Паужетском месторождении это различие выражается в уменьшении концентрации калия в зависимости от температуры по сравнению с натрием.

Остается непонятной связь концентрации калия с температурой термальной воды. Отражает ли это лишь возможное изменение pH воды с изменением температуры? Или же в процессе взаимодействия воды и породы, приводящего к выпадению калия, температура есть своего рода катализатор, оказывающий сильное влияние на ход процесса? Не ясен также вопрос о том, каким образом связывается калий породами при уменьшении температуры.

Изменение концентрации кремнекислоты в термальной воде на площади месторождения в зависимости от температуры происходит в целом аналогично изменению содержания калия. В водах юго-восточной части месторождения зафиксированы максимальные концентрации кремнекислоты до 0,393 г/л (скв. 14). На северном участке месторождения содержание H_2SiO_3 составило 0,210—0,3 г/л. Небольшие отклонения от указанной зависимости в пробах, взятых из скв. 2, 13, 17, связаны, вероятно, с пульсирующим режимом их работы, когда в разные стадии извержения пароводяной смеси происходит некоторое изменение концентрации всех компонентов.

Охлаждение и разбавление минерализованных термальных вод скорее всего осуществляется холодными пресными водами, заключенными тоже в толще псефитовых туфов и формирующимися в районе хр. Камбального вне очага нагрева. Наиболее благоприятные условия для смешения вод создаются в зоне разгрузки, куда направляются воды со значительной площади данной гидрогеологической структуры, в которую может входить и участок формирования высокотермальных вод.

Интересно то, что на графике зависимости содержания основных компонентов от минерализации, концентрации хлора и натрия в пробах скв. 14, 8, 5 и 3 ложатся на одну прямую, т. е. удовлетворяют уравнению смешения вод А. Н. Огильви: $y = ax + b$, причем состав воды скв. 14 соответствует химическому составу исходной минерализованной составляющей. Минерализация и химический состав пресных вод, видимо, подобен составу вод

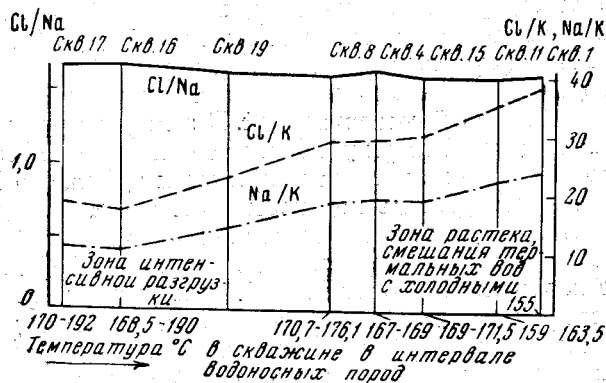


Рис. 21. Изменение отношения Cl/Na, Cl/K и Na/K в зависимости от температуры термальных вод

многочисленных холодных источников, выходящих из псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты в районе хр. Камбального, вне зоны нагрева:

$$M_{0,09} = \frac{HCO_{47}^3 SO_{28}^4 Cl_5}{Ca_{53} Na_{36} Mg_{11}}$$

В то же время при анализе этого графика и отношения Cl/SO_4 по всем скважинам видно, что при уменьшении минерализации воды и температуры в некоторых скважинах (скв. 8, 10 и особенно в скв. 5 и 6) увеличивается содержание сульфатов, максимальная концентрация которых наблюдается в водах третичных отложений (скв. Р-1).

Можно предполагать поэтому, что изменение химического состава происходит под влиянием внедрения вод из третичных отложений и уже названной пресной составляющей. В зоне разгрузки на движение вод третичных отложений вверх указывает соотношение пьезометров этого горизонта и водоносного комплекса псефитовых туфов. По В. В. Аверьеву (1961), статический уровень вод третичных отложений значительно превышает статический уровень вод толщи псефитовых туфов.

В работе Б. И. Шийца, В. В. Иванова и В. В. Аверьева (1961) изменение химического состава вод паужетской свиты объясняется подтягиванием вод третичных отложений в зоне создания депрессионной воронки за счет откачки из скважин, заложенных в толщу псефитовых туфов. Выше указывалось, что в период опытно-эксплуатационных выпусков было отмечено уменьшение содержания хлора и рост сульфатов в скв. 4 и 11.

Химический состав паровой фазы

Знание концентрации и состава газа в паре в данном случае представляет двойной интерес. С одной стороны, это имеет большое значение при использовании пара в энергетических установках (вопросы коррозии материалов), а с другой стороны, состав газа важно знать для правильной оценки генезиса термальных вод, условий их формирования, так как состав газа в паре отражает содержание газа в воде, в пластовых условиях.

Для первой цели вполне удовлетворяет определение в паре основных газовых компонентов в весовых концентрациях с помощью поглотителей. Таким путем в химической лаборатории геотермальной экспедиции анализировались CO_2 , H_2S и NH_3 .

Изучение газового состава с общей геологической точки зрения требует знания соотношений газовых компонентов между собой и общей газонасыщенности воды. На Паужетском месторождении состав газов изучается газовым отрядом ГЕОХИ под руководством К. П. Флоренского.

В пределах месторождения был определен состав газов Гейзера I и источника Южного, которые, как уже выше говорилось, представляли собой выходы газопаровых струй. В том и другом случаях в составе пара превалирует углекислота, содержание азота незначительное.

По некоторым скважинам мы располагаем предварительными данными по содержанию CO_2 к объему газа и общему объему газа в паре, полученными при отборе пробы прибором К. П. Флоренского. Результаты частичного анализа проб на содержание CO_2 , произведенного Л. Д. Кузнецовой, приведены в табл. 14.

Как видно из приведенных данных, общая газонасыщенность пара не велика и колеблется от 0,0051 до 0,0178% к объему пара при температуре 99° С. Для Паужетских пароводяных источников, по К. П. Флоренскому, содержание газа к объему пара составляет 0,0015—0,0039%.

Среднее содержание газа в паре из скважин новозеландского месторождения Вайракей, по данным Wilson (1955), составляет 0,066% по отношению к пару, отделенному при атмосферном давлении. В составе газа также превалирует углекислый газ и сероводород. В качестве примера при-

Таблица 14

Содержание газовых компонентов на 1 л конденсата пара в 1961 г.

№ скв.	Дата отбора пробы	В мг/л конденсата		В % по объему		Объем газа на 1 л конденсата	Объем газа на 1 л воды в пластовых условиях
		CO ₂ + H ₂	CH ₄	CO ₂ + H ₂	CH ₄		
7	22.IX 1961	278,6	Нет данных	83,06	Нет данных	170,3	25,6
11	4.IX 1961	417,1	« »	70,82	« »	303,0	32,6
13	29.IX 1961	141,9	« »	81,7	6,02	88,2	12,75
14	29.VIII 1961	475,0	« »	81,63	Нет данных	307,0	52
19	10.VIII 1961	128,0	« »	72,64	« »	88,1	5,6

Примечание. Газ отобран прибором К. П. Флоренского, установленным на переносном сепараторе.

ведем состав газа из скв. 4/1 в процентах к объему газа: CO₂ — 82,73; H₂S — 8,36; H₂ — 2,37; CH₄ — 0,44; C₂H₅ — 0,39; N₂ — 0,65; NH₃ — 5,36; H₂O₂ — 0,03.

Основываясь на определении концентрации газа в паре, мы рассчитали газонасыщенность воды в пластовых условиях. Содержание газа колеблется от 5,6 до 52 мг/л.

Весовые концентрации CO₂, H₂S и NH₃ в паре определены по всем разведочным скважинам и приведены в табл. 15. Результаты анализа газа в паре, отобранном из скважин двумя различными способами, показывают, что в составе газа также преобладает углекислый газ. Причем результаты

Таблица 15

Концентрации CO₂, H₂S и NH₃ в паре и воде в пластовых условиях

№ скв.	Дата отбора пробы	Содержание газа в мг/л конденсата			Содержание газа в мг/л воды в пластовых условиях		
		CO ₂	H ₂ S	NH ₃	CO ₂	H ₂ S	NH ₃
1	31.I 1962	248,7	5,4	15,4	18,4	0,40	1,1
2	31.I 1962	122,0	5,0	8,1	17,6	0,7	1,2
4	5.IV 1960	82,0	11,0	6,3	9,3	1,2	0,7
5	8.IX 1962	272,5	7,0	10,8	12,1	0,31	0,78
6	1.VIII 1962	212,5	3,9	10,8	16,6	0,30	0,84
7	3.I 1961	326,0	24,0	25,0	49,0	3,61	3,76
8	4.X 1960	171,0	12,0	12,0	19,1	1,34	1,34
10	14.X 1961	232,1	6,6	—	28,0	0,80	—
11	4.IX 1961	379,0	6,5	10,4	40,8	0,70	1,12
12	9.X 1960	252,0	12,0	6,6	36,6	1,70	0,90
13	5.V 1961	187,5	25,5	8,2	27,1	3,68	1,20
14	29.VIII 1961	464,8	35,0	9,8	78,4	5,90	1,70
15	9.I 1962	284,0	7,4	11,5	36,6	0,95	1,48
16	25.VII 1962	260,8	41,0	7,7	40,5	1,70	1,19
17	8.II 1962	383,0	18,3	8,8	58,2	2,78	1,34
18	14.III 1962	190,0	11,0	9,9	23,6	1,36	1,23
19	9.VIII 1961	91,8	7,2	10,6	5,85	0,46	0,67
20	4.V 1962	253,6	13,1	9,0	44,6	2,31	1,38
21	1.II 1963	820,8	59,7	10,9	—	—	—
P-1	25.IX 1961	331,8	9,4	6,9	22,30	0,63	0,46

анализа по CO_2 в весовых концентрациях, определенные этим методом, и $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ в мг/л конденсата в пробах, взятых прибором К. П. Флоренского, при незначительном содержании H_2S оказались приблизительно одинаковы, что говорит об одинаковых концентрациях этих газов, выраженных в процентах по объему. Поэтому изменение концентрации газов на разведанной площади можно проследить по содержанию основных газовых компонентов, определенных методом поглощения в пробах из всех разведочных скважин.

Пересчет содержания газа в паре на концентрацию в воде производился по паросодержанию в пароводяной смеси на устье скважины при известном теплосодержании и условии отбора пробы при атмосферном давлении.

Концентрация углекислоты довольно сильно изменяется в различных скважинах, что можно объяснить в ряде случаев несовершенством отбора пробы¹. Например, в скв. 1, 4, 5, 12, 16 пробы газа отбирались в невыгодных режимах работы скважин в небольшом объеме поглотителя, что, как указывалось выше, явилось причиной колебания концентрации углекислоты. Вполне возможно, что в скважинах с пульсирующим режимом (скв. 2, 13, 17, 18, 19) полученные величины концентрации газа отличаются от истинных, так как отбор проб производился в разные стадии извержения.

Тем не менее имеется определенная закономерность в изменении концентрации CO_2 и H_2S на изученном участке месторождения. Максимальные концентрации CO_2 и H_2S в воде отмечены в скважинах с высокой температурой. Обращает на себя внимание высокая концентрация газа, особенно CO_2 до 800 мг/л в расчете на 1 л конденсата в пробе, взятой из скв. 21, после месячного выпуска пароводяной смеси. При повторном опробовании, спустя месяц, концентрация CO_2 уменьшилась более чем в 2 раза. Такое резкое увеличение вначале в составе пара газа, по нашему мнению, возможно только при вскрытии скважиной «ловушек», в которых вместе с паром собирался газ, растворенный в термальной воде, т. е. происходила дегазация воды не в скважине, а в стороне от нее, так как дегазация воды, которая поступает в скважину, судя по ее обычному химическому составу, не могла дать такого количества CO_2 . Это подтверждается последующим уменьшением содержания CO_2 , что связано со сработкой накоплений пара и газа. Вода из этой скважины была менее минерализованной, чем в скв. 14 и 20, расположенных на этом же участке, видимо, за счет примешивания конденсата пара.

Небезынтересно отметить, что состав и концентрация газов в паре роторной скважины (интервал 300—800 м) принципиально не отличается от газового состава термальных вод псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты. В составе пара, проба которого была взята 25.IX 1961, было определено в расчете на 1 л конденсата CO_2 — 331,8 мг, H_2S — 9,4 мг и NH_3 — 6,9 мг или в пересчете на 1 л воды в пластовых условиях соответственно 22,2 мг, 0,46 мг.

Это, как и однотипный химический состав термальных вод третичных отложений и псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты, служит указанием общности условий их формирования.

Активная реакция воды рН

В поверхностных условиях хлоридно-натриевые воды Паужетских термальных источников и воды, вскрытые буровыми скважинами, характеризуются щелочной реакцией (рН = 8,0—8,2).

¹ По техническим причинам пока не удалось использовать для взятия проб глубокий пробоотборник, применение которого, возможно, устранит ошибки в анализе, возникающие при отборе проб в малом циклонном сепараторе.

В пластовых условиях до пароотделения, при котором вода дегазируется, активная реакция должна быть иной, так как в воде в растворенном состоянии находится углекислота и сероводород. Известно, что pH природных вод зависит главным образом от соотношения различных форм углекислоты, содержащейся в них.

Химические анализы показали, что в воде при температуре 99° С содержатся гидрокарбонаты и карбонаты, причем последние преобладают. До начала пароотделения в воде при наличии свободной CO_2 должны находиться лишь гидрокарбонаты, которые в процессе парообразования и выделения свободной CO_2 в паровую фазу превращаются в карбонаты.

Присутствие гидрокарбонатов в воде, возможно, связано с захватом углекислоты воздуха при отборе пробы и уменьшении температуры воды или неполной дегазации воды в скважинах в процессе парообразования. В пароводяных источниках дегазация воды при атмосферном давлении происходит, видимо, полностью, и HCO_3^- -ион практически отсутствует.

Если принять содержание углекислоты в воде в пластовых условиях в виде свободной CO_2 и HCO_3^- , то полученным концентрациям будет соответствовать $\text{pH} = 6,2-6,5$.

Экспериментальные данные В. В. Аверьева (1961) по определению pH воды Паужетских источников в условиях насыщения углекислотой при нормальной температуре показали, что pH равно 5,5 при концентрации CO_2 70 мг/л и 7,0 при 25 мг/л.

Активная реакция термальных вод, видимо, изменяется по площади. Термальные, наиболее высокотемпературные воды, распространенные юго-восточнее разведанного участка Паужетского месторождения, вероятно, характеризуются слабокислой реакцией и по мере передвижения к зоне разгрузки с одновременной потерей углекислоты и сероводорода, отделяющихся вместе с паром, становятся нейтральными, а на северном участке (скв. 1, 11), возможно, слабощелочными. К сожалению, указанные выше pH получены экспериментальным путем или расчетом; действительные значения pH воды в пластовых условиях на площади пока не известны.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ ПОРОД И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ

Гидротермальный метаморфизм и минералообразование в районе разгрузки гидротерм на Паужетском месторождении развиваются по всей толще четвертичных и третичных пород, вскрытых скважинами до глубины 800 м.

В зависимости от глубины, температуры, фильтрационных свойств пород и тектонической нарушенности их, а также исходного литологического состава одновременно происходит развитие различных минералов и изменение пород.

На первом этапе изучения месторождения по образцам одной роторной скважины С. И. Набоко и Б. И. Пийпом (1960) были выделены зоны вторичного минералообразования: каолинизации, цеолитизации, фельдшпацизации и пропилитизации, а при дополнительном просмотре керна высокотемпературной скв. 13 еще зона окварцевания с адуляризацией (С. И. Набоко, 1963). В результате разведки месторождения появилась возможность более детально изучить вторичное минералообразование и проследить границы его распространения в пределах всего очага разгрузки гидротерм.

Состав исходных пород

Среди пород, подвергшихся современному гидротермальному метаморфизму, выделяются следующие главные типы.

1. Пепловые туфы дацита: плотные, неслоистые с редкими обломками андезито-базальта.
2. Алевросаммитовые и алевропелитовые туфы дацита, массивные.
3. Пемзовые агломератовые туфы.
4. Агломератовые витрокристаллокластические туфы дацита с обломками андезито-базальта, пористые.
5. Спекшиеся витрокристаллокластические туфы дацита с редкими обломками андезито-базальта, плотные, лавоподобные.
6. Туфобрекчии андезито-базальта.
7. Туфопесчаники с прослоями гравелитов (третичные).

Пепловые туфы имеют типичную для них структуру и состоят из черешкообразных обломков прозрачного бесцветного стекла плагиоклаза, авгита, кварца и более крупных обломков тех же минералов, лавы и пемзы.

Основная масса агломератового литокристаллокластического туфа дацита состоит из обломков минералов лавы и туфа, спемментированных светлой массой с более мелкими обломками тех же минералов. Из минералов преобладают плагиоклаз и пироксен; кварц, роговая обманка и магнетит находятся в резко подчиненном количестве. Обломки пород представлены андезито-дацитом, дацитом, туфом дацита и дацитовой пемзой. Плагиоклаз в обломках имеет таблитчатую форму, иногда с корродированными краями. По составу он отвечает андезиту, реже встречаются олигоклаз и лабрадор. Пироксен представлен моноклинной разновидностью. Он бесцветный, $CNg = 30-32^\circ$, редко наблюдаются двойники. Форма об-

ломков неправильная. Кварц довольно редок, он встречается в виде прозрачных зерен с корродированными краями. Волнистое угасание, как правило, отсутствует. Роговая обманка представлена буровато-зеленой разностью с отчетливым плеохроизмом. Магнетит и ильменит встречаются в виде мелких неправильных образований. Из обломков пород наиболее распространены обломки лав дацитового и реже андезито-дацитового состава. Дацит имеет гиалопилитовую или пилотакситовую структуру основной массы. В качестве вкрапленников присутствует плагиоклаз, реже моноклиновый пироксен. Основная масса представлена прозрачным кислым стеклом с микролитами плагиоклаза и редкими зернами пироксена и рудного минерала.

Андезито-дацит отличается более основным характером плагиоклаза. Среди обломков встречены также туфы дацита, пемза, андезитовое стекло. Иногда присутствуют крупные обломки андезита, андезито-базальта и базальта. Цементирующая масса туфов представлена бесцветной или слабо буроватой изотропной массой с обломочками тех же минералов, а также депловых частиц, количество которых уменьшается с глубиной. Описанные агломератовые туфы наиболее интенсивно изменены, что обусловлено хорошей проницаемостью пород и соответственно водонасыщенностью. Вторичные минералы образуются в основном по цементу туфа и реже по обломкам.

Туфобрекчия андезито-базальта представляет собой плотную массивную породу, состоящую из обломков андезита и андезито-базальта различных размеров от 1—2 до нескольких сантиметров в поперечнике. Цвет их красный, бурый, серый и черный. Обломки имеют угловатые, а также округлые очертания, пространство между ними заполнено цементом с обломками лавы и минералов размером от алевритовых до песчаных частиц.

Под микроскопом видно, что основная цементирующая масса породы состоит из обломков андезита, андезито-базальта, базальта, андезито-дацита, плагиоклаза и пироксена. Крупные обломки, неравномерно насыщающие брекчию, имеют тот же состав, что и более мелкие, рассеянные в цементе. Количественные отношения обломков лавы и минералов сильно колеблются. Обломки андезита преобладают над обломками базальта. Основная масса их имеет гиалопилитовую структуру со светло-желтым стеклом. Вкрапленниками являются плагиоклаз-лабрадор, моноклиновый пироксен и зеленовато-бурый биотит, по краям опацифицированный.

Базальт обломков имеет бурую и черную непросвечивающую стекловатую основную массу гиалопилитовой структуры с вкрапленниками плагиоклаза и моноклинового пироксена. Встречаются базальты, имеющие также и интерсертальную структуру основной массы. Здесь же попадаются обломки черного пузыристого стекла, пустоты которого заполнены хлоритом и карбонатом.

Иногда в брекчиях встречаются обломки дацита: стекловатая основная масса его светлоокрашенная или бесцветная, вкрапленники — плагиоклаз (олигоклаз-андезин), моноклиновый пироксен и кварц. Очень редки обломки пемзы.

Среди обломков минералов преобладает плагиоклаз. Состав его колеблется, чаще он отвечает андезину, реже олигоклазу и лабрадору.

Пироксен в обломках как моноклиновый (авгит), так и ромбический (гиперстен); первый значительно преобладает и развит в более крупных зернах. Кварц уступает по количеству другим минералам; он чистый, идиоморфный. Связывающая масса представлена бесцветным и слабобурым изотропным материалом; количество ее очень незначительное.

Туфобрекчия плотно сцементирована и разрыв ее при ударе часто осуществляется по обломкам. Несмотря на большую плотность и массивность описанных пород и малую их водообильность, вторичное минералообразо-

вание весьма интенсивно и обусловлено, вероятно, благоприятным химическим составом породы.

Плотные спекшиеся витрокристаллокластические туфы дацита имеют светло-серый цвет и массивную плотную текстуру. Микроскопически хорошо устанавливается их ширококластическая природа. Порода очень сходна с игинимбритами, но в ней не проявлены фьяме. Она сложена в основном обломками кристаллов плагиоклаза, кварца, роговой обманки, авгита и пемзы. Среди них редко встречаются обломки андезито-базальта, четко выступающие на светлом фоне породы. Все сцементировано стекловатым материалом.

Под микроскопом порода состоит из обломков лавы и минералов, сцементированных бесцветным стеклом. Размеры обломков варьируют от 0,08 до 2—3 мм — для минералов и до 12 мм — для лав. Форма их различна: встречаются как идиоморфные кристаллы, так остроугольные и оплавленные. Плагиоклаз обломков воднопрозрачен, сдвойникован, таблитчатой формы, часто оплавлен или корродирован стекловатым цементом. Редко проявляются пустоты выщелачивания с образованием дырчатых структур. Преобладает андезин № 37—43; реже лабрадор № 63—65 и олигоклаз № 30—32. [Определения угла угасания в зоне \perp (010)]. Составляет 60—70% от общей массы всех обломков.

Кварц встречается в виде зерен, часто оплавленных, корродированных. Он чистый, прозрачный, без волнистого угасания. В нем иногда содержатся пузырьки и мелкие включения стекла, количество его достигает 15%.

Роговая обманка обладает плеохроизмом от зеленовато-желтого по Ng до коричневатого-желтого по Np ; $\angle CNg = 19^\circ$; $Ng - Np = 0,018$. Количество ее не превышает 7%. Моноклинный пироксен по содержанию не уступает роговой обманке.

Рудные минералы представлены магнетитом и ильменитом.

Среди обломков пород встречен базальт с гиалопилитовой и пойкилоофитовой структурой основной массы. Большим распространением пользуются обломки пемзы, андезита и дацита с витрофировой и микролитовой структурой основной массы с вкрапленниками плагиоклаза, роговой обманки и пироксена.

Цементом туфа является бесцветное стекло с мелкими остроугольными обломками кварца и реже плагиоклаза. Во многих участках стекло раскристаллизовано до микросферолитовой массы. Обломки лавы и минералов оплавлены, разведены стеклом, часто имеют нечеткие «размытые» очертания.

В спекшихся туфах дацита встречаются обломки андезита и андезито-базальта, количество которых к низам толщи увеличивается и породы переходят в туфобрекчии андезито-базальта, которые В. В. Аверьев и В. И. Белоусов объединяют с первыми в единую толщу. Основанием для этого служат данные наблюдений их в естественных обнажениях, где спекшиеся туфы дацита постепенно насыщаются обломками андезита и андезито-базальта, и низы толщи спекшихся туфов уже представлены туфобрекчией андезито-базальта. По данным химических анализов, цементирующий материал туфобрекчии андезито-базальта и спекшиеся туфы дацита имеют близкий состав.

Полимиктовые туфопесчаники имеют слабо проявленную слоистость и меняющийся гранулометрический состав — от алевро-пелитового до псаммитового. Сложены туфопесчаники обломками лав, преимущественно андезито-базальтового состава, и минералов — плагиоклаза и пироксена, различной степени окатанности. Обломки сцементированы гидрхимически. Цемент окрашен в светло-зеленый цвет и содержит мелкие обломочки тех же фрагментов. Под микроскопом определяются окатанные обломки плагиоклаза (лабрадора), моноклинного пироксена, андезито-базальта с витрофировой и андезитовой структурой массы.

Таблица 16

Состав свежих пород, развитых в районе Паужетского месторождения

Компоненты	1	2	3	4
SiO ₂	50,73	58,90	68,50	66,56
TiO ₂	0,99	0,64	0,39	0,36
Al ₂ O ₃	19,10	20,35	14,91	16,25
Fe ₂ O ₃	5,65	2,43	2,42	1,68
FeO	4,52	4,12	1,88	2,06
MnO	0,14	0,33	—	0,09
MgO	4,14	2,10	1,36	1,30
CaO	10,00	5,86	3,58	4,13
Na ₂ O	2,89	3,84	3,93	4,29
K ₂ O	0,68	1,44	2,46	1,66
H ₂ O	1,43	0,80	0,42	1,20
CO ₂	—	—	—	—
S	—	—	—	0,09
P ₂ O ₅	—	—	—	—
Сумма	100,27	100,81	99,91	99,67
Молекулярные отношения				
SiO ₂ /TiO ₂	65	—	270	218
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5,0	—	8	6,5
CaO/Al ₂ O ₃	0,95	—	0,44	0,45
MgO/Al ₂ O ₃	0,55	—	0,22	0,20
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,25	—	0,44	0,43
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,04	—	0,18	0,10

Примечание. 1 — базальт Камбального хребта, аналитик А. Н. Разживина; 2 — андезит вулкана Кошелева (Набоко, 1956); 3 — дацит Дикого Гребня, аналитик А. Н. Разживина; 4 — игнимбрит (Малеев, 1961).

В табл. 16 приведены химические составы свежих лав и игнимбритов района, из обломков которых сложены туфы Паужетского разреза. Для них характерно постоянное преобладание натрия над калием, кальция над магнием. В результате гидротермального метаморфизма пород химический состав пород частично изменяется.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАМОРФИЗМ И МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ

Наиболее обводненные, давшие наибольший приток воды агломератовые туфы андезито-дацита максимально метаморфизованы. Вторичные минералы в них часто составляют 60—70%. Интенсивному изменению породы способствует наличие верхнего и нижнего водоупоров, служащих экранящими горизонтами.

Верхний экранящий горизонт — алевропсаммитовые, алевропелитовые и пелловые туфы дацита; нижний — плотные спекшиеся туфы дацита. Вторичные минералы в последних, как правило, составляют всего 5—10%. В прослоях плотных туфобрекчий основного состава, хотя и обладающих пониженными фильтрационными свойствами, гидротермальное изменение интенсивное и обусловлено, вероятно, исходным химическим составом пород. В ниже лежащих третичных туфопесчаниках, являющихся вторым водоносным комплексом, минералообразование снова интенсивное.

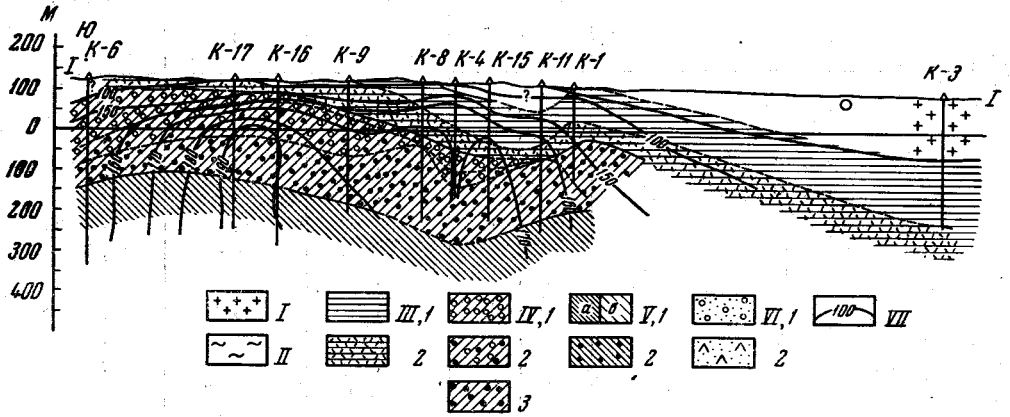


Рис. 22. Схема гидротермальной зональности на Паужетском месторождении термальных вод. Разрез по линии I — I. Масштаб 1 : 5000. Составили С. И. Набоко, А. П. Розникова

I — неизмененные породы; II — зона каолинизации; III — зона аргиллизации и цеолитизации: 1 — монтмориллонит + анальцит, 2 — монтмориллонит + анальцит + птилолит; IV — зона цеолитизации и фельдшпатизации: 1 — ломонтит + адуляр, 2 — ломонтит + адуляр + альбит, 3 — ломонтит + альбит; V — зона пропилитизации: 1 — а — интенсивное изменение, б — слабое изменение; 2 — пропилитизированные породы, содержащие в значительном количестве альбит; VI — зона окварцевания: 1 — кварц + адуляр + серицит, 2 — кварц + серицит + кальцит; VII — изомеры

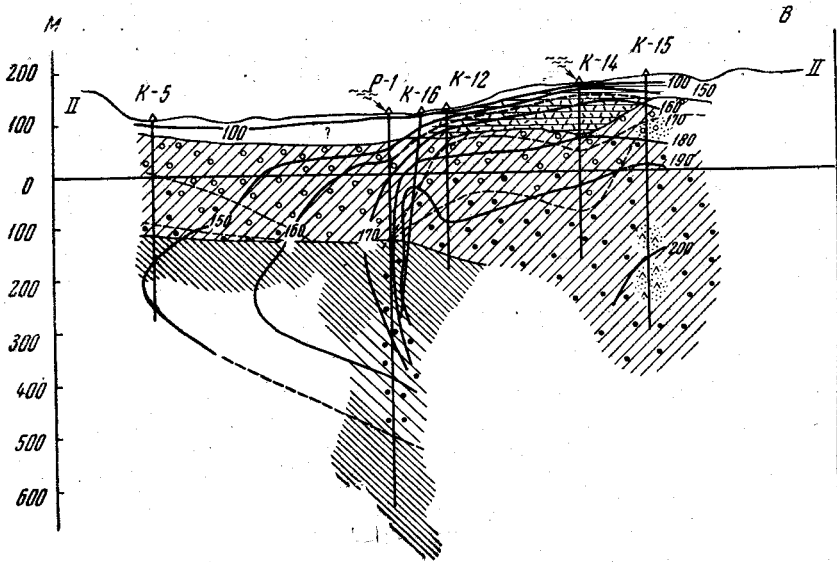


Рис. 23. Схема гидротермальной зональности на Паужетском месторождении термальных вод. Разрез II — II. Составили С. И. Набоко, А. П. Розникова

Условные обозначения см. рис. 22

В результате изучения кернов многочисленных скважин к настоящему времени выделены следующие зоны гидротермально-измененных пород (сверху вниз) и ассоциации вторичных минералов (рис. 22, 23).

I. Зона кислотного выщелачивания

1. Каолинит + лимонит (+ опал).
2. Каолинит + шпирит (+ опал + алузит).

II. Зона аргиллизации и цеолитизации
В низкотемпературных скважинах.

3. Анальцим.
4. Монтмориллонит.
5. Монтмориллонит + анальцим.
6. Монтмориллонит + анальцим + птилолит.

В высокотемпературных скважинах

7. Монтмориллонит + сколецит + гидробиотит.
8. Монтмориллонит + птилолит.

III. Зона цеолитизации и фельдшпатизации

9. Ломонтит + адуляр (кальцит + кварц + монтмориллонит + хлорит + сфен + апатит + эпидот + пренит).
10. Ломонтит + адуляр + альбит (кальцит + кварц + монтмориллонит + хлорит + сфен + апатит + эпидот + пренит).
11. Ломонтит + альбит (кальцит + кварц + монтмориллонит + хлорит + сфен + апатит + эпидот + пренит).

IV. Зона окварцевания (по разломам)

12. Кварц + адуляр (+ апатит + сфен).

V. Зона серицитизации (по разломам)

13. Серицит + кварц + пирит.
14. Серицит + карбонат + пирит.

VI. Зона процилитизации

15. Кальцит + хлорит + пирит (ломонтит + альбит + кварц + сфен + апатит + пренит + эпидот).
16. Кальцит + хлорит + пирит + ангидрит (+ альбит + кварц + сфен + апатит + пренит + эпидот).
17. Кальцит + хлорит + пирит + гидросерицит (+ альбит + кварц + сфен + апатит + пренит + эпидот).
18. Кальцит + хлорит + пирит + ломонтит.

Кислотное выщелачивание — каолинизация

Зона кислотного выщелачивания на Паужетке проявляется отчетливо, но не повсеместно. Она развивается на самой поверхности земли, распространяясь наиболее часто на глубину менее метра. Каолинизация приурочена к современным термальным парящим площадкам, а также обнаруживается на холодных полях. Поля покрыты цветными глинами белого, бурого, красного и голубого цветов. Во всех случаях ярко проявляется структура исходных пород. На поверхности земли в большей части развиты красные и бурые глины, под ними залегают голубые и серые глины.

Судя по химическому, термическому, рентгеноструктурному и оптическому анализам, основными минералом глин является каолинит, к которому в красных глинах примешивается гидрогематит, а в голубых и серых

глинах — шпирит. Кроме того, в них определены опал, алунит и в более глубоких горизонтах минералы из группы монтмориллонита.

В табл. 17 приведены химические составы современных гидротермальных глин Паужетки.

Т а б л и ц а 17

Состав гидротермальных глин с современных термальных полей Паужетки

Компоненты	1	2	3	4
SiO ₂	38,00	37,44	38,68	39,62
TiO ₂	1,32	0,46	1,56	0,86
Al ₂ O ₃	32,30	29,04	26,14	37,11
Fe ₂ O ₃	13,13	15,20	12,80	5,43
FeO	0,55	—	—	0,55
CaO	0,94	0,80	0,50	0,98
MgO	0,45	0,25	0,23	1,30
MnO	0,78	—	—	—
Na ₂ O	0,17	Не опред.	Не опред.	0,22
K ₂ O	0,12	—	—	0,09
H ₂ O ⁻	12,13	11,32	16,52	10,34
H ₂ O ⁺	0,24	2,88	2,40	3,10
S _{общ.}	0,05	—	—	—
H ₂ SO ₄	0,38	—	0,10	0,30
С у м м а	100,26	97,39	98,93	99,90

П р и м е ч а н и е. 1 — красная глина с поверхности земли, аналитик Е. П. Рябичкина; 2 — бурая глина с поверхности земли, аналитик Н. И. Постникова; 3 — серая глина с поверхности земли, аналитик Н. И. Постникова; 4 — голубая глина, залегающая под красной, аналитик Е. П. Рябичкина.

Химическое изменение исходных пород в приповерхностной зоне кислотного выщелачивания очень значительное. Из них выщелочены кальций, магний, натрий и калий, соответственно гидротермальные глины обогащены алюминием и железом (Al₂O₃ до 37%, вместо 20% в исходной породе, и Fe₂O₃ + FeO до 15%, вместо 6%).

При пересчетах химических анализов глин на молекулу каолинита остается избыточный кремнезем за счет примеси опала. В красных глинах определены повышенные количества окисного железа. В указанных образцах наравне с каолинитом присутствует гидрогематит. В голубой глине, залегающей под красной, определено повышенное содержание магнезии. Там к каолиниту примешиваются минералы из группы монтмориллонита. В большей части образцов обнаружено повышенное содержание окиси титана и соответственно пониженный коэффициент SiO₂/TiO₂ по сравнению с исходными породами. В одном из образцов красных глин существенно увеличивается количество окиси марганца. В глинах наблюдается сульфатная сера и щелочные металлы, за счет примеси алунита.

Для зоны каолинизации характерно интенсивное развитие пирита, в некоторых участках его содержание достигает 20%. Пирит в виде кристалликов кубического и реже додекаэдрического облика рассеян в глине и образует тонкие прожилки и жездки.

Образование гидротермальных глин в районе разгрузки щелочных натрово-хлоридных вод происходит под воздействием кислых сульфатных

Состав термальной воды и порового раствора в области развития гидротермальных глин

Компоненты	1			2		
	г/л	мг экв	экв %	г/л	мг экв	экв %
H ⁺	0,0016	1,60	0,80	0,0005	0,50	1,31
NH ₄ ⁺	—	—	—	0,2250	12,50	32,77
Na ⁺	0,0342	1,48	0,74	} 0,3156	13,72	35,97
K ⁺	0,0009	0,02	0,01			
Mg ²⁺	0,0567	4,67	2,34			
Ca ²⁺	0,3332	16,92	8,48	0,0135	1,11	2,91
Al ³⁺	—	—	—	0,0240	1,20	3,14
R ₂ O ₃	3,2550	174,93	87,63	0,0700	7,78	20,39
Fe ²⁺	—	—	—	—	—	—
Mn ²⁺	—	—	—	0,0283	1,03	2,70
	—	—	—	0,0086	0,31	0,81
Сумма	3,6816	199,62	100,00	0,6860	38,15	100,00
F ⁻	—	—	—	0,0006	0,03	0,08
Cl ⁻	1,0500	29,61	14,84	0,0113	0,32	0,83
SO ₄ ⁻²	8,1600	170,00	85,16	1,7901	37,27	97,70
HSO ₄ ⁻	—	—	—	0,0485	0,50	1,30
NO ₃ ⁻	—	—	—	0,0021	0,03	0,08
Сумма	9,2100	199,61	100,00	1,8526	38,15	100,00
H ₂ SiO ₃	0,4200			0,1612	M _{2,7} =	
pH	4,2			3,3	SO ₉₈ ⁴	
T°	—	M ₁₃ = $\frac{SO_{85}^4}{R_2O_3}$		92	= $\frac{Na_{36}NH_{33}^4Al_{20}}$	98

Примечание. 1 — поровый раствор из гидротермальной глины, 2 — термальная вода с поля гидротермальной глины. Образцы глин на месте их отбора парафинировались и в таком состоянии были доставлены для анализа. Проба весом в 250 г помещалась в металлический поршень, который устанавливался под пресс, и задавалось определенное давление, которое постепенно повышалось до 250 атм (аналитик Е. П. Рябичкина).

растворов. Последние образуются при конденсации пара, отделяющегося из термальных вод при фильтрации их к поверхности, и окислении содержащегося в нем сероводорода.

По данным К. П. Флоренского, такой сконденсированный пар на Паужетке содержит 10—100 мг H₂S и 20—200 мг CO₂ на литр конденсата. Представление о составе метаморфизирующих растворов мы можем получить из данных анализов термальных вод на современной парящей площадке Паужетки и поровых растворов, отжатых из гидротермальной глины (табл. 18).

Процесс каолинизации определяется как серноокислотное выщелачивание пород с концентрацией на месте процесса алюминия и железа. В гидратизированных образованиях происходит концентрация (вероятно, за счет адсорбции) ряда металлов: в первую очередь марганца и титана.

В скв. 21 опал, алунит и глинистые минералы распространяются до глубины 43 м. На глубине 17,8 м плагиоклаз в туфе дацита по трещинкам и

пятнами замещен волокнистым опалом, иногда вместе с ним, особенно в центральных частях зерен плагиоклаза, развит алунит в ромбических выделениях, часто зонального строения. Он же вместе с опалом замещает цемент. Характерно развитие тридимита в пластинчатых зернах, типичного для него двойникового и тройникового строения с углом между двойниками в 35° . Стекловатый цемент замещен сферолитами тридимита. Глубже каолинит вытесняется зелеными глинистыми минералами из группы монтмориллонита.

Мощность зоны гидротермальных глин и состав их в отношении примеси к каолиниту опала, алунита, ширита контролируются исходным содержанием сероводорода в глубинных перепретых гидротермах и соответственно интенсивности его окисления. На месторождении Вайракей (Новая Зеландия) концентрация сероводорода большая, чем на Паужетке, и соответственно зона кислотного выщелачивания более мощная. Наравне с каолинитом более значительную роль, чем на Паужетке, играют опал и алунит.

Аргиллизация и цеолитизация

Зона развития глинистых минералов из группы монтмориллонит — нонтронит с анальцимом и птилолитом или без них распространяется по всей площади разведваемого участка и занимает верхнюю часть его.

Мощность зоны аргиллизации зависит от прогретости пород, что хорошо прослеживается по разрезу с юга на север от скважин, вскрывших высокотемпературные воды, к скв. 3 на окраине термального поля, вскрывшей низкотемпературные воды. С юга на север изотермы попружаются и мощность аргиллизации и цеолитизации (анальцим + птилолит) соответственно увеличивается. Верхняя и нижняя границы зоны контролируются изотермами 50° и 150° . При температурах ниже 50° в породах совершенно отсутствует вторичное минералообразование, а выше 150° анальцим и птилолит вытесняются ломонитом.

В высокотемпературной скв. (табл. 19) в интервале 8—47 м в псефитовом туфе дацита не затронуты замещением только кварц и роговая обманка. Плагиоклаз в чистом виде присутствует редко, он замещен бесцветным или золотисто-желтым чешуйчатым монтмориллонитом с прямым погасанием и положительным удлинением: $N_g = 1,515 \pm 0,002$, $N_p = 1,507 \pm 0,002$, $N_g - N_p = 0,008$. Часто плагиоклаз выщелочен, и монтмориллонит образуется в виде щеточек по периферии полостей, центральная часть которых остается полой. По частично выщелоченному широксену развивается светло-зеленый монтмориллонит, а в обломках пемзы он замещает стекло стенок пузырьков. Более редко по обломкам бурого стекла развивается чешуйчатый гидробиотит с прямым погасанием и сильным плеохроизмом в бурых и желтых тонах. Все обломки свежих и замещенных пород и минералов окружены венчиком сколецита с погасанием 8° , отрицательным удлинением, оптически отрицательного с $N_g - N_p = 0,007$.

В высокотемпературном участке месторождения, в скв. 9, 8, 4, 11, зона развития монтмориллонита с анальцимом и птилолитом в общем совпадает с развитием алевропелитовых и пепловых туфов дацита, однако мощность аргиллизации увеличивается в северном направлении и накладывается на все породы разреза.

Так, в скв. 9 аргиллизация развивается в интервале глубин 11—84 м. На глубине 14 м при замещении монтмориллонитом цемента и обломков дацита в трещинках и реже по плагиоклазу развивается, вероятно, шабазит. [Низкое преломление и двупреломление (0,005), отрицательное удлинение, прямое угасание, отрицательный угол оптических осей]. Здесь же встречаются кварц и кальцит. На глубине 30 м наблюдается интенсивное окварцевание и развитие в пустотах выщелачивания адуляра. Указанные

Границы распространения подзон: монтмориллонит + анальцим (1)
и монтмориллонит + анальцим + птилолит (2)

№ скв.	1		2		Исходные породы
	глубина, м	температура, °С	глубина, м	температура, °С	
1	8—79	50—100	79—128	100—150	По алевропелитовым и псаммитовым туфам
3	142—311	50—74	311 — забой	74	
4	69—116	50—160	116—167	160	По всем породам
7	12—40	50—120	40—112	120—70	По алевропелитовым и псаммитовым туфам
8	16—61		61—153		» »
9	Нет	50—120	21—80	120—70	» »
10	66—148		Нет		» »
12	Нет	50—120	11—57	100—150	» »
13			8—47		100—170
14		50—120	11—97	100—180	По алевропелитовым и алевропсаммитовым туфам
20	25—65		50—100	65—108	100
21*	56—112	60—100	Нет		

* В основном монтмориллонит — анальцим появился на глубине 65 м и не характерен.

новообразования, вероятно, фиксируют трещину, обеспечивающую подъем высокотемпературной воды и парообразование. С 30 м до 84 м по плотным пепловым туфам дацита развивается зеленый монтмориллонит, по стенкам пустот — друзовый анальцим, по стеклу — сноповидный птилолит.

Севернее в скв. 8 зона развития монтмориллонита с анальцимом и птилолитом уже имеет большую мощность и прослеживается до глубины 153 м, а в скв. 4 — до глубины 167 м.

Здесь в интервале 0—47 м породы совсем не затронуты вторичным минералообразованием: обломки пемзы, шлака, андезита, стекла, плагиоклаза, авгита и цемент совершенно свежие. На глубине 47 м появляется зеленый монтмориллонит, который развивается в основном по стеклу пемзы, при этом поры ее остаются незаполненными. С глубины 69 м наряду с монтмориллонитом отмечается анальцим, который устилает стенки пузырьков пемзы, замещенной монтмориллонитом. Он же заполняет трещинки в плагиоклазе. Эти минералы развиваются также по пепловому цементу, причем с глубиной количество монтмориллонита уменьшается, а анальцима увеличивается, и он образует не только друзы в порах и пустотах, но участками замещает и цемент. Плагиоклаз обломков остается воднопрозрачный.

На глубине 116 м появляется птилолит, который в виде сноповидных агрегатов занимает центральную часть полостей в пемзе и в виде пучков отходит от друз анальцима.

Ниже (134 м) наряду с монтмориллонитом, анальцимом и птилолитом встречаются редкие лапчатые выделения загрязненного ломонтита, развивающегося по участкам цемента, предварительно замещенного монтмориллонитом. На этой глубине появляется сфен, образовавшийся по ильмениту. С глубиной количество ломонтита увеличивается, анальцим и птилолит исчезают.

Еще севернее, в скв. 1, зона арциллизации с анальцимом и птилолитом распространяется до глубины 141 м. С зеленым монтмориллонитом в тесном сочетании развивается мелкочешуйчатый глинистый минерал фиолетового цвета со слабым плеохроизмом; интенсивность окраски различна.

Двупреломление и преломление у фиолетового минерала выше, чем у зеленого и золотисто-желтого монтмориллонита. Он так же, как и зеленый, замещает стекло пемзы и развивается пятнами и струями по цементу¹. По краям пустот образуется друзовый анальцим. На глубине 21 м встречен кальцит, а с глубины 79 м появляется птилолит, развивающийся вместе с анальцимом в пустотах и по цементу туфа. С ними ассоциирует апатит. Количество монтмориллонита и анальцима колеблется от незначительного до 40 и 20% соответственно. Птилолит всегда количественно подчинен им. На глубине 116—124 м анальцима особенно много, он заполняет пустоты, трещинки и развивается по цементу. Обломки андезита, включенные в алевропелитовый и пепловый туф дацита на указанной глубине, также изменены. Монтмориллонит замещает цемент и авгит. Порода пересечена жилками кальцита, в зальбандах которых развиты анальцим и монтмориллонит или же какой-нибудь один из них. На глубине 141 м появляются ломонит, кварц и адуляр.

На окраине месторождения, в самой северной его части (скв. 3), вскрыты низкотемпературные воды. Изотерма 50° погружена на 150 м, а изотерма 100° проходит глубже 300 м и не вскрыта. Здесь, несмотря на то, что алевропелитовые туфы чередуются с псефитовыми, хорошо проницаемыми водоносными породами до глубины 300 м, развита только аргиллизация с анальцимом.

В интервале 0—142 м (температура 50°) вторичное минералообразование в породах отсутствует. Обломки лавы, стекла, пемзы, плагиоклаза, авгита и цемент совершенно свежие.

С глубины 142 м появляется зеленый монтмориллонит в сочетании с анальцимом. Монтмориллонит развивается по цементу, в трещинках плагиоклаза, на границе зерен плагиоклаза с цементом. В щелевидных породах цемента развит таблитчатый анальцим, который также встречается в прожилках, секущих породу. Количество анальцима и монтмориллонита не постоянно. Максимальное содержание анальцима — на глубине 242 м. Птилолит появляется вблизи забоя (312 м).

Во всех скважинах в приповерхностной зоне аргиллизации и цеолитизации монтмориллонит замещает цемент, стекло, а анальцим в основном развивается в трещинках и порах. Птилолит всегда в виде радиальнолучистых тонкоигольчатых кристаллов занимает центральную часть пустот или отходит пучками от друз анальцима, выстилающих стенки пустот.

Для описываемого участка типична вертикальная зональность, выражающаяся в смене с глубиной подзон: монтмориллонит + анальцим, монтмориллонит + анальцим + птилолит.

В табл. 20 приводится химический состав гидротермально измененных пород из зоны аргиллизации и цеолитизации и для сравнения неизмененных пород с верхнего горизонта скв. 3 и 1.

Судя по химическим анализам пород из зоны аргиллизации и цеолитизации, при метаморфизме происходит некоторое изменение химического состава исходных пород. Развитие монтмориллонита явно сопровождается обогащением породы магнием. Коэффициент $MgO : Al_2O_3$ (табл. 21) в породах с глубиной и соответственно усилением монтмориллонитизации непрерывно возрастает. В неизмененном алевропелитовом туфе — 0,07, в интенсивно аргиллизированном — до 0,23. Одновременно в породе увеличивается содержание железа и воды. Учитывая это, можно считать, что монтмориллонит железисто-магнезиальный. Развитие анальцима не сопровождается изменением содержания в породе щелочных металлов. Соотношение $Na_2O : Al_2O_3$ в неизмененной породе и в породе с интенсивным развитием новообразований анальцима близкое. Коэффициент $K_2O : Al_2O_3$

¹ Возможно, в состав его входит литий; в указанных измененных породах — 0,01—0,05% лития.

Таблица 20

Состав свежих и измененных туфов (аналитик А. Н. Разживина)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	70,44	73,12	61,54	62,68	60,58	68,97	57,60	60,50	60,58	67,46	66,47
TiO ₂	0,32	0,35	0,60	0,57	0,67	0,42	0,81	0,79	0,71	0,40	0,41
Al ₂ O ₃	13,83	12,68	16,99	16,87	17,02	14,13	18,27	16,83	18,80	13,88	15,10
Fe ₂ O ₃	1,36	1,15	1,93	2,59	2,99	1,77	3,71	3,84	3,32	2,09	2,18
FeO	1,45	1,38	2,51	2,03	2,14	1,57	3,79	2,69	2,74	1,59	1,06
MnO	—	—	0,13	0,16	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0,11	0,80	1,56	1,60	1,85	0,87	2,89	2,64	2,34	1,18	0,95
CaO	3,97	2,38	5,50	4,85	6,18	1,86	6,32	5,42	5,47	2,56	3,79
Na ₂ O	3,10	2,10	3,24	2,74	3,43	—	—	—	—	3,27	3,55
K ₂ O	2,84	3,56	1,81	1,57	1,81	—	Не опред.			2,70	2,55
H ₂ O	2,64	2,52	4,04	4,53	3,20	—	—	—	—	4,18	4,19
CO ₂	Не опред.	Не опред.	Не опред.	0,22	0,34	—	—	—	—	Не опред.	
S	Не опред.	Не опред.	Не опред.	—	—	—	—	—	—	Не опред.	
Сумма	99,76	100,03	99,85	100,41	100,19	—	—	—	—	99,41	100,25

Примечание. Цифры объяснены в табл. 21.

Таблица 21

Молекулярные отношения

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂ /TiO ₂	293	243	128	173	112	230	100	100	100	261	—
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	8,7	9,8	6,1	6,3	60	8,3	5,3	6,1	5,4	7,9	7,5
CaO/Al ₂ O ₃	0,52	0,34	0,53	0,52	0,66	0,22	0,60	0,60	0,52	0,33	0,47
MgO/Al ₂ O ₃	0,07	0,16	0,23	0,22	0,28	0,15	0,40	0,40	0,32	0,22	0,17
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,37	0,28	0,31	0,26	0,33	—	—	—	—	0,40	0,38
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,22	0,30	0,11	0,11	0,11	—	—	—	—	0,21	—

Примечание. 1 — К-1. Алевропелитовый туф дацита без новообразований, глубина на 24 м. 2 — К-1. Алевропелитовый туф дацита. Очень немного монтмориллонита и анальцима, глубина 34,5 м. 3 — К-1. Псаммитовый туф дацита. Незначительное развитие монтмориллонита и анальцима, глубина 36,5 м. 4 — К-1. Агломератовый туф дацита. Незначительное развитие монтмориллонита и анальцима, глубина 44,5 м. 5 — К-1. Пепловый туф дацита. Изменения более значительные, развитие монтмориллонита и анальцима, глубина 60,5 м. 6 — К-3. Пепловый туф, свежий, глубина 64,7 м. 7 — К-3. Агломератовый туф. Развитие монтмориллонита, глубина 104,5 м. 8 — К-3. Агломератовый туф. Развитие монтмориллонита и анальцима, глубина 173 м. 9 — К-3. Агломератовый туф. Развитие монтмориллонита и анальцима, глубина 235 м. 10 — К-4. Алевропелитовый туф дацита, свежий, глубина 27,0 м. 11 — К-4. Алевропелитовый туф дацита. Незначительное количество монтмориллонита, глубина 58,5 м.

в породе с образованиями анальцима и птилолита даже меньше, чем в неизмененной породе.

Возможно, на Паужетке изотропный минерал имеет более сложный состав, чем анальцим. Это относится к птилолиту.

Аргиллизация с анальцимом и птилолитом развивается под воздействием поровых растворов, имеющих реакцию, близкую к нейтральной

(рН = 7,3). Состав их сульфатно-хлоридный, кальциево-натровый при минерализации до 10 г/л (табл. 22).

Т а б л и ц а 22

Состав порового раствора, отжатого из зерна зоны аргиллизации и цеолитизации (монтмориллонит + анальцим + птилолит)

Компоненты	г/л	мг. экв	экв %
Na ⁺	1,4195	61,74	40,26
K ⁺	0,1055	2,69	1,75
Ca ²⁺	1,6745	83,55	54,49
Mg ²⁺	0,0655	5,38	3,50
Сумма	3,2650	153,36	100,00
Cl ⁻	2,7321	56,92	37,11
SO ₄ ²⁻	3,4200	96,44	62,89
HCO ₃ ⁻	Нет	—	—
CO ₃ ²⁻	Нет	—	—
Сумма	6,1521	153,36	100,00
H ₂ SiO ₃	1,4267		
рН	7,3		
		$M_{10,8} = \frac{SO_4^{4-} Cl_{37}}{Ca_{54} Na_{40}}$	

Примечание. Аналитик Е. П. Рябичкина.

Верхняя граница развития монтмориллонита с анальцимом 8 м, нижняя — 311 м. Монтмориллонит + анальцим образуются при температурах 50—120°.

Верхняя граница появления птилолита в высокотемпературных скважинах 8 м, нижняя — 167 м, а в низкотемпературной скв. 3 он фиксируется лишь на глубине 311 м. Птилолит в ассоциации с монтмориллонитом развивается в интервале температур 100—160°. Другие гидротермальные минералы для урезанной зоны не характерны.

Цеолитизация и фельдшпатизация

Под зоной аргиллизации и цеолитизации (анальцим и птилолит) почти во всех скважинах вскрывается зона цеолитизации (ломонтит) и фельдшпатизации.

Наиболее интенсивно цеолитизация и фельдшпатизация развиваются в обводненной толще песчистых литокристаллокластических туфов дацита и наблюдаются в зерне скважин, вскрывших наиболее высокотемпературные воды (табл. 23). В таких скважинах цеолитизация и фельдшпатизация частично захватывают и плотные алевропелитовые и алевропсаммитовые туфы, начинаясь с небольшой глубины (скв. Р-1) и распространяясь на туфобрекцию андезитов-базальтов, залегающих глубже агломератовых туфов. В скв. 5 и 6 подобные изменения отмечаются с глубины 35—40 м. В низкотемпературных скважинах зона цеолитизации и фельдшпатизации вскрывается на больших глубинах или совсем не проявляется (скв. 3).

Границы глубинности подзон цеолитизации и фельдшпатизации (м)

№ скв.	Ломонтит + адуляр	Ломонтит + адуляр + альбит	Ломонтит + альбит	№ скв.	Ломонтит + адуляр	Ломонтит + адуляр + альбит	Ломонтит + альбит
P-1	53—263	—	—	10	—	272—345	—
1	—	144	—	11	—	—	180—330
4	202—224	224—253	—	12	57—64	64—177	177—290
5	35—99	99—189	189—224	13	47—125	125—162	165—285
6	48—157	157—190	190—257	14	97—124	124—244	244—323
7	Нет	Нет	170	20	—	—	—
8	Нет	Нет	182—345	21	—	—	—
9	30—90	90—180	180—300				

Таким образом, наибольшая мощность этой зоны прослеживается в южной и юго-восточной части разведваемого участка; в северном и северо-восточном направлении она уменьшается и погружается на значительную глубину. Наиболее характерными минералами для этой зоны являются ломонтит, адуляр и альбит.

В распределении перечисленных новообразований наблюдается закономерность: в верхней части зоны развиты ломонтит и адуляр, глубже к ним прибавляется альбит, который затем постепенно вытесняет адуляр. Такая зональность вскрыта скв. P-1, 4, 5, 6, 9, 12, 13, 14. В скв. 10 и 11, 20 и 21 с началом появления ломонтита сразу же встречаются и адуляр и альбит. Для пород в скв. 7 и 8 адуляр не характерен, и с ломонтитом ассоциирует только альбит.

Количество новообразованных минералов в обводненном псефитовом туфе достигает 60%.

Основные вторичные минералы в этой зоне — цеолиты; среди них резко преобладает ломонтит, изредка встречаются филиппсит и томсонит, характерны адуляр и альбит, типичны: кальцит, кварц, хлорит, монтмориллонит, сфен, апатит, редкими являются эпидот, пренит, ангидрит, пирит.

Среди новообразований описанной зоны ломонтит по количеству занимает первое место, достигая иногда 50—60%. Судя по оптическому, рентгеновскому и химическому анализам, он является чистой кальциевой разностью. Верхняя граница его появления 30 м. В верхах зоны он развивается по цементу, имеет расплывчатые лапчатые контуры, загрязнен включениями и пузырьками. С глубиной количество ломонтита возрастает, выделения становятся идиоморфными. Он бесцветный, с совершенной спайностью под углом 90°. Преломление и двупреломление на всем интервале глубин более или менее постоянные: $N_g = 1,513$, $N_p = 1,504$, $N_g - N_p = 0,009$. Минерал оптически положительный, $2V = 28-40^\circ$, редко 20—25°.

Наиболее часто ломонтит развивается в туфе, в связывающей обломки массе, с образованием вторичного ломонтитового цемента. В этом случае в нем много включений кристалликов кварца, которые обуславливают псевдопойкилитовую структуру, либо червеобразных выделений монтмориллонита или гидрохлорита, а также бочонковидных и призматических зернышек апатита. Иногда при замещении ломонтитом видна реликтовая структура исходной породы, причем нередко сохраняются участки, ранее монтмориллонитизированные. Встречаются образования ломонтита по цементу, часто окруженные венчиком из мелких зерен сфена. Ломонтит развивается по обломкам лавы и минералов, замещает плагиоклаз или полностью (псевдоморфозы из мозаики зерен), или частично с сохранением

участков совершенно свежего минерала. Ломонит образуется и по авгиту (в этих случаях с ним ассоциируют хлорит, апатит и сфен), и по роговой обманке (по трещинам и окружает ее). В случае образования ломонита в трещинах и полостях в породе он без включений кристаллизуется в виде друз, совместно с кварцем или кальцитом.

Филлипсит встречается в виде таблитчатых образований, а томсонит — в виде игольчатых радиально-лучистых агрегатов.

Адуляр развит в верхней части зоны цеолитизации и фельдшпатизации. Верхняя граница его появления 30 м; адуляр образуется наиболее часто в пустотах выщелачивания плаггиоклаза. В низкотемпературных скважинах адуляр развивается тонкой каймой по периферии полостей выщелачивания. В наиболее высокотемпературных скважинах адуляр встречается в виде крупных, до 1,5 мм в диаметре, скелетных кристаллов, реже целиком замещает плаггиоклаз (скв. 2, 12, 14, 13). Иногда отмечаются жилки адуляра. Нередко при замещении плаггиоклаза адуляром образуется кальцит, реже ломонит. Адуляр водянопрозрачен, пространство в пустотах между его лучами не загрязнено. Для адуляра характерен малый угол оптических осей от 35 до 50°, $N_g = 1,522$. $N_p = 1,519$, $Ng - Np = 0,003$.

В пустотах выщелачивания иногда наблюдаются каймы адуляра, оканчивающиеся ромбоэдрами с острой или срезанной вершинкой. В случае образования адуляра по плаггиоклазу у него иногда проявляется решетчатая структура.

На глубине скелетные кристаллы адуляра пересекаются прожилочками или обрастают тонкой каемкой альбита, хорошо отличимого от первого по более высокому преломлению и двупреломлению.

Альбит при более детальном исследовании керн многочисленных скважин оказался не менее распространенным, чем адуляр, самая верхняя граница его появления в скв. 12—64 м, скв. 10—272 м. Наиболее мощная зона развития альбита наблюдается в высокотемпературных скважинах. Для альбита так же, как и для адуляра, характерна приуроченность к пустотам выщелачивания, но в то же время он чаще, чем адуляр, замещает плаггиоклаз либо полностью, либо частично, образуя псевдоморфозы, иногда с дырчатой структурой. В переходной зоне одновременного развития адуляра и альбита последний сетчат тонкими жилками адуляр или обрастает его тонкой каймой. Пространство между лучами или полости в альбите загрязнены в отличие от таковых в адуляре. Иногда альбит тесно ассоциирует с ломонитом или кальцитом, замещая плаггиоклаз.

В новообразованиях альбита изредка проявляются полисинтетические двойники (по альбитовому закону).

Количество альбита иногда достигает 10%. Судя по углу симметричного угасания в зоне $\perp (010)$, равному 15—18°, новообразованный плаггиоклаз содержит всего 2—8% аортитовой молекулы, такой же состав плаггиоклаза (№ 8) получается по замерам угла симметричного угасания, на столике Е. С. Федорова. Показатели преломления альбита: $N_g = 1,536$, $N_p = 1,526$, двупреломление $Ng - Np = 0,010$. Угол оптических осей небольшой 45—50°, оптический знак положительный. Альбит развивается обычно по лабрадору (№ 45—50) без прироста вещества при растворении аортитовой молекулы, поэтому правильнее назвать этот процесс не альбитизацией, а деаортитизацией. Наличие дырчатого альбита и образование в виде кайм в пустотах выщелачивания свидетельствует о выносе вещества, причем извлеченный из плаггиоклаза кальций часто идет на развитие кальцита и ломонита, которые совместно с альбитом образуют псевдоморфозы по плаггиоклазу.

Кварц для зоны цеолитизации и фельдшпатизации очень характерен, но количество его варьирует в широких пределах. В скв. 13 в интервале 100—120 м наблюдается интенсивное окварцевание породы, описание которого будет дано особо; менее интенсивное окварцевание встречается

участками почти по всему разрезу многих скважин. Очень характерно тесное прорастание идиоморфных кристаллов кварца с ломонитом. Кварц новообразованный — водянопрозрачный без следов волнистого слоения, содержит редкие включения. Часто кварц вместе с ломонитом самостоятельно нарастает в виде друз на стенки полостей, а также пересекает цеолитизированную породу жилками, где он представлен криптокристаллической разновидью.

Халцедон развивается обычно в пустотах обломков шлака либо самостоятельно, либо совместно с хлоритом, занимая центральные части пустот. В скв. 13 на глубине 125—185 м встречены прожилки халцедона мощностью в 3—5 мм, халцедон двусосный, $N_g - N_p = 0,08$, их пересекают менее мощные жилки кальцита и ломонита.

Монтмориллонит в зоне цеолитизации и фельдшпатизации довольно распространен, он обычно имеет криптокристаллическое строение, зеленую окраску и замещается ломонитом.

Хлорит наиболее часто развивается по обломкам андезита и андезито-базальта, включенным в псефитовый туф дацита, а также по обломкам авгита и роговой обманки. Среди хлоритов определяются клинохлор и пеннин (голубовато-зеленого цвета, без плеохроизма, с низкой интерференционной окраской).

В пустотах часто образуется светло-зеленый плеохроичный хлорит с повышенным ($N_g - N_p = 0,014$) двупреломлением, вероятно, железистая разновидь деплесита.

Кальцит распределяется по всей зоне цеолитизации — фельдшпатизации и проявляется на различных глубинах: в скв. 5 и 13 встречается уже с глубины 50 м, а в скв. 11 — с глубины 149 м. Кальцит с ломонитом, адуляром и альбитом замещает плагиоклаз, образуется по авгиту и роговой обманке совместно с хлоритом, а также заполняет пустоты в обломках андезито-базальтов, занимая центральную их часть и псевдоморфоз. Наиболее же часто кальцит развивается по цементу туфа и основной массе обломков лавы и пересекает гидротермально-измененные породы жилками. В полостях туфа встречены крупные прозрачные кристаллы кальцита в ассоциации с ломонитом.

Апатит — типичный гидротермальный минерал, встречающийся в зоне цеолитизации и фельдшпатизации чаще, чем в верхней зоне аргиллизации и цеолитизации. Для него характерны призматические и бочонковидные образования. В основном апатит приурочен к ломониту, развивающемуся по цементу, однако он образуется и при замещении плагиоклаза ломонитом, адуляром или альбитом. Кроме того, он часто находится в ассоциации с кальцитом и хлоритом, замещающими пироксен, и даже выделяется при замещении ильменита сфеном. Судя по химическим анализам, привноса фосфора в породу не происходит, и кристаллизация апатита осуществляется при извлечении его из вещества цемента, стекла и минералов, в результате чего гидротермально-измененная порода резко обогащается апатитом по сравнению с исходной.

Сфен в радиально-лучистых сферолитах, а также неправильных зернах образует каймы вокруг первичного рудного минерала, ильменита, часто на некотором расстоянии от зерен последнего. Точно так же сфен в виде каймы окружает участки ломонита, развивающегося по цементу туфа, в то время как в самом агрегате ломонита его мало. При замещении пироксена хлоритом и кальцитом иногда образуются мелкие зерна сфена, кристаллики рутила и брукита. Так же как и апатит, сфен развивается за счет перегруппировки компонентов исходной породы; судя по химическим анализам, титан в породу не привносится.

Эпидот и пренит типичны для зоны цеолитизации и фельдшпатизации, однако редки. Эпидот встречен в высокотемпературных скв. 5, 13, 14, 20, 21 в виде розеток, неправильных зерен и агрегатов. Он обра-

зуются по плагиоклазу вместе с кальцитом, встречается в основной массе обломков лавы и развивается в виде мелких зерен в цементе туфа при замещении его ломонтиком. Верхняя граница появления эпидота в скв. 13—78 м, 5—133 м, 14—21 м. Пренит в скв. 20 и 21 преобладает над эпидотом, в остальных скважинах он редок. Не вызывает сомнений, что эти минералы являются новообразованиями так же, как ломонтит, кальцит, адуляр и альбит.

Описанные выше вторичные минералы развиваются по цементу, по минералам обломков и по вкрапленникам в обломках лавы, причем первые два вида изменения наиболее типичны. В отдельных участках исходная порода полностью замещена новообразованиями, сохраняются лишь очертания первичной структуры. Почти все минералы несут на себе следы изменения, за исключением кварца, который иногда частично растворяется, и контуры тогда сглаживаются, а вокруг его зерен часто образуется венчик из мелких зернышек того же кварца.

В некоторых разрезах (скв. 13) в пределах зоны цеолитизации и фельдшпатизации можно видеть подзоны окварцевания двух типов: I — с адуляром или II — с серицитом и пиритом. Эти подзоны фиксируют, вероятно, зоны разломов.

Таблица 24

Состав псефитовых туфов дацита из зоны цеолитизации и фельдшпатизации

Компоненты	Вес, %		Компоненты	Вес, %		
	1	2		1	2	
SiO ₂	60,89	68,00	Молекулярные отношения			
TiO ₂	0,67	0,29		SiO ₂ /TiO ₂	120	300
Al ₂ O ₃	15,14	12,12		SiO ₂ /Al ₂ O ₃	6,7	9,3
Fe ₂ O ₃	2,33	3,78		CaO/Al ₂ O ₃	0,51	0,56
FeO	2,52	2,12		MgO/Al ₂ O ₃	0,30	0,19
MnO	0,09	0,10		Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,22	0,24
MgO	1,83	1,36		K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,32	0,30
CaO	4,33	3,84				
Na ₂ O	2,06	1,82				
K ₂ O	4,55	3,31				
H ₂ O ⁻	0,61	3,07				
H ₂ O ⁺	3,93	0,32				
S	0,30	0,25				
CO ₂	0,77	He опред.				
P ₂ O ₅	—	0,12				
Сумма	100,02	100,50				

Примечание. 1—скв. Р-1. Глубина 42,40 м (аналитик В. П. Энман). 2—скв. К-13. Глубина 47,65 м (аналитик В. Г. Сильниченко).

В табл. 24 приведен состав туфов дацита из зоны цеолитизации и фельдшпатизации. По химическим анализам установлено, что измененные породы обогащены калием (преобладает над натрием, в то время как в свежих лавах и туфах всегда натрия преобладает над калием). Таким образом, очевидно, что в зоне цеолитизации и фельдшпатизации наблюдается шивнос растворами в породу калия, что минералогически выражается в образовании адуляра. Развитие альбита происходит без шивноса натрия при разрушении плагиоклаза с выносом кальциевой молекулы. В гидротермально-измененной породе увеличивается содержание серы (образование пирита и ангидрита), углекислоты (образование кальцита).

Состав поровых растворов, отжатых из породы зоны цеолитизации и фельдшпатизации (скв. 12)

Компоненты	г/л	мг-эке	эке %	г/л	мг-эке	эке %
Na ⁺	1,5191	66,07	49,21	1,5446	67,18	45,27
K ⁺	0,0655	1,67	1,27	0,0471	1,20	0,80
Ca ²⁺	1,2608	62,91	46,84	1,2805	63,89	43,05
Mg ²⁺	0,0437	3,59	2,68	0,9165	16,15	10,88
Сумма	2,8892	141,25	100,00	3,0687	148,42	100,00
Cl ⁻	3,5682	74,34	55,38	4,2907	89,39	60,23
SO ₄ ²⁻	1,9836	55,90	41,65	1,9662	55,44	37,35
HCO ₃ ⁻	0,2440	4,00	2,97	0,2190	3,59	2,42
Сумма	5,7958	134,24	100,00	6,4759	148,42	100,00
H ₂ SiO ₃	0,5188			0,6485		
pH	9,1			9,5		

$$M_{9,01} = \frac{Cl_{55}SO_{41}^4}{Na_{49}^4Ca_{17}Mg_3}$$

$$M_{10,2} = \frac{Cl_{60}SO_{37}^4}{Na_{45}Ca_{43}Mg_{10}}$$

Примечание. Аналитик Е. П. Рябичкина.

и кремния, что определено по интенсивному образованию в некоторых участках кварца.

Цеолитизация (образование ломонтита) и фельдшпатизация развиваются под воздействием поровых щелочных (рН до 10) гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридных натрово-кальциевых растворов с минерализацией до 10 г/л (табл. 25), причем адуляризация, как правило, развивается в верхней части зоны.

Окварцевание и адуляризация

Наиболее четко подзона окварцевания прослеживается в скв. К-13. В интервале 87,0—125,0 м туфы превращены в плотную яшмоподобную, темно-серого цвета породу, с кавернами и пустотами выщелачивания. Микроскопически она состоит из кварца двух типов: криптокристаллического (диаметр зерен 0,007—0,008 мм) и зернистого (0,03—0,04 мм). Криптокристаллический кварц преобладает и создает общий фон породы, а зернистый располагается в пустотах, трещинках и в полостях выщелачивания минералов. Последний имеет гребенчатую, друзовую структуру; часто вершины кристаллов, направленные к центру трещин и пустот, окрашены в бурый цвет сыпью гематита, а вдоль основания друз прослеживаются скопления лейкоксена. Встречаются участки неокварцованного цемента, тогда он замещен зеленым монтмориллонитом, а пустоты заполнены гребенчатым кварцем, чешуйчатым монтмориллонитом с мелкими зернами сфена. Среди кварца встречаются иголки и призмы апатита, пирамидальные призмы циркона, магнетита и мелкие ромбоэдрические зерна шабазита (?). Криптокристаллический кварц часто пронизан гидроокислами железа, располагающимися или полосами, или пятнами, подчеркивающи-

ми псевдоморфозы кварца по цветным минералам. В пустотах выщелачивания плагиоклаза иногда образуются скелетные кристаллы адуляра, а некоторые участки пород описываемой подзоны почти полностью отвечают кварцево-адуляровой породе, которая изредка пересекается кальцитовыми прожилками с пустотами, заполненными друзами ломонтита.

Окварцевание в менее яркой форме проявляется и в других высокотемпературных скважинах. В скв. Р-1 окварцевание в зоне цеолитизации и фельдшпатизации наблюдается на глубинах 158—173 м и 212—250 м. Здесь кварц в виде мелких идиоморфных кристалликов прорастает ломонтит с образованием пойкилитовой структуры. Порода пересечена тонкими прожилками мелкозернистого радиально-лучистого халцедона.

Таблица 26

Состав окварцованной породы

Компоненты	Вес, %	Компоненты	Вес, %	Пересчет на минералы (%)
SiO ₂	84,94	K ₂ O	3,59	Кварц — 63,40
TiO ₂	0,12	H ₂ O ⁻	1,06	
Al ₂ O ₃	5,98	H ₂ O ⁺	0,04	Ортоклаз — 21,15
Fe ₂ O ₃	1,00	S	Нет	Альбит — 9,96
FeO	1,30	CO ₂	Нет	Анортит — 2,50
MnO	0,04	P ₂ O ₅	0,06	Других минералов — 2,99
MgO	0,06			
CaO	0,56	Сумма	99,94	Сумма 100,000
Na ₂ O	1,19			

В табл. 26 приведен состав кварцево-адуляровой породы. При пересчете химического состава породы на нормативные минералы получено 63,40% кварца, 21,15% калиевого полевого шпата, 9,96% альбита и 2,50% анортита.

Кварцево-гидрослюдистое замещение

В некоторых высокотемпературных скважинах в пределах зон цеолитизации — фельдшпатизации и пропилитизации выделяются подзоны наиболее интенсивного изменения туфов, выражающегося в развитии гидрослюдов (?), кварца, кальцита и пирита. Степень замещения пород указанными минералами различная. В некоторых участках компоненты породы полностью преобразованы и сохраняются лишь реликты первичных структур. Наиболее полно такой тип изменения наблюдается в скважине К-13 в интервалах 285—330 м, 356—359 м и 360—462 м. В первом интервале исходной породой явился литокластический туф дацита, который нацело замещен кварцем, чешуйчатым слюдистым минералом и пиритом. Слюдистый минерал имеет желтоватую окраску и располагается неправильными скоплениями, полосами и зонами концентрического сложения, подчеркивая структуру первичной породы. Количество его иногда достигает 80%.

Для кварца характерно зубчатое строение и неравномерное распределение по породе, он обычно загрязнен примесями описанного выше чешуйчатого минерала и других включений. Совместно с перечисленными минералами присутствует в больших количествах пирит в виде неправильных зерен, часто лимонитизированных, также встречаются призмочки и гексагональные зерна апатита. В проходящем свете отчетливо выступает структура исходной породы: видны таблицы плагиоклаза, обломки лавы. Описанные новообразования с одинаковой интенсивностью развиваются как по обломкам минералов и лавы, так и по цементу, за исключением

Состав кварцево-сланцевых пород

Компоненты	№ образца		Компоненты	№ образца	
	1	2		1	2
SiO ₂	50,68	50,50	Na ₂ O	2,90	3,35
TiO ₂	0,50	0,53	K ₂ O	1,55	2,26
Al ₂ O ₃	16,48	17,53	H ₂ O ⁻	1,01	0,80
Fe ₂ O ₃	3,90	5,84	H ₂ O ⁺	6,04	4,96
FeO	5,95	3,45	P ₂ O ₅	0,29	0,21
MnO	0,46	0,48	S	0,05	2,96
MgO	5,01	2,29	CO ₂	Не опр.	Не опр.
CaO	5,62	5,32			
			Сумма	99,94	99,88

пирита, содержание которого в цементе исходного туфа выше, чем в его обломках.

В интервале 356—359 м характер изменения аналогичен вышеописанному. Кварц имеет два типа выделений: мелкозернистый — с лапчатыми, зубчатыми очертаниями и микрозернистый — мозаичной структуры. Чешуйчатый, слабо окрашенный в желтый цвет минерал развивается в участках мозаичного кварца, здесь же много мелкозернистого пирита. Кварц с зазубренными краями, чистый, без примесей, концентрируется по трещинам и в пустотах, а также развивается по обломкам плагиоклаза и пироксена. По краям его скоплений и трещинкам кристаллизуется пирит. Химический состав описанной породы приведен в табл. 27 (анализ 1). Обращает на себя внимание повышенное содержание окиси магния и воды, незначительные количества окиси калия. Возможно, чешуйчатый слюдоподобный минерал относится к минералам группы монтмориллонита.

В интервале 360—426 м скважина прошла туфобрекцию, сильно измененную, с участками глиноподобной породы. Вначале кварц преобладает над чешуйчатым минералом и представлен криптокристаллической разновидностью, ниже количество чешуйчатого минерала увеличивается. Для всего интервала характерна обильная сыпь пирита, часто лимонитизированного. Плагиоклаз иногда замещается агрегатом кварца с альбитом. В пустотах развиваются клинохлор, кальцит, рассеянные зерна сфена и лучистый пенин, а по обломкам андезита с черным стеклом образуется хлорит.

В таблице 27 (анализ 2) представлен состав указанной гидротермально-измененной породы из зоны туфобрекций. По сравнению со свежей лавой здесь увеличения содержания окиси магния не наблюдается, но отмечается обогащение серой, которая при пересчете на минералы в породе дает 10% пирита. Привноса в породу кремнезема и щелочных металлов не происходило. Вода присутствует в повышенных количествах.

В скв. К-5 зона развития кварцево-гидрослюдистых пород начинается с глубины 252 м и прослеживается до забоя. Туф здесь изменен очень интенсивно: мелкочешуйчатый слюдястый минерал развивается по всей массе породы в ассоциации с анкеритом, кварцем и хлоритом.

Процесситизация

Цеолитизация и фельдшпатизация с глубиной ослабевают, и ведущими вторичными минералами становятся кальцит, хлорит, пирит, серицит, альбит, сфен, реже кварц, цеолиты, ангидрит, эпидот, адуляр и монтморилло-

нит. Такой характер метаморфизма обусловлен, во-первых, особенностями состава исходных пород — на глубине агломератовые туфы дацита сменяются туфобрекчией андезито-базальтов, по которой преимущественно развивается указанный парагенезис минералов, свойственный пропилитизации трансильванского типа. Во-вторых, глубиной процесса — на разных глубинах по одним и тем же породам образуются различные вторичные минералы. В наиболее глубинной зоне проявляется максимальная обогащенность гидротермально-измененных пород серой и углекислотой, что минералогически определяется более интенсивным, чем в верхних горизонтах, развитием пирита и кальцита.

Наиболее полно зона пропилитизации вскрыта роторной скважиной с глубины 250 м и до забоя (800 м) (табл. 28). Сюда же включается толща спекшихся туфов дацита, слабо метаморфизованных за счет их плохой проницаемости (С. И. Набоко, 1963). В настоящей работе ее описание дано отдельно.

Таблица 28

Состав пропилитизированной туфобрекчией андезито-базальта (Р-1)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	51,43	51,30	52,47	54,00	52,01	65,41	50,73
TiO ₂	0,99	0,93	0,77	0,35	0,91	0,49	0,99
Al ₂ O ₃	18,52	15,38	17,45	14,16	17,10	15,20	19,10
Fe ₂ O ₃	3,56	5,00	3,02	2,10	3,26	2,32	5,65
FeO	5,64	4,60	4,29	2,51	5,22	2,17	4,52
MnO	Не опред.	Не опред.	Не опред.	0,17	Не опред.	—	0,14
MgO	2,88	2,50	2,88	3,34	3,11	1,40	4,14
CaO	6,43	6,12	8,39	9,25	6,20	5,17	10,00
Na ₂ O	2,41	1,40	1,86	2,48	2,61	3,37	2,89
K ₂ O	1,07	1,11	1,50	2,47	2,14	1,43	0,68
H ₂ O	3,81	6,33	5,20	1,07	4,90	1,06	1,43
CO ₂	1,89	2,27	2,44	6,55	3,00	0,61	Нет
S	1,27	2,54	—	1,70	Не опред.	1,37	Нет
Сумма	100,00	99,18	99,97	100,15	100,46	100,59	100,27

Молекулярные отношения

SiO ₂ /TiO ₂	66	80	87	222	70		65
CaO/Al ₂ O ₃	0,63	0,65	0,90	1,20	0,66	0,62	0,95
MgO/Al ₂ O ₃	0,40	0,40	0,43	0,60	0,46	0,23	0,55
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0,21	0,12	0,17	0,30	0,27	0,37	0,25
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0,10	0,08	0,10	0,20	0,13	0,10	0,04
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4,8	6,2	5,2	6,5	5,0	7,3	5,0

Примечание. 1 — пропилитизированная туфобрекчией андезито-базальта (аналитик А. Н. Разживина). Определено по разности, глубина 296 м. 2 — то же (аналитик Е. П. Рябичкина), глубина 320 м. 3 — то же (аналитик А. Н. Разживина), глубина 361 м. 4 — то же (аналитик Е. П. Рябичкина), глубина 630 м. 5 — обломок пропилитизированного андезито-базальта из толщи туфобрекчий (аналитик А. Н. Разживина), глубина 658 м. 6 — цемент туфобрекчией андезито-базальта (аналитик А. Н. Разживина). Определено по разности, глубина 551 м. 7 — свежий андезито-базальт Камбального хребта (аналитик А. Н. Разживина).

Туфобрекчия андезито-базальтов, вскрытая роторной скважиной, состоит из окатанных и угловатых обломков андезито-базальта, плотно сцементированных, и имеет зеленоватый цвет за счет вторичного минералообразования. Обломки андезито-базальта, андезита и базальта изменены очень сильно. В них по вкрапленникам плагиоклаза или в пустотах выщелачивания последнего развивается альбит часто в ассоциации с серицитом. Плагиоклаз также замещается кальцитом и хлоритом — пеннином, изредка по нему образуется цеолит (на глубине 290 м).

Авгит вкрапленников, как правило, изменен слабо, по нему иногда развивается хлорит (клинохлор).

Основная масса обломков андезито-базальта замещена клинохлором, реже радиально-лучистым пеннином и карбонатом (в начале интервала кальцитом, глубже анкеритом), а пустоты, как правило, заполнены новообразованиями, представленными хлоритом, карбонатом, халцедоном, кварцем, реже цеолитом и ангидритом. Встречаются жеоды как мономинерального, так и сложного состава зонального строения. Среди минералов жеод отмечаются: хлорит, халцедон, кальцит + хлорит + ангидрит, халцедон + хлорит. Почти всегда в указанных минералами ассоциируют сфен, вытесненный на периферию жеод, апатит и пирит, рассеянные в центральных их частях. Иногда внешняя зона жеод представлена гидролимонитом, далее идет зона чешуйчатого клинохлора, потом ломонтита и, наконец, центральная часть заполнена крупночешуйчатым клинохлором. В других жеодах изотропный хлорит переходит к центру в крипточешуйчатый, далее в зону радиально-лучистого зеленого, шлеохроичного хлорита, который к центру сменяется кальцитом.

В некоторых обломках базальта пустоты заполнены бесцветным радиально-лучистым розетковидным цеолитом с отрицательным удлинением $N_g - N_p = 0,006$, большим углом оптических осей, положительным оптическим знаком или другим цеолитом типа томсонита с прямым погасанием, положительным удлинением, высоким двуупреломлением ($N_g - N_p = 0,013$), положительным углом оптических осей (около 50°). На глубине 300 м пустоты окружены тонкой каемкой халцедона; в центре таких пустот находятся крупные чешуи мусковита, а в интервалах 325—340 м наблюдаются трещинки в обломках основных пород, заполненные таблитчатыми кристалликами ангидрита (прямое угасание, $N_g - N_p = 0,034$, двуосный, положительный), совместно с анкеритом. Жеоды на этой глубине сложены в центральной части криптокристаллическим монтмориллонитом с каймой ломонтита и внешним венчиком мелких зерен сфена.

Ассоциации минералов, встречающиеся в пустотах и трещинах, отличаются от таковых, развитых по самой породе. Характер замещения в обломках дацита иной, чем в обломках основных пород из тех же туфобрекчий. По цементу развиваются хлорит, карбонат, пирит, кварц, серицит, цеолит, монтмориллонит, ангидрит, сфен, апатит. Встречаются метасоматические жеоды сложного состава. В жеодах определены хлорит — двух типов, карбонаты (кальцит и анкерит), цеолиты, мусковит, ангидрит. Наиболее часты концентрические образования хлорита; по краям развивается слабо зеленый, почти изотропный хлорит, а в центре — радиально-лучистый. Другие жеоды сложены пеннином, с мелкими зернами сфена и кальцита. Очень часты жеоды зонального строения: по краям концентрируется радиально-лучистый цеолит (прямое погасание, отрицательное удлинение, отрицательный оптический знак, $N_g - N_p = 0,006$), в центре же кальцит или по краям криптокристаллический монтмориллонит, переходящий в чешуйчатый светло-зеленый хлорит, который сменяется в центре кальцитом; или зеленый монтмориллонит по периферии и лучистый цеолит в центре. Иногда участки цемента замещены ломонтитом с рассеянным игольчатым апатитом и мелкозернистым сфеном. На глубине 290 м по

цементу туфобрекчии в большом количестве развиваются слюдистый минерал, пирит, кальцит и хлорит.

Таким образом, в роторной скважине туфобрекчии андезито-базальтов в интервале 270—390 м пропилитизированы, причем в верхах непосредственно под зоной цеолитизации и фельдшпатизации еще много цеолитов, но с глубины 290 м их количество резко уменьшается — ломонит почти исчезает, а филлипсит и томсонит очень редки. На глубине 290—325 м проявляется интенсивная серицитизация (возможно, образование монтмориллонита с пиритом и анкеритом). Ангидрит и гипс отмечены в интервале 350—425 м.

Пропилитизированные туфобрекчии андезито-базальтов на глубине 390 м сменяются слабо измененными спекшимися туфами дацита. Минералообразование сходное с таковым агломератовых туфов андезито-дацита и туфобрекчий андезито-базальта: кальцит + хлорит + пирит + альбит + + адулярь + ломонит + халцедон + сфен + апатит.

Под плотными слабо измененными спекшимися туфами дацита снова залегают туфобрекчии андезито-базальта, но со стекловатым цементом состава, близкого к составу спекшихся туфов. По обломкам основных пород так же, как и в верхнем горизонте туфобрекчий андезито-базальта, развиваются хлорит (клинохлор, пеннин), карбонат (кальцит и анкерит), серицит, пирит, по стекловатому цементу пятнами образуется цеолит.

Гидротермально-измененные туфобрекчии андезито-базальта имеют зеленоватый цвет и по вторичным минералам сходны с пропилитами Трансильвании (Румыния). Третичная вулканическая формация андезитов, дацитов и отчасти риолитов в Трансильвании метаморфизирована до пород зеленоватого цвета с развитием в них кальцита и хлорита по цветным минералам, адуляра, редко цеолитов по плагиоклазам и пирита по магнетиту.

В описанных современных пропилитизированных туфах андезито-базальта в отличие от трансильванских встречены пренит и эпидот (в единичных зернах).

Современная пропилитизация протекает под воздействием поровых слабобокислых (рН около 6) сульфатно-гидрокарбонатно-хлоридных растворов

Т а б л и ц а 29

Состав поровых растворов, отжатых из породы зоны пропилитизации (сбв. 12)

Компоненты	г/л	мг-экв	экв, %	г/л	мг-экв	экв, %
Na ⁺	1,8020	78,38	46,67	1,7350	75,46	62,68
K ⁺	0,0845	2,16	1,28	0,1767	4,51	3,74
Ca ²⁺	1,5365	76,67	45,64	0,6304	31,45	26,12
Mg ²⁺	0,1310	10,77	6,41	0,1092	8,98	7,46
С у м м а	3,5540	167,98	100,00	2,6516	120,40	100,00
SO ₄ ²⁻	5,3442	111,61	66,44	2,7369	57,02	47,37
Cl ⁻	1,9990	56,37	33,56	2,1204	59,79	49,65
HCO ₃ ⁻	—	—	—	0,2190	3,59	2,98
С у м м а	7,3432	167,98	100,00	5,0763	120,40	100,00
H ₂ SiO ₃	0,5188			0,9079		
рН	6,1			6,9		

П р и м е ч а н и е. Аналитик Е. П. Рябичкина

с H_2S ; при температурах 100—200°, на глубинах 300—800 м. В табл. 29 приведен состав поровых растворов, отжатых из образцов туфа с признаками пропилитизации. Минералообразование (кальцит + хлорит + пирит + кварц + эпидот + пренит + серицит + цеолит + альбит + адуляр + ангидрит + сфен), апатит развивается в основном за счет компонентов пород с привнесом углекислоты и сероводорода.

Вторичное минералообразование в витрокристаллокластических туфах дацита

Лавоподобные, стекловатые, плотные витрокристаллокластические туфы дацита, залегающие между интенсивно пропилитизированными туфобрекчиями андезитов-базальтов, мало изменены. Это обусловлено слабыми фильтрационными свойствами пород. Вторичные минералы составляют не больше 5—10%, в то время как в выше и ниже залегающих туфобрекчиях и тем более агломератовых туфах их содержание достигает 50—60%, иной

Таблица 30

Состав слабоизмененных спекшихся туфов дацита (Р-1)

Компоненты	1	2	3	4
SiO_2	63,20	65,26	68,64	66,56
TiO_2	0,56	0,56	0,34	0,36
Al_2O_3	15,37	14,91	15,55	16,25
Fe_2O_3	2,27	1,81	1,56	1,68
FeO	1,63	2,92	1,90	2,06
MnO	0,15	Не опред.	0,10	0,09
MgO	3,70	1,42	1,50	1,30
CaO	5,03	4,15	3,76	4,13
Na_2O	4,42	3,41	2,83	4,29
K_2O	2,45	1,94	2,43	1,66
H_2O	1,36	1,79	1,63	1,20
CO_2	0,30	0,96	0,15	Следы
S	0,13	Не опред.	Следы	0,09
P_2O_5	0,11	Не опред.	Следы	Следы
Сумма	100,68	99,13	100,38	99,67
Молекулярные отношения				
SiO_2/TiO_2	175	—	285	218
CaO/Al_2O_3	0,60	—	0,44	0,45
MgO/Al_2O_3	0,60	—	0,24	0,20
Na_2O/Al_2O_3	0,49	—	0,30	0,43
K_2O/Al_2O_3	0,17	—	0,16	0,10

Примечание. 1 — слабоизмененный спекшийся туф дацита (аналитик Е. П. Рябичкина), глубина 380 м. 2 — слабоизмененный спекшийся туф дацита (аналитик А. Н. Разживина), глубина 395 м. 3 — то же (аналитик Е. П. Рябичкина), глубина 510 м. 4 — свежий спекшийся туф дацита (игнимбрит) (аналитик А. Н. Разживина).

раз и 90%. Все минералы витрокристаллокластических туфов дацита преимущественно свежие, лишь в незначительной степени наблюдается замещение плагиоклаза, роговой обманки, пироксенов и цемента. Альбит развивается за счет плагиоклаза, часто в пустотах его выщелачивания в виде кайм или скелетных ажурных кристаллов, а также образуется вдоль трещинок двойникования и спайности плагиоклаза наподобие елочковидных выделений, гаснущих одновременно. Адуляр очень редок. Иногда таблицы плагиоклаза участками замещены кальцитом или ломонтитом, причем последний располагается в центральных частях зерен или по трещинам спайности и по краям его.

Иногда по плагиоклазу вдоль трещинок наблюдается филлипсит с низким преломлением, с $CNg = 30^\circ$, положительным удлинением, $Ng - Np = 0,008$, с большим углом оптических осей, оптически положительный. Очень редко в центральных частях зерен плагиоклаза развивается десмин (?) в форме табличчатых зерен с $CNg = 25^\circ$, $Ng - Np = 0,011$, отрицательным удлинением, оптически отрицательным с $2V = 45^\circ$.

По зернам роговой обманки участками образуется анкерит с пиритом, со сфеном или с халцедоном. В основной своей массе роговая обманка сохраняется свежей, а авгит иногда замещается кальцитом с пиритом и сфеном или лучистым хлоритом с апатитом, кальцитом, сфеном, рутилом и пиритом (хлорит часто фиксирует трещины спайности). По ильмениту развивается сфен.

В центральной части толщи стекловатых дацитовых туфов увеличивается количество кальцита, ассоциирующего с хлоритом, причем кальцит частично замещает плагиоклаз, совместно с хлоритом. В интервале 474—482 м встречается зернышки эпидота, развивающегося с ломонтитом по плагиоклазу или по стекловатому цементу.

По кислому стекловатому цементу туфа в основном отмечаются хлорит либо в лапчатых формах, либо в радиально-лучистых агрегатах, кальцит и цеолит, возможно, томсонит. Кальцит часто образует крупные сплошные зерна с сохранением участков незамещенного стекла. В обломках андезито-базальта, включенных в туф дацита, пустоты заполнены хлоритом, причем, сама порода остается совсем свежей.

Химические анализы плотных витрокристаллокластических туфов дацита (табл. 30) подтверждают незначительные химические изменения исходного состава. Об этом можно судить по малому содержанию воды, серы и уголекислоты в сравнении с таковыми выше и ниже залегающими туфами, в которых наблюдается интенсивное минералообразование. Непостоянство химического состава указанных пород вызвано различной загрязненностью дацитового материала обломками андезито-базальтов.

Минералообразование в третичных полимиктовых песчаниках

Третичные полимиктовые туфопесчаники с прослоями граувакков — второй водоносный горизонт, в результате чего они интенсивно изменены.

Кальцит, иногда вместе с ломонтитом, развивается по плагиоклазу, авгиту и цементу. Количество его в отдельных плифах достигает 20%.

Хлорит представлен наиболее часто слабо анизотропным клинохлором, замещающим авгит, реже плагиоклаз, а также цемент. В отдельных пустотах развивается пенниц, с участками хлорита ассоциирует апатит. Ильменит по трещинкам и с периферии зерен замещен сфеном, в породе много лейкокена, неравномерно рассеянного. Пирит в описанной зоне имеет своеобразные сферические и коломорфные формы выделения. С глубины 743 м интенсивность вторичного минералообразования ослабевает.

В табл. 31 приведен химический состав измененных туфопесчаников.

Т а б л и ц а 31

Состав метаморфизованных туфопесчаников

Компоненты	Глубина, м			
	667	736	780	793
SiO ₂	57,24	48,40	47,32	59,72
TiO ₂	1,09	0,91	0,79	0,86
Al ₂ O ₃	16,82	17,32	17,24	14,93
Fe ₂ O ₃	2,00	3,45	2,72	4,54
FeO	5,05	6,27	6,28	5,01
MnO	Не опред.	Не опред.	0,14	Не опред.
MgO	2,00	3,20	4,73	3,00
CaO	5,95	8,07	7,08	8,03
Na ₂ O	2,85	4,86	2,64	2,51
K ₂ O	2,25	1,63	1,01	0,94
H ₂ O	3,48	3,30	5,64	5,65
CO ₂	0,90	2,80	Не опред.	Не опред.
S	1,26	0,55	Не опред.	0,55
Сумма	100,89	100,76	99,40	99,74

Примечание. Аналитики: Е. П. Рябичкина (обр. 667 м, 736 м, 793 м), А. Н. Разживина (обр. 780 м).

Содержания серы до 1,25%, углекислоты — до 2,80% и, наконец, воды — до 5,65% являются показателями интенсивности карбонатизации, пиритизации, цеолитизации и хлоритизации.

РУДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ В ПРОДУКТАХ СОВРЕМЕННОГО МЕТАСОМАТОЗА

Рассматривая результаты многочисленных анализов (200) образцов гидротермально-измененных пород из зон современного минералообразования, можно утверждать, что интенсивного привноса и выноса рассеянных элементов при современном гидротермальном метаморфизме под воздействием натрово-хлоридных вод не происходило. Такие элементы, как Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Zr, Ga, Zn, Pb, определены почти во всех образцах гидротермально-измененных пород независимо от характера вторичного минералообразования, глубины взятия образца, температурного режима и состава исходных пород. В близких количествах эти элементы определены в породах низкотемпературной скважины, где вторичное минералообразование полностью отсутствует.

Таким образом, указанные металлы, вероятнее всего, характерны для исходных вулканокластических пород Паужетского месторождения.

Интерес представляет поведение в области современного минералообразования лития.

Литий определен в количествах 0,01—0,03% в образцах, где проявилось наиболее интенсивно современное минералообразование, причем, преимущественно в образцах высокотемпературных скважин. В то же время литий отсутствует в образцах низкотемпературных скважин. Если принять во внимание, что литий в повышенных количествах определен в высокотемпературных натрово-хлоридных водах Паужетки, можно с уверенностью говорить, что в породы он привносится гидротермами.

Не меньший интерес представляет поведение в зонах современного минералообразования на Паужетке серебра, которое определено в гидротермально-измененных породах в количествах от 0,001 до 0,002%.

Есть все основания думать, что источником серебра являются термальные воды. Это же можно сказать об олове и ртути.

Ниже приводится сводная таблица распределения микроэлементов в гидротермально-измененных породах Паужетки и краткие данные о их поведении (табл. 32).

Т а б л и ц а 32

Содержание рассеянных элементов в гидротермально-измененных породах, определенных в 170 образцах

Компоненты	Минимальное количество	Максимальное количество	Определено	% встречаемости	Компоненты	Минимальное количество	Максимальное количество	Определено	% встречаемости
Be	0,001	0,001	11	6	Ga	0,001	0,03	142	87
Sc	0,001	0,006	107	64	Y	0,005	0,005	43	26
V	0,002	0,1	149	88	Mo	0,0005	0,005	11	6
Co	0,001	0,01	125	74	Ag	0,0001	0,001	28	16
Ni	0,001	0,013	121	71	Sn	0,001	0,001	4	2
Cu	0,001	0,01	97	57	Pb	0,0001	0,02	83	50
Zn	0,001	0,1	53	31	Sr	0,01	0,02	65	39

Л и т и й является одним из типичных элементов термальной воды и гидротермально-измененных пород Паужетки. В сухом остатке натрово-хлоридной воды (скв. 10) определено 0,1% лития.

В пещловых туфах с новообразованиями монтмориллонита и анальцима его содержание доходит до 0,01—0,05% (литий определен в 16 пробах из 31 анализированных). Литий прослежен в керне других скважин. Наиболее часто встречается в породах в интервале 50—125 м в количестве от 0,015 до 0,030% и в интервале 372—412 м.

Иногда литий обнаруживается на глубинах 100—190 м и совсем не встречается на глубине 256—372 м. В низкотемпературной скважине он чрезвычайно редок, причем совсем не определяется в пещловых туфах верхнего горизонта, где отсутствует современное минералообразование.

Наоборот, в высокотемпературной скв. 13, в интенсивно измененных породах и верхнего горизонта (8—50 м) литий определен. Можно считать, что литий поступает в породы из термальной воды.

Б е р и л л и й определен в гидротермально-измененных породах в количествах 0,001%, однако встречаемость редкая.

Какой-либо закономерности в приуроченности бериллия к литологическим горизонтам или к гидротермальным зонам не наблюдается.

С к а н д и й фиксируется почти во всех образцах пород всех скважин в количествах 0,001—0,005, близких кларку. Вероятно, типичен для развитых в районе вулканических пород. Однако в скв. 10 скандий в ряде образцов с глубины 16—45, где распространены пещловые монтмориллонитизированные туфы, не определяется. Не ясно, чем это вызвано; скандий отмечен в аналогичных породах других скважин и даже в свежих пещловых туфах (К-3).

С в и н е ц типичен для всех гидротермально-измененных пород, включая незатронутые минералообразованием пещловые туфы. Количество его (0,001%) остаются постоянными на всех глубинах и можно думать, что он является характерным для вулканических пород данного района.

О л о в о, в отличие от свинца, встречается чрезвычайно редко. Определено в количествах 0,001% только в породах зоны высокотемпературного минералообразования, особенно в скв. 13. В отличие от этого редок в породах скв. 6 и не обнаружен в скважине 3, вскрывшей низкотемпературные воды.

Г а л и й обычен для исследуемого района и встречается в количествах от 0,001 до 0,006%. Какой-либо закономерности в его распределении в измененных породах не улавливается. Является, вероятно, характерным для вулканогенных пород Паужетского района.

М о л и б д е н встречен в породах всех скважин в количествах 0,005—0,0005% независимо от температуры, глубины и литологии. Какой-либо закономерности в его распределении не наблюдается.

Ванадий обычен в количествах от 0,003 до 0,01%; в единичных случаях его содержание достигает 0,1%. Какой-либо закономерности в поведении его, в связи с вторичным минералообразованием, не намечается.

Медь также типична для всех пород Паужетского месторождения. Количества ее близкие (0,001 до 0,01) для всех пород, независимо от глубины взятия образца, температуры и литологии исходных пород.

Серебро встречено в количествах 0,0001% в 46 образцах из 170 — анализированных. В скв. 10, в керне с глубины 21,2 м определено 0,002% серебра.

Цинк отмечается во многих (50%) анализированных образцах во всех скважинах, на различных глубинах. Его содержания выдерживаются в пределах 0,010%. В образце из скв. 10 с глубины 21,4 м определено 0,1% цинка.

Кобальт и никель встречаются почти во всех пробах в количествах от 0,001 до 0,01%. Закономерностей в их распределении не наблюдается.

Стронций фиксируется в образцах в количествах от 0,01 до 0,03%.

Ртуть определена только в 3-х образцах из 170 — анализированных в скв. 6 на глубинах 254 м и 373 м, в воне агломератовых туфов с развитием в них ломонтита, адуляра и альбита. Содержание ее 0,0001%.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ

На Паужетском месторождении обнаружено 45 новообразованных минералов. Среди них наибольшим распространением пользуются цеолиты, глинистые минералы, полевые шпаты, карбонаты и хлориты.

Цеолиты	Хлориты	Группа эпидота
1. Ломонтит	15. Делессит	29. Эпидот
2. Анальцит (или вайрацит)	16. Пеннин	30. Пренит
3. Птилолит	17. Клинохлор	
4. Сколецит	Карбонаты	Другие минералы
5. Гейландит	18. Кальцит	31. Гематит
6. Томсонит	19. Анкерит	32. Магнетит
7. Шабазит	20. Сидерит	33. Мушкетовит
8. Десмин	Сульфаты	34. Сфен
9. Филлипсит	21. Гипс	35. Анатаз
Полевые шпаты	22. Ангидрит	36. Брукит
10. Адуляр	23. Алузит	37. Рутил
11. Альбит	Группа кварца	38. Апатит
Глинистые минералы	24. Кварц	39. Гиролит
12. Каолинит	25. Халцедон	40. Пирит
13. Монтмориллонит	26. Опал	41. Селадонит
14. Нонтронит	27. Тридимит	42. Гидрогематит
	28. Кристобалит	43. Гидросерицит
		44. Гидробиотит
		45. Актинолит

Цеолиты

Ломонтит на Паужетском месторождении является самым распространенным из всех вторичных минералов. Образуется по компонентам пород всех литологических типов в прожилках и пустотах на большой площади и прослеживается от поверхности на глубину до 800 м. Распределение его в разрезах контролируется в основном температурой и в меньшей степени зависит от глубинности. Максимальное развитие ломонтита приурочено к обводненным агломератовым туфам дацита. В низкотемпературных скважинах по периферии месторождения (скв. 3) ломонтит до глубины 300 м не встречен; температура в скважине на всей глубине ниже 100°. В высокотемпературных скважинах ломонтит определяется вблизи самой поверх-

ности. Ниже приведены глубины появления ломонтита по скважинам (табл. 33).

Т а б л и ц а 33

Глубина появления ломонтита

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-7	К-8	К-9
Глубина, м	53	141	135	112	135	84
Температура, °С	140	150	160—170	170—180	170	160—170

Т а б л и ц а 33 (окончание)

№ скв.	К-10	К-11	К-12	К-13	К-14	К-20	К-21
Глубина, м	167	149	57	47	61	108	127
Температура, °С	170	160	170—180	160	170—180	120	100

Ломонтит развивается по плагиоклазу, цветным минералам, цементу, стеклу, в трещинках и пустотах. В обводненных агломератовых туфах дацита ломонтит полностью замещает цемент, тогда количество его достигает 50—60% (рис. 24).

Ломонтит снежно-белого цвета встречается в виде хорошо индивидуализированных образований и лапчатых зерен. Имеет спайность в двух



Рис. 24. Замещение плагиоклаза ломонтитом. ×

направлениях под углом 90° , положительное удлинение, угол погасания $C:Ng$ от 27 до 30° . Преломление ломонтита остается близким в образцах с различных глубин: $Ng = 1,524$, $Np = 1,513$, $Ng - Np = 0,011$. Термограмма и рентгенограмма ломонтита соответствуют эталонным. Судя по химическому анализу, ломонтит представляет собой чистую кальциевую разность.

Анальцим среди цеолитов по распространенности уступает только ломонтиту. Количество его в некоторых шлифах достигает 20% . Развитие анальцима контролируется в основном температурой и меньше зависит от глубинности. В низкотемпературных скважинах анальцим является преобладающим цеолитом, но определяется на тех глубинах, где температура не ниже 50° . В скв. 3 до глубины 60 м, там, где температура ниже 50° , новообразованных минералов нет; редкие мельчайшие зернышки анальцима появляются лишь с глубины 66 м. Анальцим в низкотемпературных скважинах развивается по всем породам дацитового и андезитово-дацитового состава, независимо от их фильтрационных свойств. В высокотемпературных скважинах он развит только в верхних горизонтах разреза, в породах с пониженными фильтрационными свойствами (пепловых туфах). Температурный интервал образования анальцима $50-100^\circ$. Минимальная глубина появления анальцима — 8 м, максимальная глубина его распространения — 300 м (табл. 34).

Т а б л и ц а 34

Глубины появления анальцима по скважинам

№ скв.	К-1	К-3	К-4	К-7	К-8	К-9	К-10	К-11	К-12	К-14	К-20	К-21
Глубина, м	8	66	69	12	16	11	66	10	11	21	26	66
Температура, $^\circ\text{C}$	50	50	160	100	120	100	110	100	130	160	—	—

Анальцим изотропный, $N = 1,486$.

Наиболее часто анальцим приурочен к зоне аргиллизации и ассоциирует с монтмориллонитом, при этом монтмориллонит замещает стекло и цемент, а анальцим развивается в виде друзовых образований в порах и пустотах в пемзе, цементе, а также на границах зерен плагиоклаза и цемента; плагиоклаз при этом остается свежим. Реже анальцим замещает стекло и цемент. Несмотря на широкое развитие анальцима порода не обогащается натрием. Анальцим совместно с монтмориллонитом кристаллизуется в условиях слабощелочных, близких к нейтральным, поровых растворов (рис. 25, 26) при температурах $50-100^\circ$ (?).

В более глубоких горизонтах высокотемпературных скважин (190°) анальцим встречается, но редок и более сходен с вайрацитом.

Птилолит является третьим по распространенности цеолитом. Наиболее часто он встречается в приповерхностной зоне аргиллизации, ассоциируя с монтмориллонитом и анальцимом. Граница распространения птилолита определяется температурой: в высокотемпературных участках месторождения птилолит встречается вблизи поверхности, а в низкотемпературных скважинах фиксируется с глубины 300 м (скв. 3). В зоне аргиллизации и цеолитизации птилолит развивается в низах зоны, где температура приближается к 100° . В зависимости от глубинности стоградусной изотермы верхняя граница появления птилолита от 8 до 300 м (табл. 35).

Птилолит в виде споньевидных, тонкоигольчатых сферолитовых агрегатов развивается в центральных частях пор пемзы и цемента с друзовым

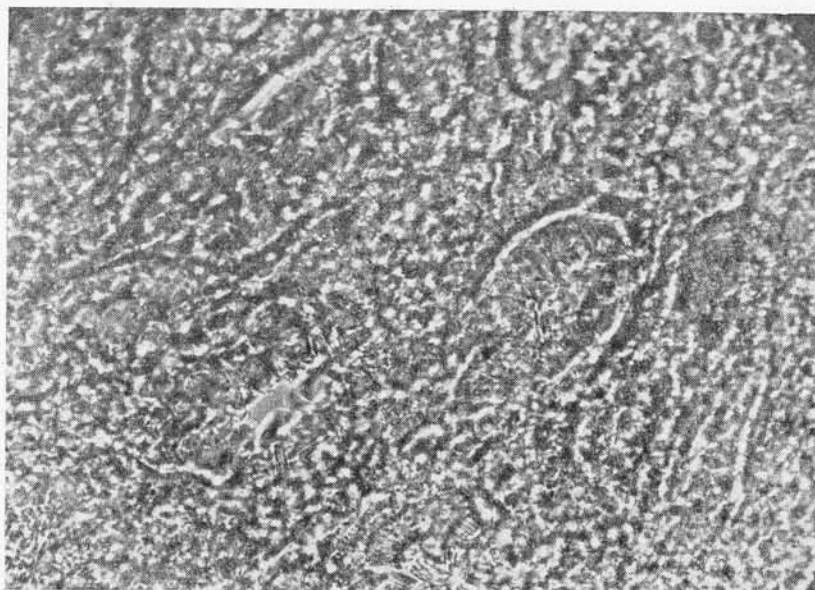


Рис. 25. Анальцим в пустотах пемзы, + николи. $\times 250$

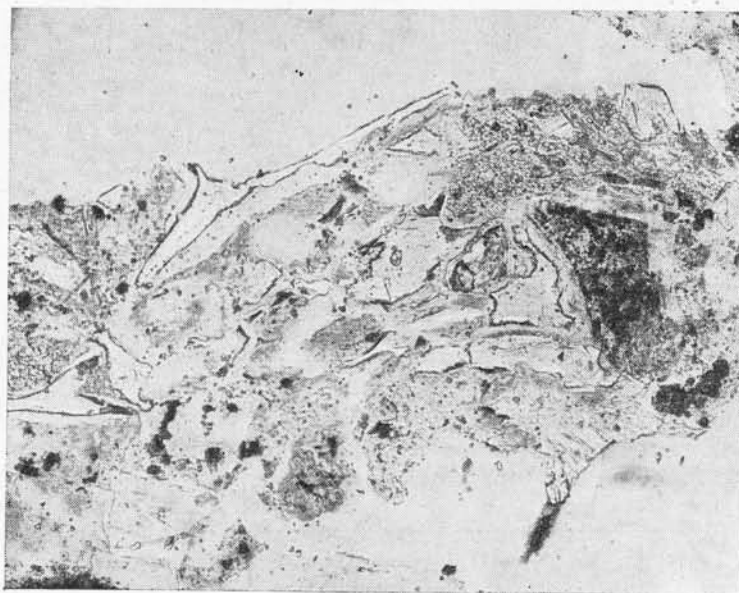


Рис. 26. Замещение цемента туфа анальцимом. $\times 250$

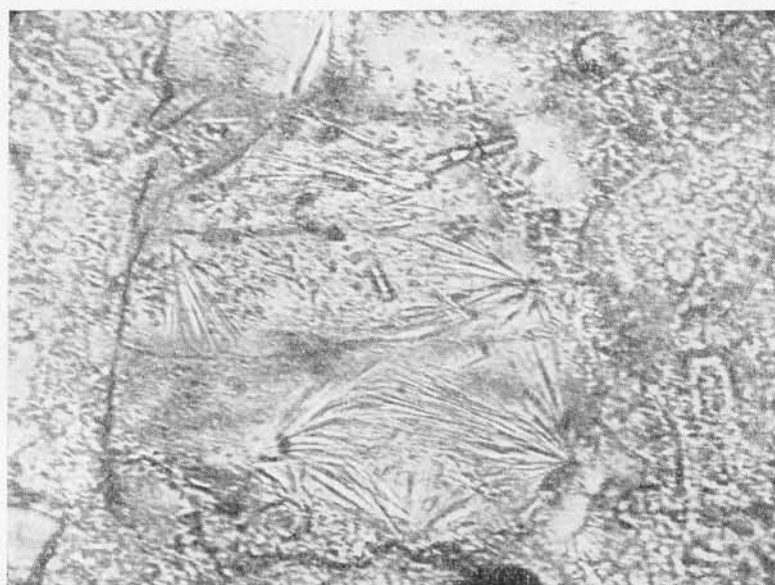


Рис. 27. Птилолит в пустотах туфа. $\times 250$

анальцимом, реже птилолит замещает стекло и цемент (рис. 27). Преломление птилолита 1,475, двупреломление 0,002, прямое погасание, положительное удлинение, большой угол оптических осей. Этот минерал сходен с птилолитом месторождения Вайракей (Новая Зеландия). Он образуется под воздействием поровых растворов со слабо щелочной, близкой к нейтральной реакцией при температуре 100—160°.

Таблица 35

Верхняя граница появления птилолита в скважинах

№ скв.	К-1	К-3	К-4	К-7	К-8	К-9	К-11	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	79	312	116	40	61	11	149	8	21	68	Нет
Температура, °С	120	100	160—170	100	160	100	160	120	160	—	—

Склецит редок. Обнаружен только в гидротермально-измененных породах высокотемпературных скважин, в самых верхних горизонтах зоны аргиллизации и цеолитизации (скв. 10, 11, 12, 13), табл. 36. Им обрастают

Таблица 36

Верхняя граница появления скелецита в скважинах

№ скв.	К-10	К-11	К-12	К-13
Глубина, м	49,2	10,0	8,0	10,0
Температура, °С	100	50—70	100	100

в виде венчиков призматических кристаллов обломки минералов и пород, которые замещены золотистым монтмориллонитом и гидробититом. Кроме того, сколецит нарастает на стенках трещин и пустот в форме друзовых образований.

Для сколецита характерны правильные призматические очертания. Это бесцветный, прозрачный минерал с отрицательным удлинением, оптически отрицательный. Угол угасания $C:Ng = 8^\circ$, $Ng - Np = 0,008$, преломление около 1,512. Сколецит образуется под воздействием на породы щелочных натрово-хлоридных растворов при температуре 100° и выше в зоне существования жидкой и парообразной фаз воды.

Томсонит редок. Встречен только в скважинах Р-1, 8, 12 (табл. 37). В скв. 8 на глубине 125 м он в форме сферолитов развивается в пустотах и

Таблица 37

Верхняя граница появления томсонита
в скважинах

№ скв.	Р-1	К-8	К-14
Глубина, м	317,1	125,0	107,0
Температура, °С	17,0	170	180

по цементу. Минерал оптически положительный, имеет прямое угасание, положительное удлинение. В скв. Р-1 на глубине 317 м томсонит в виде лапчатых и радиально-лучистых агрегатов образуется по цементу. Он бесцветный, преломление несколько меньше 1,54, прямое угасание, оптический знак положительный, $2V = 45^\circ$, удлинение положительное.

Шабазит редок. Встречен в скв. 9 на глубине 14,5 м в виде ромбоэдрических кристаллов в порах и прожилках, иногда он замещает плагиоклаз (табл. 38). Минерал бесцветный, прозрачный, оптически отрицательный, с отрицательным удлинением, $Ng - Np = 0,005$. В скв. 13 на глубине 93 м шабазит образуется в форме ромбоздров совместно с ломонитом. Оптически положительный, $Ng - Np = 0,005$, спайность хорошая по ромбоздру.

Таблица 38

Верхняя граница появления шабазита
в скважинах

№ скв.	К-9	К-13
Глубина, м	14,5	93,17
Температура, °С	100	170—180

Филлипсит еще более редок. Встречен в роторной скважине на глубине 53,4 м, где он совместно с ломонитом развивается по плагиоклазу и в пустотах. Минерал имеет таблитчатую форму, угол угасания $C:Ng = 38^\circ$, положительное удлинение, $Ng - Np = 0,007-0,008$. На глубине 416 м филлипсит образуется вдоль трещинок и имеет $Ng - Np = 0,010$, положительный знак, угол оптических осей большой, положительное удлинение и $C:Ng = 30^\circ$.

Десмин (?) очень редок. Встречен в слабо измененных витрокристаллокластических туфах дацита на глубине 350 м в центральных частях зерен плагиоклаза в форме табличек. Оптический знак у него отрицатель-

ный, угол оптических осей равен 45° , $CNg = 25$, $Ng - Np = 0,11$, удлинение отрицательное.

В распределении цеолитов наблюдается зональность, обусловленная в основном температурным фактором. К анальциму на глубине присоединяется птилолит, который еще глубже сменяется ломонитом. В сильно прогретых участках месторождения зона анальцима и птилолита не фиксируется, и ломонит появляется вблизи поверхности, распространяясь на значительные глубины. В распределении других цеолитов закономерностей не проявляется.

Группа полевых шпатов

Адуляр и альбит являются типичными вторичными образованиями. Распространение полевых шпатов контролируется температурой, а преимущественное развитие адуляра или альбита глубинностью. Они оба ассоциируют в основном с ломонитом и кальцитом. Адуляр тяготеет к верхней части зоны цеолитизации и фельдшпатизации, альбит — к нижней. В промежуточной зоне присутствуют одновременно и тот и другой (рис. 28).

Адуляр развивается в пустотах выщелачивания плагиоклаза в виде скелетных кристаллов или каемок, а также образует псевдоморфозы по плагиоклазу часто совместно с кальцитом. Редко кристаллизуется в жилках. Границы появления адуляра определяются прогретостью пород: в высокотемпературных скважинах максимальное развитие адуляра отмечается в агломератовых туфах, под толщей пепловых туфов, обладающих плохими фильтрационными свойствами на глубинах, где температура выше 150° . В низкотемпературных скважинах в аналогичных агломератовых туфах адуляра нет (табл. 39).

Т а б л и ц а 39

Верхняя граница появления адуляра в скважинах

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-9	К-10	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м . . .	53,4	141	202,0	30,0	301,5	57,0	47,65	97,90	99	108
Температура, °С	140	150	160—170	130	180	170—180	160	180	—	—

Адуляр водянопрозрачный, в форме ромбоэдров и скелетных кристаллов, оптически отрицательный, угол оптических осей от 35 до 50° , $Ng = 1,519$, $Ng - Np = 0,007$.

А л ь б и т при детальном изучении керна многочисленных скважин оказался более распространенным минералом, чем это представлялось ранее (Набоко, 1963). Он появляется на некоторой глубине совместно с адуляром, постепенно его полностью вытесняя (табл. 40).

Развивается он по плагиоклазу, в пустотах выщелачивания последнего совместно с кальцитом и ломонитом или без них. Судя по оптическим свойствам, альбит содержит от 2 до 8% анортитовой молекулы [угол симметричного угасания в зоне [(010) $15-18^\circ$]. Альбит оптически положительный, угол оптических осей небольшой — $45-50^\circ$, $Ng = 1,526$, $Ng - Np = 0,010$.

Полевые шпаты образуются под воздействием поровых растворов при температурах $160-190^\circ$. Альбит развивается в более глубоких частях разреза под зоной парообразования в условиях растворенной углекислоты, адуляр — в приповерхностной зоне парообразования и ощелачивания под

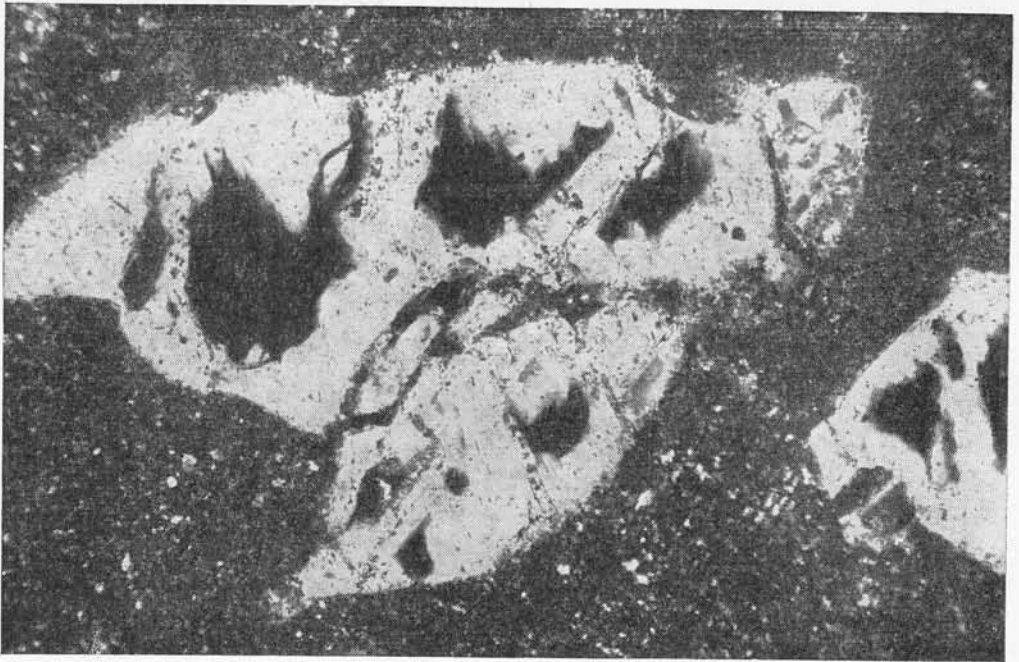


Рис. 28. Скелетные кристаллы адуляра. $\times 70$. Скв. 13. Глубина 105 м

воздействием хлоридных растворов при дегазации углекислоты (рН около 10). Образование адуляра протекает в условиях привноса растворами калия в породы, вероятно, за счет уменьшения растворимости хлорида калия при резком падении температуры в зоне парообразования.

Выделение альбита происходит без видимого привноса за счет натрия плагноклаза, кальций при этом частично поступает в раствор, о чем свидетельствует дырчатый характер псевдоморфоз альбита по плагноклазу, и расходуется на образование ломонтита и кальцита.

Распределение адуляра и альбита контролируется глубиной процесса: адуляр тяготеет к верхам зоны цеолитизации и фельдшпатизации, альбит — к низам. В большинстве скважин проявляется явно выраженная

Таблица 40

Верхняя граница появления альбита в скважинах

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-7	К-8	К-9	К-10
Глубина, м . . .	263,6	141,0	224,0	170,5	183,0	91,0	272,0
Температура, °С	170—180	150	160—170	—	180	160—170	—

Таблица 40 (окончание)

№ скв.	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м . . .	180,9	64,0	162,3	124,4	112	108
Температура, °С	160—170	170—180	180—190	180—190	—	—

зональность в их распределении (сверху вниз): адуляр, адуляр + альбит, альбит. В некоторых скважинах адуляр и альбит появляются совместно уже в самих верхних горизонтах зоны цеолитизации и фельдшпатизации; в редких случаях адуляра нет, и по плагиоклазу развивается только альбит. В керне скважин, вскрывших низкотемпературные воды, адуляр и альбит отсутствуют.

Глинистые минералы из группы монтмориллонита-нонтронита

Монтмориллонит является одним из наиболее распространенных глинистых минералов верхней зоны аргиллизации. Встречено три разновидности глинистых минералов из этой группы: в проходящем свете золотисто-желтый монтмориллонит, зеленый, криптокристаллический и чешуйчатый и, наконец, аналогичной структуры — фиолетовый.

Золотисто-желтый монтмориллонит развит в самых верхах зоны аргиллизации обычно в высокотемпературных скважинах. Он образуется по плагиоклазу и цементу в виде чешуйчатых и червеобразных выделений. Золотистый монтмориллонит ассоциирует со сколецитом и гидробитомом, глубины появления и температура его развития приведены ниже (табл. 41).

Т а б л и ц а 41

Верхняя граница появления монтмориллонита (золотистого) в скважинах

№ скв.	К-1	К-3	К-4	К-8	К-9	К-12	К-13
Глубина, м . . .	21,1	142,0	34,0	32,0	11,0	8,0	8,0
Температура, °С	50	50	150	140	100	120	100

Золотистый чешуйчатый монтмориллонит имеет прямое погасание, положительное удлинение, $N_g = 1,515 \pm 0,002$, $N_p = 1,507 \pm 0,002$, $N_g - N_p = 0,008$. Совместно с золотисто-желтым монтмориллонитом в высокотемпературных скважинах на некоторой глубине появляется бурый монтмориллонит такой же структуры, но с более высоким показателем преломления (1,555). В других скважинах золотисто-желтый монтмориллонит постепенно переходит в зеленый, резко отличающийся от первого повышенным преломлением.

В большинстве скважин в зоне аргиллитизации и цеолитизации развит только зеленый чешуйчатый и криптокристаллический монтмориллонит (табл. 42). В этом случае он ассоциирует с анальцимом и птилолитом. Глубинность его образования контролируется температурой — он развивается при температуре выше 50° . В низкотемпературной скв. 3 до глубины 170 м монтмориллонита нет, так как температура не превышает 50° . Таким образом, можно считать, что температура выше 50° наиболее благоприятна для образования монтмориллонита. Монтмориллонит замещает преимущественно кислое вулканическое стекло, пепловые частички и стенки пемзы в результате воздействия поровых слабощелочных, близких к нейтральным, натриево-хлоридных растворов (рис. 29). Описанный зеленый монтмориллонит имеет прямое погасание, положительное удлинение, $N_g = 1,570$, $N_g - N_p = 0,020$, чаще 0,013, плеохроизм отсутствует, иногда встречаются крупночешуйчатые разновидности.

В тесном сочетании с зеленым монтмориллонитом развиваются чешуйчатые, сферолитовые и криптокристаллические образования фиолетового минерала, сходного по структуре с первым. Наблюдаются постепенные переходы от зеленых к фиолетовым разновидностям, преломление и двупреломление у фиолетового чешуйчатого минерала выше, чем у зеленого монтмо-



Рис. 29. Монтмориллонит замещает стекло пемзы. $\times 250$

риллонита. В этих образцах определяется литий и можно думать, что он входит в указанный минерал.

Монтмориллонит развивается почти на всех глубинах в широком температурном интервале, однако наиболее устойчив он при температурах $50-100^\circ$ в приповерхностной зоне и образуется под воздействием поровых слабощелочных растворов натрово-хлоридного состава.

Кальцит. Максимальное развитие кальцита приурочено к зоне пропилитизации, развивающейся по туфам андезита и андезито-базальта (рис. 30), однако он также встречается в зоне цеолитизации и фельдшпатизации. Для зоны монтмориллонитизации он не характерен. Верхняя граница распространения кальцита варьирует в широких пределах от 11 до 160 м, температура образования его не ниже 100° , поэтому в низкотемпературной скв. 3 он не встречен (табл. 43).

Кварц. Новообразования кварца широко представлены в зонах цеолитизации — фельдшпатизации и пропилитизации. Для приповерхностной зоны аргиллизации и цеолитизации кварц не характерен. В отдельных участках дробления развитие кварца несколько интенсивное, что приводит к образованию плотных кварцевых яшмовидных пород. В зависимости от того, в какой зоне кристаллизуется кварц, он ассоциирует с адуляром или ломонитом, или кальцитом. Он развивается по компонентам пород, а также в полостях и трещинках при температурах $100-200^\circ$ и на различных глубинах (табл. 44).

Сфен. Новообразования сфена имеют широкое развитие в зонах цеолитизации — фельдшпатизации и пропилитизации. В зоне аргиллитизации сфен не встречается. Распространение его контролируется в основном температурой, а не глубиной; он не обнаруживается в низкотемпературной скв. 3 до глубины 300 м (забой), там, где температура ниже 100° . В высокотемпературных скважинах он отмечен до глубины 64 м и прослеживается до глубины 800 м (табл. 45).

Сфен развивается наиболее часто по ильмениту и вокруг него на некотором расстоянии, а также ассоциирует с кальцитом и хлоритом, развивающимися по авгиту. Стекло и цемент пород, замещенные вторичными

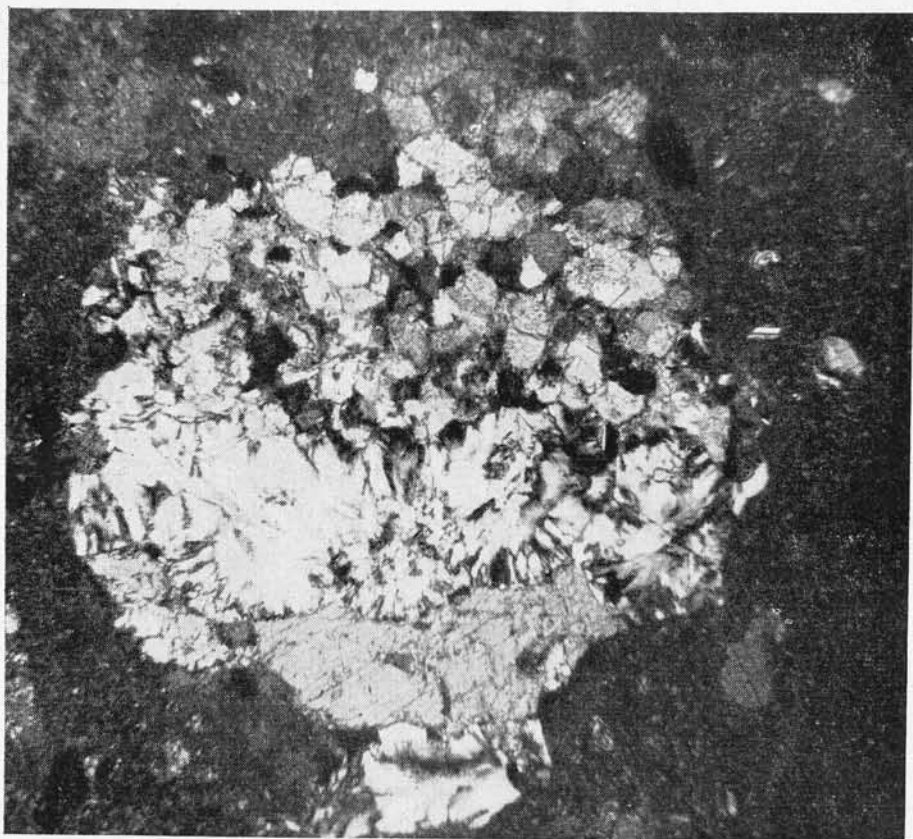


Рис. 30. Заполнение полости в туфе кальцитом, ломонтитом и халцедоном. $\times 70$. Скв. Р-1. Глубина 150 м

минералами — ломонтитом, кальцитом, хлоритом — часто насыщены мелкими сферолитами сфена и комочками лейкоксена. Типичными являются скопления зерен сфена на границах метасоматических жеод и жилков. В сравнении со свежими разностями гидротермально-измененные породы резко обогащены сфеном, хотя, судя по химическим анализам, не отмечается привноса титана. Образование титанистых минералов происходит за счет титана, заимствованного из стекла, цемента и минералов.

Апатит также является современным гидротермальным минералом и встречается в форме бочонковидных, гексагональных или длиннопризматических зерен в ассоциации с адуляром, альбитом, кварцем, кальцитом, ломонтитом, которые замещают породы во всех метасоматических зонах. Однако в верхней монтмориллонитовой зоне апатит присутствует намного реже, чем в нижележащих зонах. Кристаллизация его контролируется в основном температурой, а не глубиной. В высокотемпературных скважинах верхняя граница его появления 30 м; распространяется он до глубины 800 м (табл. 46).

Количество апатита в гидротермально-измененных породах резко повышенное по сравнению с исходными породами, однако, судя по химическим анализам, привноса фосфора не происходило. Фосфор на образование апатита заимствуется из стекла, цемента и минералов туфа. В отличие от сфена, который вытесняется на периферию замещенных участков, апатит остается в их центральных частях.

Верхняя граница появления монтмориллонита в скважинах (зеленого)

Т а б л и ц а 42

№ скв.	Р-1	К-1	К-3	К-4	К-7	К-8	К-9	К-10	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	53,4	21,1	176,5	34,0	12,25—13,0	32,0	11,0	49,2	10,0	8,0	22,3	21,5	20	21
Температура, °С	150	50	50	150	100	140	100	100	100	120	120	160	25	17

Верхняя граница появления кальцита в скважинах

Т а б л и ц а 43

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-7	К-8	К-9	К-10	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м . . .	89,1—97,9	21,1	158,0	134,0	135,0	11,0	129,0	149,2	64,0	47,65	30,65	133	66
Температура, °С	160	100	160—170	180	170	100	170	160	170—180	160	160—170	—	—

Верхняя граница появления кварца в скважинах

Т а б л и ц а 44

№ скв.	Р-1	К-3	К-7	К-8	К-9	К-10	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	158	250	112	244	14	320	182	191	68	21	113	112
Температура, °С	170—180	100	170—180	170—180	100	180	160—170	180—190	170	100—150	—	—

Верхняя граница появления сфена в скважинах

Т а б л и ц а 45

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-7	К-8	К-10	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	65	79	148	112	233	287	149	64	69	100	108	107
Температура, °С . . .	150	130	160—170	170—180	170—180	180	160	170—180	170	180	—	—

Верхняя граница появления апатита в скважинах

№ скв.	Р-1	К-1	К-4	К-11	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	53	79	172	39	67	30	127	66
Температура, °С	140	130	160—170	150	170	160—170	—	—

Эпидот. Нахождение эпидота в современных гидротермально-измененных породах на небольших глубинах представляет большой интерес. Судя по взаимоотношениям с другими минералами, он является новообразованным. Он в виде мелких зерен и розеток фишанково-зеленого цвета с обычными для него оптическими свойствами развивается совместно с ломонитом, кальцитом, кварцем и хлоритом по цементу туфа, в обломках лавы и туфа, по плагноклазу и авгиту (рис. 31). Он встречен на глубинах от 70 до 800 м в четвертичных и в третичных туфах; количество его с глубиной не увеличивается. Как правило, эпидот обнаруживается в керне высокотемпературных скважин; для низкотемпературных скважин он не типичен (табл. 47).

Т а б л и ц а 47

Верхняя граница появления эпидота в скважинах

№ скв.	Р-1	К-8	К-9	К-11	К-12	К-13	К-14	20	21
Глубина, м	71	125	183	182	93	73	71	25	107
Температура, °С	150	170	180	160—170	180	170	150	—	—

Пренит встречается так же, как и эпидот в зонах цеолитизации — фельдшпатизации и пропилитизации (рис. 32). Верхняя граница его появления 120 м — это несколько глубже, чем для эпидота, что является необычным. Распространяется он до глубины 500 м (табл. 48). Он ассоциирует с кальцитом, кварцем, ломонитом, развиваясь с указанными минералами не только по обломкам лавы, минералов, но и по цементу, а также в пустотах туфа.

Т а б л и ц а 48

Верхние границы появления пренита в скважинах

№ скв.	Р-1	К-8	К-9	К-11	К-14	К-20	К-21
Глубина, м	120	345,0	307,5	201,0	124,4	—	112
Температура, °С	180	170—180	180—190	160—170	180—190	—	—

Таким образом, в распределении минералов по зонам наблюдается явная закономерность. Приуроченность цеолитов к тем или иным горизонтам контролируется в основном температурой (рис. 33, 34). Анальцит развивается по слабопрогретым породам (50—100°), птилолит — в участках большего прогрета (100—150°) и, наконец, ломонит — при еще большей температуре (150—160°). Поскольку прогрев пород в центральной части месторождения определяется фильтрационными их свойствами, постольку анальцит в основном развит в неплывых, алевро-пелитовых и

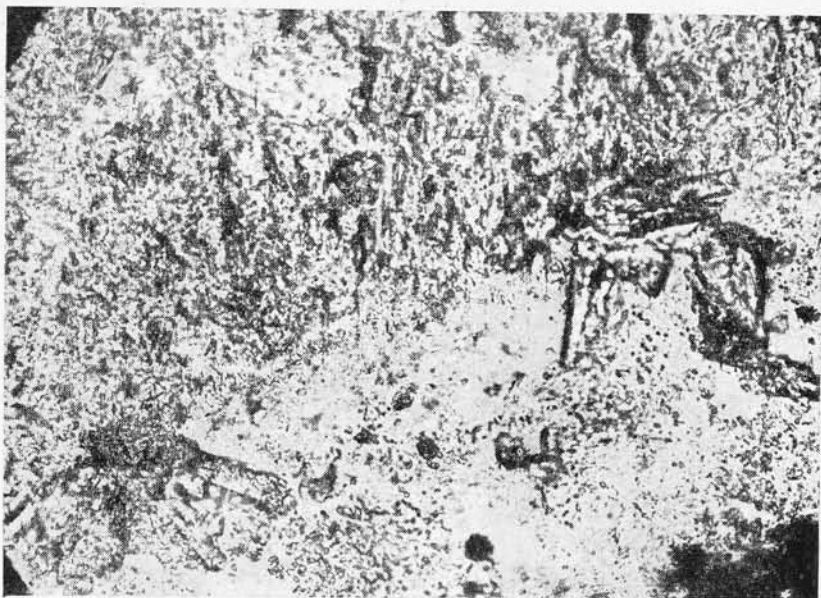


Рис. 31. Эпидот в измененном туфе. $\times 250$. Скв. К-20. Глубина 105 м



Рис. 32. Пренит в измененном туфе. $\times 70$

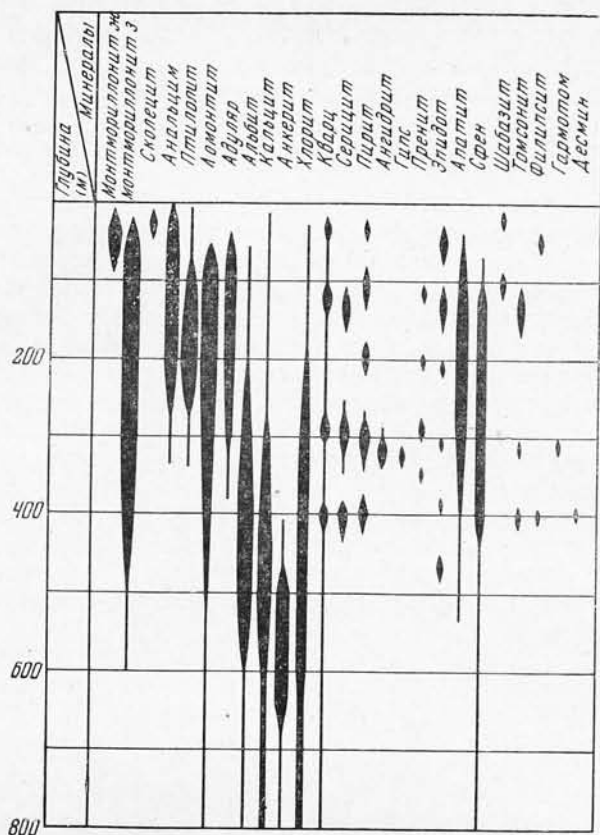


Рис. 33. Распределение вторичных минералов по глубинам на Паужетском месторождении

Зона пропитации	Зона цеолитизации и фельдspathизации			Зона аргиллизации и цеолитизации		Зона кислотного выщелачивания	Зоны	
	Ломонтит + альбит	Ломонтит + адуляр + альбит	Ломонтит + адуляр	Монтмориллонит-ангидритовая зона	Монтмориллонит-ангидритовая зона		Ассоциация минер.	Минералы
								Каолинит
								Опал
								Пирит I
								Лимонит
								Монтмориллонит
								Скалецит
								Аналецим
								Птилолит
								Монтмориллонит, Анконтмориллонит
								Ломонтит
								Апатит
								Кварц
								Адуляр
								Альбит
								Сфен
								Кальцит
								Анкерит
								Хлорит
								Серицит
								Пирит II
								Ангидрит
								Гипс
								Пренцит
								Эпидот
								Шабазит

Рис. 34. Распределение вторичных минералов по гидротермальным зонам

алевро-псаммитовых туфах дацита верхней части разреза, а ломонтит — в водонасыщенных агломератовых туфах андезито-дацита. Иными словами, в центральной части месторождения проявляется вертикальная зональность в распределении цеолитов (сверху вниз): анальцит, анальцит + пиллолит, ломонтит. В низкотемпературных скважинах (3) ломонтит не обнаружен.

Распределение калишпата (адуляра) и альбита контролируется в основном глубиной, определяющей поведение углекислоты. Альбит образуется ниже уровня вскипания и дегазации растворов в условиях растворенной углекислоты за счет деанортизации плагиоклаза без приноса натрия. Калишпатизация происходит в зоне вскипания, при удалении углекислоты из раствора, в ошелоченных хлоридных растворах с приносом в породу калия при понижении температуры.

Таким образом, в распределении полевых шпатов проявляется вертикальная зональность со сменой на глубине адуляра альбитом. В распределении глинистых минералов основным фактором является кислотность растворов, которая в свою очередь контролируется глубиной. Вблизи поверхности, в условиях кислых сульфатных растворов, образовавшихся при окислении сероводорода, образуется каолинит, глубже, при наличии слабо щелочных растворов, развиваются минералы группы монтмориллонита. Максимальное развитие монтмориллонита приурочено к плотным пепловым туфам дацита, слабо прогретым.

Часть вторая

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ
РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Опытно-разведочное роторное бурение

Буровая установка. Бурение первой опытно-разведочной роторной скважины на Паужетском месторождении высокотермальных вод осуществлялось с помощью комплекта роторного оборудования марки УЗТМ с четырехдизельной установкой (лебедка У2-4-3, У7-520-2, насосы У8-3, дизели В2-300, вышка ВМ-41 м).

Роторный способ бурения, применяемый при разведке нефтяных и газовых месторождений, был выбран, учитывая максимальное обеспечение безопасности ведения работ, поскольку неизвестно было, какие температуры могут быть встречены на глубине, каково пластовое давление в водопосных горизонтах термальных вод. Кроме того, роторные установки с успехом применялись уже в течение ряда лет для бурения скважин на месторождениях термальных вод и пара за рубежом (Новая Зеландия, Италия).

В целях максимального обеспечения безопасности бурения техническим проектом строительства опытно-разведочной роторной скважины предусматривалась установка вращающегося превентера. Это заставило поднять всю буровую установку на 6 м над поверхностью земли. Фундаменты буровой были выполнены металлоконструкциями из обсадных труб (8-10-12-дюймовые). Основания труб были забетонированы на глубину до 2 м.

Конструкция скважины. Фактическая конструкция скв. Р-1 выглядит следующим образом:

0—3 м — шахтное направление 20 дюймов;

0—29,3 м — кондуктор 16 дюймов;

0—121 м — кондуктор 12 дюймов;

0—300 м — обсадная колонна 8 дюймов;

300—800 м — бурение без обсадки; диаметр скважины $7\frac{3}{4}$ дюйма.

Все обсадные колонны цементировались до устья. При цементировании использовались насосы буровой установки; приготовление цементного раствора осуществлялось при помощи глиномешалки.

Противовыбросное оборудование. В связи с тем, что вращающийся превентер изыскать не удалось, скважина до глубины 30 м бурилась вообще без превентера, а после спуска и цементажки направления дальнейшее бурение велось с использованием двух обычных плашечных превентеров, применяемых при бурении на нефть и газ.

При бурении под кондуктор 12 дюймов был установлен один превентер 16 дюймов с плашками под бурильные трубы 5 дюймов, снабженными термостойкими резиновыми уплотнениями, а при бурении под обсадную колонну 8 дюймов были установлены два превентера 12 дюймов. После спуска и цементажки обсадной колонны превентеры 12 дюймов были заменены на плашечные превентеры 8 дюймов.

Буровой инструмент. Бурение скв. Р-1 до глубины 30 м велось трехшарошечным долотом, а с глубины 30 м и до конца (т. е. до глубины 800 м) — колонковыми долотами СДК-1 № 12 — № 8. Перед обсадкой скважины производилось расширение ствола трехшарошечным долотом.

При бурении до глубины 300 м использовались бурильные трубы \varnothing 5 дюйма, а с глубины 300 м — \varnothing 4 дюйма.

Режим бурения. Проводка скважины осуществлялась при соблюдении следующего режима бурения: давление на долото — 3—5 т, число оборотов ротора — 65—90 об/мин, производительность насосов — 1080—1200 л/мин.

В целях изучения геологического разреза участка бурение велось со сплошным отбором керна с применением колонковых долот. В процессе бурения производилось поинтервальное гидрогеологическое опробование скважины. На каждое опробование затрачивалось 10—16 бригадо-смен (всего проведено 5 поинтервальных опробований).

Промывочная жидкость. В качестве промывочной жидкости использовался глинистый раствор, приготовляемый из местной глины и имеющий после химической обработки УЩР следующие параметры: плотность — 1,18—1,25 г/см³, вязкость — 25—30 сек, содержание песка — 1—1,5%, фильтрация — 20—25 см³ за 30 мин.

Для охлаждения раствора при бурении была предусмотрена удлиненная желобная система протяженностью около 45 м и запасной амбар-охладитель с площадью охлаждения около 50 м². Для очистки раствора от шлама было установлено несколько отстойников.

Несмотря на то, что при бурении первой опытно-разведочной роторной скважины не произошло ни одного внезапного выброса, проводка ее осуществлялась в специфических условиях.

В процессе бурения скважины температура выходящего раствора возрастала порой до 90°С, и даже удлиненная желобная система не могла обеспечить достаточно эффективного охлаждения глинистого раствора (разница температур входящего и выходящего раствора иногда не превышала 5—7°С). В таких случаях в скважину закачивался свежий холодный раствор, а выходящий из скважины перегретый раствор сливался в запасной амбар-охладитель.

От воздействия высоких температур глинистый раствор резко ухудшал свои качества, подвергался коагуляции, сильно густел, увеличивалась водоотдача. Для уменьшения водоотдачи раствора приходилось производить дополнительную обработку его углекислотным реагентом. Снижение вязкости достигалось разбавлением глинистого раствора водой, что в свою очередь способствовало повышению водоотдачи.

Наибольшие затруднения возникали при возобновлении бурения после гидрогеологических исследований. В этих случаях, как правило, отмечалась интенсивная потеря промывочной жидкости, что вынуждало проводить работы по тампонажу и восстановлению глинистой корки по всему необсаженному стволу скважины. Выполнение этих работ в значительной мере снижало скорость проводки скважины.

Всего на бурение скважины с учетом работ по монтажу и обустройству было затрачено полтора года.

Структурно-картировочное и поисково-разведочное колонковое бурение

Буровая установка. Бурение структурно-картировочных и поисково-разведочных скважин на Паужетском месторождении высокотермальных вод осуществлялось с помощью станков колонкового бурения ЗИФ-300 и ЗИФ-650А.

В работе постоянно находились два станка. Станком ЗИФ-300 были пробурены скв. 1, 3, 5, 7, 9, 10, 12. Впоследствии он был заменен вторым станком ЗИФ-65А. Буровые агрегаты полностью монтировались на саях из бурильных и обсадных труб \varnothing 5—6 дюймов. На этих же саях сооружался досчатый или щитовый тепляк-сарай. Копер-тренога высотой 15 м

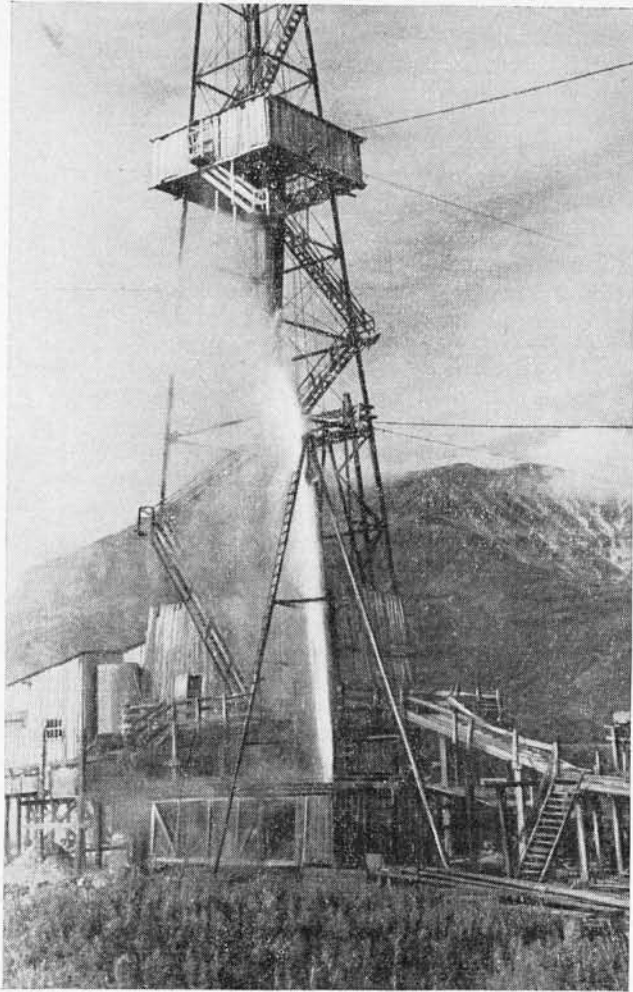


Рис. 35. Выпуск пароводяной смеси из скв. К-2 — колонкового дублера роторной скважины

Фото М. П. Флоренского

изготавливался из того же материала, что и сани (рис. 35). В целях предотвращения травмирования верхового рабочего в случае внезапного выброса пароводяной смеси бурение осуществлялось без верхового рабочего с выносом бурового снаряда на мостки, что обусловило и конструкцию копра. Буровая установка и копер перевозились тракторами, первая — в собранном виде, второй — в разобранном.

Конструкция скважин. Глубина структурно-картировочных и поисково-разведочных скважин, как отмечалось выше, не превышала 489 м. Конечный диаметр большинства из них составляет 112 мм, и лишь у скв. 1, 15 и 16 он равен 91 мм.

Перед забуркой скважины проходилась шурф размером $1 \times 1 \times 1,5$ м для установки направляющей трубы и для более надежного закрепления устья скважины при последующем цементаже обсадных колонн.

До глубины 15—21 м (в редких случаях до 5—8 м) скважина бурилась ребристой коронкой $\varnothing 225$ мм под направлением $\varnothing 8$ дюймов, которым полностью перекрывались аллювиальные валунно-галечниковые, а также

другие рыхлые отложения. Перед обсадкой производилась проработка скважины трехшарошечным долотом $\varnothing 9\frac{3}{4}$ дюйма, и спускалось направление $\varnothing 8$ дюйма с цементированием его до устья скважины.

В первых скважинах бурение под кондуктор $\varnothing 146$ мм велось ребристой коронкой, $\varnothing 152/168$ мм до глубины 20—25 м, а в последующих до 40—60 м. Кондуктор, который также цементировался до устья скважины, предназначался для предотвращения проникновения холодных грунтовых вод верхних горизонтов в зону термальных вод, а также возможного прорыва воды и пара около скважины в приустьевой ее части. В исключительных случаях допускалась меньшая глубина обсадки кондуктора. Так, скв. 19, вскрывшая трещинную зону в интервале 20—55 м, была обсажена кондуктором лишь до глубины 26 м.

После обсадки кондуктором бурение велось диаметром 132 мм до глубины 161—372 м, ниже и до конца скважины — $\varnothing 112$ мм, в редких случаях — $\varnothing 91$ мм.

Первые скважины, пробуренные на месторождении, показали достаточную устойчивость обводненной толщи пород. Впервые значительное обрушение ствола после пробного выпуска было отмечено в скв. 9. Поэтому в дальнейшем было решено устанавливать в скважинах в интервале залегания обводненных пород фильтровые колонны. Они собирались из перфорированных и обычных, неперфорированных обсадных труб диаметром 127 и 108 мм. Неперфорированные трубы располагались против тех участков ствола, которые по данным бурения и геофизических исследований считались бесперспективными в отношении притоков термальных вод. Фильтровые колонны спускались до глубины, ниже которой устойчивость пород не вызывала сомнений или ниже которой колонна по тем или иным причинам пройти не могла. Наибольшая глубина установки фильтровой колонны составляет 291 м (скв. 20).

Поскольку на изготовление перфорированных труб и их транспортировку к месту работы партии потребовалось много времени, фильтровые колонны были установлены только в последних 7 скважинах (15—21). Применялись фильтры двух видов: дырчатые и щелевые. Диаметр отверстий дырчатых фильтров составлял 10—15 мм. Щели другого вида фильтров имели длину 100—150 мм, ширину 10—15 мм. Скважность обоих видов фильтров составляла около 20%.

Опыт оборудования фильтрами скв. 16, 17, 18 показал, что трубы $\varnothing 127$ мм с большим трудом проходят в скважину при диаметре последней 132 мм. Учитывая это обстоятельство, последние разведочные скважины (15, 19, 20, 21) после бурения под кондуктор проходились на глубину 121—207 м ребристой коронкой $\varnothing 127/151$ мм и только после этого обсаживались кондуктором.

Цементирование обсадных колонн. Тщательный цементаж обсадных колонн был необходим, как уже указывалось выше, для изоляции открытого ствола скважины от попадания в него холодных грунтовых вод и предотвращения возможных утечек воды и пара по затрубному пространству в атмосферу. Цементирование производилось двояким способом. В скважинах, заложенных на участках, где термальные воды, благодаря интенсивной трещиноватости пород, циркулируют на небольшой глубине (район скв. 5, 2, 12, 16, 17, 9, 19, 13 и 14), 8-ми дюймовое направление цементировалось сразу после спуска. В скважинах, расположенных на участках, где до глубины 80—90 м залегают плотные слаботрециноватые и практически непроницаемые пепловые туфы и туффиты, цементирование направления производилось одновременно с цементированием кондуктора $\varnothing 146$ мм. После появления цементного раствора на дне шурфа, последний засыпался галькой и также цементировался. Для приготовления цементного раствора использовался как тампонажный цемент марки 400, так и строительный (при отсутствии тампонажного). Удельный вес

раствора находился в пределах 1,7—1,8 см³. Цементаж осуществлялся с помощью грязевого насоса ЗИФ-Р200/40 бурового агрегата.

Буровой инструмент. В результате бурения первой опытно-разведочной скважины было установлено, что категории буримости пород, слагающих разрез Паужетского месторождения, находятся в пределах от III до VIII. Поэтому наиболее рациональным был признан способ бурения твердыми сплавами. При проходке первых двух скважин применялись обычные победитовые коронки типа МР-2. Опыт этих скважин показал, что в условиях высокой температуры, вызывающей коагуляцию глинистого раствора, бурить такими коронками нельзя. Под воздействием высокой температуры резко увеличивается водоотдача глинистого раствора, и на стенках скважины интенсивно «нарастает» глинистая корка, что неизбежно приводит к затылкам колонковой трубы при подъеме снаряда и к авариям. Для увеличения зазора между стенками скважины и колонковой трубой впоследствии использовались только ребристые коронки с тремя, четырьмя (в зависимости от диаметра) и более ребрами. Толщина ребер составляла 8—10 мм. Таким образом, зазор увеличивался до 10—12 мм. Например, при бурении ребристой коронкой \varnothing 112/132 мм диаметр колонковой трубы составлял 108 мм, диаметр скважины — 132 мм, а при бурении ребристой коронкой \varnothing 91/112 мм диаметр колонковой трубы был равен 89 мм, диаметр скважины — 112 мм. Почти все ребристые коронки изготовлялись в механической мастерской Паужетской партии, причем в партии кроме ребристых коронок, изготавливаемых из коронок МР-2, была выработана и своя особая конструкция ребристых коронок.

При проходке скв. 13 впервые были встречены очень крепкие породы — сильно окварцованные пепловые туфы и туффиты X—XI и частично XII категории. Бурение по этим породам, ввиду отсутствия буровой дроби, осуществлялось теми же победитовыми коронками и, как показал хронометраж, было крайне непроизводительным (проходка за смену иногда составляла 0,08—0,05 м).

Проходка скважин осуществлялась с помощью колонны буровых. При бурении разведочных скважин преимущественно применялись штанги nippleного соединения (\varnothing 50 мм), что было вызвано особенностями конструкции специального противовыбросного сальника, о чем будет сказано ниже.

Оборудование устья скважин. После спуска 8 дюймов направления на устье скважины монтировалась задвижка Лудло, которая болтами крепилась к фланцу, приваренному к верхнему торцу направления. На первых скважинах устанавливались стальные задвижки \varnothing 6 дюймов (высокого давления) или чугунные — \varnothing 8 дюймов. Эти задвижки легко поддавались коррозии под действием пароводяной смеси и быстро приходили в негодность. Впоследствии для оборудования устья стали использоваться антикоррозийные задвижки \varnothing 10 дюймов. Ими были заменены и ранее установленные задвижки \varnothing 6 и 8 дюймов.

Над устьевой задвижкой на фланце короткого патрубка (тройника), имеющего боковой отвод для выходящей из скважины промывочной жидкости, устанавливался противовыбросной устьевой сальник конструкции ЦКБ СВГУ, усовершенствованный работниками партии. Сальник имел фланец, в центре которого вваривалась втулка с зажимной гайкой с одного (верхнего) конца. Во внутрь втулки до упора в буртик нижнего конца ее укладывались резиновые кольца наружного диаметра 70 и внутреннего — 51 мм. При ввинчивании гайки во втулку сальника резиновые кольца уплотнялись, плотно обхватывая штангу. Диск сальника зажимался между двумя специальными фланцами, причем нижний фланец являлся одновременно и фланцем тройника. Сальник предназначался для предохранения в процессе бурения. В случае начавшегося самоизлива или выброса он так же позволял производить нагнетание глинистого раствора в скважину,

для чего боковой отвод тройника предварительно заглушался. Однако этот противовыбросной сальник имел определенные недостатки. Основным его недостаток заключался в том, что он исключал возможность использования бурильных труб с муфтовозамковым соединением, которые обладают большей прочностью, чем штанги нипельного соединения. Кроме того, такой сальник создавал значительные затруднения при необходимости извлечения из скважины колонковой трубы при начавшемся выбросе лавоудной смеси в процессе бурения.

В этом отношении гораздо более совершенное противовыбросное оборудование применялось на месторождении Вайракей в Новой Зеландии: над устьевой задвижкой, располагавшейся на дне трехметрового шурфа, устанавливался сдвоенный регулировочный вентиль, который обеспечивал плотный обхват резиновыми прокладками как бурового снаряда или обсадных труб, так и замковых соединений. Еще выше размещалось устройство для предотвращения выброса, состоящее из резинового уплотняющего затвора, способного обхватывать любую часть бурового снаряда, а также полностью перекрывать скважину. Управление сдвоенным вентилем и противовыбросным устройством осуществлялось автоматически или вручную.

После окончания бурения и демонтажа бурового оборудования, на большинстве скважин Паужетского месторождения выше устьевой антикоррозийной задвижки \varnothing 10 дюймов устанавливалась через переводную катушку вторая неаантикоррозийная задвижка \varnothing 8 дюймов. Это делалось с целью обеспечить более продолжительную сохранность нижней задвижки путем перенесения всех регулировочных операций в процессе гидрогеологического опробования скважины и длительных режимных наблюдений на верхнюю задвижку. Нижняя задвижка при этом оставалась постоянно открытой. Замена же верхней задвижки в случае выхода ее из строя никаких трудностей не представляла. Практика показала, что антикоррозийные задвижки \varnothing 10 дюймов в течение 2—3 лет вполне обеспечивают надежную герметизацию скважины.

На верхней задвижке монтировался оголовок (крестовина, сваренная из 8-ми дюймовых труб, а на малопроизводительных скважинах — из 6- и 4-х дюймовых труб), снабженная двумя боковыми задвижками соответствующего диаметра) для производства гидрогеологических испытаний.

Длительное использование пробуренных скважин для режимных наблюдений позволило установить, что обсадка скважин двумя колоннами (\varnothing 219 и \varnothing 146 мм) с полным цементацией затрубных пространств не всегда обеспечивает качественную герметизацию устья: на ряде скважин обнаружались утечки горячей воды и выходы пара рядом с обсадной колонной или вблизи нее. Это обстоятельство привело к необходимости соорудать по окончании бурения около каждой скважины приустьевые бутобетонные площадки размером $5 \times 8 \times 0,35$ м³.

Режим бурения. На опыте проходки первых же колонковых скважин было установлено, что одним из факторов успешной проводки скважины до проектной глубины в условиях Паужетского месторождения является форсированный режим бурения, не допускающий каких-либо значительных простоев скважины в процессе бурения. Поэтому пришлось отказаться от поинтервального гидрогеологического опробования, которое осуществлялось при бурении первой опытно-разведочной роторной скважины и первых двух колонковых скважин, а также от регулярных замеров температуры на различных глубинах в процессе бурения.

Давление на забой скважин при проходке аллювиальных валунно-галечниковых отложений составляло 500—700 кг, туфы паужетской свиты, имеющие малую и среднюю твердость (IV—VI категории буримости), бурились при среднем давлении на забой 500 кг, плотные туфобрекчии андезитового состава и спекшиеся туфы дацитового состава голыгинского горизонта (VII—VIII категория) — 600—700 кг, иногда до 800 кг.

Ввиду значительной трещиноватости пород бурение велось преимущественно на I—II скорости (71—153 об/мин).

Интенсивность промывки по возможности была максимальной и составляла 180—200 л/мин. Однако даже такой расход промывочной жидкости далеко не всегда обеспечивал эффективное охлаждение ствола скважины.

Проходка скважин постоянно велась со сплошным отбором керна. Средний выход керна по 21 колонковой скважине составил 53%, верхний и нижний пределы соответственно 75% (скв. 12) и 35,2% (скв. 2). При бурении по плотным нетрещиноватым и слабо трещиноватым породам выход керна достигал 90—100%. Наиболее низкий выход керна давали мягкие псефитовые пемзовые туфы средненаужетской подсвиты («продуктивная толща»). Средний выход керна по ним составлял 20—30%.

Для увеличения выхода керна бурение иногда велось укороченными рейсами, с ограниченной промывкой. Заклинка керна производилась сечкой из медной проволоки, битым фарфором, стеклом, а в мягких породах — путем сухой затирки. Однако метод сухой затирки заключал в себе серьезную опасность: при прекращении промывки был неизбежен перегрев скважины, ведущий в конечном итоге к прихвату бурового снаряда. По этой причине сухая затирка применялась только в низкотемпературной зоне.

Промывочная жидкость. В качестве промывочной жидкости при бурении использовался глинистый раствор, приготовляемый из местной глины, образовавшейся в результате приповерхностного гидротермального метаморфизма аллювиальных отложений. Такой раствор имел следующие параметры: вязкость по СПВ-5 — 25—30 сек, водоотдача — 35 см³ за 30 мин, толщина глинистой корки — 4 мм, содержание песка до 2%, удельный вес — 1,18—1,20 г/см³.

В условиях высоких температур, в которых проходило бурение, качества этого глинистого раствора, и без того невысокие, резко ухудшались: водоотдача возрастала до 40 см³ за 30 мин, вязкость до 40—50 сек и более, раствор коагулировал («спекался»). Глинистые сальники (иногда на протяжении до 100 м), обволакивающие буровой снаряд, и толстая глинистая корка на стенках скважины затрудняли циркуляцию промывочной жидкости, способствовали образованию затяжек инструмента и вели к авариям. Так, применение необработанного глинистого раствора при бурении первой колонковой скважины привело к необходимости вообще отказаться от его использования и перейти на бурение с промывкой водой. Последовавшая за этим разглинизация стенок скважины вызвала притоки термальной воды. Дальнейшая углубка скважины проходила с большими трудностями при периодических выбросах пароводяной смеси. В результате довести скважину до проектной глубины (300 м) не удалось. Следует заметить, что температура вскрытых скважиной пород не превышала 155°С.

С аналогичными трудностями столкнулись и новозеландские буровики на месторождении Вайракей, применяя первоначально также необработанные глинистые растворы, но приготовленные из более высококачественных, бентонитовых глин. В последнее время там стали использовать более эффективные импортные бентониты. Интересно отметить, что несмотря на гораздо более высокую стоимость импортных бентонитов, фактическая стоимость приготовляемых из них глинистых растворов оказалась ниже. Для поддержания нормальных параметров глинистого раствора в условиях высоких температур на месторождении Вайракей, как указывает Д. И. Вудз (Новая Зеландия), широко применяются следующие химические реагенты:

- а) натриевая карбоксиметилцеллюлоза (для уменьшения водоотдачи);
- б) танин (для уменьшения вязкости и силы геля);
- в) каустическая сода (для повышения щелочных свойств);
- г) барит (для повышения плотности)

раствора); д) дизельное масло (для уменьшения водоотдачи и улучшения смазывающих качеств глинистого раствора).

Однако даже обработанные таким образом глинистые растворы все же не лишены абсолютно таких недостатков, как гелеобразование и повышение водоотдачи при высоких температурах. В последнее время в лаборатории Вайракей проводятся эксперименты с растворами типа лигнитнатрийсурфактан, разработанными для бурения глубоких скважин на нефтяных месторождениях, а также для бурения геотермальных скважин в Неваде (США). Эти растворы, как отмечает Д. И. Вудз, не подвержены гелеобразованию при высокой температуре и высоким потерям воды (имеется в виду водоотдача).

Низкие качества раствора, приготовленного из паужетской глины, а также резкое ухудшение растворов при высокой температуре заставили искать наиболее выгодный и эффективный способ химической обработки глинистого раствора. Большое количество экспериментов было произведено еще в процессе бурения скв. Р-1. Было установлено, что из всех паужетских глин наиболее качественной является желтая глина, для приготовления глинистого раствора необходимо использовать только пресную холодную воду, так как горячая минерализованная вода термальных источников и скважин способствует повышению водоотдачи и коагуляции глинистого раствора. В процессе экспериментов испытывались реагенты, широко используемые в отечественной практике разведочного бурения: КМЦ, УЩР, ТЩР, каустическая сода, кальцинированная сода.

Реагент КМЦ, добавляемый в холодный глинистый раствор в количестве 1% по всему объему (т. е. 10 кг на 1 м³ исходного раствора), снижал водоотдачу с 36 до 13 см³ за 30 мин, толщину глинистой корки — с 4 до 1,5 мм. При этом значительно увеличивалась вязкость раствора (с 19 до 35 сек), что было весьма нежелательно, так как при высокой температуре она должна была увеличиться еще более. Добавление КМЦ в горячий глинистый раствор положительных результатов не дало.

УЩР (углещелочной реагент) приготавливался на месте из расчета 100 кг сухого бурого угля и 20 кг твердой каустической соды (NaOH) на 1 м³ реагента. Реагент добавляли в воду, на которой приготавливался глинистый раствор из расчета 100 л на 1 м³ раствора. Обработанный раствор с вязкостью 38 сек имел водоотдачу 8 см³ за 30 мин и глинистую корку толщиной 1,5 м, а раствор с вязкостью 28 сек — соответственно 9 см³ и 1,5 мм. Однако в скважине при повышении температуры до 60—80°С и выше обработанный УЩР (углещелочной реагент) глинистый раствор сильно густел, его приходилось разбавлять водой, что увеличивало водоотдачу до 36—37 см³ за 30 мин, а глинистую корку до 3—5 мм. В целях сохранения нормальных параметров глинистого раствора производилась вторичная обработка в количестве до 15% по объему, а часть отработанного раствора со сгустками глины удалялась из циркуляционной системы. В связи с тем, что в партии были незначительные запасы бурого угля которые были исчерпаны уже при бурении первых скважин, было решено воспользоваться местным торфом, приготавливая из него торфощелочной реагент (ТЩР).

На приготовление 1 м³ ТЩР (торфощелочной реагент) расходовалось 470 кг влажного торфа и 20 кг каустической соды. ТЩР добавлялся в воду при приготовлении глинистого раствора в количестве до 15% от объема, а затем в процессе бурения — по мере ухудшения качеств раствора. Общий расход ТЩР при бурении в высокотемпературных зонах достигал 40% по объему. Хорошо снижая водоотдачу раствора, он так же, как и УЩР, повышал его вязкость и не исключал коагуляцию при высокой температуре. Разбавление же его водой при густении, как и в случае с УЩР, вызывало усиление водоотдачи и увеличение толщины глинистой корки.

При бурении последних разведочных скважин проводились экспери-

менты по обработке глинистого раствора кальцинированной содой (Na_2CO_3). Наиболее эффективная порция кальцинированной соды, установленная лабораторным путем, составила 20 кг на 1 м³ глинистого раствора. Обработанный раствор с вязкостью 25 сек имел водоотдачу 15—17 см³ за 30 мин при толщине глинистой корки 1—1,5 мм. Практика показала, что при этом способе обработки, в отличие от предыдущих способов, раствор в меньшей мере подвергался коагуляции.

Применение химической обработки глинистого раствора при проходке разведочных скважин на Паужетском месторождении высокотермальных вод значительно повысило эффективность бурения, хотя и не смогло полностью устранить явление коагуляции раствора и связанные с ним трудности.

В связи с частым удалением из желобной системы загустевшего обработанного глинистого раствора, потери его при проходке зоны высоких температур составляли до 0,5—1 м³ в смену. Было установлено, что на бурение одной колонковой скважины глубиной 300 м затрачивалось до 40—50 м³, а скважины глубиной 500 м — 50—100 м³ глинистого раствора, что значительно превышает расход раствора при бурении в обычных условиях.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что качественный глинистый раствор является одним из важных факторов успешной проводки скважин в условиях высоких температур. Поэтому очевидно, насколько необходима разработка новых рецептов химреагентов и новых более совершенных методов химической обработки глинистых растворов, используемых при бурении геотермальных скважин.

Однако отметим, что при определенных условиях в качестве промывочной жидкости оказалось возможным использовать холодную воду. Такими благоприятными условиями являются: отсутствие сильно поглощающих интервалов и мощных зон притоков на участке заложения скважины; положение статического уровня термальных вод ниже устья скважины или чуть выше его; сравнительно низкотемпературный режим участка (до 150—160°С). Наглядным примером в этом отношении могут служить скв. 5, 6, 20. Так, скв. 5, которая в 1961 г. углублялась с 275 м до 375,3 м, бурилась в этом интервале с промывкой водой. Холодная вода подавалась насосом непосредственно из реки. Температура воды на выходе из скважины при этом не превышала 35°С. Максимальная температура воды в скважине, зафиксированная на глубине 350 м, составила 152,3°С, статический уровень был на 2 м выше поверхности земли.

Разбуривание скв. 6 от завала также производилось с промывкой водой. Статический уровень термальных вод на этом участке находится на 1,9 м ниже поверхности земли, максимальная температура не превышает 157°С.

Обязательным требованием при применении в качестве промывочной жидкости холодной воды было использование шламовой трубы.

Наблюдения при бурении. В процессе бурения скважин, наряду с первичным изучением керна, велись постоянные наблюдения за качеством глинистого раствора, его температурой, поглощением и другими водопроявлениями. Контроль за параметрами глинистого раствора производился при помощи полевой лаборатории несколько раз в течение смены. Для определения вязкости использовался стандартный полевой вискозиметр СПВ-5, удельный вес измерялся ареометром АГ-2, водоотдача и толщина глинистой корки определялись прибором ВМ-6.

Наблюдения за температурой глинистого раствора велись с помощью двух дистанционных термометров, один из которых устанавливался на выходе раствора из скважины, а другой — в рабочей емкости. Регулярное проведение наблюдений позволяло своевременно принимать необходимые меры по дополнительной обработке глинистого раствора химреагентами или его охлаждению.

Величина поглощения глинистого раствора устанавливалась по понижению уровня его в рабочей емкости и выражалась в m^3 на 1 погонный m бурения. При этом учитывались расход раствора на заполнение вновь пройденных участков ствола, а также количество удаленного из желобной системы отработанного раствора. В нескольких первых скважинах определялась не абсолютная, а относительная величина поглощения; после подъема бурового снаряда скважину до устья заполняли глинистым раствором и наблюдали за понижением его уровня. Величина поглощения в этом случае выражалась в скорости понижения уровня промывочной жидкости в $m/мин.$

В журналах проводки скважин фиксировались также все проявления самоизлива с указанием его дебита (если последний удавалось измерить), выбросы пароводяной смеси, их интенсивность.

Сведения о поглощении глинистого раствора, самоизливах термальной воды, выбросах пароводяной смеси, наряду с другими данными (выход керна, результаты геофизических исследований, гидрогеологического опробования скважин и др.), использовались для установления интервалов притока термальных вод в скважину. С этой целью производились также сравнения обломков пород, выброшенных из скважины в процессе проведения пробного выпуска, по составу и внешнему облику с керновым материалом.

При бурении первой колонковой скважины делались замеры температуры на забое скважины при достижении той или иной глубины с целью изучения геотермических условий месторождения. При этом было установлено, что для получения истинной температуры необходимо выстаивать скважину в течение нескольких суток, пока не восстановится нарушенный бурением первоначальный температурный режим. Так как длительные простои скважины без циркуляции промывочной жидкости сильно осложняли дальнейшее бурение, регулярные замеры забойных температур были отменены, и производились они впоследствии эпизодически, при благоприятных условиях, например после ОЗЦ при цементировке кондуктора или в тех случаях, когда поведение скважины позволяло допустить некоторую остановку в бурении. Очевидно, что в последнем случае значения температуры получались несколько заниженными.

Осложнения при бурении. Проходка разведочных скважин на Паужетском месторождении высокотермальных вод была сопряжена со значительными трудностями, обусловленными спецификой месторождения, а именно: высокой температурой (до $200^{\circ}C$) пород, нагретых циркулирующими в них высокотермальными водами.

При простое скважины в течение нескольких часов температура глинистого раствора в ней резко повышалась и при возобновлении циркуляции достигала $85-90^{\circ}C$ и более (на выходе из скважины). Как уже отмечалось выше, раствор в скважине в таких случаях сильно коагулировал, вызывая затяжки и прихваты бурового инструмента. Для борьбы с подобными осложнениями кроме применения ребристых коронок и химической обработки глинистого раствора, начиная с глубины $100-150 m$, производилась тщательная проработка ствола скважины (разбуривание быстро нарастающей глинистой корки), а также применялись все возможные меры по охлаждению ствола скважины. Последнее осуществлялось при интенсивной, максимально возможной для данного насосного оборудования промывки скважины глинистым раствором.

Сильно нагретый в скважине раствор подвергался охлаждению на поверхности путем использования удлиненной желобной системы или путем перекачивания его через запасную емкость. Некоторое охлаждение достигалось при разбавлении загустевшего раствора холодной пресной водой или добавлением холодного свежего раствора. В зимнее время в этих целях использовался снег.

При глубине скважин около 250—300 м и более таким образом удавалось снизить температуру выходящего раствора только до 60—70°С. Последние десятки метров скважин часто добуривались при температуре выходящего раствора 80—85°С.

На месторождении Вайракей в Новой Зеландии с помощью градирен раствор, выходящий из скважины с температурой 55—65°С, удавалось охладить до температуры 20°С.

Следует заметить, что сильный перегрев раствора в скважине таил в себе опасность выброса его при вскипании, а затем и выброса пароводяной смеси за счет резкого снижения гидростатического давления на пласт.

Во избежание перегрева ствола скважины, охлажденного в процессе бурения, при спуске на забой периодически осуществлялась прокачка скважины. Интенсивная промывка скважины в течение 0,5—2 час производилась перед подъемом колонковой трубы и после спуска ее. При внезапном возрастании температуры раствора во время бурения дальнейшая проходка прекращалась, и скважина интенсивно прокачивалась в течение некоторого времени.

В целях сокращения относительных затрат времени на спуско-подъемные операции и достижения, таким образом, более эффективного охлаждения ствола скважин, бурение некоторых скважин в высокотемпературной зоне велось удлиненными рейсами с применением сдвоенного колонкового снаряда. Однако практика показала, что в этом случае значительно уменьшается выход керна и увеличивается вероятность прихвата снаряда. Поэтому широкого применения бурение сдвоенным колонковым снарядом не нашло.

Другим важным мероприятием для осуществления бурения форсированным методом было использование при проходке некоторых скважин одновременно двух колонковых труб: после подъема одной в скважину сразу же опускалась вторая, а в процессе бурения из первой трубы извлекался керн.

В какой-то мере трудностей, связанных с высокотемпературными условиями месторождения, можно было бы избежать, имея более мощное насосное оборудование. Достаточно сказать, что буровая установка, с помощью которой проходились разведочные и эксплуатационные скважины на месторождении Вайракей в Новой Зеландии и которая сама по себе является довольно мощной установкой, способной бурить до глубины 1000—1200 м, имеет мощную насосную группу, состоящую из трех насосов разной мощности. Каждый из двух насосов может обеспечить производительность от 1100—1600 л/мин во время бурения до 2000 л/мин во время прокачки. Благодаря такой высокой производительности насосов, температуру выходящего из скважины глинистого раствора удавалось снизить до 55—65°С при диаметре скв. 8 дюймов и температурах пород, достигающих 250—266°С. Максимальная же производительность насоса ЗИФ-Р 200/40 бурового агрегата ЗИФ-650А, как известно, не превышает 200 л/мин. Остановки из-за ремонта единственного насоса бурового агрегата, которые случались довольно часто, приводили к дополнительным осложнениям. Одного насоса, для ведения буровых работ форсированным методом, в условиях Паужетского месторождения было явно недостаточно.

Значительные трудности при бурении разведочных скважин создавали большие поглощения глинистого раствора, происходившие при пересечении скважинами тектонических трещинных зон, отдельных открытых трещин или при вскрытии сильно пористых и кавернозных пород. Наиболее крупные поглощения глинистого раствора наблюдались в скважинах, проходивших в пределах высокой правобережной террасы Паужетки, где величина статического уровня термальных вод по разным скважинам колеблется от 2,6 до 31,7 м ниже поверхности земли. При первых же при-

знаках сильного поглощения принимались экстренные меры для его ликвидации. Прежде всего в скважину закачивался глинистый раствор повышенной вязкости (1—3 мин по СПВ-5). Если поглощение не прекращалось, в вязкий раствор добавлялись опилки, ветошь, мелко изрубленный торф с каустической содой, скважину тампонируют глиной, иногда с примесью опилок. Глиняные шарики забрасывались в скважину с устья или опускались в колонковой трубе и выдавливались из нее глинистым раствором, а затем утрамбовывались специальным снарядом — колонковой трубой с ввернутым в нее переходником. В процессе тампонажа скважина периодически прокачивалась, если удавалось хотя бы частично восстановить циркуляцию или заливалась раствором с устья. В отдельных случаях, когда восстановить циркуляцию с помощью тампонажа не удавалось, бурение велось без выхода промывочной жидкости на поверхность с выносом шлама в поглощающие трещины. Таким образом, бурилась скв. 14 в интервале 316,4—342 м, скв. 13 в отдельных интервалах при пересечении трещинной зоны на глубинах от 80 до 120 м.

В отдельных случаях затампонируемый поглощающий интервал при дальнейшей углубке скважины вновь активизировался (скв. 14, 15). Тогда ниже этого интервала устанавливалась деревянная пробка, и тампонаж скважины глиной повторялся до полной ликвидации поглощения. Борьба с поглощениями занимала до 9—20 станко-смен.

Однако указанные мероприятия не всегда давали положительный результат — зачастую поглощение сменялось самоизливом или пароводяным выбросом (скв. 13, 14, 15, 19), борьба с которыми была не только сложной, но и опасной.

В тех случаях, когда обводненные трещинные зоны вскрывались скважинами, расположенными в пределах низкой террасы, на небольшой глубине (до 100 м), поглощения глинистого раствора не наблюдалось. Наоборот, можно было отметить разжижение раствора, а затем и самоизлив. Вполне очевидно, что это происходило, если пластовое давление превышало гидростатическое давление столба глинистого раствора. Такое явление было отмечено при бурении скв. 7 и 11, в которых положение статического уровня зафиксировано соответственно на 26,5 и 19,5 м выше поверхности земли.

Ликвидация самоизливов и выбросов осуществлялась путем закачивания под давлением через герметизированное устье скважины утяжеленного вязкого глинистого раствора с удельным весом 1,3 — 1,5 г/см³, которое чередовалось с охлаждением скважины промывкой и тампонажем ствола глиной. Утяжеление глинистого раствора осуществлялось добавками барита. Иногда для задавливания сначала применялась холодная вода, а затем уже глинистый раствор.

Несмотря на принятие всех отмеченных мер, борьба с пароводяными выбросами не всегда заканчивалась успешно. Так например, скв. 4, 7, 14 из-за невозможности ликвидации выбросов не были добурены до проектной глубины.

В тех случаях, когда самоизлив или выброс удавалось задвить в скважину, спускался буровой снаряд, и производилось интенсивное охлаждение ее качественным обработанным ТЩР холодным глинистым раствором. Дальнейшее бурение возобновлялось только после полной ликвидации поглощения.

На борьбу с самоизливами или выбросами затрачивалось иногда до 100 м³ вязкого глинистого раствора (скв. 7), до 15 т барита, 7 м³ древесных опилок и ветоши (скв. 15).

Аварии при бурении. Основной причиной аварий на Паужетском месторождении являются сложные геолого-гидрогеологические и геотермические условия, оказывающие резко отрицательное воздействие на глинистый раствор с первоначально нормальными параметрами.

Непосредственной причиной почти всех аварий были прихваты бурового снаряда «спекшимся» глинистым раствором. В некоторых случаях устранить их удавалось путем интенсивной промывки скважины водой (скв. 1, 15, 18). В большинстве случаев, уже после интенсивной промывки водой, попытки привести прихваченный снаряд во вращение или натяжка снаряда приводили к осложнениям аварии: происходил обрыв снаряда в резьбовых соединениях или, что бывало гораздо реже, обрыв самой штанги. Ликвидация подобных аварий осуществлялась по обычной методике с применением обычного ловильного инструмента. Скважина при этом интенсивно промывалась и прорабатывалась.

В практике бурения на Паужетском месторождении наблюдались также случаи прихвата снаряда шламом при снижении интенсивности промывки, особенно во время заклинки керна (скв. 1, 3, 4, 13), а при проходке неустойчивых пород (чаще всего это были аллювиальные валунно-галечниковые отложения) — обвалившейся массой. В скв. 15 снаряд был прихвачен осевшим из глинистого раствора баритом.

При бурении скв. 3, 5, 6, 13, 20 имели место аварии, связанные с разворачиванием снаряда при спуске его в скважину. Очевидной причиной этих аварий является притормаживание низа опускаемой колонны загустевшим глинистым раствором и раскручивание верха ее вместе с рабочим тросом правой свивки.

Ликвидация геотермальных скважин. По окончании опытно-эксплуатационных выпусков и режимных наблюдений, производившихся с целью подсчета эксплуатационных запасов термальных вод разведанного участка Паужетского месторождения, значительная часть разведочных скважин (скв. 1, 2, 4, 9, 12, 17, 19, 21), не подлежащих включению в сеть пунктов дальнейших режимных наблюдений, а также переоборудованию для использования их в эксплуатационных целях, была ликвидирована.

Ликвидация геотермальных скважин так же, как и их бурение, связана с определенной спецификой. При ведении ликвидационных работ использовалась буровая установка и буровая вышка, монтировавшиеся на скважине, как при бурении. Работы по ликвидации скважин сводились к засыпке их гравием и песком до глубины 100 м и последующему цементированию верхнего стометрового интервала.

Работы начинались с задавливания скважины водой или глинистым раствором (в зависимости от температурной и гидродинамической характеристики каждой скважины). После задавливания скважины и прокачки ее в течение 2—3 час определялся интервал времени между окончанием прокачки и началом самоизлива или выброса. После повторного задавливания скважины в течение установленного ранее безопасного интервала времени производилась засыпка ствола скважины гравием и песком до глубины примерно 100 м.

Для более надежного обеспечения безопасности работ засыпка осуществлялась при периодической прокачке скважины, для чего еще перед началом засыпки в скважину спускалась колонна буровых штанг. С помощью этой колонны производились также промеры глубины и трамбовка заполнителя.

По окончании засыпки скважина почти до бапмака кондуктора (до глубины 65—50 м) заливалась цементным раствором, равным $1,85 \text{ г/м}^3$ с прокачкой последней порции ($0,3—0,5 \text{ м}^3$) под давлением. После ОЗП проверялось качество цементации и, если пропусков пара не обнаруживалось, скважина до устья заполнялась цементным раствором с примесью песка в пропорции 1:1. В противном случае, в скважину вновь под давлением закачивалось до 1 м^3 цементного раствора для цементации имеющихся паропроходов. В завершение всех работ по ликвидации на устье скважины приваривалась заглушка.

В среднем для ликвидации одной скважины расходовалось 7—10 м³ песка и гравия, 2,5—3 т цемента, до 30 м³ воды и 15—20 м³ глинистого раствора.

* * *

Резюмируя все вышеизложенное о методике и технологии буровых работ на Паужетском месторождении высокотермальных вод, необходимо отметить следующее:

1. В процессе проведенных разведочных работ освоен колонковый способ бурения на перегретые термальные воды, которым удалось заменить дорогостоящее роторное бурение, что позволило не только значительно удешевить стоимость буровых работ, но и сократить сроки разведки.

2. Богатый опыт проводки геотермальных скважин, накопленный на Паужетском месторождении, позволяет сделать вывод о том, что колонковое бурение при разведке месторождений перегретых термальных вод может осуществляться весьма успешно при соблюдении следующих основных условий: а) применение высококачественных промывочных жидкостей, способных сохранять заданные параметры при высоких температурах; б) интенсивная промывка ствола скважины, обеспечивающая его эффективное охлаждение. В этом отношении необходимо ориентироваться на применение высокопроизводительного насосного оборудования; в) применение ребристых коронок или шарошечных долот (при бурении сплошным забоем) во избежание прихватов бурового инструмента на забое или затяжек его при подъеме; г) форсированный режим бурения, сводящий до минимума простои скважины, без циркуляции промывочной жидкости во избежание перегрева скважины и возникновения пароводяных выбросов; д) применение качественного оборудования и бурового инструмента, исключающее возникновение аварий из-за выхода из строя отдельных узлов бурового агрегата или из-за поломки инструмента; е) наличие соответствующей организации работ и материально-технического снабжения, своевременное обеспечение буровых работ всеми необходимыми материалами и инструментами (особенно на завершающей стадии бурения), исключающее непроизводительные простои, оказывающие резко отрицательное влияние на состояние геотермальной скважины.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ

В 1957 г. на разведваемой площади был поставлен комплекс геофизических работ, проведенных К. П. Митрофановым. Наиболее интересные материалы, которые можно было систематизировать и на этом основании сделать определенные выводы, дала электроразведка методом ВЭЗ. При интерпретировании кривых ВЭЗ было выделено три горизонта различных сопротивлений.

Первый электрический горизонт обладает высоким сопротивлением от 100 до 1000 *ом*. Мощность его в пределах термальной площадки 0,5—3,0 м. В северном и южном направлениях мощность его увеличивается.

Второй электрический горизонт, являющийся проводящим, характеризуется очень низкими сопротивлениями 2,5—3,0 *ом*. Мощность его меняется в пределах от 35 м до 200 м. Этот горизонт подразделяется на ряд подгоризонтов, один из которых, делящий горизонт на две части, имеет повышенное сопротивление порядка 15 *ом*. Этот горизонт особенно хорошо отбивается на кривых ВЭЗ в месте естественных выходов термальных вод, где практически отсутствует первый высокоомный горизонт.

Третий электрический горизонт характеризуется повышенным сопротивлением порядка 10—12 *ом* по сравнению со вторым горизонтом.

Работами 1959—1961 гг., которые велись на большей площади, данные о геоэлектрическом разрезе в очаге разгрузки подтвердились.

Когда проводились геофизические работы, данных о геологическом разрезе и структуре очага разгрузки Паужетских терм практически не было и многие заключения делались в отрыве от геолого-гидрогеологического разреза.

Как указывалось К. П. Митрофановым, второй горизонт подходит близко к поверхности в районе массовых выходов термальных источников, и его погружение происходит в северном и южном направлениях. При этом, на юг от основных естественных выходов термальных вод, на левом берегу Правой Паужетки наблюдается быстрое увеличение мощности первого высокоомного горизонта. На этом основании при составлении геоэлектрического разреза К. П. Митрофанов предположил наличие антиклинальной структуры, южное крыло которой опущено по сбросовому нарушению. Однако данными бурения эти предположения не подтвердились.

Как следует из сопоставления геологических и геофизических данных, особое влияние на электропроводимость пород оказывают термальные минерализованные воды, на что обращал внимание и К. П. Митрофанов. Они, по-видимому, и обуславливают распределение электрогоризонтов. Породы, разные по литологическому составу и возрасту, но имеющие одинаковые фильтрационные свойства, приходится объединять в один электрогоризонт. Так, в зоне разгрузки термальных вод на термальной площадке, где минерализованные воды насыщают всю толщу и даже аллювий, второй электрогоризонт с малым сопротивлением естественно приближается к поверхности. На левом берегу Правой Паужетки геологический разрез ничем не отличается от разреза термальной площадки, но сопротивления здесь

выше за счет наличия близ поверхности холодных пресных вод, которые характеризуются высокими сопротивлениями.

Мощность электрогоризонта с малым сопротивлением совпадает с мощностью водоносного комплекса.

Третий электрогоризонт совпадает с толщиной туфобрекчий, которая по данным кароттажа имеет приблизительно сопоставимые сопротивления с данными ВЭЗ. Несколько большее сопротивление их также можно объяснить малой водонасыщенностью, что подтвердилось данными бурения и гидрогеологических исследований.

Таким образом, можно с большим основанием говорить, что данные, полученные методом ВЭЗ, могут быть использованы для выяснения характера потока термальных вод и в меньшей мере — для выяснения геологического разреза в очаге их разгрузки.

Следует отметить, что методами электроразведки очень трудно установить зоны тектонических нарушений в обводненных толщах, так как на общем минерализованном фоне отличия в геоэлектрическом разрезе за счет нарушенного залегания пород исчезают.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ

Работы в скважинах Паужетского месторождения производились по общепринятым схемам с использованием серийной аппаратуры и оборудования, которые иногда были явно непригодны к работе при высоких температурах. Это снижало возможности каротажных методов и приводило в ряде случаев к браку в работе.

Стандартный электрокароттаж

В первой пробуренной на месторождении опытно-разведочной роторной скв. Р-1 для выбора стандартного зонда было проведено БКЗ шестью градиент-зондами: $N_{0,1} M_0, 5A$; $N_{0,1} M1, 0A$; $N_{0,2} M1, 9A$; $N_{0,5} M_{4,0} A$; $N_{1,0} M_{6,0} A$; $N_{2,0} M_{8,0} A$. Составление кривых БКЗ и геологического разреза скважины показало, что наиболее четкую расчлененность разреза дают зонды $N_{0,1} M_{0,5} A$ и $N_{0,2} M_{1,9} A$. При исследованиях в других скважинах зондом $N_{0,2} M_{1,9} A$ записывались более сглаженные кривые, чем зондом $N_{0,1} M_{0,5} A$. Поэтому для более точного выделения отдельных литологических прослоев мощностью менее 1 м стандартным был принят кровельный градиент-зонд $N_{0,1} M_{0,5} A$.

Подготовка скважин к каротажу заключалась в интенсивной промывке ствола качественным глинистым раствором, чтобы создать достаточное охлаждение и обеспечить беспрепятственное прохождение в скважину кабеля с зондом.

Запись диаграмм КС велась при чувствительности потенциометра $S = 0,2; 1$ и 5 с масштабом сопротивлений $2,5$ и 12 ом/см.

Измерения производились согласно инструкции по каротажным работам. Данные КС позволили произвести корреляцию геологических разрезов скважин с низким выходом керна.

Измерение естественного потенциала, проводившееся в первых скважинах Паужетского месторождения, не дало положительных результатов и в дальнейшем от него пришлось отказаться.

Геоэлектрическая характеристика пород по данным стандартного электрокаротаж

Породы, слагающие разрез разведанного участка Паужетского месторождения высокотермальных вод, обладая различным литологическим составом, характеризуются и различными геоэлектрическими свойствами. Последние также зависят от характера и степени гидротермального метаморфизма пород и от степени насыщенности их минерализованными термальными водами (рис. 36, 37).

Термокароттаж и резистивиметрия

Термокароттаж и резистивиметрия в скважинах Паужетского месторождения проводились с целью определения мест притока термальных вод. Следует отметить, что выявление мест сосредоточенного водопритока справедливо лишь для слабопроницаемых, практически водоупорных

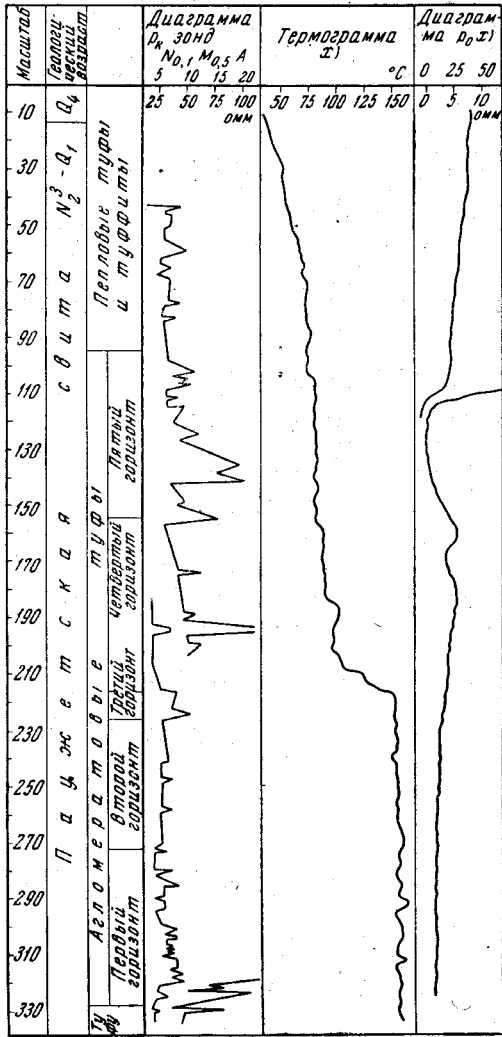


Рис. 36. Геолого-геофизический разрез скв. 15

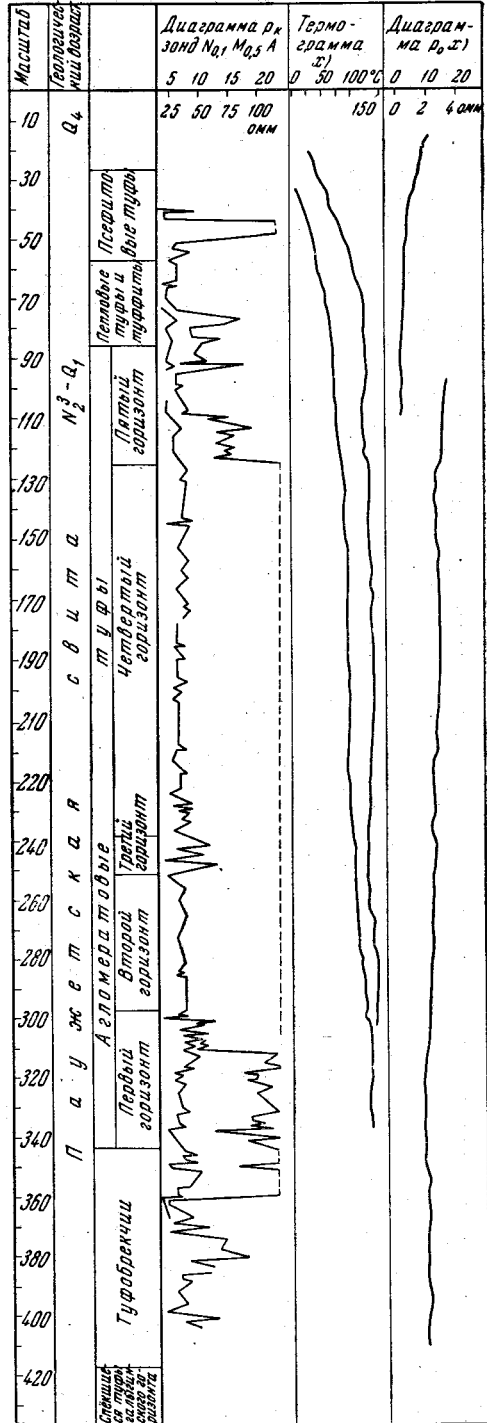


Рис. 37. Геофизический разрез скв. 20

пепловых туфов и туффитов верхнепаужетской подсвиты, которые могут быть водоносны только на участках, где они разбиты тектоническими нарушениями. Если же иметь в виду толщу псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты, то здесь выявляются интервалы наибольших водопритоков, поскольку вся толща туфов водоносна и сосредоточенные выходы не выделяются на общем фоне поступления вод по всей поверхности скважины.

Очевидно, что интервалами наибольших водопритоков являются горизонты, сложенные наиболее трещиноватыми или наиболее кавернозными и пористыми породами.

Методика проведения термокароттажа и резистивиметрии на Паужетском месторождении несколько отличалась от общепринятой методики этих исследований. Отступления от общепринятой методики заключались в следующем. Способ отгартывания в его «чистом» виде осуществить было невозможно, так как снижение гидростатического давления в скважине могло привести к пароводяному выбросу.

Способ продавливания, при котором вода, отличающаяся от пластовой по температуре или минерализации, закачивается в скважину определенными порциями, также был недоступен, так как весь ствол скважины перед началом измерений необходимо было максимально охладить с тем, чтобы предотвратить возможные выбросы в процессе работы.

Практически осуществлялась комбинация статического способа и способа отгартывания, причем отгартывание, как таковое, не производилось, потому что через некоторое время после окончания промывки или задавливания скважины начинался подъем уровня воды, а в некоторых скважинах и самоизлив.

Подготовка скважины к геофизическим исследованиям производилась двумя способами.

1. Если геофизические исследования проводились сразу же после окончания бурения, то подготовка скважины к исследованиям осуществлялась посредством продолжительной промывки холодной пресной водой через буровой снаряд, спущенный в скважину до забоя. Промывка прекращалась, когда стенки скважины были в достаточной мере освобождены от глинистой корки, и открывался доступ в скважину термальным водам.

2. Если геофизические исследования проводились в скважинах после того, как они уже некоторое время «поработали», подготовка скважины к геофизическим исследованиям сводилась к задавливанию их с устья холодной пресной водой в течение 1—3 час.

Как в том, так и в другом случаях первые замеры удельного сопротивления или температуры воды производились при неизменном положении уровня воды, а последующие замеры — в условиях постепенного подъема уровня, т. е. в условиях притока термальных вод. Измерения производились непрерывно как при спуске, так и при подъеме приборов. Таким образом, записывались 2—3, иногда 4 кривые ρ_0 или T . Такое количество записей увеличивало достоверность получаемых результатов.

Опыт показал, что наиболее благоприятным способом подготовки геотермальных скважин к геофизическим исследованиям является способ промывки ее с забоя, обеспечивающий более или менее равномерное охлаждение всего ствола скважины. При подготовке скважины способом задавливания, выделение зон водопритока вызывает большие затруднения, связанные со значительным поглощением закачиваемой воды в интервалах наиболее трещиноватых или пористых и кавернозных пород.

Термокароттаж. Участки водопритоков (или наибольших водопритоков) выделялись на термограмме характерными максимумами различной амплитуды, зависящей от скорости восстановления теплового

режима, которая в свою очередь зависела от скорости циркуляции термальных вод и, следовательно, от степени проницаемости пород того или иного интервала.

Наиболее успешно термокароттаж был выполнен в последних скважинах, когда стали применяться высокотемпературные (до 170°C и до 250°C) электротермометры.

Запись велась при чувствительности потенциометра $S = 1$ и 5 с масштабом температур 15 , 20 и 25°C в 1 см и масштабом глубин $1:200$ и $1:500$. Выбор такого мелкого масштаба температур был обусловлен целью самих исследований (определение мест притока высокотермальных вод), а также желанием получить непрерывную кривую, несмотря на большую разницу значений температур в начальной и конечной точках кривой, достигающую иногда 130 — 150°C .

Для получения начальной температуры и для контроля регистрации записывались начальная, промежуточная и конечная компенсация ΔV . Начальная температура определялась по формуле, рекомендуемой инструкцией к электротермометру: $T = T_0 + \Delta V/S$, где T_0 — нулевая температура электротермометра (температура равновесия). Значение начальной температуры сопоставлялось с показаниями максимального ртутного термометра.

Резистивиметрия проводилась только в нескольких последних скважинах, из-за отсутствия высокотемпературных резистивиметров был использован резистивиметр, рассчитанный на работу в среде с температурой до 40°C .

Регистрация диаграмм ρ_0 производилась при чувствительности потенциометра $0,05$, $0,2$ и 1 , при масштабе сопротивлений 25 ; $12,5$; 5 и 2 ом/см и масштабе глубин $1:500$. При записи всегда наблюдалось изменение установленного тока, который необходимо было поддерживать постоянным через каждые несколько метров записи даже при применении шунтирующих сопротивлений. Причиной этих изменений, вероятно, служила большая разница температур на концах кабеля.

Интервалы водопритоков (или наибольших водопритоков) отражались на диаграмме ρ_0 в виде минимумов, поскольку сопротивление минерализованных термальных вод было много меньше, чем сопротивление холодной пресной воды, заполняющей ствол скважины.

Аппаратура и оборудование. В первый год проведения поисково-разведочных работ на Паужетском месторождении для производства термометрии в скважинах использовались электротермометры марки ЭТС-Т, рассчитанные на температуру среды $+120^{\circ}\text{C}$. Вполне естественно, что при недостаточном охлаждении ствола скважины промывкой эти термометры вскоре выходили из строя. Впоследствии стали применяться термометры марки ЭТМИ-55 с предельной температурой среды $+170^{\circ}\text{C}$.

Измерение удельного сопротивления воды в скважине производилось с помощью резистивиметра марки РСМ-52, рассчитанного на работу при температуре до $+40^{\circ}\text{C}$. Несмотря на то, что изоляция этого резистивиметра была нами максимально усилена, а температура закачиваемой в скважину воды не превышала 40°C , прибор все же вышел из строя после четырех спуско-подъемов.

Спуск приборов в скважину осуществлялся на кабеле КТШ-2. Этот кабель внешне не испытывал никаких повреждений и изменений от воздействия высокой температуры, но есть основания полагать, что при температурах свыше 150 — 160°C имели место некоторые утечки тока.

Приборы присоединялись к кабелю обычным способом, при помощи соединительных муфт и патронов. Жилы кабеля заделывались в патроны оловянной или свинцовой пайкой.

Изолирование соединений оказалось довольно сложной проблемой при проведении геофизических исследований в скважинах Паужетского ме-

сторождения. Обыкновенная лента-пара и изоляционная лента плохо выдерживали температуру даже в 120—130° С. Изолента полностью теряла смоляной битум, а лента-пара «сваривалась» в жгуты (независимо от количества наложенных слоев), оголяя жилу и место соединения.

Хорошим изолирующим материалом в условиях высоких температур Паужетского месторождения зарекомендовала себя белая (или сырая) резина, которая из всех вариантов намотки дает лучший результат при такой последовательности: на изолируемое место накладывается два-три слоя лента-пары под полным натяжением, сверху — три слоя белой резины, перекрывающей лента-пару, также при полном натяжении, затем несколько свободнее накладывается два-три слоя лента-пары для плотного обжимания менее эластичной белой (сырой) резины. Весь изолируемый участок покрывается тремя-четырьмя слоями изоленты и в четырех-шести местах перетягивается шпагатом. Выполненная таким образом изоляция выдерживала, как правило, 40—60 мин в зависимости от температуры в скважине. Потом появлялись утечки тока. Во избежание утечек приходилось увеличивать скорость регистрации, особенно при записи в масштабе 1:200.

Регистрация диаграмм велась разборной аппаратурой, которая в известной мере ограничивала скорость подъема прибора и увеличивала по сравнению с автоматической станцией время воздействия высокой температуры на изоляцию приборов и соединений.

Определение мест притока термальных вод в скважинах по данным термометрии и резистивиметрии

Наиболее четко зоны водопритоков с помощью термометрии и резистивиметрии фиксировались в местах пересечения скважинами открытых тектонических трещин или тектонических трещинных зон.

Так например, скв. 21 вскрыла в интервале 80—108 м, сложенном псаммитовыми туфами, тектоническое нарушение, которое фиксируется плохим выходом керна и сильной раздробленностью пород. На обеих термограммах, одна из которых записана через 3 час 10 мин, а вторая — через 5 час 15 мин после прекращения промывки скважины, резко вырывается в указанном интервале температурный максимум с амплитудой до 20—25° С. Сравнение этих кривых показывает возрастание температуры со временем и расширение зоны притока к низу. Последнее, по видимому, можно объяснить тем, что периферийные участки трещинной зоны медленнее восстанавливают свой первоначальный температурный режим по сравнению с центральной частью зоны, так как обладают меньшей проницаемостью.

Как первая, так и вторая термограммы выделяют еще один интервал водопритока (262—270 м), приуроченный к нижней части третьего горизонта среднепаужетской подсветы (туфобрекчия) и к верхней части второго горизонта, представленной псаммитовыми туфами. Величина температурной аномалии здесь не превышает 4—5° С. Для этого интервала характерен плохой выход керна и повышенное поглощение глинистого раствора в процессе бурения.

Остальные три интервала наибольшего водопритока, выделенные по данным бурения, на термограммах почти не выражены. С другой стороны, термограммы и диаграмма ρ_0 по скв. 20 гораздо менее дифференцированы (рис. 37), потому что трещинный характер притока играет здесь меньшую роль.

На диаграмме ρ_0 хорошо видны два широких минимума, один из них соответствует интервалу 125—165 м, сложенному довольно плотными псефитовыми туфами, участками ячеистыми и трещиноватыми. В пределах

этого минимума на термограмме «а», записанной через 4 часа после прекращения промывки, в интервалах 131,5—140,7 м и 132,5—138 м отмечается некоторое повышение температуры (до 6° С). На термограмме «б», записанной 46 час. спустя, соответствует повышение температуры на 7° С началу описываемой зоны притока.

Второй минимум диаграммы ρ_0 , имеющей более расплывчатые очертания, приурочен к интервалу 319—360 м, сложенному как прочносцементированными, так и слабыми псефитовыми туфами с прослоями вулканомиктовых песчаников и алевролитов. На обеих термограммах фиксируется более или менее резкое, по сравнению с общим характером кривых, повышение температуры на 8—10° С с глубины 275—285 м. Менее четко на диаграмме ρ_0 выделяется еще один минимум, приуроченный к интервалу 221—252 м. На термограммах он почти не отражается.

Примером выделения зон наибольших водопритоков в скважину при другом способе подготовки ее к геофизическим исследованиям может служить скв. 12.

В скв. 12 в разные дни дважды проведена термометрия и один раз резистивиметрия. Подготовка скважины к проведению геофизических исследований заключалась в закачивании в нее под давлением пресной холодной воды в течение от 1 час 15 мин до 3 час 10 мин.

Термограмма I записывалась через 20 мин, термограмма II — через 1 час 20 мин после прекращения закачивания. Разница в продолжительности подготовки скважины и в продолжительности выстаивания перед замерами хорошо подчеркивается самими термограммами. Они отличаются только значениями температуры, сохраняя один и тот же характер кривой.

На обеих термограммах довольно четко выделяются две зоны наиболее интенсивного притока термальных вод в ствол скважины. Первая из них приурочена к интервалу 43—56 м в толще трещиноватых алевроитовых пелловых и псефосаммитовых пемзовых туфов. На термограмме II в этом интервале наблюдается повышение температуры примерно на 15° С. На диаграмме ρ_0 хорошо видно понижение сопротивления воды, заполняющей скважину.

Вторая зона приурочена к интервалу 185—210 м, где залегают трещиноватые туфобрекчи и алевропсаммитовые туфы. Она отчетливо фиксируется диаграммой ρ_0 .

Значительное понижение температуры в нижней части зоны, по-видимому, следует объяснить усиленным проникновением закачиваемой под давлением воды в сильно трещиноватые породы. По этой же причине, как явствует из термограмм, резким повышением температуры характеризуется нижележащий интервал, породы которого, по данным бурения, являются менее водопроницаемыми. Очевидно, закачиваемая вода в породы ниже глубины 220 м не попадала, так как почти вся поглощалась трещиноватыми породами верхних горизонтов.

Таким образом, применение таких методов, как термокароттаж и резистивиметрия для определения зон водопритоков в скважины, вскрывающие перегретые высокотермальные воды, дает вполне приемлемые результаты даже при тех отступлениях от общепринятой методики, о которых упоминалось выше.

Температурные измерения в выстаившихся скважинах

Термограммы всех скважин, на основании которых составлены геозотермические профили и карта изотерм, получены путем измерения температур в выстаившихся скважинах, заполненных водой и паром. В процессе бурения измерение температур в скважинах систематически не проводилось. Отдельные точечные замеры носили случайный характер

и делались в различных условиях по времени выстаивания и по характеру заполнителя скважины в момент замера.

При выстаивании скважин или замерах температур в скважинах с избыточным давлением на устье не всегда достигалась полная герметизация устья скважины ввиду плохого качества устьевой арматуры, что явилось причиной передвижения воды вверх.

Естественное распределение температуры в скважинах нарушалось за счет передвижения воды при утечках на устьях и конвекции, связанной с большей разностью температур на забое и устье. На характере термограмм сказывалось также время выстаивания после бурения или пробного выпуска пароводяной смеси из скважин. Влияние каждого из этих факторов на распределение температур в скважинах специально не исследовалось, но, очевидно, оно различно. Передвижение воды за счет пропусков воды и пара на устье, а также конвективный теплообмен приводят к завышению температуры в верхней части ствола скважины, в то время как на глубине, в интервале залегания водосодержащих пород, указанные процессы практически не влияют на температуру.

Период выстаивания скважин по ряду причин не был постоянным и колебался от 15 до 125 дней. В данном случае время выстаивания скважины, особенно для определения температуры, соответствующей установившемуся термическому режиму в приповерхностной зоне, не имело решающего значения в связи с наличием утечек и конвекции. Например, в скв. 10 температура на глубине 20 м после выстаивания в течение 22 дней при достаточной герметизации скважины равнялась 85°C , а после выстаивания в течение 57 дней при наличии утечек — температура на этой же глубине увеличилась до 143°C .

Так как все замеры температур производились после пробного выпуска пароводяной смеси, который длился 2—3 дня, или после гидрогеологического опробования, в процессе которого продолжительность выпуска пароводяной смеси возрастала до 30—45 дней, то можно предполагать нарушение естественного температурного режима за счет прогрева ствола скважины. Например, в скв. 10 температура на глубине 5 м в естественных условиях (замер в шурфе) составила 12°C ; после бурения, пробного выпуска и выстаивания при соблюдении герметичности устьевого оборудования температура повысилась на 42°C .

В скв. 3 температуры, замеренные после пробной откачки и длительного выстаивания в течение 310 дней, несколько отличались от температуры, замеренной вскоре после откачки, причем в верхнем интервале (до 40 м) температура последнего замера была меньше температур, измеренных первоначально (табл. 49).

Надо полагать, что большие отклонения от температур в естественных условиях в приповерхностной зоне за счет прогрева имели место и на других скважинах. Это подтвердилось по наблюдениям за изменением

Т а б л и ц а 49

Температуры в скважине К-3

Глубина замера, м	Дата замера		Глубина замера, м	Дата замера	
	31.X 1959	8.IX 1960		31.X 1959	8.IX 1960
10	14,3	13,0	50	26,3	27,0
20	17,2	14,5	60	30,0	31,0
30	20,0	18,0	80	35,0	38,0
40	23,1	22,0	100	40,5	43,0

температуры в период опытно-эксплуатационных выпусков в скв. 8. Она простаивала более года, и чем ближе к этому сроку была снята термограмма, тем больше отмечалось уменьшение температуры в интервале 0—120 м по сравнению с первоначальной температурой, замеренной в период одиночных испытаний. Так как уровень в скважине находился ниже устья, никаких утечек и, следовательно, продвижения воды не происходило.

Промывка в процессе бурения охлаждала ствол скважины, причем наибольшее искажение температуры происходило в интервале водонасыщенных отложений на глубине 100—300 м. После прекращения циркуляции бурового раствора температура вначале довольно быстро поднималась, затем медленно приближалась к температуре, замеренной после пробного выпуска пароводяной смеси и выстаивания. Данные по измерению температур в различные стадии проходки и испытания скважины получены по скв. 18 (рис. 38).

Измерения температуры в скважинах, по данным которых построены термограммы, производились максимальными ртутными термометрами со шкалой 0—150°С и 120—250°С, за исключением скв. 10. Замеры в последней были проведены биметаллическим термометром ТГБ-4, который, к сожалению, не мог быть широко использован в связи с конструктивными недостатками. Температуры в верхней части ствола замерялись максимальными ртутными термометрами со шкалой 0—150°С. Они же использовались при измерении температур по всей глубине в первых колонковых скважинах из-за отсутствия подходящих термометров.

В скважины, находящиеся под напором, гильза с термометром опускалась через лубрикатор. Спуск производился гидрологической лебедкой, оборудованной счетчиком глубины, на стальном тросе диаметром 2—3 мм.

Измерение температур в скважинах в условиях, описанных выше, несмотря на возможные ошибки в определении истинных величин, имеют большое, чисто прикладное значение для выяснения границ потока термальных вод, выявления максимальных температур как показателя потенциальной энергетической значимости проектируемых эксплуатационных скважин, уточнения направления движения термальных вод и характера их циркуляции.

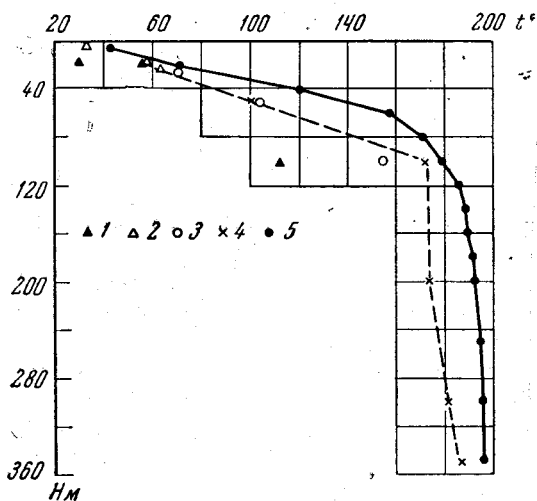


Рис. 38. Измерение температур в скв. К-18

1 — температуры, замеренные в процессе бурения, выстаивание 2 часа; 2 — температуры, замеренные в цементном стакане после цементирования обсадной колонны, выстаивание 16 дней; 3 — температуры, замеренные после бурения и смены бурового раствора на воду, выстаивание 4 дня; 4 — температуры, замеренные после бурения и смены бурового раствора на воду, выстаивание 8 дней; 5 — термограмма, полученная измерением температур в скважине, заполненной водой, после выстаивания в течение 123 дней

На первом этапе разведки на Паужетском месторождении применялась поинтервальная система опробования водоносного комплекса с оставкой процесса бурения. Она была выдержана на 800-метровой роторной скважине и на первой колонковой скважине. Благодаря этому, удалось составить принципиальную гидрогеологическую характеристику отдельных литологических комплексов, слагающих месторождение, и выявить продуктивную толщу псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты. Впоследствии, когда скважины разбуривали, в основном только эту толщу, поинтервальная система сменилась опробованием всего вскрытого и необсаженного трубами водоносного комплекса.

Опробование проводилось после окончания бурения. Это значительно облегчало проходку скважин, но создавало ряд затруднений при расшифровке мест водопритоков. В связи с этим, данные по фильтрационным свойствам пород и их обводненности по ряду скважин являются усредненными. Однако участки сильных водопритоков выявлялись достаточно уверенно. Это можно было сделать благодаря сопоставлению данных опробования с наблюдениями в процессе бурения за поглощением раствора и буримостью пород.

Опробование пароводяных скважин сопряжено со значительными трудностями, так как общепринятые методика и конкретные приемы гидрогеологических испытаний оказываются здесь часто неприемлемыми.

До начала разведочных работ на Паужетке отечественная гидрогеология не сталкивалась с подобными рода объектами.

В имевшихся зарубежных материалах, в основном в новозеландских работах (L. J. Grange, 1955), имелось довольно подробное описание техники измерений производительности пароводяных скважин. Краткая характеристика этих приемов дается в небольшой статье В. В. Иванова и Б. И. Пийла (1960), посетивших Новую Зеландию в 1959 г. Однако разбор общих методических положений в упомянутых работах отсутствует. Это легко объяснимо. Опробование пароводяных скважин — новый раздел в практике гидрогеологических работ, и многие теоретические стороны вопроса в настоящее время слабо разработаны.

На Паужетке была разработана методика испытаний пароводяных скважин, базирующаяся на гидрогеологической основе. В отношении технической стороны дела она имеет много общего с зарубежной, в частности новозеландской, практикой.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Специфика опробования пароводяных скважин обусловлена тем, что на месторождениях, подобных Паужетскому, бурением вскрываются напорные воды с температурой значительно выше 100°C . До тех пор, пока на глубине вода находится под давлением, превышающим давление насыщенного пара при данной температуре, она не вскипает. Однако во время действия скважины вода в конце концов поднимается до такого уровня, где возможно ее вскипание, и в стволе скважины образуется пароводяная смесь. При приближении к устью скважины количество пара прогрес-

сивно нарастает; соответственно с этим возрастает скорость пароводяной смеси, достигая на выходе в ряде случаев сотен метров в секунду.

Своеобразная гидродинамика пароводяных скважин в основном и предопределяет как программу их испытаний, так и методы опробования. Ниже будут рассмотрены главные характерные особенности таких скважин.

Процесс истечения пароводяной смеси из скважины в первом приближении, необходимым для практических расчетов, можно рассматривать как адиабатический. Действительно, вынос тепла из скважин, заключенного в пароводяной смеси, измеряется обычно тысячами *ккал/сек*. На этом фоне тепловые потери в окружающее пространство, не превышающее, как показывают расчеты, 1—10 *ккал/сек*, не имеют существенного значения.

Количество пара в пароводяной смеси, измеряемое обычно в весовых процентах, строго контролируется величиной энтальпии и давлением в данной точке. Оно может быть легко рассчитано по соответствующим теплотехническим формулам, которые приводятся в следующих разделах, если известны указанные параметры. Величина паросодержания в свою очередь дает возможность рассчитать удельный вес пароводяной смеси, удельный объем, а следовательно — и скорость ее движения, если известен расход.

Основные формулы для расчетов параметров пароводяной смеси (при известном давлении):

$$i_{\text{пвс}} = i'(1-x) + i''x, \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{пвс}} = \frac{1}{\frac{1-x}{\gamma'} + \frac{x}{\gamma''}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{пвс}} = \frac{1}{\gamma_{\text{пвс}}} = \frac{1-x}{\gamma'} + \frac{x}{\gamma''} = (1-x)V' + xV'', \quad (3)$$

$$W_{\text{пвс}} = \frac{Q \cdot V_{\text{пвс}}}{S}, \quad (4)$$

где i — энтальпия (в *ккал/кг*) пароводяной смеси ($i_{\text{пвс}}$), воды (i') и пара (i''); x — паросодержание в 1 *кг* пароводяной смеси (в долях *кг*); γ — удельные веса пароводяной смеси ($\gamma_{\text{пвс}}$), воды (γ') и пара (γ'') в *кг/м³*; V — удельные объемы пароводяной смеси ($V_{\text{пвс}}$), воды (V') и пара (V'') в *м³/кг*; W — скорость пароводяной смеси в *м/сек*; Q — расход пароводяной смеси в *кг/сек*; S — сечение труб в *м²*.

Значения i' , i'' , V' , V'' , γ' , γ'' берутся из таблиц сухого насыщенного пара.

Температура и давление взаимно определяют друг друга, и каждому значению давления соответствует строго определенная температура и наоборот, что позволяет отказаться при опробовании пароводяных скважин от одновременных замеров температур и давлений и измерять только какой-либо один параметр, находя другой по теплотехническим таблицам. Это подтверждено результатами контрольных измерений давления и температур в условиях резко меняющегося режима.

Во время действия скважины на ее устье устанавливается то или иное давление насыщенного пара, которое определяется, с одной стороны — тепловыми параметрами и расходом пароводяной смеси и, с другой, — условиями выхода смеси в атмосферу. Это давление легко регулируется прикрытием и открытием задвижки.

Минимальное давление на устье, практически равное атмосферному, достигается при свободном вертикальном фонтанировании скважины без установки каких-либо дополнительных устройств. При монтаже

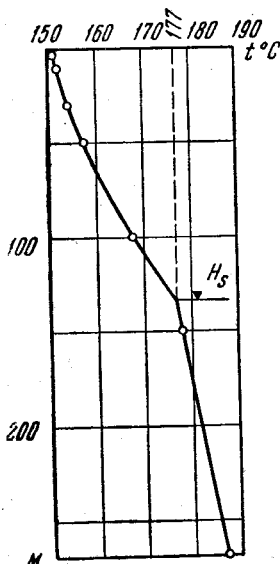


Рис. 39. Температура в действующей скв. 2. Давление на устье 3, 4 *ми*, средняя энтальпия 77 ккал/кг, H_s — уровень парообразования

различных отводов, в том числе измерительных, нижний предел давления повышается и особенно значительно — с уменьшением диаметра отвода.

Максимальное значение давления ограничивается величиной, соответствующей температуре термальной воды, вскрытой скважиной. Однако рабочие давления на устье пароводяных скважин всегда значительно ниже этой величины. Так например, максимальной температуре 195°, зафиксированной на Паужетском месторождении в скв. 14, соответствует давление насыщенного пара 14,2 *ата*. Максимальное же рабочее давление на устье этой скважины составляет всего 6,75 *ата*. Эта отставание рабочих давлений от максимально возможных объясняется тем, что уровень парообразования в скважине находится на большой глубине и во время подъема пароводяной смеси часть внутренней энергии пара переходит в кинетическую энергию, которая расходуется на перенос воды, а также тратится на преодоление гидравлических сопротивлений.

Глубина образования паровой фазы находится в сложной функциональной зависимости от температуры вскрытой воды, ее расхода и условий движения по стволу скважины и отводам на поверхности. В общем случае глубина парообразования

тем больше, чем выше температура вскрытой воды и чем шире ствол скважины; с ростом гидравлических сопротивлений на пути движения смеси она уменьшается. По данным опытных работ парообразование в действующих скважинах начинается на глубине десятков и сотен метров.

На Паужетском месторождении определение глубины парообразования производилось с помощью измерения температур в стволе действующей скважины. Так как парообразование в скважине сопровождается уменьшением температуры вскипевшей воды, на всем интервале от уровня парообразования до устья скважины температуры имеют более низкие значения, чем это следует из величины теплосодержания пароводяной смеси, замеренной на поверхности. На графике температуры (рис. 39) выделяются два участка, один из которых криволинейный — характеризует рост температур в зоне пароводяной смеси, а второй — более крутой и прямолинейный — температуру воды на глубине. В месте сопряжения этих участков фиксируется температура, равная среднему значению теплосодержания пароводяной смеси и соответствующая ей глубина парообразования. В принципе уровень парообразования можно определить также по изменению давлений в действующей скважине с помощью глубинного манометра.

Найденной глубине парообразования всегда соответствует строго определенное давление, а именно — давление насыщенного пара при имеющейся температуре. Благодаря этому обстоятельству, можно произвести оценку гидродинамического состояния скважины. Действительно, если на некоторой глубине существует давление, которое по своей величине значительно меньше пластового давления на этом же уровне, то происходит откачка воды, обусловленная глубоко проникающим парообразованием, т. е. эффект парлифта. При этом каждому положению уровня парообразования соответствует определенный перепад давлений и определенный расход.

Следствием парлифта является высокая производительность скважин, измеряемая часто десятками килограммов в секунду. Особенно резко влия-

ние парлифта на производительность скважин сказывается на месторождениях, где водоносные породы обладают относительно низкими фильтрационными свойствами. В самом деле, когда парообразование происходит на глубине сотен метров, перепад между давлением в пласте и в стволе скважины достигает десятков атмосфер. Поэтому, несмотря на невысокие фильтрационные свойства пород, поступление воды в ствол скважины идет очень интенсивно.

Глубина парообразования в гидродинамическом отношении имеет нечто общее с понижением динамического уровня при откачке обычных артезианских скважин. Однако между ними имеется существенная количественная разница. Уровень воды в скважине при обычной откачке (например, штанговым насосом) находится только под атмосферным давлением. В пароводяных скважинах вода на уровне парообразования испытывает давление, равное давлению насыщенного пара при имеющейся температуре, т. е. значительно больше атмосферного. Очевидно, что величина понижения динамического уровня, применяющаяся в гидрогеологических расчетах, меньше глубины парообразования на высоту водяного столба, оказывающего давление, равное избыточному давлению насыщенного пара (рис. 40).

Поскольку давление на уровне парообразования есть величина строго определенная, для ориентировочных гидрогеологических расчетов на пароводяных скважинах с установившимся режимом применимы общие формулы подземной гидравлики, в частности — формула Дюпюи:

$$Q = \frac{2\pi MK\Delta P}{\ln \frac{R}{r}},$$

где Q — дебит скважин; M — мощность водоносного горизонта; K — коэффициент фильтрации; ΔP — перепад между пластовым давлением и давлением в стволе скважины на уровне парообразования, выраженный в метрах водяного столба; R и r — радиусы воронки депрессии и скважины.

На основании изложенного выше, можно сделать вывод, что при получении необходимых данных имеется принципиальная возможность свести методику опробования пароводяных скважин к общепринятой

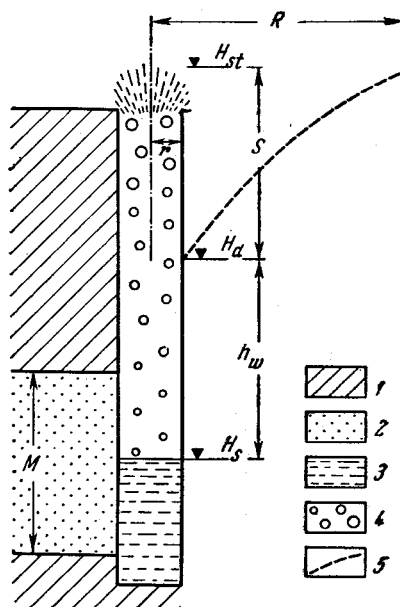


Рис. 40. Гидродинамическая система действующей пароводяной скважины

1 — водонепроницаемые породы; 2 — водоносный горизонт с температурой выше 100° С; 3 — вода; 4 — пароводяная смесь; 5 — кривая депрессии; M — мощность водоносного горизонта. H_{st} — статический уровень термальных вод; H_d — динамический уровень; H_s — уровень парообразования; S — понижение динамического уровня; h_w — высота столба воды, оказывающего давление, равное избыточному давлению насыщенного пара при имеющейся температуре; R — радиус воронки депрессии; r — радиус скважины

методике гидрогеологических испытаний, и рассматривать расход пароводяной смеси как функцию понижения уровня при откачке. Однако в ряде случаев этому мешают технические трудности. Не всегда бывает возможно точно определить уровень парообразования, особенно если он находится в призабойной части скважины. На практике оказалось более рациональным представлять расход пароводяной смеси как функцию давления пара на устье скважины, которое легко и достаточно точно поддается регулировке с помощью задвижек. При этом более высокому давлению пара на устье соответствует меньшая глубина парообразования и, следовательно, меньшее понижение динамического уровня и меньший расход. Зависимость между расходом и давлением в данном случае имеет обратный характер. Наибольший расход пароводяной смеси наблюдается при свободном фонтанировании скважины, т. е. при минимальном давлении пара на устье, равном 1 атм.

Подобно тому, как выражение дебита обычных артезианских скважин лишено почти всякого смысла, если оно не отнесено к какому-то понижению динамического уровня, значения производительности пароводяных скважин имеют смысл лишь тогда, когда они отнесены к какому-то давлению пара на устье. И если при опробовании обычных артезианских скважин составляется график зависимости расхода от понижения уровня (минимум при трех понижениях), на пароводяных скважинах составляется график зависимости расхода от давления пара на устье: $Q = f(P)$ (минимум при трех значениях давления). Этот график (рис. 56) с нанесенной на него числовой величиной теплосодержания является основной характеристикой пароводяных скважин в части их производительности. Подобная система опробования широко применяется за границей (L. J. Grange, 1955), она была принята также и на Паужетском месторождении.

График $Q = f(P)$ очень удобен в практическом отношении, так как он непосредственно отражает изменения в расходе пароводяной смеси при вводе на устье скважины тех или иных гидравлических сопротивлений. Это самым тесным образом связано с различными вопросами эксплуатации — с выбором типа турбин, пароотделителей, подводных трасс и т. д.

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Разобранные выше гидродинамические положения применимы к скважинам, которые находятся в стабилизировавшихся гидрогеологических условиях. При этом полагалось также, что процесс извержения пароводяной смеси находится в гармоничном сочетании с притоком воды, т. е. имелась в виду пароводяная скважина с постоянным режимом. В действительности гидрогеологические условия на участке заложения скважин могут изменяться. Что же касается режима извержения, то наряду с постоянно действующими пароводяными скважинами имеются скважины, обладающие пульсирующим, а иногда прерывистым режимом, аналогичным режиму природных гейзеров (рис. 41).

Гейзерный и пульсирующий режим во всех отношениях чрезвычайно затрудняет опробование, так как по ходу извержения непрерывно меняются расход, энтальпия и химические показатели пароводяной смеси. Еще более нежелателен он в условиях эксплуатации пароводяных скважин. В связи с этим необходимо коротко остановиться на способах перевода гейзерного и пульсирующего режима в режим постоянного истечения.

Очевидно, что при постоянном режиме должно выдерживаться определенное условие, а именно: поступление воды в ствол скважины из водовмещающих пород должно уравновешиваться истечением пароводяной

смеси. Если приток воды не компенсирует выброс пароводяной смеси, то для устранения этого явления есть два пути. Один — увеличение устьевого давления и второй — создание дополнительных сопротивлений по пути движения пароводяной смеси, т. е. уменьшение диаметра эксплуатационной колонны.

Наиболее просто режим извержения регулируется с помощью задвижки, т. е. путем увеличения давления на устье скважины. В частности, на скв. 2 пульсирующий режим сменился постоянным после того, как задвижка была прикрыта примерно на $\frac{3}{4}$ сечения и давление на устье достигло 4,1 ата, против 2,65 ата при полном открытии задвижки. Этот способ применяется при опробовании довольно часто, но его отрицательным свойством является то, что выравнивание режима извержения достигается ценой сильного уменьшения расхода пароводяной смеси. Так, приведение скв. 1 к постоянному режиму повлекло уменьшение расхода в 7 раз — до 1 кг/сек против 7 кг/сек. Поэтому более рациональным способом, особенно в условиях эксплуатации, является оборудование скважины колонной труб такого диаметра, который бы максимально точно соответствовал конкретным гидрогеологическим условиям.

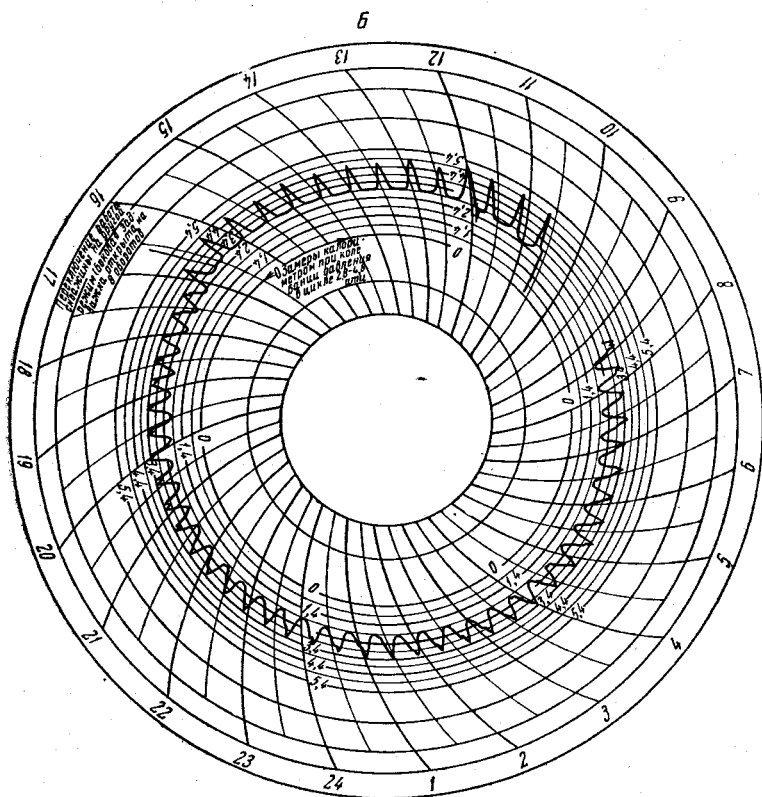
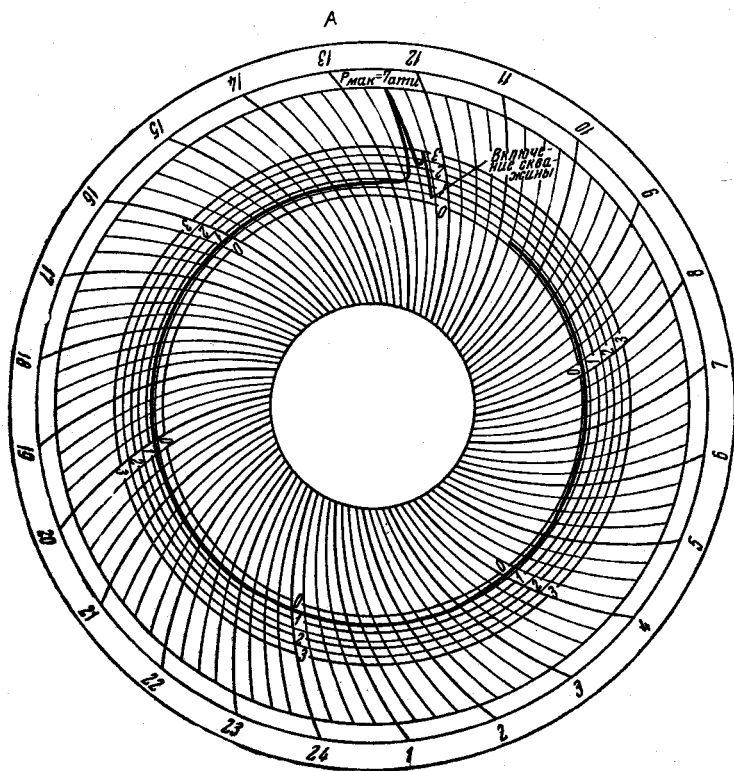
Во время разведочного бурения в обстановке, когда еще неизвестны водообильность пород и параметры пароводяной смеси, конструкция скважин, естественно, часто не соответствует оптимальной. Диаметр обсадных колонн бывает либо очень большим, что приводит к прерывистому режиму, либо, наоборот, слишком малым, что влечет за собой некоторое искусственное снижение производительности скважины.

В этом отношении показательны следующие примеры. При опробовании первой роторной скважины на Паужетском месторождении на интервале от 120 до 196 м был зафиксирован средний расход пароводяной смеси около 6 кг/сек при среднем давлении около 3 ата. Вместе с тем, работа скважины имела ярко выраженный гейзерный характер. Это было связано с тем, что для данных условий относительно низкой водообильности ствол скважины, имевшей диаметр около 10 дюймов, был очень широк.

Колонковая скв. 2 — дублер роторной — имела в этом интервале средний диаметр 4,5 дюйма, и приток воды в нее был несколько меньше, чем в широкий ствол роторной скважины. Несмотря на это, был достигнут непрерывный режим извержения, хотя и со значительными пульсациями. Расход пароводяной смеси при среднем давлении около 3 ата составил 3 кг/сек, т. е. всего вдвое меньше, чем было зафиксировано на роторной скважине.

С другой стороны, на Паужетском месторождении имелись разведочные скважины, которые, находясь в благоприятных гидрогеологических условиях, обладали недостаточно широким диаметром, что препятствовало максимальному проявлению парлифта. К ним относятся, в частности, наиболее производительная разведочная скв. 4. Она имела конечный диаметр 112 мм и была пробурена на глубину 275,9 м. Поступление воды в ствол происходило из крупных трещин в призабойной части скважины. Режим извержения пароводяной смеси этой скважины отличался очень большим постоянством. При свободном фонтанировании ее расход достигал 40 кг/сек, а уровень парообразования находился, по опытным данным, на глубине около 200 м. Можно полагать, что если бы скв. 4 имела большой диаметр — порядка 6—8 дюймов, парообразование в ней произошло бы на большую глубину, и приток воды в ствол происходил более интенсивно (без учета дополнительного притока за счет большого диаметра). По расчетам, понижение уровня парообразования до забоя могло бы обеспечить расход пароводяной смеси до 60 кг/сек.

Таким образом, решение вопросов эксплуатации пароводяных скважин самым тесным образом связано с особенностями их гидродинамики.



И если обеспечение больших водопритоков достигается в общем случае бурением скважин большого диаметра, то постоянный режим извержения пароводяной смеси может быть обеспечен лишь в том случае, если в эксплуатации колонке не развиваются процессы опережающего движения паровой фазы. Выбор эксплуатационной колонны нужного диаметра возможен, очевидно, лишь после гидрогеологического опробования, по получении необходимых данных о водообильности скважины и тепловых параметрах пароводяной смеси.

Изменения в расходе и величине энтальпии пароводяной смеси отражаются на величине давления пара на устье скважины. Указанные взаимоотношения между меняющимся расходом и паросодержанием, с одной стороны, и давлением на устье — с другой, были изучены при детальном исследовании пароводяных скважин с пульсирующим и гейзерным режимом.

О характере этих взаимоотношений дает представление следующий пример. При опробовании скв. 2 было установлено, что она имеет резко выраженный пульсирующий режим с продолжительностью циклов 20—25 мин. После обработки результатов измерений выяснилось, что средние величины параметров за цикл составили по расходу 3,1 кг/сек, по теплоемкости — 175 ккал/кг и по давлению — 2,65 атм. Все эти величины могут быть нанесены на график $Q = f(P)$. Однако они сугубо расчетны, так как в действительности значения параметров, близкие к средним,

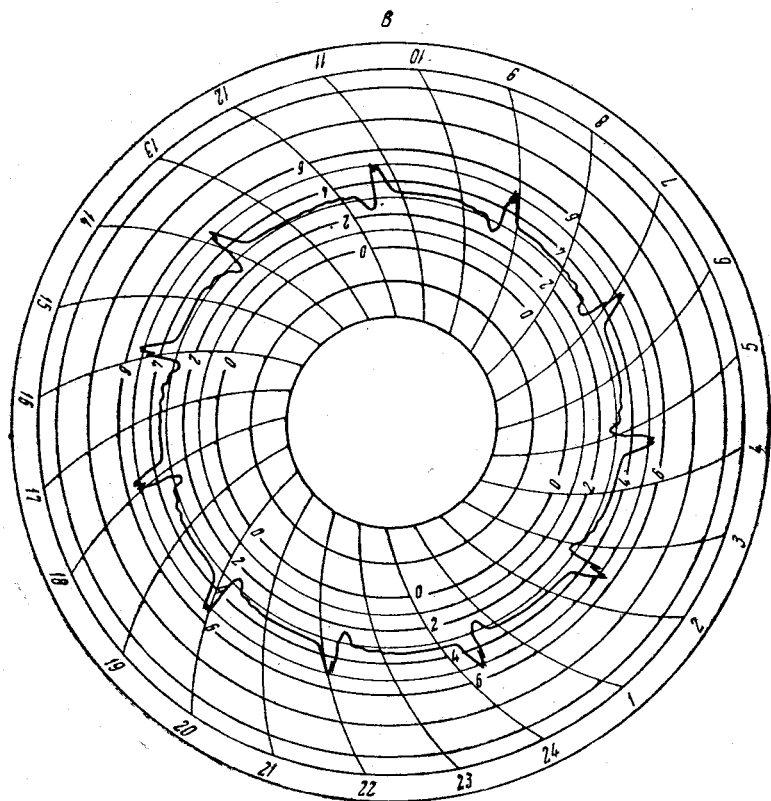


Рис. 41. Диаграммы давления пара на устье Паужетских скважин

А — скв. К-7 — постоянный режим извержения пароводяной смеси, прибор МГ-410, поставлено 17.IV 1960 г., снято 18.IV 1960 г.; Б — В — разновидность пульсирующего режима: Б — скв. К-13, поставлено 14.VI 1961 г., снято 15.VI 1961 г.; В — скв. К-12, поставлено 25. IX 1960 г., снято 26.IX. 1960 г.

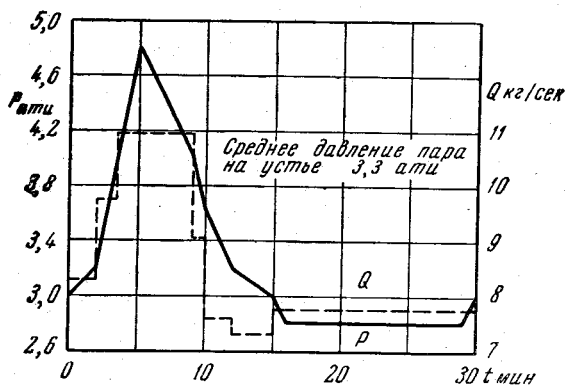


Рис. 42. Изменение дебита и давления на устье пульсирующей скв. К-13 в течение цикла извержения

не выдерживались хоть сколько-нибудь продолжительное время. Начало цикла ознаменовалось резким повышением давления с 1,8—1,9 до 3,1—3,2 *атм*. При этом фиксировались наибольшие значения дебита 7—8 *кг/сек*, хотя теплосодержание пароводяной смеси было минимальным — около 140 *ккал/кг*. Развитие извержения сопровождалось уменьшением расхода до 2 *кг/сек* и ростом теплосодержания пароводяной смеси до 220 *ккал/кг*. В течение первых 2—3 *мин* уменьшение расхода проис-

ходило очень быстро, поэтому, несмотря на рост паросодержания, давление на устье падало до 2,7—2,6 *атм*. В дальнейшем, однако, давление держалось практически на одном уровне — 2,5—2,6 *атм*, так как относительно незначительное уменьшение расхода компенсировалось ростом паросодержания. Всю вторую половину цикла величина расхода почти не менялась, находясь в пределах 2—3 *кг/сек*, в то время как теплосодержание в последние 4—5 *мин* резко падало. Соответственно с этим на манометрах отмечалось падение давления до 0,8—0,9 *атм*. Сходная картина, но при более высоком среднем давлении, наблюдалась на скв. 13 (рис. 42).

Таким образом, давление пара на устье скважины является весьма чувтким индикатором, моментально реагирующим на изменения в режиме извержения. Изменения во внешней гидрогеологической обстановке также, вероятно, отражаются на давлении пара на устье. Уменьшение притока воды, например, при влиянии соседних скважин в период опытно-эксплуатационных выпусков вызвало уменьшение давления. В результате падения или роста температуры поступающей воды также уменьшится или увеличится давление на устье. Таким образом, только по изменению давления без привлечения дополнительных сведений нельзя однозначно судить о том, что же именно изменяется во внешней обстановке. Однако «самопроизвольный» спад или рост давления на устье всегда нужно рассматривать как своего рода сигнал для нового обследования пароводяной скважины.

Отсюда следует, что регистрация давления на устье — важнейший элемент режимных наблюдений на пароводяных скважинах. Будучи автоматизирована, регистрация давления дает очень ценный систематический материал, по которому можно судить как о режиме извержения пароводяной смеси, так и о стабильности гидрогеологических условий на месте заложения скважины.

ХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ПРИ РАБОТЕ СКВАЖИН

С особенностями динамики пароводяных скважин тесно связаны процессы дифференциации химического состава высокотермальных вод, вскрываемых скважиной. По мере того, как образуется паровая фаза, в нее переходят легко летучие вещества, растворенные в воде. Вода при этом дегазируется и, кроме того, обедняется некоторыми солями. В отношении же основной массы солей вода становится более концентрированной.

Для того, чтобы иметь правильное представление о химическом составе пароводяной смеси и той воды, которая вскрывается на глубине скважины, необходимо, во-первых, знать состав паровой фазы и состав воды на выходе, и во-вторых — соотношение количеств воды и пара при отборе проб на анализ.

Состав паровой фазы имеет очень важное практическое значение сам по себе, так как от него зависит выбор схемы использования пара на проектируемой геотермической электростанции.

При химическом опробовании особые трудности возникают в тех случаях, когда скважина имеет гейзерный режим. В стадию парения вода, находящаяся в скважине, сильно дегазуруется, а концентрация солей, как показали наблюдения, увеличивается в ней почти вдвое. Поэтому во время извержения первые порции пароводяной смеси оказываются чрезвычайно бедными газом и обладают повышенной минерализацией. Данные их анализа, очевидно, не могут быть распространены на выводы о водах в целом. Точно также не могут считаться характерными и данные, получаемые в результате анализа проб пара, отобранных в стадию парения и в конце извержения, когда количество пара по отношению к воде становится очень большим. И только примерно в середине извержения, когда на поверхность поступают порции воды, не подверженные предварительно дегазации, анализ может отражать действительный состав воды на глубине.

Поскольку отбор проб занимает значительное время (в среднем около 1 часа), скважина с гейзерным режимом может быть удовлетворительно опробована, если стадия извержения у нее длится несколько часов. Если же стадия извержения непродолжительная, то при отборе одной пробы в нее неизбежно будут поступать порции пара с разной концентрацией газов и, что также важно, в равном соотношении с водой. Поэтому при интерпретации данных химического анализа по скважинам с гейзерным и пульсирующим режимом следует очень осторожно относиться к приводимым цифрам, особенно по газовому составу, имея в виду, что они могут характеризовать случайные временные концентрации.

ИСПЫТАНИЯ ОДИНОЧНЫХ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Программа испытаний пароводяных скважин составлялась в расчете на то, чтобы в ходе опробования были получены исходные данные, достаточные для составления как гидрогеологической, так и энергетической характеристик скважины.

К числу важнейших исходных данных относятся следующие.

1. Теплофизические данные

- а) температура в выстоявшейся скважине;
- б) энтальпия пароводяной смеси на выходе;
- в) давление пара на устье скважины.

2. Гидродинамические данные

- а) положение статического уровня термальной воды или величина пластового давления;
- б) дебит скважины при различных давлениях пара на устье;
- в) положение уровней парообразования при различных расходах;
- г) режим извержения пароводяной смеси при различных давлениях пара на устье.

3. Химические данные

- а) химический состав воды;
- б) химический состав пара;
- в) весовое соотношение воды и пара при отборе проб на анализ.

Анализ этих данных позволяет оценить энергетическую мощность скважины, наметить рациональный эксплуатационный режим и осветить гидрогеологические условия на месте ее заложения.

Необходимо иметь в виду, что уверенно опираться на полученные данные можно лишь при условии, если конструкция и оборудование скважин соответствуют определенным требованиям, а именно: соблюдены качественный цементаж обсадных колонн и безупречное оборудование устья, исключающее утечки. В противном случае, в действующих пароводяных скважинах при разных режимах может быть либо поглощение в верхний безнапорный водоносный горизонт, либо наоборот — отсасывание из него. При наличии утечек на оголовке невозможно замерить статический уровень и подготовить скважину к термометрии.

Последовательность отдельных операций при опробовании изменялась в зависимости от конкретных условий. Однако по большей части выдерживалась следующая последовательность. В первую очередь производились операции по замерам температур в скважине и определению статического уровня термальной воды. Этим замерам предшествовало выставление скважины в течение нескольких дней, которые использовались для оборудования устья оголовком и подготовки и монтажа измерительных устройств. На следующем этапе устанавливался полный диапазон давлений пара на устье скважины, и наблюдался режим извержения пароводяной смеси при разных давлениях. В ходе этих работ обычно уже вырисовывалась предварительная характеристика скважины. Наконец, на третьем, заключительном этапе, получались точные сведения о производительности скважины, теплосодержании пароводяной смеси и ее химическом составе.

Подготовительный этап опробования

Оборудование устья скважины

Проведению гидрогеологических испытаний предшествовало оборудование устья скважин специальными оголовками. Они установлены непосредственно над главными задвижками. Ответительные штуцеры оголовка, один из которых используется для выпуска пароводяной смеси в атмосферу, а другой — для направления ее в измерительные устройства, снабжены линейными задвижками. Верх оголовков оборудован съемной заглушкой. К боковому отводу, по которому пароводяная смесь выбрасывается в атмосферу, крепится труба с набкой для подсоединения переносного циклонного сепаратора, используемого при химическом опробовании скважины, и уже после этой трубы — регулирующая боковая задвижка. К задвижке обязательно присоединяется выбросной патрубок длиной 80—100 см для защиты ее от коррозии и безопасного открытия или закрытия задвижки. В корпус оголовков вварены маленькие штуцеры для подсоединения манометров. В качестве прокладочного материала на фланцевых соединениях труб и задвижек использовался паранит.

Конкретная конструкция оголовка выбиралась в соответствии с дебитом скважины, оцененным визуально при пробном выпуске. Для скважины с небольшим дебитом вполне применим оголовок-крестовина, сваренный из отрезков обсадных труб сравнительно небольшого диаметра (до 100 мм). Такой оголовок весьма прост в изготовлении, а отдельные узлы его имеют небольшой вес. Это дает возможность устанавливать оголовок вручную. Однако, указанная конструкция не является универсальной, так как она не пригодна для пропуска большого расхода пароводяной смеси. Поэтому на высокодебитных скважинах устанавливались оголовки, сваренные из труб большого — до 8 дюймов диаметра.

Определение статического уровня термальной воды

При опробовании артезианских скважин данные о положении статического уровня необходимы, чтобы иметь представление о величине и распределении пластового давления. Это давление можно измерить непосредственно, опустив в скважину на нужную глубину глубинный манометр. Однако на большинстве гидрогеологических объектов величина пластового давления более точно рассчитывается, учитывая положение статического уровня.

На пароводяных скважинах все эти работы значительно усложняются. Принципиально здесь возможно применение глубинных манометров. Однако приборы, которые выпускаются в настоящее время промышленностью, приспособлены в основном для нужд нефтяников. Те глубинные манометры, с которыми можно работать при высоких температурах (100—200°), рассчитаны на очень большие давления. В связи с этим на объектах, где 100—200° температуры фиксируются на первых сотнях метров, а пластовые давления относительно невелики, подобные приборы не обеспечивают необходимой точности. В то же время более точные приборы, рассчитанные на меньшие давления, как правило, не приспособлены к высоким температурам. Опыта применения глубинных манометров на пароводяных скважинах пока не имеется.

Положение статического уровня в самоизливающихся скважинах определяется по замеру напора воды манометром. В скважинах несамоизливающихся положение уровня можно определить обычной хлопущкой.

На сильно прогретых участках, расположенных в пределах естественной термальной площадки, нередки случаи, когда в верхней части ствола закрытых скважин образуется пар. В этом легко убедиться, измерив температуру в приустевой части скважины и сравнив ее с табличной температурой насыщенного пара при том давлении, которое зарегистрировано манометром. Очевидно, в данном случае показания манометра относятся к давлению пара, а не воды, и использовать их для расчетов статического уровня нельзя. Следует подчеркнуть, что вскипание при закрытой задвижке может также начаться и в тех скважинах, устье которых герметизировано недостаточно надежно.

В том случае, когда в приустевой части скважины находится пар, статическое давление (давление насыщенного пара) периодически изменяется, причем амплитуда колебаний может достигать одной атмосферы и больше. На диаграмме давления запись давления пара в закрытой скважине имеет характерный пилообразный вид. Практически, по характеру диаграммы давления закрытой скважины можно определить пар или вода находится в верхней части ствола скважины, не прибегая к измерению температуры.

Причины колебания давления пара на устье закрытой скважины недостаточно ясны. Можно предположить, что они связаны с частичной конденсацией пара в процессе отдачи тепла на оголовке и вообще в приповерхностной части скважины. При этом изменяется объем и давление (минимум на диаграмме), затем образование новых порций пара за счет вскипания перегретой воды повышает давление на устье (на диаграмме максимум давления).

Определение статического уровня в таких скважинах в последнее время, по предложению В. М. Сугрובה, проводилось с помощью закачки в них под давлением холодной воды. Таким способом были определены статические уровни несамоизливающихся скв. 13, 20, 21 и самоизливающихся скв. 12 и 16.

Холодная вода конденсировала имеющийся пар, охлаждала приповерхностную часть скважины и частично нагнеталась в пласт, что приводило в первый момент к понижению естественного статического уровня. Для

определения положения статического уровня после закачки проводились наблюдения за восстановлением уровня и температурой воды. В тех скважинах, в которых статический уровень располагается ниже устья, измерения можно было проводить обычной хлопущкой, а в скважинах самоизливающихся наблюдения за восстановлением статического давления производятся по самопишущему или показывающему манометрам. В этом случае требуется обязательное измерение температуры на устье скважины. В несамоизливающихся скважинах наблюдения проводились, обычно, до начала кипения или пароводяного выброса.

Перед началом кипения уровень сильно колеблется из-за образования пузырьков пара и одновременно конденсации. Перед выбросом, когда температура достигает точки кипения при данном давлении, начинается быстрый подъем уровня, после чего начинается извержение пароводяной смеси.

Определение статического уровня в скважинах с высокой температурой показало, что время закачки и количество холодной воды тем больше, чем ниже положение статического уровня и, следовательно, больше температура на его отметке.

Статические уровни, определенные описанными выше способами, отражают пластовое давление в том случае, если объемный вес воды на исследуемой площади приблизительно одинаков. Если объемный вес изменяется по площади, то необходимо при расчете пластового давления учитывать влияние объемного веса. Изменение объемного веса термальных вод связано с изменением температуры.

Расчет пластового давления производится по известной формуле

$$P_{\text{пласт}} = P_{\text{стат}} + \frac{h_{\text{стат}} \gamma_{\text{ср}}}{10}$$

или более точно

$$P_{\text{пласт}} = P_{\text{стат}} + \frac{h_1 \gamma_1}{10} + \frac{h_n \gamma_n}{10},$$

где h — высота столба воды в скважине, для которого по данным термометрии определено среднее значение объемного веса (γ).

Учет объемного веса при расчетах пластового давления на высокотемпературных скважинах совершенно необходим, так как уже при 170° плотность пресной воды составляет всего $0,9 \text{ г/см}^3$. На Паужетском месторождении в ряде случаев приведенный к нормальному объемному весу статический уровень отличается от замеренного почти на 20 м. Отсюда следует, что замер напора манометром должен обязательно сопровождаться термометрией в закрытой скважине.

Наблюдение за режимом работы скважины при различных давлениях пара на устье

Подготовительные работы завершались комплексом наблюдений за режимом работы скважины в полном диапазоне давлений пара на ее устье. Это позволяло наметить рациональную схему измерений и производить их впоследствии при таких давлениях, когда извержение пароводяной смеси протекает наиболее ровно. Кроме того, выявление режима работы скважины давало возможность оценить ее качество в отношении энергетического использования.

Наблюдения за режимом работы скважин начинались, обычно, при полностью открытых задвижках, т. е. при минимальном рабочем давлении (часто принимался и обратный порядок). Переключение скважины с одного режима на другой производилось с помощью линейной задвижки на ответвительном штуцере. По мере уменьшения проходного отверстия

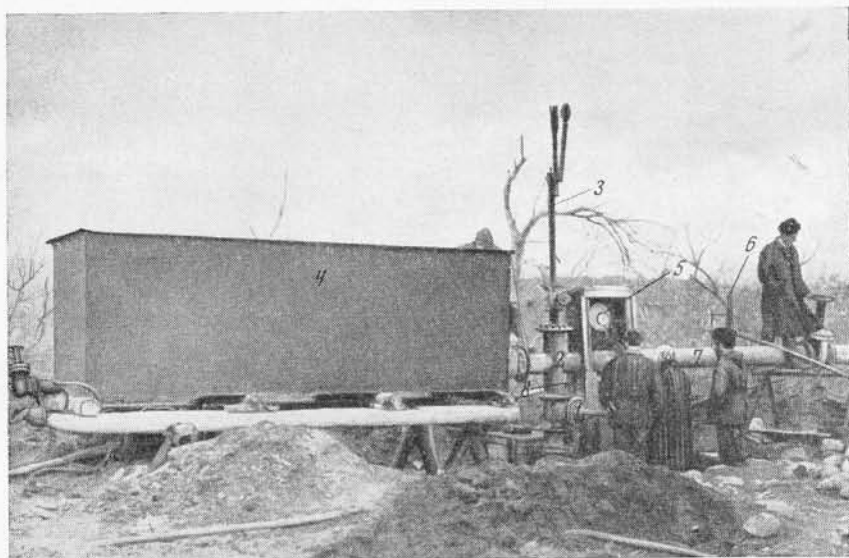


Рис. 43. Оборудование устья пароводяной скважины (К-11) в период испытаний
 1 — основная задвижка; 2 — оголовок-крестовина; 3 — лубрикатор; 4 — калориметр; 5 — самопишущий манометр; 6 — переносный сепаратор; 7 — выпускная линия; 8 — точка снятия давления. Фото В. П. Кононова

давление пара на устье скважины возрастает, а расход уменьшается. В зависимости от того, в каком диапазоне давлений работает скважина, выбиралось три — пять прикрытий задвижки. Главная же задвижка оставалась все время полностью открытой.

Подкручивание линейной задвижки производилось до тех пор, пока уменьшение проходного сечения сопровождалось повышением давления на устье. Максимальное рабочее давление на большей части скважин устанавливается тогда, когда линейная задвижка прикрыта на $\frac{3}{4}$ — $\frac{4}{5}$ своего сечения. Дальнейшее уменьшение проходного отверстия вызывает уже не рост, а спад давления.

Режим извержения при каждом новом положении задвижки в скважинах бывает разный. Высокодебитные скважины очень быстро приспосабливаются к вновь созданным условиям, и новое среднее давление на их устье устанавливается буквально в течение нескольких минут. На малодебитных скважинах перестройка режима их работы сопровождается следующими характерными явлениями. Подкручивание задвижки вызывает первоначально не рост, а наоборот — спад давления на устье. Скважина резко снижает свою деятельность, а иногда вообще глохнет и временно перестает работать. Постепенно, однако, давление повышается и по истечении сравнительно длительного времени, иногда только через сутки, достигает какого-то нового среднего значения. Выявление таких конкретных деталей на каждой скважине значительно способствует дальнейшему опробованию. Наблюдения за режимом работы скважины при заданном давлении производились от одних до нескольких суток после стабилизации процесса извержения пароводяной смеси.

Основные данные о режиме работы скважины (время стабилизации режима, степень его постоянства, продолжительность циклов извержения и перерывов при гейзерном и пульсирующем режиме) давала запись давления на устье, которая производилась с помощью самопишущих манометров. Давление снималось на участке между главной задвижкой скважины и поворотом в ответственный штуцер оголовка (рис. 43).

Самонищующие манометры устанавливались в непосредственной близости от устья скважины и защищались от дождя и снега специальными ящичками. Параллельно с самонищующими манометрами включался показывающий манометр, служащий для контрольных и визуальных наблюдений. При установке манометров предусматривалась возможность контроля нулевого положения стрелки и продувки импульсной трубки. Для этого перед манометрами устанавливался вентиль, связывающий импульсную трубку с атмосферой.

Методы и аппаратура для оценки расхода и качества пароводяной смеси

Замеры расхода пароводяной смеси производились при различных значениях давления пара на устье скважины. Одна точка выбиралась вблизи максимального рабочего давления, которому соответствует наименьший расход; вторая точка с наибольшими расходами — при наименьшем давлении на устье; промежуточные значения расхода измерялись при средних рабочих давлениях. После определения расходов, соответствующих различным давлениям на устье, строился график $Q = f(P)$.

Наименьшее давление на устье и максимальная производительность скважины наблюдаются при свободном вертикальном фонтанировании. Однако способов для достаточно точного замера расхода при свободном фонтанировании не имеется. Поэтому, как уже указывалось, надо стремиться применять такие конструкции измерительных устройств и подводных трасс, которым соответствует наименьшее сопротивление выхода пароводяной смеси.

Основные трудности, возникающие при замерах дебита пароводяной скважины, заключаются в том, что непосредственные измерения расхода в потоке пароводяной смеси не дают точных результатов. Для производства замеров необходимо предварительно либо сепарировать смесь на пар и воду, либо наоборот — полностью конденсировать ее, приводя к однофазной среде. В первом случае используются различного рода сепараторы, во втором — калориметры. Лишь в некоторых случаях, когда не нужна большая точность измерений ради простоты их осуществления, могут быть применены устройства для непосредственных замеров в пароводяной смеси. Таким образом, опробование пароводяных скважин требует применения разнообразных устройств и приборов и нуждается в весьма высокой общей технической оснащенности разведочных партий.

При выборе измерительных устройств был использован опыт опробования пароводяных скважин в Новой Зеландии, где первоначальные испытания скважин проводились в основном с помощью калориметра. На скважинах, вводимых в эксплуатацию, применялись циклонные сепараторы, конструкция которых определялась в ходе экспериментальных работ.

Имеющийся опыт показывает, что основными аппаратами для измерения продукции пароводяных скважин являются сепараторы и калориметры. При этом в условиях разведки наиболее рационально применение калориметров в комбинации с различного рода вспомогательными устройствами. При длительных режимных наблюдениях на эксплуатационных скважинах применима более совершенная система измерений, которую обеспечивают стационарные установки.

Калориметры

На Паужетском месторождении наибольшее развитие получило применение большого 8 м^3 калориметра (см. рис. 43). Он представляет собой мерный бак, который, как показывает его название, предназначен в пер-

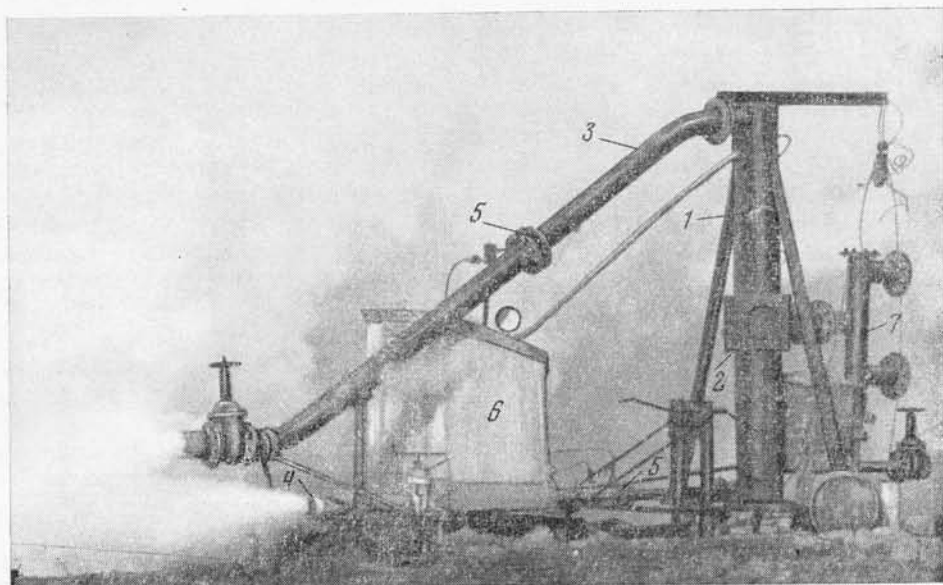


Рис. 44. Передвижной циклонный сепаратор (смонтирован на сажах).

1 — циклон; 2 — улитка циклона; 3 — паровая линия; 4 — водная линия; 5 — расходомерные устройства; 6 — будка для измерительных приборов; 7 — оголовок на пароводяной скважине
Фото В. М. Сугрובה

вую очередь для измерения теплосодержания. Однако его с успехом можно использовать как простейший мерный сосуд для измерения расхода. Принцип действия калориметра заключается в охлаждении поступающей в него пароводяной смеси с полной конденсацией пара холодной водой, которая заливается в бак перед замером.

При измерениях в калориметре теплосодержание пароводяной смеси рассчитывается по формуле

$$i_{\text{пвс}} = \frac{M_{\text{к}} t_{\text{к}} C - M_{\text{н}} t_{\text{н}} C}{M_{\text{к}} - M_{\text{н}}},$$

где $i_{\text{пвс}}$ — теплосодержание пароводяной смеси в ккал/кг ; $M_{\text{н}}$, $M_{\text{к}}$ — начальная и конечная масса воды в калориметре в кг ; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ — начальная и конечная температура в калориметре в $^{\circ}\text{C}$; C — теплоемкость воды (равна 1 ккал/кг град).

Одновременно с определением теплосодержания производится обычно и замер расхода пароводяной смеси, рассчитываемый по формуле

$$Q = \frac{M_{\text{к}} - M_{\text{н}}}{\tau},$$

где Q — расход пароводяной смеси в кг/сек ; τ — время производства замера в сек .

Определения расходов и теплосодержания калориметром производились с учетом режима извержения пароводяной смеси. В случае постоянного установившегося режима число замеров расхода на каждой ступени давления было не меньше 5—10. Основной объем измерений теплосодержания — не менее 10 замеров — выполнялся при каком-либо одном значении давления; при других же значениях давления делались контрольные замеры. При гейзерном и пульсирующем режимах число замеров сильно увеличивалось, чтобы иметь возможность вычислить усредненные параметры.

Калориметры, применяемые при опробовании пароводяных скважин, имеют весьма простую конструкцию (рис. 44). Главным элементом установки является мерный резервуар, как правило, строго параллелепипедной формы. Измерение объема воды в резервуаре ведется по специальной разградуированной рейке, укрепленной в центре бака (цена деления рейки 50 л). Температура воды меряется обычно вручную максимальными ртутными термометрами в разных частях бака. В комплект с калориметрической установкой входит мотопомпа, обеспечивающая подачу холодной воды. С нижней части резервуара оборудуется сливная труба с краном или задвижкой. Калориметр монтируется на санях и перевозится от одной скважины к другой трактором или автомашиной.

Особо должна быть охарактеризована система включения калориметра и ввода в него пароводяной смеси. Совершенно необходимо, чтобы при пуске пароводяной смеси в калориметр режим ее извержения не был нарушен.

Иными словами, во время работы калориметра на оголовке скважины должно быть то же самое давление пара, что и до включения. В противном случае, как бы ни были точны замеры, их нельзя уверенно отнести к какому-то определенному давлению на устье скважины, т. е. нельзя построить график производительности.

Калориметр, используемый для замеров, был оборудован для ввода пароводяной смеси специальной перфорированной 200 мм трубой, имеющей такую же длину, как и сам калориметр, и сваренный в нижней части бака. Суммарная площадь отверстий в трубе примерно вдвое превышала площадь ее сечения, что практически исключало дополнительные сопротивления при выходе пароводяной смеси. При таком устройстве оголовка скважины оборудуется двумя боковыми патрубками, один из которых направлен в атмосферу, а другой соединяется с перфорированной трубой и используется для ввода пароводяной смеси в калориметр. Они оборудуются задвижками и кранами, рассчитанными на соответствующие давления пара.

Перед началом измерений производилась предварительная работа по уравнению сопротивлений обеих трасс с помощью задвижек так, чтобы включение калориметра не отражалось на режиме извержения. Положение «равновесия» фиксировалось. Включение калориметра в отдельных случаях производилось с помощью крана, при этом один рабочий перекрывал боковой отвод для выпуска в атмосферу, а другой — в тот же момент включал трассу на калориметр. Прекращение выпуска производилось таким же путем. В результате работа скважины практически не останавливалась.

На отводах большого диаметра операции по включению калориметра производились одними задвижками. Однако в этом случае, поскольку полное открытие и закрытие задвижки требует значительного времени (минимум 10 сек), режим извержения пароводяной смеси сразу после включения калориметра несколько нарушается и лишь по прошествии некоторого времени приобретает прежний характер. Если на измерениях теплосодержания это практически не отражается, то в замеры расхода изменение режима может внести существенные ошибки. Для устранения подобных ошибок применялось специальное электроконтактное устройство, смонтированное на измерительной рейке с разносом контактов, соответствующим приросту воды в 1 м³ или водомерное стекло, на котором была отмечена по рейке высота, равная 1 м³. Принцип работы с этим устройством заключается в том, что регистрация объемов начинается тогда, когда режим извержения пароводяной смеси уже заведомо стабилизируется. Измерения начинаются, когда уровень воды достигает нижнего контакта или метки. В этот момент включается секундомер. При соприкосновении уровня воды с верхним контактом (верхней меткой) се-

кундомер останавливается. Таким путем получают необходимые данные для расчета расхода. Подобная система измерения значительно расширяет пределы применения калориметра.

При хорошей технической оснащенности работа с калориметром может быть еще более усовершенствована. В частности, если насосы, закачивающие в калориметр холодную воду, достаточно мощны и могут работать длительное время, то подачу холодной воды и слив из калориметра можно отрегулировать таким образом, чтобы при пуске пароводяной смеси и ее конденсации бак не переполнялся. Расход пароводяной смеси определяется как разница между расходом воды на сливе из калориметра и расходом холодной воды. Линии, по которым подается холодная вода и происходит слив, могут быть оборудованы мерными устройствами (например, водосливами), а запись расходов автоматизирована.

Такая система измерений была осуществлена на Паужетке В. М. Сугробовым. Опыт показал, что измерения подобного рода уточняют замер дебита скважины, особенно с пульсирующим режимом, так как исключаются ошибки в измерении, возникающие за счет нарушения режима давления при пуске смеси в калориметр.

При замерах теплосодержания особое внимание обращается на возможно более равномерное перемешивание пароводяной смеси с холодной водой. Рост температуры в калориметре допускается до $70-80^{\circ}$. Если же при длительных замерах конечная температура в калориметре превышает указанные пределы, то вносятся поправки на остывание в зависимости от температуры воздуха, определяемые опытным путем. При измерениях температур применяются термометры с ценой деления не более 1°C .

Количество пароводяной смеси, которое может быть охлаждено в калориметрах ниже 100° , обратно пропорционально ее теплосодержанию. Это определяет пределы применения калориметра как расходомера.

Сепарационные установки

Как уже указывалось, сепараторы предназначены для разделения пароводяной смеси, что дает возможность производить измерения в однофазных системах. По принципу действия они подразделяются на объемные, в которых отделение пара происходит в результате его свободного улетучивания, и центробежные.

При исследованиях пароводяных скважин преимущественно используется второй тип сепараторов, так как они по сравнению с объемными являются более компактными установками.

Принцип действия центробежного (циклонного) сепаратора заключается в следующем. Пароводяная смесь из скважины, движущаяся с большой скоростью по трубопроводу, подводится тангенциально к вертикально стоящей трубе — циклону, в специальном утолщении которого приобретает круговое движение. Развивающаяся в результате такого движения центробежная сила отбрасывает воду к стенкам циклона, а пар, как более легкий компонент смеси, собирается в осевой зоне. Стекающая вниз по стенкам вода попадает в трубу, по которой выводится наружу, пар же устремляется в паропровод. На трубопроводах, выводящих из циклона пар и воду, устанавливаются измерительные приборы — расходомеры, манометры, термометры. Специальные заборные устройства дают возможность отбирать пробы воды и пара на химический анализ. Таким образом, сепарационная установка обеспечивает большой комплекс исследований при высокой точности измерений. Измерения расходов воды и пара, а также давления могут быть полностью автоматизированы и результаты измерений зарегистрированы на диаграммах соответствующих самопишущих приборов. Такого рода документация оказывается весьма ценной при длительных наблюдениях.

Расход пароводяной смеси на сепараторе подсчитывается как сумма расходов воды и пара, замеренных отдельно; что же касается тепло-содержания, то оно рассчитывается по формуле

$$i_{\text{пвс}} = i'(1 - x) + i''x,$$

где $i_{\text{пвс}}$ — теплосодержание пароводяной смеси; i' — теплосодержание воды при замеренном давлении; i'' — теплосодержание пара при замеренном давлении; x — содержание пара (в кг) в 1 кг пароводяной смеси.

При этом в результате измерений по соотношению расходов воды и пара определяется паросодержание x , а значение теплосодержаний i' , i'' берется из таблиц сухого насыщенного пара.

Выбору конструкции должна предшествовать подготовительная работа, для уточнения пределов применения сепаратора в части расходов, тепло-содержания и давления. Это обусловлено тем, что высокая степень сепарации достигается только при определенных значениях скоростей пароводяной смеси в улитке и скорости подъема пара в циклоне, которые зависят от перечисленных параметров. В общем случае сепараторы, рассчитанные на работу при низких давлениях, имеют значительно большие размеры по сравнению с сепараторами высоких давлений.

Большой циклонный сепаратор, смонтированный на Паужетке в 1958 г. во время бурения роторной скважины и рассчитанный на работу при высоких давлениях, оказался неподходящим для работы при низких давлениях пара. Гораздо удачнее оказался сепаратор, сконструированный В. Г. Ренне в 1961 г. после того, как было пробурено и опробовано более десяти скважин (рис. 44). Пределы работы этого сепаратора составляют 8—10 кг/см.

Вспомогательные устройства

К вспомогательным устройствам относятся приспособления, которые в комбинации с основными измерительными аппаратами, например с калориметром, позволяли достаточно просто и быстро производить комплексное опробование пароводяной скважины.

Устройства для забора средней пароводяной смеси. Оно необходимо чтобы применить аппаратуру для химического опробования скважины. Очевидно, что данные химического анализа будут действительны только тогда, когда относятся к средней пробе пароводяной смеси.

Структура потока пароводяной смеси чрезвычайно сильно зависит от паросодержания. При малом количестве пара преобладает пузырьковая и пробковая формы движения и структура потока резко неоднородна. При большом количестве пара система приобретает характер эмульсии, в которой мелкие капельки воды распределены более или менее равномерно.

Дело осложняется тем, что пароводяная смесь прежде, чем достигнет паразаборного устройства, испытывает частичную сепарацию при переходе из вертикального ствола скважины в горизонтальный отвод. Структура потока нарушается также при прохождении смеси через сужающие устройства, задвижки и т. д. Поэтому в общем случае, в разных частях сечения трубопровода паросодержание различно.

Для забора пароводяной смеси использовалось так называемое пропорциональное устройство. Оно представляет собой трубку, вставленную в трубопровод поперек движения потока. В трубке имеются отверстия, площадь которых пропорциональна соответствующим кольцевым сечениям трубопровода, благодаря чему отбираемая проба оказывается близкой к средней. Конец трубки, выступающий из трубопровода, снабжен резьбой для подсоединения малого циклонного сепаратора.

Переносные циклонные сепараторы. Малогабаритные циклонные сепараторы получили в условиях паужетской разведки очень широкое применение. Они изготавливаются из отрезков труб малого диаметра и имеют небольшой вес — всего несколько кг; производительность их невелика — несколько кг/час по пару.

Из измерительных приборов эти сепараторы снабжены обычно только манометром, показывающим давление, при котором происходит сепарация. На входной и выводных трубках устанавливаются регулировочные вентили. При хорошей регулировке поступления в сепаратор пароводяной смеси сухость отделенного пара достигает почти 100%. Такие сепараторы присоединяются к парозаборному устройству, укрепленному в отрезке трубы, равной по диаметру трубам, отходящим от оголовка. Отрезок трубы снабжен фланцами. Таким образом, составляется целый узел, который легко переносится с одной скважины на другую.

Малогабаритные сепараторы использовались главным образом при химическом опробовании. В этом случае переносный узел устанавливался на отводе для пароводяной смеси между оголовком и задвижкой на отводе. В. М. Сугробовым и Т. В. Ренне экспериментально было установлено, что оптимальные условия для забора средней пробы создаются при сильно закрытой задвижке на отводе, когда скорости в трубопроводе не очень велики. При больших скоростях данные анализа по пару очень сильно колеблются. Соотношение количеств воды и пара при отборе проб рассчитывалось, исходя из известного теплосодержания, измеренного в большом калориметре, с учетом давления на сепараторе.

Устройства для непосредственного измерения расхода пароводяной смеси. Приближенные значения расхода пароводяной смеси могут быть получены путем непосредственных измерений ее потока. Для этих целей применялись сужающие устройства — конические насадки и диафрагмы. Расход рассчитывался по перепаду давлений, получающемуся при прохождении пароводяной смеси через сужающееся отверстие:

$$Q = C \sqrt{h \gamma_{\text{пвс}}}$$

где Q — расход пароводяной смеси; h — перепад давлений; $\gamma_{\text{пвс}}$ — удельный вес пароводяной смеси в условиях измерения; C — коэффициент пропорциональности.

Возможность применения таких устройств связана с тем, что при низких давлениях двухфазная система приближается по своим свойствам к гомогенной. Так например, удельный объем пароводяной смеси с тепло-содержанием 180 ккал/кг при давлении 2 ата имеет величину около 100 л/кг, т. е. в 100 раз больше, чем у воды и всего в 9 раз меньше, чем у пара. В отношении вязкости пароводяная смесь при таких условиях также стоит гораздо ближе к пару, чем к воде. Таким образом, с известным приближением ее можно рассматривать как пар с очень большой влажностью. В связи с этим сужающие устройства для пароводяной смеси работают по существу как паромеры.

Величина удельного веса пароводяной смеси, необходимая для определения расхода, берется по вспомогательному, заранее построенному графику либо рассчитывается по приведенной выше формуле 2.

Проверка значения расхода пароводяной смеси, рассчитанного по формуле для паромера, обнаруживает, как правило, значительные погрешности. Поэтому сужающие устройства перед их эксплуатацией проходят предварительную тарировку. При тарировке экспериментально устанавливается поправочный коэффициент — K_3 , который вводится затем в расчетную формулу

$$Q = K_3 \sqrt{h \gamma_{\text{пвс}}}$$

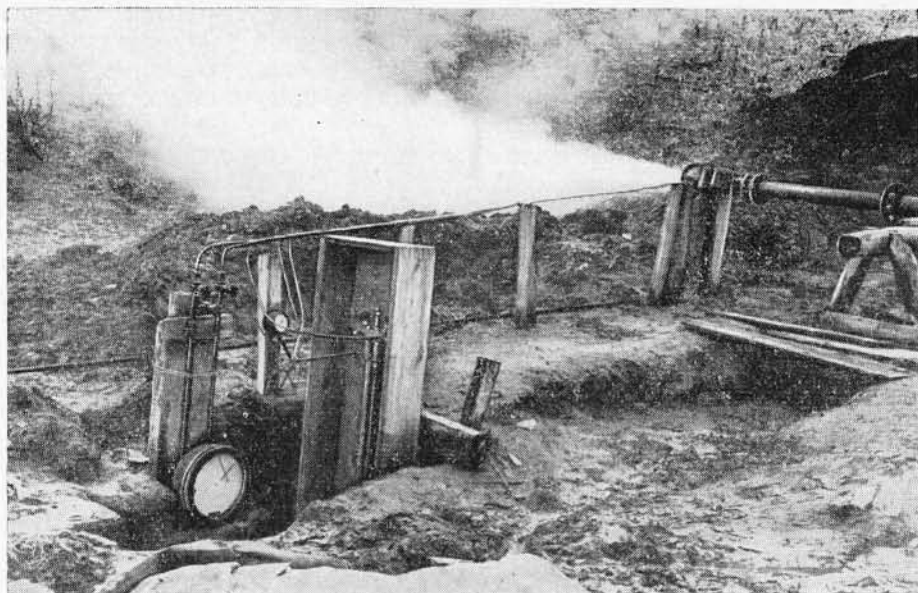


Рис. 45. Экспериментальное «дифустройство» для замера расхода пароводяной смеси
Фото Ю. А. Краевого

На Паужетской станции для измерения расхода пароводяной смеси А. А. Гавронский применял 100 мм трубу с установленной в ней диафрагмой, получившую название дифустройства (рис. 45). Диафрагма была установлена в кольцевых камерах, имеющих отверстия для снятия давлений перед диафрагмой и после нее. Перепад давлений измерялся дифманометром. Дифустройство, рассчитанное на измерение расходов до 10 кг/сек, имело небольшие габариты, легко переносилось вручную и достаточно просто, с помощью фланцев, присоединялось к боковому отводу скважины.

Поправочный коэффициент — K_2 , к формуле паромера, определенный при тарировке устройства большим калориметром, оказался равен 1,6. С применением самопишущего дифманометра процесс измерений был автоматизирован.

Дифустройство испытывалось при опробовании малодобитных скважин и работало при различном режиме извержения пароводяной смеси. В условиях равномерного истечения, удельный вес смеси определялся указанным выше расчетным путем и принимался постоянным. Необходимая для расчетов величина теплосодержания была либо известна заранее — по результатам калориметрических измерений, либо определялась попутно — в средней пробе с помощью малогабаритного сепаратора и малого калориметра. Полученные цифры дали удовлетворительное совпадение с расходами, замеренными другими методами.

При переменном режиме точность измерений сильно снижалась, так как и паросодержание и перепад давлений на диафрагме испытывали значительные колебания.

Особенно неблагоприятное воздействие оказывали частые мелкие пульсации при истечении пароводяной смеси, во время которых показания дифманометра изменялись с такой быстротой, что было трудно установить их средние значения. Удельный вес пароводяной смеси в таких условиях нельзя было принимать постоянным и для его определения пришлось ввести непрерывное измерение паросодержания. Все вместе взятое сильно

осложняло систему измерений, в результате чего преимущества диффузности практически сводились на нет.

Кроме того, при опробовании скважин с большим дебитом габариты устройства увеличились, а точность была небольшой. Поэтому оно не нашло широкого применения при опробовании скважин.

Изучение химического и газового состава термальных вод

Чтобы знать химический состав термальной воды в пластовых условиях, очевидно, необходимо определить отдельно химический состав воды и пара на устье скважины.

Пробы воды отбирались на анализ после сепарации из водяной линии сепаратора в бутылки при температуре, почти равной 100°C . В химической лаборатории по общепринятой методике определялись общие компоненты химического состава воды Cl' , SO''_4 , HCO'_3 и CO''_3 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , а также H_2SiO_3 и HBO_2 .

Методы отбора пара на химический анализ. Перед отбором проб из сепаратора устанавливалась степень сепарации. Для этой цели в конденсате пара делалось определение характерного компонента состава воды — хлора, и сепаратор регулировался до тех пор, пока этот компонент не фиксировался в конденсате пара в минимальных количествах.

Если отбор проб воды на сепараторе не сопровождается по существу никакими затруднениями, то при отборе проб пара возникает ряд осложнений. Дело в том, что при конденсации пара происходит вторичная дифференциация компонентов химического состава паровой фазы. Химически активные газы такие, как CO_2 , H_2S и NH_3 хорошо растворяются в конденсате и образуют ионносолевые растворы, реагируя друг с другом. Как пример, можно привести образование гидрокарбоната аммония при совместном растворении CO_2 и NH_3 . Другие газы — азот и углеводороды, а также инертные, наоборот, в большей части остаются в газообразном состоянии. Если конденсация пара произойдет до того, как пар попадает в пароотборник, то значительная часть газов может оказаться захваченной, и анализ даст результаты, не соответствующие действительности. Поэтому при отборе проб пара, в качестве обязательного условия нужно стремиться к тому, чтобы конденсация пара происходила в системе пароотборника. В этом случае приходится подвергать анализу как газовую фазу, так и конденсат, но это обеспечивает наиболее полный учет составных компонентов пара.

Второе обязательное условие, которое нужно соблюдать при отборе проб пара, — учет количества пара, что нужно сделать, измерив объем конденсата. Если известно количество отобранного пара, то можно рассчитать и концентрацию газов в паровой фазе; по соотношению же количества пара и воды в точке отбора пробы может быть найдена также концентрация газов в воде на глубине.

Наконец, третьим условием качественного отбора пара является герметичность пароотборника. Необходимо помнить, что, как бы ни было высоко давление пара, парциальное давление отдельных газов, содержащихся в паровой фазе, в частности азота и особенно кислорода, может быть значительно меньше, чем в атмосфере. По этой причине при недостаточной герметизации в пароотборник могут попасть газы из воздуха.

Перечисленным условиям наиболее полно отвечает пробоотборник конструкции К. П. Флоренского. Он представляет собой цилиндрический резервуар объемом около 200 мл, выполненный из толстого жаростойкого стекла (рис. 46). В верхней части резервуара имеется трехходовый край, который дает возможность открывать и закрывать доступ пару и отдельно

выпускать газ и сливать конденсат. В нижней части резервуара имеется шарообразное утолщение, отделенное от цилиндра краном, но в то же время постоянно связанное с ним тонкой трубкой. Шарообразное утолщение с помощью вакуумного шланга соединено с резиновой грушей, заполненной ртутью. К одному из отверстий трехходового крана подсоединен вакуумный шланг. Другой конец шланга соединен с резиновой растягивающейся камерой, которая в свою очередь также с помощью вакуумного шланга соединена с краном на трубке, выводящей пар после сепарации.

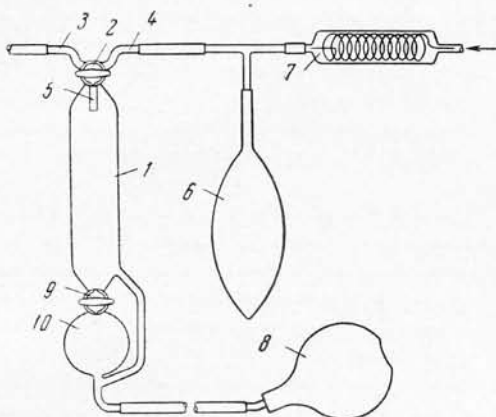


Рис. 46. Пробоотборник К. П. Флоренского

1 — баллон для дегазации; 2 — трехходовой кран; 3 — отвод для сбора газа; 4 — отвод для забора пробы пара; 5 — отвод для сбора конденсата; 6 — резиновая камера; 7 — холодильник; 8 — груша с ртутью; 9 — кран; 10 — баллон для отделения конденсата от газа

В качестве предварительной операции вначале делается пуск пара в резиновую камеру. Под давлением пара она растягивается до объема 2—3 л. После этого пусковой кран перекрывается, и пар в камере конденсируется с помощью холодной воды, которой обливают камеру снаружи. Во время этой операции трехходовой кран на стеклянном пароотборнике закрыт, а сам цилиндр заполнен ртутью.

Когда в камере образуется первая порция конденсата, трехходовой кран открывается и путем небольшого понижения уровня ртути производится всасывание конденсата и свободного газа из камеры в стеклянный резервуар. Трехходовой кран вновь закрывается. Вслед за этим производится сильное понижение уровня ртути — до тех пор, пока она вместе с конденсатом, плавающим сверху, не уйдет в шарообразное утолщение. В ходе понижения ртути в цилиндре создается сильный вакуум и газы, растворенные в конденсате, переходят в газовую фазу. После вакуумирования нижний кран, отделяющий цилиндр от шарообразного утолщения, закрывают, и конденсат оказывается в своеобразной ловушке в верхней части шара. Вслед за этим газ с помощью ртути, которая поступает в цилиндр через тонкую трубочку, поднимается вверх, а трехходовым краном открывают отверстие, через которое газ может выйти наружу. По специальному шлангу газ попадает в бутылочку, заполненную концентрированным соленым раствором и, вытесняя последний, накапливается для анализа. После вытеснения газа из цилиндра, уровень ртути вновь понижают, открывают нижний кран и вытесняют ртуть уже конденсат. При этом трехходовым краном открывают отверстие для слива конденсата и собирают его в отдельную бутылочку. Затем начинают новый цикл отбора пробы, повторяя их столько раз, сколько нужно для того, чтобы набрать необходимый объем газа. Отобранные таким образом пробы газа и конденсата направляются для анализа в лабораторию. Обязательно записываются объемы газа и конденсата, а также давление на сепараторе.

Разобранная выше методика обеспечивает полный учет составных компонентов паровой фазы. Однако помимо нее применялись своего рода

«экспресс-методы» для быстрого определения в паре концентраций некоторых газов. Эти методы в основном использовались при опробовании скважин, так как прибор Флоренского нельзя было применять в зимнее время из-за замерзания смазки трехходового краника. К таким газам относятся CO_2 , H_2S и NH_3 . Они представляют обычно большую часть общего объема газа и легко могут быть фиксированы и определены с помощью специальных жидких поглотителей, таких как растворы $\text{Ba}(\text{OH})_2$, NaOH и HCl .

Поглотитель наливается в мерную колбу и прямо в него направляют струйку пара из сепаратора. В поглотителе пар конденсируется, а его количество вычисляется по приросту объема жидкости в мерной посуде. Обязательным условием является то, чтобы поглотитель не кипел, потому что тогда поглощение газа будет неполным. В последнее время пар из сепаратора направлялся в змеевик-холодильник, из которого конденсат пара поступал в склянку с поглотителем. Этот способ значительно ускорял и упрощал отбор проб пара на химический анализ и давал лучшие результаты.

После того, как в поглотителе набирался необходимый объем конденсата, получившийся раствор сдавался на гидрохимический анализ лаборатории, где устанавливалось количество поглощенного газа. Получившиеся цифры относились к объему конденсата определяемого газа в порции пара.

Форма выражения концентрации газов в паре может быть как объемной — мл/л , так и весовой — г/кг или мг/кг . Так как весь анализ ведется при нормальной температуре и для расчета объемных концентраций при 100° необходимо в полученные цифры вводить сложные поправки, применялась весовая форма, как более рациональная.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРОВОДЯНЫХ РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Давление пара на устье

Нижний предел рабочих давлений пара на устье скважин находился в прямой зависимости от дебита, сечения выбросной трубы и конструкции оголовка. При оборудовании скважин 8-дюймовым оголовком минимальное давление колебалось в зависимости от дебита в пределах 1,1—1,8 *ата*. В тех случаях, когда скважина с малой или средней производительностью оборудовалась 4-дюймовым оголовком-крестовиной, при полном открытии задвижек давление пара на устье повышалось до 2,5 *ата*. Максимальные рабочие давления пара у большинства пароводяных скважин Паужетского месторождения находились в пределах 3,6—5,6 *ата*. Наибольшее значение было зафиксировано в скв. 14—6,75 *ата*, где теплосодержание пароводяной смеси достигло 190 *ккал/кг*. Наименьшая величина верхнего предела давлений была зарегистрирована в скв. 5, 6 и 19—1,8 *ата*, 2,2 и 2,3 *ата* (энтальпия пароводяной смеси 123, 141 и 133 *ккал/кг*).

Давление пара на устье выше указанных максимальных рабочих давлений наблюдалось только в момент включения некоторых скважин в работу. Оно создавалось благодаря тому, что в большей части ствола происходило мгновенное вскипание воды, имевшей температуру значительно выше 100°.

Режим извержения пароводяной смеси

По характеру извержения пароводяной смеси пароводяные скважины подразделялись на постоянно действующие, пульсирующие и скважины с прерывистым, гейзерным режимом. Большинство скважин характеризовалось постоянным и пульсирующим режимом работы.

Постоянно действующие пароводяные скважины располагались на всей площади месторождения, но большая часть их приходилась на северный участок, находящийся у подножья высокой террасы р. Паужетка.

Скважины с постоянным режимом истечения пароводяной смеси представляют наибольший интерес с точки зрения использования их в энергетике. К тому же они, как правило, отличаются высокой производительностью (15—40 *кг/сек* при свободном фонтанировании — скв. 4, 10, 11, 14, 15). В гидрогеологическом отношении они располагались в пределах трещинных водообильных зон.

В зависимости от давления пара на устье режим извержения несколько изменялся. Наиболее стабильный режим наблюдался при минимальном давлении пара. При этом на диаграммах самопишущих манометров давление записывалось в виде тонкой линии, толщина которой в масштабе диаграммы соответствовала давлению 0,1 *ата*.

Небольшие по амплитуде и очень частые пульсации отмечались при максимально возможном прикрытии задвижки на выбросной линии. Колебания давления достигали 0,4 *ата*, особенно на высокопроизводительных скважинах, что объясняется различной способностью пара и воды проходить через суженное сечение регулирующей задвижки. При этом возника-

ли, по-видимому, гидравлические удары, мгновенно изменяющие давление, колебание которого фиксировалось на диаграммах. Такие же частые пульсации отмечались при пуске пароводяной смеси в калориметр.

В момент выпуска пароводяной смеси в горизонтальном направлении, при максимальном рабочем давлении, небольшие пульсации на постоянно действующих скважинах можно было определить по характеру изменения звука и неравномерному выбросу той части воды, которая движется по стенке выбросной трубы. Давление пара с мелкими пульсациями записывалось на диаграммах в виде почти сплошной жирной линии, толщина которой соответствовала амплитуде колебания давления 0,2—0,4 *ата*.

Скважины с пульсирующим режимом на Паужетском месторождении занимают по численности второе место. Как правило, они имеют небольшой дебит до 7—10 *кг/сек*, за исключением скв. 13 и 19, производительность которых достигала 17 *кг/сек*.

Характерной особенностью пароводяных скважин с пульсирующим режимом было то, что давление пара на устье, дебит, теплосодержание и паросодержание, т. е. все наиболее важные параметры скважин, значительно изменялись в различные, ритмически повторяющиеся периоды извержения, выделяемые в циклы. В каждом цикле по изменению давления пара на устье можно наметить отдельные стадии, отличающиеся друг от друга по дебиту и теплосодержанию пароводяной смеси.

Пульсирующим режимом обладали преимущественно скважины, расположенные на участке развития слаботрециноватых пород с низкими фильтрационными свойствами, например, 12, 18 или там, где водоприток в скважину уменьшался за счет естественной разгрузки термальных вод (скв. 2, 17). Уменьшение отбора воды из скважины, которое создавалось прикрытием задвижки, обычно влекло за собой смену пульсирующего режима постоянным. Подобное изменение режима было четко выражено на скв. 5 и 12.

Своеобразным режимом извержения пароводяной смеси характеризовались высокопроизводительные пульсирующие скв. (13, 21). В отличие от низкодебитных скважин, режим извержения которых при максимальных давлениях переходил в постоянный и характеризовался значительным изменением продолжительности циклов, на высокопроизводительных скважинах наблюдалось более ритмичное чередование циклов при различных давлениях пара на устье. Изменялась только продолжительность стадий в циклах, амплитуды колебаний дебита и давления, тогда как продолжительность полного цикла практически оставалась постоянной.

Пульсирующий режим высокодебитных скважин нельзя объяснить причинами, положенными в основу объяснения режима гейзеров, так как здесь имеется интенсивный приток термальных вод. В данном случае в формировании пульсирующего режима главную роль играют другие факторы. В их число следует в первую очередь поставить дренирование скважиной двух водоносных горизонтов с различной температурой и проницаемостью пород, а также захват скважиной пара, находящегося на большой глубине в стороне от скважины и поступающего в нее по трещинам или трещинной зоне.

В первом случае вода из слабопроницаемой зоны должна иметь более высокую температуру. Неравномерно поступающая в скважину (это связано с весьма небольшой водообильностью слоя), она вскипает на более низком уровне, чем при наблюдавшемся до этого уровне парообразования, понижает его, что влечет за собой самопроизвольное понижение уровня откачки и, как следствие, — периодическое увеличение дебита.

Аналогичное явление будет происходить, если в скважину поступает пар. Это наблюдалось в скв. 21.

Небольшое число скважин, обладающих низкой производительностью, характеризовалось прерывистым гейзерным режимом, который проявлял-

ся при свободном фонтанировании и при небольших давлениях на устье. Помимо роторной скважины гейзерный режим был зафиксирован на скв. 1, 5 и 17.

Производительность пароводяных скважин

Измерение дебита разведочных скважин производилось обычно калориметром параллельно с определением теплосодержания пароводяной смеси.

Производительность пароводяных скважин, которая приводится в настоящем разделе, получена при отдельном гидрогеологическом опробовании каждой скважины. В этот период остальные скважины не работали.

Для характеристики производительности скважин используется зависимость их дебита от давления пара на устье. Значение дебита скважин, представляющих собой сумму весовых количеств воды и пара, выраженных в $кг/сек$, откладывалось на графике по оси абсцисс, давление пара на устье, измеряемое в $кг/сек^2$ избыточных — на оси ординат. Сводный график зависимости дебита скважин от давления приведен на рис. 47.

Все скважины по производительности можно разбить на две группы: группа высокодебитных скважин, дебит которых колеблется от 10 до 33 $кг/сек$ при $P = 2 \text{ ата}$ (скв. 4, 10, 11, 13, 14, 15, 19, 20), и группа малопродуктивных скв. (2, 5, 6, 7, 8, 12, 16, 17, 18, 21), дебит которых изменялся в пределах 2—8 $кг/сек$, при $P = 2 \text{ ата}$.

Для большинства скважин обеих групп график зависимости расхода пароводяной смеси от давления имеет вид прямой или слегка выпуклой кривой к оси абсцисс, что, по-видимому, отражает прямолинейную зависимость дебита от понижения уровня для скважин, вскрывших напорный горизонт. Характерно, что прямолинейную зависимость отражают графики высокопроизводительных низкотемпературных скв. 4, 11 и 10.

Малопродуктивные скв. 2, 7 и 16, продукция которых отличалась высоким теплосодержанием на устье (до 180 $ккал/кг$), имеют характерные перегибы кривой в диапазоне максимальных и минимальных давлений на графиках производительности.

Наименьшие дебиты скважин измерялись при максимально возможном прикрытии выбросного сечения и соответствовали максимальным рабочим давлениям. Дальнейшее сужение сечения приводило к резкому падению давления и расхода; на графике это выражалось перегибом кривой.

На первых колонковых скв. 2 и 7 были измерены давления и расходы за пределами максимальных рабочих давлений. В дальнейшем такие испытания не проводились, так как левая ветвь кривой после перегиба отражала давление пара, полученного при вскипании воды на устье.

Максимальный дебит скважин, который можно было измерить, ограничивался противодействием, полученным на устье при данных конструкциях оголовков и применении названных измерительных устройств. Как уже указывалось, на всех скважинах, за исключением скв. 4, минимальное давление пара было ниже 2 $ата$. Производительность скважин при свободном фонтанировании приблизительно экстраполировалась по графику зависимости дебита от давления.

Производительность скважин с циклически пульсирующим режимом также выражается графиком зависимости дебита от давления, но эта зависимость характеризует лишь соотношение между средним рассчитанным дебитом и давлением. На самом деле соотношение между дебитом и давлением не остается постоянным и изменяется в различные стадии цикла извержения.

Давления в цикле рассчитывались как средневзвешенные давления, относимые к периоду цикла, а средний дебит — по общему количеству пароводяной смеси, вынесенной за цикл, — отнесенному к полному периоду цикла извержения.

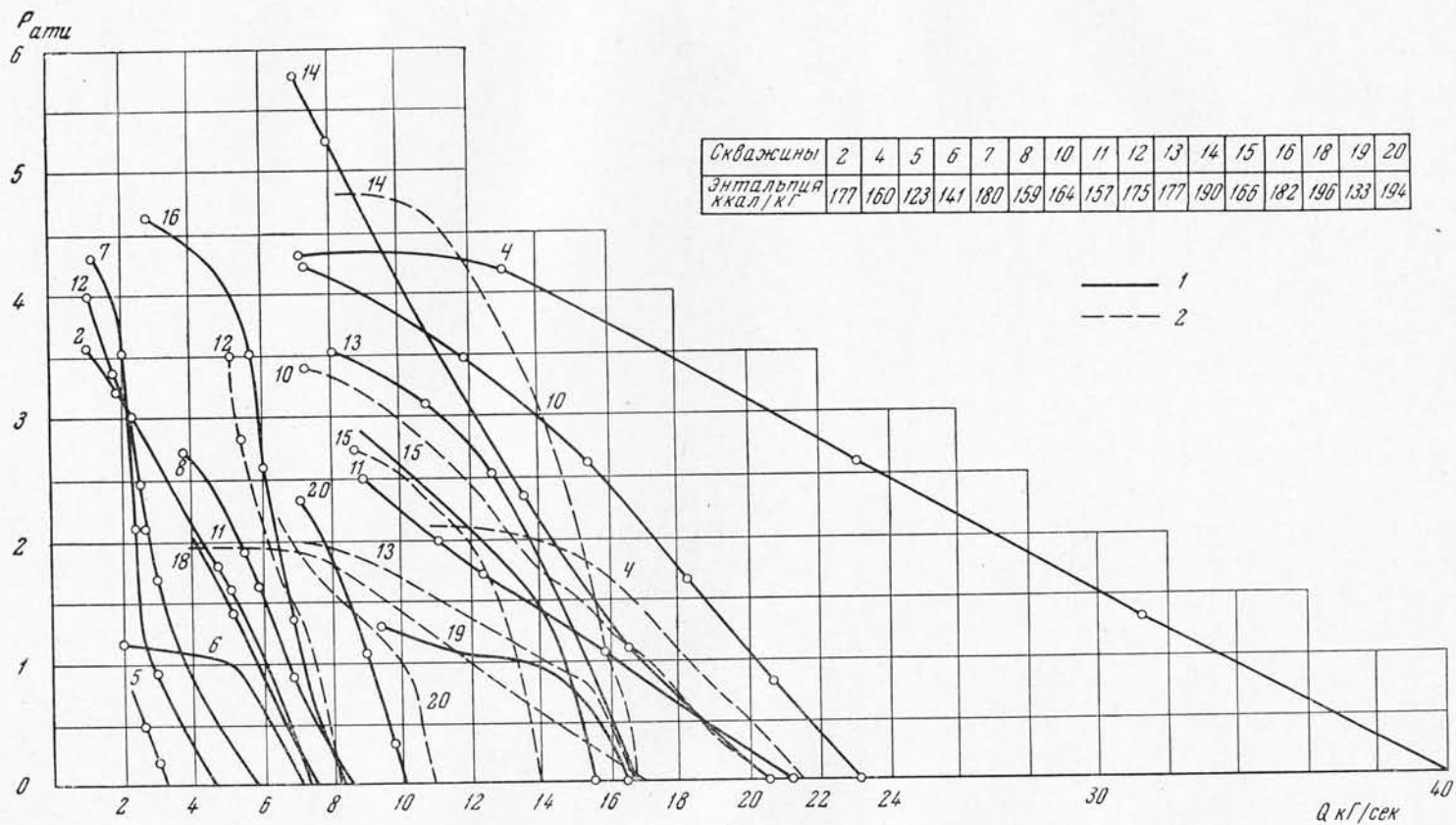


Рис. 47. Производительность пароводяных скважин Паужетского месторождения по данным одиночных опробований
 1 — при одиночных испытаниях без взаимодействия скважин; 2 — при взаимодействии скважин

Сумма дебитов 19 опробованных разведочных скважин составляет 195,0 кг/сек пароводяной смеси при давлении пара на устье 2 ата. Из общего количества скважин семь по своему дебиту удовлетворяют требованиям эксплуатации (скв. 4, 10, 11, 13, 14, 15 и 20).

Теплосодержание пароводяной смеси и вынос тепла скважинами

Теплосодержание пароводяной смеси на поверхности измерялось калориметрическим способом одновременно с изменением дебита скважин при разных выбранных значениях давления пара на устье. Общая характеристика скважин по величине энтальпии пароводяной смеси дается на основании средних значений теплосодержания, измеренного при различных давлениях.

Теплосодержание пароводяной смеси, определяемое на устье, изменялось на разведываемой площади в целом в зависимости от изменения температуры в интервале залегания водонасыщенных пород. Максимальные значения теплосодержания пароводяной смеси были отмечены в скважинах юго-восточного участка и зоны интенсивной разгрузки 175—194 ккал/кг (скв. 2, 7, 12, 13, 14, 16, 17 и 20). В этих же скважинах по данным термометрии были зафиксированы наибольшие температуры в интервале водопритока от 168,5—190°С до 176—199°С. Среднее теплосодержание на устье скв. 21 достигало 260 ккал/кг.

Теплосодержание пароводяной смеси в скважинах, расположенных на северном участке месторождения, на низкой террасе Паужетки, составляло 157—166 ккал/кг (скв. 4, 8, 10, 11, 15). Здесь же наблюдалось значительное снижение температуры вскрываемых скважинами термальных вод. Наименьшие значения энтальпии пароводяной смеси (как и следовало ожидать по данным термометрии) были отмечены в скважинах, расположенных по границе активного термального потока (скв. 1, 5, 6 энтальпия — 139, 123 и 141 ккал/кг соответственно).

Результаты измерения теплосодержания показывают, что значение их несколько изменялось при различных давлениях пара на устье. Для большинства скважин не было отмечено прямой зависимости теплосодержания от давления пара на устье. Например, теплосодержание высокопроизводительных скважин несколько увеличивалось при уменьшении давления, а иногда, как в скв. 10, изменялось независимо от изменения давления. Также значительно изменялась величина теплосодержания каждого отдельного калориметрического замера при одном и том же давлении.

Причины колебания величины теплосодержания точно не выяснены. Представляется, что они связаны с несовершенством выпуска пароводяной смеси в калориметр, особенно для малодебитных скважин, когда возможно поступление продукции с изменяющимся соотношением пара и воды. Некоторые отклонения от среднего теплосодержания пароводяной смеси можно объяснить ошибкой измерения. В постоянно действующих скважинах отличия отдельных замеров от среднего теплосодержания достигали 5—7 ккал/кг в ту и другую стороны.

Теплосодержание в пульсирующих скважинах изменялось в значительных пределах в различные стадии цикла извержения пароводяной смеси. По данным опробования пульсирующих скв. 12 и 13 минимальное теплосодержание отмечалось в начальную стадию цикла извержения, затем оно несколько увеличивалось и достигало максимального значения при спаде давления до минимума.

В ряде скважин теплосодержание пароводяной смеси, замеренное на устье, было значительно меньше теплосодержания воды, соответствующего максимальной температуре.

Если же сравнить средние температуры в скважине на интервале водопритока и теплосодержание пароводяной смеси на устье, то можно заметить, что различие между ними незначительно. Это связано с тем, что водоприток осуществлялся по всему мощному интервалу обводненных пород, температура в пределах которого уменьшается в верхней его границе. Например, в скв. 12 температура изменялась от 161 до 192°С, среднее теплосодержание 175 ккал/кг. В скважине 16 температура колебалась от 168 до 190°С, среднее теплосодержание — 182 ккал/кг.

В том случае, когда поступление воды происходило сосредоточенно по крупным трещинам, теплосодержание пароводяной смеси практически не отличалось от теплосодержания воды в этой зоне. Примером этого могут служить скв. 4, 14, 16. Также незначительно уменьшалось теплосодержание пароводяной смеси на устье от температуры в тех скважинах, в которых была зафиксирована небольшая разница между температурами на нижней и верхней границах обводненных пород.

Сравнивая измеренную величину теплосодержания теплоносителя на устье и температуру в стволе скважины, можно приблизительно определить основные интервалы водопритоков в скважину. Так, в скв. 19 температура на глубине 120 м составила уже 172°С (ниже измерить температуру не удалось), а теплосодержание пароводяной смеси на устье скважины — 133 ккал/кг. Наблюдения в процессе бурения показали, что на глубине 26—35 м скважина пересекла трещинную зону, из которой поступает основная масса воды.

Ярким примером, показывающим возможность определения места поступления воды в скважину по теплосодержанию пароводяной смеси, может быть роторная скважина. Первоначально при опробовании интервала 300—800 м было измерено только теплосодержание пароводяной смеси на устье, которое составило 135 ккал/кг, причем на основании определения водообильности пород предполагалось, что водоприток связан в основном с третичными песчаниками, залегающими ниже 657 м. Спустя два года, удалось замерить температуру на глубине 680 м, она оказалась равной 143°С.

С другой стороны, в скважинах, вскрывших не только воду, но и пар, наблюдалось значительное увеличение энтальпии пароводяной смеси по сравнению с температурой. Так, максимальная температура, зарегистрированная в скв. 21 на глубине 290 м (ниже температуру нельзя было за-

Т а б л и ц а 50

Тепловая мощность разведочных скважин

№ скв.	Производительность при $P = 2,0$ ата	Среднее теплосодержание пароводяной смеси на устье, ккал/кг	Вынос тепла скважиной, ккал/сек	№ скв.	Производительность при $P = 2,0$ ата	Среднее теплосодержание пароводяной смеси на устье, ккал/кг	Вынос тепла скважиной, ккал/сек
1	1,7	139	229	13	15,3	177	2718
2	3,90	177	690	14	17,0	190	2330
4	33,00	160	5280	15	14,8	166	2457
5	2,3	123	283	16	7,2	182	1310
6	5,1	141	719	17	9,5	181	1720
7	3,00	180	540	18	5,8	166	963
8	6,8	159	1081	19	12,5	133	1662
10	20,2	164	3312	20	9,1	194	1765
11	16,6	157	2606	21	5,2	260	1352
12	6,0	175	1050				

П р и м е ч а н и е. Суммарная тепловая мощность скважин составляет 32 967 ккал/сек.

мерить из-за обвала стенок скважины), составила 188°C , а энтальпия на выходе — 260 ккал/кг , причем в максимальную стадию извержения она поднималась до 500 ккал/кг . Такое расхождение можно объяснить только поступлением в скважину ранее отделенного (отсепарированного) пара. Передвижение пара происходило по трещинной зоне, в интервале 80—108 м.

Отделение пара от термальной воды в трещинной зоне на большей глубине, чем глубина пересечения ее со скважиной, вполне возможно, так как при наличии гидравлической связи трещины со скважиной, снижение давления в последней вызовет снижение давления в трещинной зоне.

Количество тепла, выносимого скважинами, помимо значения теплоемкости пароводяной смеси, определялось дебитом скважины. Например скв. 19, имеющая большой дебит, несмотря на низкое теплоемкость пароводяной смеси, приближалась к скважинам с высокой тепловой производительностью.

Тепловая производительность 19-и опробованных скважин (по данным среднего теплоемкости пароводяной смеси на устье и дебите при оптимальном рабочем давлении пара на устье 2 ата) приведена в табл. 50. Скважины с высоким дебитом (4, 10, 11, 13, 14 и 15) имеют, как видно из таблицы, значительную тепловую мощность от 2400 до 5300 ккал/сек .

Классификация пароводяных скважин по условиям возбуждения

Самопроизвольное возбуждение скважин имеет большое значение при опробовании после бурения и эксплуатации. Вскипание воды, образование пара, вызывающее эффект «парлифта», может произойти, если температура в скважине превышает температуру точки кипения при данном гидростатическом давлении. Этому условию соответствуют только скважины, расположенные на юго-восточном высокотемпературном участке (12, 13, 14, 16, 17, 19, 20 и 21), температуры в которых на устье или на

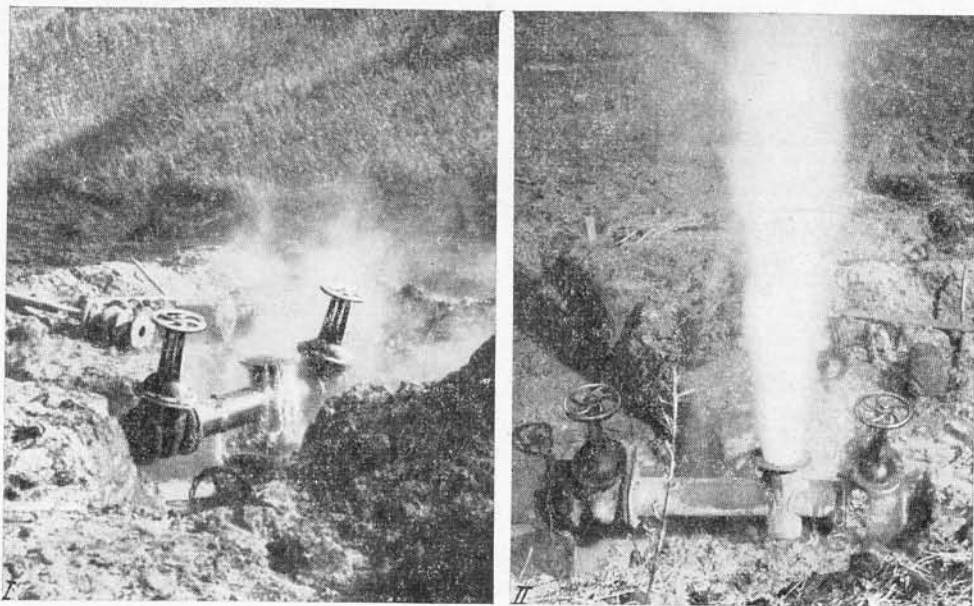


Рис. 48. Начало извержения скв К-10.

I — самоизлив горячей воды; II — начавшийся через несколько секунд выброс пароводяной смеси. Фото М. П. Флоренского и В. М. Сугрובה

отметке статического уровня, в случае установления его ниже устья, превышают 100°C . В таких скважинах при их открытии сразу же начинается бурное вскипание воды и извержение пароводяной смеси.

На северном участке месторождения температура пород в скважине значительно меньше температуры парообразования при данном давлении. Температура более 100°C фиксируется только с глубины 20—30 м (точка кипения при 2 ата — $132,9^{\circ}\text{C}$). В этом случае необходимым условием произвольного возбуждения скважин является самоизлив воды или, если статический уровень находится ниже устья, то необходимо искусственное возбуждение скважин путем откачки ее на первых порах насосом, желонкой, эрлифтом.

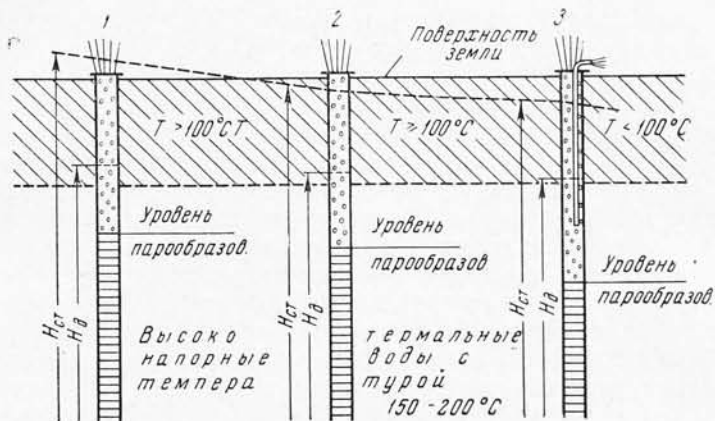


Рис. 49. Схема классификации пароводяных скважин по характеру возбуждения

1 — самоизливающиеся скважины, возбуждение которых происходит независимо от температуры на устье; 2 — несамоизливающиеся скважины, возбуждение которых происходит за счет вскипания воды с высокой температурой (более 100°C) на отметке статического уровня; 3 — несамоизливающаяся скважины с искусственным возбуждением

При самоизливе или откачке из скважины отбирается охлажденная вода, и постепенно температура повышается на открытом уровне до 98 — 100°C . Начинается пароводяной выброс (рис. 48).

По условиям возбуждения Паужетские пароводяные скважины можно классифицировать следующим образом:

1. Самоизливающиеся, возбуждение которых происходит независимо от температуры на устье при подъеме перегретой воды.
2. Несамоизливающиеся, возбуждение которых происходит при вскипании воды с высокой температурой (более 100°C) на отметке статического уровня.
3. Несамоизливающиеся с искусственным возбуждением. Температура в отметке статического уровня менее 100°C (рис. 49).

Пароводяные скважины по характеру возбуждения подобны скважинам с газовым режимом, описанным в 1955 г. К. Ф. Богородицким. Большинство скважин, расположенных на северном участке месторождения, были самоизливающимися. Искусственное возбуждение потребовалось только при испытании скв. 6 и 18. Интересно, что при опытно-эксплуатационных выпусках за счет снижения уровня ниже устья скв. 10, 11, 15 при их остановке возбуждались только тогда, когда уровень поднимался до самоизлива при закрытии прежних. Этим обстоятельством пользовались при ремонте устьевых задвижек. Смежные скважины открывались, а в нужной скважине, когда уровень снижался, можно было проводить работы при открытом стволе.

ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для оценки эксплуатационных ресурсов Паужетского месторождения, обеспечивающих надежную работу геотермальной электростанции, был применен метод опытной эксплуатации. В опытно-эксплуатационных выпусках участвовало большинство высокопроизводительных разведочных скважин, по своим параметрам соответствующих эксплуатационным, и суммарный дебит которых близок к требуемым эксплуатационным ресурсам. При этом опытным путем определялись изменения в параметрах каждой скважины, возникающие при их взаимном влиянии, а также проводились наблюдения за режимом термальных вод.

Отсутствие опыта по изучению высокотермальных вод в вулканических областях СССР делало этот, в сущности простой, метод единственно приемлемым. Применение его обеспечивалось способностью пароводяных скважин к самопроизвольной откачке воды паром, что позволило производить длительные выпуски пароводяной смеси без излишних затрат на насосное оборудование и энергию.

Этот метод мог бы явиться особенно эффективным, если опытно-эксплуатационные выпуски можно было бы начать после бурения первых хорошо оборудованных скважин, постепенно увеличивая количество скважин, участвующих в выпусках. Иначе говоря — постепенно наращивать эксплуатационные ресурсы в процессе производства буровых работ.

Такое последовательное включение скважин в работу, помимо надежного опытного учета их взаимного влияния, позволяет значительно сократить время на подготовку месторождения к эксплуатации. Очевидно, что применение этого способа оценки ресурсов возможно в том случае, если скважины по своему техническому исполнению с самого начала пригодны к эксплуатации.

Аналогичный способ описан по месторождению Вайракей Банвеллом (Banwell, 1957). Поэтому на будущее, для разведки месторождений современных гидротерм можно рекомендовать следующую последовательность:

1. Бурение поисково-разведочных скважин с детальным изучением геологического разреза, анализом геофизических данных, измерением температур и поинтервальным гидрогеологическим опробованием. Число таких скважин не должно превышать 20% от общего количества запроектированных скважин.

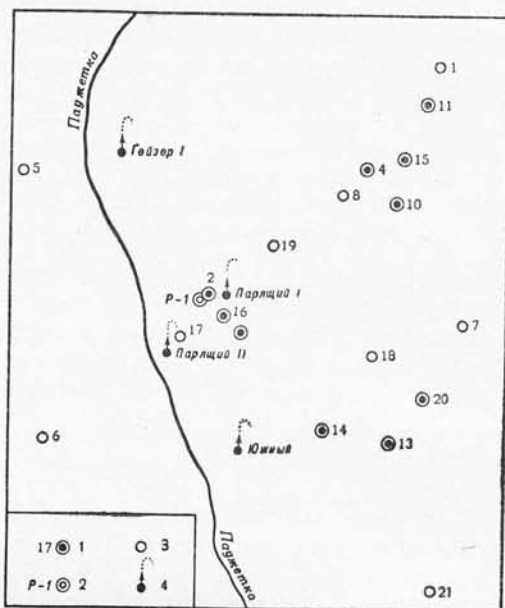
2. Бурение разведочно-эксплуатационных скважин, конструкция и расположение которых выбираются по данным исследования поисково-разведочных скважин. После определения параметров, в случае если они вполне отвечают технико-экономическим нормам, разведочно-эксплуатационные скважины переводятся в разряд эксплуатационных. Они немедленно включаются в опытную эксплуатацию с целью подсчета эксплуатационных ресурсов и установления наиболее рационального режима их работы.

На Паужетском месторождении для эксплуатационного водозабора был выбран участок, в пределах которого скважины имеют теплосодержание пароводяной смеси на выходе более 155 ккал/кг, что соответствует

предъявленным кондициям на энергетическое использование Паужетских гидротерм. Он ограничивается с северо-запада линией, проходящей через скв. 11 и 17; с юго-юго-запада — линией, соединяющей скв. 17 и 14, а с северо-востока — скв. 11 и 7 (рис. 50). В юго-восточном направлении от разведанного участка намечается усиление термальной активности, о чем свидетельствует северо-западное направление потока термальных вод и более высокие температуры в скв. 13 и 14, расположенных на юго-западной границе.

Рис. 50. Схема расположения действующих и наблюдательных скважин в период опытной эксплуатации

1 — действующие скважины; 2 — роторная скважина; 3 — наблюдательные скважины; 4 — термальные источники



Для опытно-эксплуатационных выпусков было выделено десять скв.: 2, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 и 20, расположенных в пределах указанного контура. Из этих скважин только скв. 2 и 12 характеризуются **небольшим** расходом, однако включение их в число опытных было необходимо для выявления ширины потока термальных вод и целесообразного заложения эксплуатационных скважин.

Скв. 5, 6, 7, 8, 17, 18, характеризующиеся в целом небольшим расходом и являющиеся малоэффективными в качестве откачиваемых скважин, использовались в роли наблюдательных за развитием депрессии пластового давления (по статическим уровням) и изменениями температур.

Высокодебитные скважины, участвующие в опытно-эксплуатационных выпусках и заложенные на выделенном участке, образуют два куста, отличающиеся друг от друга по величине теплосодержания.

Скв. 4, 10, 11 и 15, пройденные на севере разведываемого участка, вскрыли термальные воды, которые на поверхности дали пароводяную смесь с теплосодержанием от 157 до 165 ккал/кг. Вместе с наблюдательными скв. 7 и 8 они образовали северный куст скважин.

Южный куст включает скв. 12, 16, 13, 14 и 20. Они бурились вблизи естественных выходов термальной воды или пара на поверхность на юге и юго-востоке участка. Теплосодержание пароводяной смеси на их устьях колебалось от 175 до 194 ккал/кг. К ним же относятся: действующая скв. 2, используемая для отопления поселка, и наблюдательные скв. 5, 6, 17, 18. Некоторые скважины южного куста (I группа — 2, 12 и 16) пробурены на низкой террасе. Так же, как в скважинах северного куста, на их устьях зафиксировано избыточное давление термальной воды порядка 2 атм (см. табл. 52).

В скв. 13, 14 и 20 (II группа), расположенных на правой высокой террасе Паужетки, в пределах юго-восточной трещинной зоны, статические уровни устанавливаются значительно ниже устья. Температура в верхней части скважины приближается к 100°C , а на отметке статического уровня превышает эту величину.

Суммарная производительность скважин северного куста по данным одиночных испытаний при намечаемом эксплуатационном давлении пара на устье 1,8 ата составила 87,8 кг/сек, пароводяной смеси. Средневзвешенное теплосодержание пароводяной смеси на устье — 161 ккал/кг. Паросодержание (X) при давлении в сепараторе 1,5 ата равно

$$X = \frac{J - i'}{i'' - i'} = 0,0942.$$

Количество пара, полученное после сепарации 87,8 кг/сек пароводяной смеси

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{пвс}} \cdot X = 8,25 \text{ кг/сек или } 29,7 \text{ т/час.}$$

Количество пара, получаемого из скважин южного куста при этих же условиях, будет равно также 29,7 т/час.

Суммарное количество пара, которое можно было получить из всех переисчисленных скважин — около 60 т/час — несколько превышало цифру, требующую для опытной геотермальной электростанции на 5000 квт.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СКВАЖИН

Для расчета взаимодействия пароводяных скважин принципиально применимы гидродинамический и гидравлический методы. Однако на практике, в связи с тем, что на устье скважины появляется пароводяная смесь или пар, непосредственно измерить понижение уровня в большинстве случаев невозможно. В действующих скважинах определение уровня парообразования производилось только при максимальном давлении пара на устье, что соответствовало минимальным значениям дебита и понижения уровня. При максимальной и средней величинах дебита, вследствие значительной скорости прохождения пароводяной смеси, достигающей в верхней части ствола 60—200 м/сек, специальная гильза с термометром в процессе термометрии не проходила в скважины, т. е. нельзя было измерить глубину, на которой начинается парообразование. Поэтому установить зависимость дебита от понижения уровня в пароводяных скважинах не удалось. По этой же причине в период опытных и опытно-эксплуатационных выпусков невозможно было установить динамику снижения уровня в действующих скважинах. В тех наблюдательных скважинах, где статический уровень находился ниже устья, положение его нельзя было определить в связи с образованием пара в верхней части ствола.

Следует отметить, что при оценке взаимодействия пароводяных скважин и оценке эксплуатационных ресурсов, основным параметром их является давление пара на устье, так как скважины используются в энергетике.

В случае взаимодействия скважин уменьшение давления пара на устье происходило потому, что снижался динамический уровень и, следовательно, увеличивались глубина парообразования и величина гидравлического сопротивления за счет удлинения пути движения пароводяной смеси. Результатом этого было уменьшение дебита скважины. При длительных выпусках, если сечение выбросной трубы на устье не регулировалось, то наблюдалось уменьшение всех трех указанных параметров: давления пара на устье, дебита и понижения уровня. Соотношения между ними были бы еще сложнее, если бы происходило изменение энтальпии. Но ее величина практически осталась постоянной.

Таким образом, самопроизвольное одновременное изменение трех параметров скважин — основное объективное препятствие для применения гидродинамического и гидравлического методов расчета взаимодействующих пароводяных скважин. В период опытной эксплуатации уменьшение этих параметров отмечалось почти во всех скважинах, но количественная зависимость между ними была неопределенной.

Степень взаимодействия пароводяных скважин определялась по коэффициенту снижения дебита, предложенного М. Е. Альтовским, так как изменение дебита во времени явилось единственным надежным показателем взаимного влияния скважин.

В разработке методики взаимодействующих пароводяных скважин, очевидно, надо идти по двум направлениям.

Первое сводится к тому, чтобы устранить существующие трудности в определении понижения уровня и дебита скважин, применив более совершенные приборы. Для измерения уровня парообразования и, следовательно, понижения уровня можно использовать специальные глубинные манометры, а для непрерывного определения дебита — сепараторы. Зная динамику изменения этих параметров, можно применить гидродинамические и гидравлические методы расчета.

Сущность второго направления заключается в том, чтобы по изменению давления пара на устье установить характер и степень изменения дебита скважины и понижения уровня, и таким образом рассчитать величины указанных параметров при взаимодействии скважин. Здесь все решение вопроса связано с расчетом гидравлического сопротивления, возникающего при движении пароводяной смеси в скважине.

Гидравлическое взаимодействие скважин в пределах опытных кустов

Опытно-эксплуатационные выпуски начались проведением в мае 1962 г. группового (кустового) выпуска на северном участке месторождения (рис. 51). Выпуск пароводяной смеси производился из четырех наиболее производительных скв. 4, 10, 11 и 15. В качестве наблюдательных за изменением статического уровня использовались скважины этого же куста (7, 8 и 18).

Первоначально давление пара на устьях действующих скважин было доведено до 2 *ата*. После непродолжительных выпусков пароводяной смеси давление пара на устье скв. 4 при неизменных условиях выхода пароводяной смеси стало довольно интенсивно падать и, спустя пять дней, снизилось до 1,8 *ата*. К концу июня 1962 г., после двух с половиной месяцев непрерывных выпусков перед открытием скважин южного куста, давление пара на устье скв. 4 осталось неизменным, а на остальных скв. 10, 11 и 15 оно было практически равно первоначальному давлению — 2,0 *ата*.

Уменьшение статического уровня в наблюдательных скважинах происходило также очень быстро (рис. 52). В скв. 8, через день после открытия скв. 10, 11 и 15, уровень понизился на 18 м, через 5 дней — на 23,85 м, а через 2,5 месяца — на 28,2 м. В скв. 7 уровень снизился соответственно на 3, на 8 и на 9 м. В скв. 18 статический уровень понизился на 1,5 м. Понижения уровня в действующих скв. 4, 10, 11 и 15 были получены расчетным путем и составили соответственно 166, 89, 138 и 92 м.

Депрессионная воронка на участке расположения скважин северного куста так же, как и при выпуске пароводяной смеси из одной скв. 4, оказалась вытянутой в юго-восточном направлении. Судя по небольшому изменению статического уровня в скв. 18 — на 1,4 м, влияние выпуска из четырех скважин распространяется не далее 470 м на юго-восток, считая от центра воронки.

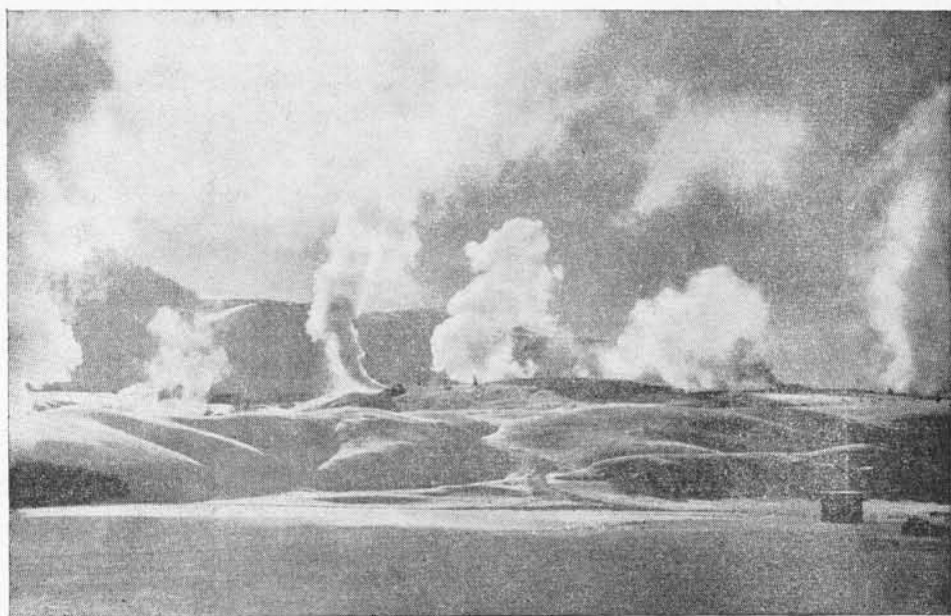


Рис. 51. Общий вид Паужетского месторождения в период опытно-эксплуатационных выпусков
 Фото В. М. Сугрובה

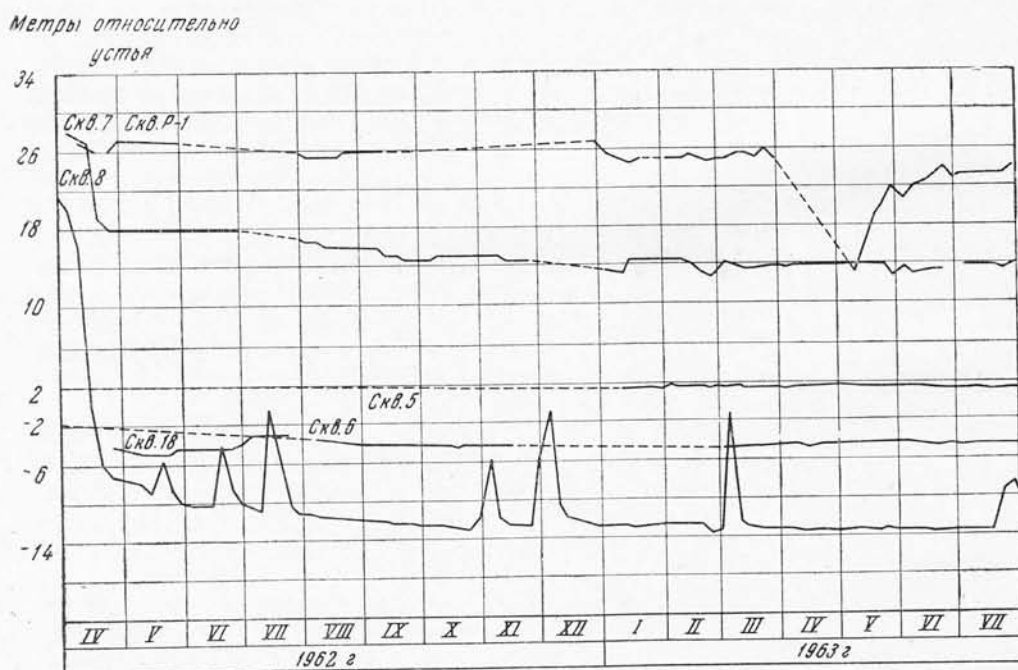


Рис. 52. Графики изменения статического уровня в наблюдательных скважинах в период опытно-эксплуатационных выпусков в 1962—1963 гг.

Точно установить юго-западную границу депрессионной воронки было трудно из-за отсутствия достаточного количества наблюдательных скважин. Можно только предполагать по крутизне депрессионной кривой между скв. 4 и 8, что радиус влияния по этому лучу меньше, чем расстояния до источника Парящего I, отстоящего от условного центра депрессионной воронки на 487 м, так как он не реагировал на интенсивный отбор термальной воды указанными скважинами.

Взаимное влияние скважин северного и южных кустов

В начале июля были открыты скважины, которые вошли в южный куст. Это скважины 2¹, 12 и 16, объединяющиеся в I группу, и скв. 13, 14 и 20, образующие II группу.

Выпуски в этом случае также производились при давлении пара на устье, приближающемся к 2,0 ата, за исключением скв. 12, давление на устье которой не опускалось ниже 2,6 ата. Кроме ранее указанных скважин в качестве наблюдательных за снижением уровня использовались скв. 5 и 6. В результате почти двухмесячных выпусков на южном участке параллельно с выпусками пароводяной смеси из скважин северного куста статический уровень в наблюдательных скважинах снизился не более, чем на 2 м.

Основываясь на незначительной реакции статического уровня в наблюдательных скважинах, отражающих в целом положение статического уровня всего северного куста, можно считать, что взаимное влияние выделенных трех групп скважин незначительно.

Изменение дебита скважин при их взаимном влиянии

Изменения дебита скважин в процессе опытно-эксплуатационных выпусков пароводяной смеси являются основным объективным показателем степени взаимного влияния пароводяных скважин.

Для определения характера взаимодействия скважин воспользуемся коэффициентом снижения дебита (α) М. Е. Альтовского, который под последним понимал отношение разности дебитов до и после взаимодействия скважин к первоначальному дебиту

$$\alpha = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2}.$$

В нашем случае это будет суммарный коэффициент снижения дебита рассматриваемой скважины по отношению ко всем скважинам или кусту скважин.

Коэффициенты снижения дебита рассчитаны для характерных моментов опытно-эксплуатационных выпусков: на 30.VI 62 г. окончание кустовой откачки на северном участке месторождения, на 30.VIII 62 г. — после двухмесячной работы всех скважин, участвующих в выпусках, и на 15.VII 63 г. — окончание опытно-эксплуатационных выпусков. Общие результаты взаимодействия скважин в эти же моменты времени уже разбирались выше.

Результаты расчетов коэффициента снижения дебита скважин приведены в табл. 51. Следует отметить, что для скважины южного куста величина коэффициента снижения дебита получается отрицательной, так как дебит некоторых скважин в конце опытно-эксплуатационных выпусков увеличился. В этом случае указанный коэффициент не соответствует смыслу, который вкладывал в него М. Е. Альтовский, и может, следовательно, применяться как сравнительный коэффициент, отражающий условия взаимодействия скважин.

¹ Сква. 2 работала с 1960 г. почти без остановок и использовалась для теплофикации пос. Паужетка.

Снижение дебита пароводяных скважин в период опытной эксплуатации

№ скв.	Дебит скважин при пробных выпусках, кг/сек		Дебит и снижение статического уровня, м			Коэффициент снижения дебита		
	P = 2,0 ата	P = 1,8 ата	30.VI 1962	30.VIII 1962	15.VII 1963	30.VI 1962	30.VIII 1962	15.VII 1963
Северный куст								
4	33,0	34,6	21,5	20,2	19,0	0,380	0,405	0,450
10	20,2	20,9	19,9	18,7	17,6	0,015	0,110	0,158
11	16,6	17,3	13,8	14,0	13,0	0,183	0,157	0,260
15	14,8	15,0	13,5	13,7	13,6	0,088	0,074	0,093
Южный куст (1 группа)								
2	3,9	4,2	—	3,5	4,6	—	0,125	—0,095
12	5,4*	4,8*	—	5,4	6,3	—	0,99	—0,313
16	7,2	7,4	—	6,7	7,9	—	0,07	—0,067
(2 группа)								
13	13,8	15,6	—	20,2	15,5	—	—0,295	0,006
14	17,0	17,7	—	17,6	16,1	—	—0,035	0,090
20	9,1	9,3	—	8,5	10,0	—	0,066	—0,075
Наблюдательные скважины								
7	—	—	9	11	13,7	—	—	—
8	—	—	28	30	31,5	0,197	0,211	0,192

* Для скв. 12 дебиты при первоначальном опробовании соответствуют давлению пара на устье 2,5 и 1,8 ата.

Изменения, связанные со взаимным влиянием скважин, происходили в течение короткого срока — одного-двух месяцев (рис. 53). Это характерно как для отдельных скважин северного и южного кустов, так и для всех скважин при одновременной их работе. Наибольшее снижение дебита при групповом выпуске на северном участке отмечалось в скважинах, расположенных ближе к условному центру куста, и при прочих равных условиях в скважинах с большим дебитом и большим понижением уровня.

Например, наибольшее снижение дебита наблюдалось в скв. 4 (коэффициент снижения 0,38). В скв. 10, расположенной в стороне от линии, которая соединяет остальные три скважины куста, понижение уровня было приблизительно равно понижению уровня в скв. 15, однако коэффициент снижения дебита был значительно меньше, чем для скв. 15.

Для скважин северного куста, отдаленных друг от друга на расстояние от 100 до 125 м, при одновременных выпусках, соответствующих давлению пара на устье 1,8—2,0 ата, средний суммарный коэффициент снижения дебита не превышает 0,2.

Интересно, что расчет этого коэффициента по суммарной срезке — снижению статического уровня на 28 м в скв. 8 и расчетному понижению уровня (142 м — по данным пробного испытания скв. 8) при дебите, соответствующем давлению пара на устье 2,0 ата, равен 0,197, т. е. дает хорошее совпадение с опытными данными.

Опытно-эксплуатационные выпуски на южном участке месторождения почти не повлияли на изменение дебита скважин северного куста, за исключением скв. 10, которая ближе остальных скважин расположена к условным центрам I и II групп южного куста (на расстоянии 480 м).

Что касается изменения дебита при одновременной работе шести скважин южного куста в течение первых двух месяцев, то оно выражалось в незначительном снижении дебита (скв. 16, 20) или даже в неко-

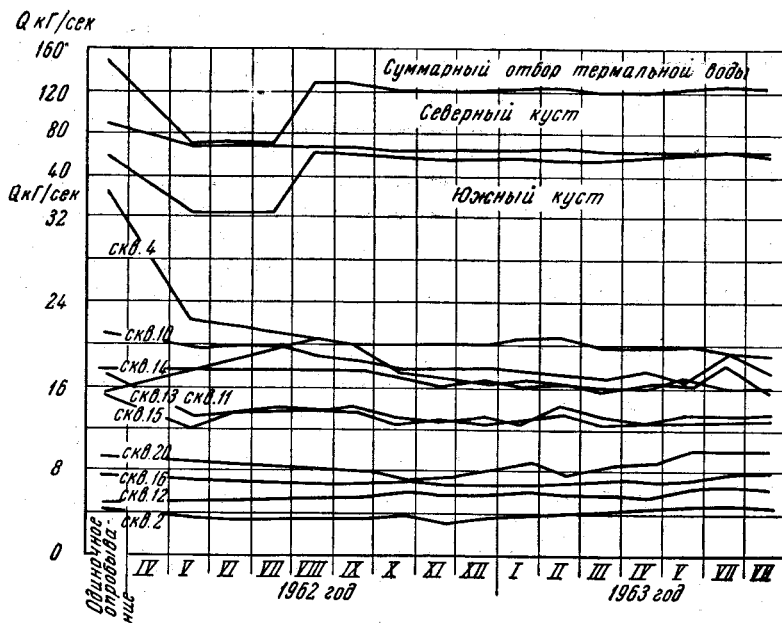


Рис. 53. Дебит пароводяных скважин в период опытной эксплуатации

тором его увеличении. На основании этих данных (табл. 51) можно сказать, что в процессе опытно-эксплуатационных выпусков при давлении пара на устье всех скважин в пределах 2,0 ата средний коэффициент снижения дебита не превышает 0,05.

Последующие изменения дебита всех скважин после августа 1962 г. и изменения статического уровня были незначительны и обусловлены уже не взаимодействием, а дальнейшим развитием районной депрессионной воронки в течение продолжительного отбора воды с суммарным дебитом около 120 кг/сек.

РЕЖИМ ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВЫПУСКОВ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ

Режим давления

Опытно-эксплуатационные выпуски проводились в течение года. В процессе их периодически один раз в месяц определялись на каждой скважине дебит, энтальпия пароводяной смеси и химический состав воды и пара. Давление пара на устье записывалось непрерывно регистрирующими манометрами.

Первые 8 месяцев выпусков пароводяной смеси 8 на северном участке месторождения и 6 месяцев — на южном участке опытно-эксплуатационные выпуски пароводяной смеси из скважин производились при постоянном выходном сечении на оголовках, при котором в момент открытия скважин было установлено необходимое давление 2,0 ата.

На всех скважинах северного куста с течением времени давление пара на устье уменьшилось, причем интенсивность и величина снижения его были связаны с величиной снижения дебита. Например в скв. 4, дебит которой резко понизился на большую величину, давление пара на устье уменьшилось до 1,6 ата. Менее всего уменьшение давления пара произошло на скв. 15, и даже более того, в первые 2 месяца выпусков давление

пара на устье скважины несколько увеличилось — до 2,05 *ата*. Понижение дебита было также минимальным. На основании этих данных можно говорить о том, что уменьшение дебита скважин при неизменных условиях выхода пароводяной смеси и постоянстве энтальпии влечет за собой обязательное снижение давления пара на устье, и эта общая связь вытекает из особенностей динамики пароводяных скважин, рассмотренных В. В. Аверьевым. Однако отношение величины снижения дебита и давления пара на устье для каждой конкретной скважины различное, и это связано, на наш взгляд, с очень разными условиями движения пароводяной смеси в каждой скважине, вызванными конкретной конструкцией ее и оборудованием устья.

С января месяца 1963 г. давление пара на устье всех скважин было приведено к одному давлению — 1,8 *ата* с тем, чтобы проследить закономерность снижения дебита при постоянном давлении. Такое давление на скважинах северного куста было легко достигнуто путем уменьшения выбросного сечения на оголовке и прикрытия задвижек.

До конца эксплуатационных выпусков давление пара на устье в 1,8 *ата* поддерживалось периодическим прикрытием задвижек на выбросной линии оголовка. На скв. 14 давление в течение годового цикла при полном открытии сечения выбросной линии не уменьшалось ниже величины 1,85 *ата*.

Характер извержения пароводяной смеси всех скважин за период опытно-эксплуатационных выпусков практически не изменился. На скважинах с постоянным режимом извержения диаграммы давления полностью соответствуют диаграммам давления, снятым в период пробных выпусков. То же самое относится к скважинам с пульсирующим режимом извержения. Общий характер пульсации, характерные стадии цикла извержения и их продолжительность по существу остались неизменными. Только в скв. 13 наблюдалось изменение в продолжительности отдельных стадий цикла и их извержения, хотя длительность всего цикла практически не изменялась. Изменения режима скв. 13 по давлению — видимо, следствие изменения дебита и теплосодержания, которые были отмечены на этой скважине и на которые указывается ниже.

Таким образом, данные опытно-эксплуатационных выпусков подтверждают то, что давление пара на устье в целом отражает режим работы скважины и количественные изменения ее основных параметров (дебита и теплосодержания пароводяной смеси) и поэтому оно обязательно должно регистрироваться на устьях пароводяных скважин в различные стадии их исследований.

Изменение дебита скважин

При сопоставлении величины дебитов, полученных при одиночных испытаниях (рис. 53), с дебитами, измеренными в процессе опытно-эксплуатационных выпусков, видно, что резкое снижение дебита скважин северного куста произошло в течение первого месяца совместных выпусков и эти изменения, бесспорно, связаны с их взаимным влиянием. Изменения в июне 1962 г. (второй месяц выпусков) были незначительны, что свидетельствовало о начале стабилизации дебита. Открытие скважин южного куста в начале июля привело вновь к снижению дебита скважин, но менее резко, причем наибольшее уменьшение дебита произошло в скв. 10, которая менее удалена от южного куста. Изменения, произошедшие в августе-сентябре также, вероятно всего, связаны с взаимодействием скважин южного куста. Изменения в дебите скважин северного куста в последующие месяцы выпусков, в которых принимали участие одни и те же десять скважин, работающих в относительно постоянном режиме, очевидно, надо связывать с развитием общей районной депрес-

сии с течением времени. Это изменение дебитов, как видно на графике, весьма незначительно и уже можно говорить об относительной их стабилизации. Если в скважинах северного куста все изменения были довольно закономерны и подобны изменениям скважин, вскрывающим обычные напорные подземные воды, для которых весьма характерно уменьшение дебита при взаимном влиянии, то на скважинах южного куста эти изменения носили более сложный характер.

Часть скважин, после их открытия, по сравнению с одиночным опробованием увеличили свой дебит (13, 14), причем скв. 13 — значительно. Увеличение дебита этих скважин в первый момент выпусков пароводяной смеси можно объяснить захватом из трещинной зоны отсепарированного пара. В последующие месяцы выпусков пароводяной смеси дебит этих скважин постепенно уменьшался, и дебит скв. 14 к концу выпусков был меньше дебита при одиночном опробовании, тогда как дебит скв. 13 по-прежнему превышал дебит одиночного опробования.

Дебит скв. 12, 16 и 20 первоначально уменьшился незначительно, а затем для каждой скважины начал расти и достиг максимума к концу годового цикла опытно-эксплуатационных выпусков. Увеличение дебита этих скважин по сравнению с одиночным опробованием соответственно составило 31,3, 9,7 и 7,5% (июль 1963 г.).

При подсчете суммарного дебита скважин северного и южного кустов и общем отборе термальной воды, как видно из графика, колебания по отдельным скважинам сказывались незначительно и это, возможно, связано с тем, что указанные колебания были следствием перераспределения притока к каждой скважине в отдельные моменты опытно-эксплуатационных выпусков.

Количество отбираемой скважинами воды в конце опытной эксплуатации (данные на июль 1963 г.) уменьшилось по сравнению с суммой дебитов этих скважин, по данным одиночных испытаний, на 15,8%.

Изменение зависимости дебита скважин от давления пара на устье

В конце опытно-эксплуатационных выпусков в июле 1963 г. кроме определения параметров действующих скважин при давлении пара на устье 1,8 *ата* были измерены дебиты, соответствующие максимальному рабочему давлению и промежуточному между этими двумя. Так как испытание каждой скважины при различных давлениях производилось поочередно, а все остальные скважины работали при давлении, установленном в период опытно-эксплуатационных выпусков, то полученные новые кривые $Q = f(P)$ характеризуют изменения этой зависимости от взаимодействия в условиях выпусков пароводяной смеси и, видимо, изменение во времени (рис. 47).

На графике $Q = f(P)$ значения энтальпии даны по замерам в течение трех последних месяцев опытно-эксплуатационных выпусков, как более показательные в отношении изменения энтальпии при взаимодействии скважин в течение продолжительной их работы.

Сравнение графиков зависимости дебита от давления пара на устье, по данным пробных выпусков, и в период опытно-эксплуатационных выпусков показывает, что во всех скважинах снизились максимальные рабочие давления, и вообще уменьшился диапазон рабочих давлений, за исключением скв. 12.

Уменьшение максимального давления было тем больше, чем больше уменьшился дебит скважины и теплосодержание. Например, в скв. 4 давление уменьшилось на 2 *ата*, в скв. 10 — на 0,8 *ата*, в скв. 11 — на 0,6 *ата*. В скв. 12, дебит которой при минимальном и среднем давлениях пара и теплосодержание увеличились, также отмечалось снижение мак-

симального рабочего давления. Уменьшение его наблюдалось и в остальных скважинах южного куста 13, 14, 16, 20 несмотря на то, что уменьшение энтальпии и дебита, соответствующего меньшим давлениям пара на устье, было незначительным, или даже несколько увеличился дебит в период опытно-эксплуатационных выпусков (скв. 13, 20).

Такое значительное уменьшение диапазона рабочих давлений, наряду с уменьшением дебита, вызванного взаимным влиянием скважин, объясняется увеличением глубины парообразования и, следовательно, понижения уровня, так как практически температура (по теплосодержанию) не изменилась.

Определение уровня парообразования в скважинах путем измерения температур в момент их работы удалось сделать только при максимальном рабочем давлении в скв. 10 северного куста. Уровень парообразования в ней, по данным термометрии, при давлении пара на устье 4,4 ата наблюдался на глубине 120 м. Следовательно, понижение уровня относительно первоначального статического составляет:

$$S = \pm H_{ст} + H_{пар} - H_p \text{ атм};$$

$$S = +18 + 120 - 80 = 58 \text{ м.}$$

Отсюда удельный дебит скважины в период опытно-эксплуатационных выпусков равен

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{7,2}{58} = 0,124 \text{ кг/сек} \cdot \text{м.}$$

Режим энтальпии пароводяной смеси

Теплосодержание пароводяной смеси на устьях скважин северного куста изменялось, в отличие от дебита, постепенно, так что характер изменения четко наметился только по данным последних замеров перед окончанием выпусков пароводяной смеси (рис. 54). Колебание значений энтальпии здесь можно объяснить ошибками измерений, за исключением замера энтальпии скв. 11 в сентябре 1962 г. Резкое повышение теплосодержания, очевидно, связано с прекращением поступления охлажденных вод с северо-западного участка месторождения, к которому тяготеет скв. 11, в связи с закрытием ее накануне замера.

Теплосодержание пароводяной смеси уменьшилось в скв. 4 и 11, и это связано с усиливающимся притоком менее нагретых термальных вод третьих отложений, что подтверждается изменением химического состава, о чем говорится ниже. Несколько увеличилась по сравнению с теплосодержанием, замеренным в процессе одиночного испытания, энтальпия пароводяной смеси скв. 10. Причина такого изменения заключается в том, что зона влияния скважины (это доказано по изменению дебита) распространяется на юго-восточный участок развития высокотемпературных термальных вод.

В скважинах южного куста наметилась общая тенденция к снижению энтальпии по сравнению с ее величиной, определенной в период пробных испытаний. Особенно резко уменьшилось теплосодержание в скв. 13 — более, чем на 10 ккал/кг, и в скв. 20. В скв. 14 и 16 энтальпия уменьшилась незначительно, по сути дела, на величину ошибки измерения. Лишь в одной скважине этого куста — в скв. 12 энтальпия пароводяной смеси увеличилась за период выпусков в целом на 10 ккал/кг.

Уменьшение энтальпии в скважинах южного куста можно связывать со следующими причинами.

1. Сокращение или полное прекращение захвата скважинами отсепа-рированного пара из местных ловушек-трещин. Поступление такого пара можно было предполагать здесь при одиночном опробовании на основании

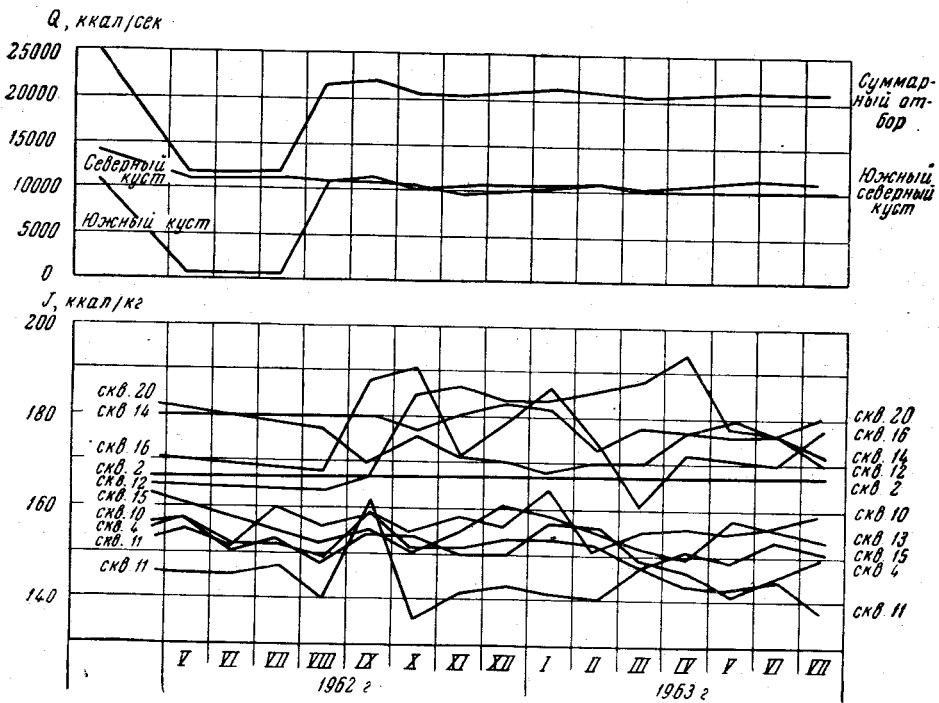


Рис. 54. Тепловая мощность и энтальпия пароводяной смеси скважин Паужетского месторождения в период опытной эксплуатации

испытания скв. 21 и вскрытия трещинной зоны с паром на глубине 36 м при проходе скв. 13.

2. Возможное увеличение притока охлажденных термальных вод по трещинам в верхней зоне водопритока. Это предположение основывается на том, что в скважинах еще в процессе одиночных испытаний были обнаружены обрушения ствола, которые в какой-то мере изолировали высокотемпературный интервал водопритока (скв. 13 и 14).

Таблица 52

Средняя энтальпия пароводяной смеси в период опытной эксплуатации

Время измерений	Средняя энтальпия, ккал/кг вынос тепла, ккал/сек		
	северный куст скважин	южный куст скважин	все скважины
Одиночное опробование	161 14170	184 10849	170 25019
Октябрь 1962 г.	161 10154	181 10529	171 20683
Июль 1963 г.	160 10159	180 1079	172 20956

Среднее теплосодержание пароводяной смеси за период опытной эксплуатации практически не изменилось (табл. 52). Это свидетельствует о том, что обнаруженные изменения или колебания теплосодержания па-

роводяной смеси в отдельных скважинах скорее всего связаны с внутренним перераспределением в пределах потока термальных вод, а не с изменениями, глубоко нарушающими естественное термальное поле.

Общая тепловая мощность действующих скважин в конце опытно-эксплуатационных выпусков составила величину 20 956 *ккал/сек*.

* * *

После года опытной эксплуатации дебиты скважин, давление пара на устье, а также статические уровни в наблюдательных скважинах практически стабилизировались. Суммарный дебит опытных скважин составлял величину 124 *кг/сек* пароводяной смеси с энтальпией от 150 до 190 *ккал/кг* при давлении пара на устье 1,8 *ата*. Качество геотермальных ресурсов — теплосодержание пароводяной смеси и ее химический состав — изменились незначительно. Все это указывает на высокую обеспеченность ресурсами расхода опытного водозабора.

Следует отметить, что в упомянутую величину ресурсов не входят ресурсы, выявленные скважинами, не участвовавшими в опытной эксплуатации. Суммарный дебит этих скв. (1, 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19 и 21), рассчитанный с учетом их возможного взаимодействия, составляет около 45 *кг/сек* пароводяной смеси при давлении 1,8 *ата* и энтальпии 140—180 *ккал/кг*. Из них можно получить дополнительный паросъем 16 *т/час*.

Кроме того, в величину выявленных ресурсов должна входить и естественная разгрузка гидротерм. В период опытной эксплуатации ее суммарная величина составляла 78 *л/сек*.

Таким образом, в настоящее время ресурсы высокотермальных вод Паужетского месторождения, выявленных в результате разведочных работ, составляют величину около 250 *л/сек*. Они в 2,5 раза превышают количество термальных вод, разгрузившихся в естественных условиях до начала бурения, и представляют собой надежную базу для геотермальной электростанции мощностью 5000 *квт*.

В процессе опытно-эксплуатационных выпусков формирование депрессионной воронки и установление относительно постоянных дебитов скважин происходило довольно быстро. При остановке выпусков наблюдалось быстрое восстановление статического уровня до первоначального. Это свидетельствует о том, что при дебите опытно-эксплуатационного забора не происходила (или почти не происходила) сработка статических запасов термальной воды. Следовательно, Паужетское месторождение располагает значительными потенциальными возможностями, которые на закончившейся стадии разведочных работ еще далеко не выявлены. Во всяком случае можно утверждать, что дальнейшее разбуривание Паужетской геотермальной системы в юго-восточном направлении, откуда происходит подток высокотермальных вод, позволит существенно расширить базу для геотермальной энергетики.

РЕЖИМ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВЛИЯНИЕ НА НЕГО ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

До начала разведочных работ в районе Паужетских источников в 1957 г. режим последних изучался эпизодически в течение весьма короткого срока. Планомерные режимные наблюдения на Паужетских источниках были начаты в августе 1957 г. Они проводились не только с целью изучения режима термальных вод в естественной обстановке, что само по себе имеет большое значение, но и с целью выяснения поведения их в зависимости от отбора воды скважинами для подсчета эксплуатационных ресурсов.

На первом этапе работ (1957—1961 гг.) до начала опытных откачек режим термальных вод зависел в основном от воздействия природных факторов, так как выпуски пароводяной смеси из отдельных скважин в 1960—1961 гг. не оказывали заметного влияния на режим источников и теплых ручьев.

На втором этапе (1962—1963 гг.), когда проводились групповые опытно-эксплуатационные выпуски, режим термальных вод формировался под совместным воздействием природных и искусственных факторов.

РЕЖИМ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ДО ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВЫПУСКОВ

Режим кипящих источников и теплых ручьев

Наблюдения проводились на источниках Парящем I и Парящем II, находящиеся в непосредственной близости от расположения действующих скважин, и Гейзера I — в некотором удалении от центра эксплуатации месторождения. Одновременно изучался режим ручьев Левого I, Левого II, Левого III и Теплого, протекающих по северо-западному участку термальной площадки. Ручьи, собирающие многочисленные термальные источники и грунтовые воды, представляли неменьший интерес для прогноза режима в естественных условиях и в условиях эксплуатации скважин.

Режим источников

Парящий I — самый крупный источник Паужетского месторождения. Средний дебит его равен 10,7 л/сек, амплитуда колебания дебита источника в естественных условиях не превышала 1,0 л/сек. Небольшие отклонения от среднего дебита обычно вызывались причинами искусственного характера: расчисткой места выхода, неудовлетворительным каптажом. Общий характер кривой расхода показывает стабильность дебита Парящего I (рис. 55). Такие естественные факторы, как осадки и уровень реки, не влияли на дебит источника. Однако ежедневные наблюдения в течение месяца за расходом источников и атмосферным давлением показали связь между ними. Эта связь выявляется только

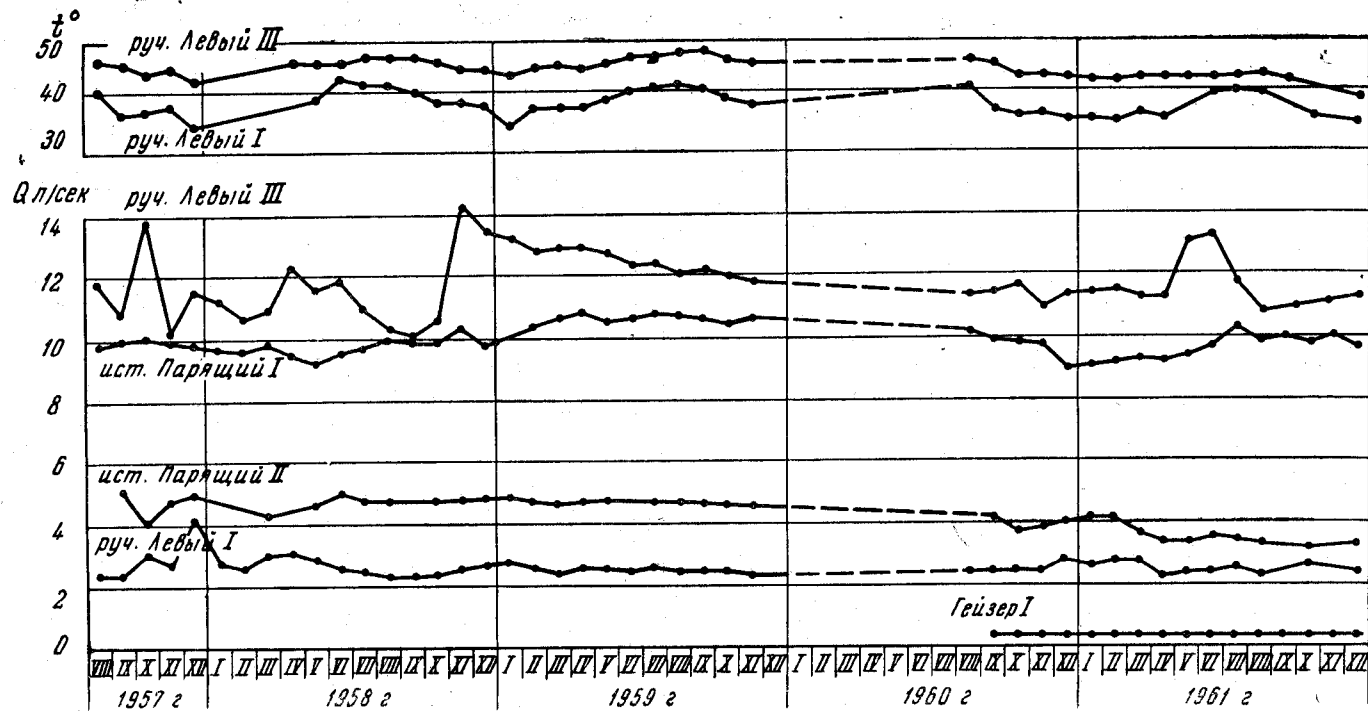


Рис. 55. Изменения дебита и температуры источников и ручьев (1957—1961 гг.)

при давлениях, значительно отклоняющихся от средних значений. Самому низкому давлению соответствуют наибольшие расходы, и наоборот. Так, при изменении атмосферного давления с 724 мм на 761 мм дебит источника Парящего I упал с 11,5 л/сек до 10,9 л/сек., а Парящего II — с 4,5 л/сек до 4 л/сек. Средние значения давления не отражаются на колебаниях расходов. Это явление сходно с изменением давления пара на устье скважины, когда при увеличении его расход уменьшается, а при уменьшении противодействия — дебит скважины увеличивается.

Таким образом, режим источника Парящего I в естественной обстановке практически стабилен. Естественные факторы формирования режима (метеорологические, гидрологические) не оказывают существенного влияния на его режим. Данные единичных замеров дебита и химических анализов разных лет, полученные до 1957 г. по источнику Парящему I, показывают, что с 1934 г. уменьшилось содержание хлора примерно на 8% (1702 мг/л в 1934 г. и 1569 мг/л в 1955 г.); увеличилась концентрация сульфат-иона на 35—40%, тогда как дебит в целом остался неизменным (в пределах 10 л/сек).

В. В. Иванов и А. С. Нехорошев считают, что такое изменение химического состава, возможно, связано с изменением во времени соотношений двух составляющих хлоридно-натриевой и сульфатно-кальциевой или с окислением сернистых фумарольных газов, поступающих в термальные воды.

Первое предположение, по нашему мнению, более правильно объясняет изменение химического состава, поскольку отбор воды в период пробных испытаний приводил к уменьшению хлора в источнике Парящем I, а в период опытно-эксплуатационных выпусков, как мы увидим ниже, произошло уменьшение хлора и увеличение содержания сульфатов в некоторых скважинах северной части месторождения.

Источник Парящий II — второй по величине источник Паужетской группы. Средний дебит источника составлял 4,8 л/сек, максимальный — 5,2 л/сек и минимальный — 4,3 л/сек. Как видно, дебит Парящего II относительно стабилен.

Влияние на режим источника таких природных факторов, как осадки, грунтовые воды можно считать несущественным. Сезонные колебания расхода отсутствуют. Основным фактором, определяющим режим источника, являются, по-видимому, условия выхода самих термальных вод. Источник Парящий II возник, по рассказам старожилов, сравнительно недавно. Можно предположить, что условия его питания еще не стабилизировались.

Гейзер I. Наблюдения на Гейзере I были начаты в сентябре 1960 г. До этого времени изучался лишь режим работы Гейзера, и эпизодически измерялся среднесуточный секундный дебит. Характер режима работы Гейзера I со временем менялся, уменьшалось время перерыва между извержением воды пароводяной смеси.

Расход Гейзера I во времени совершенно стабилен. Среднесуточный расход его составляет 0,3—0,4 л/сек, амплитуда колебания расхода не превышает 0,1 л/сек.

Гейзер II («Ленивый»). Режим Гейзера II крайне неровен. В работе его нет какой-либо закономерности. В последнее время на Гейзере были проведены систематические наблюдения. Его работа фиксировалась самопишущим прибором типа «Валдай». Самописец регистрировал уровень воды в отводящем лотке во время извержения Гейзера II. Максимальный расход при этом достигал 2 л/сек, средний — 0,9 л/сек. Каждый цикл включает 5 стадий: 1) наполнение воронки, 2) излив, 3) извержение, 4) парение, 5) покой. Время каждой стадии различно. Для примера приводится длительность стадий во время работы Гейзера II 1 апреля 1964 г.

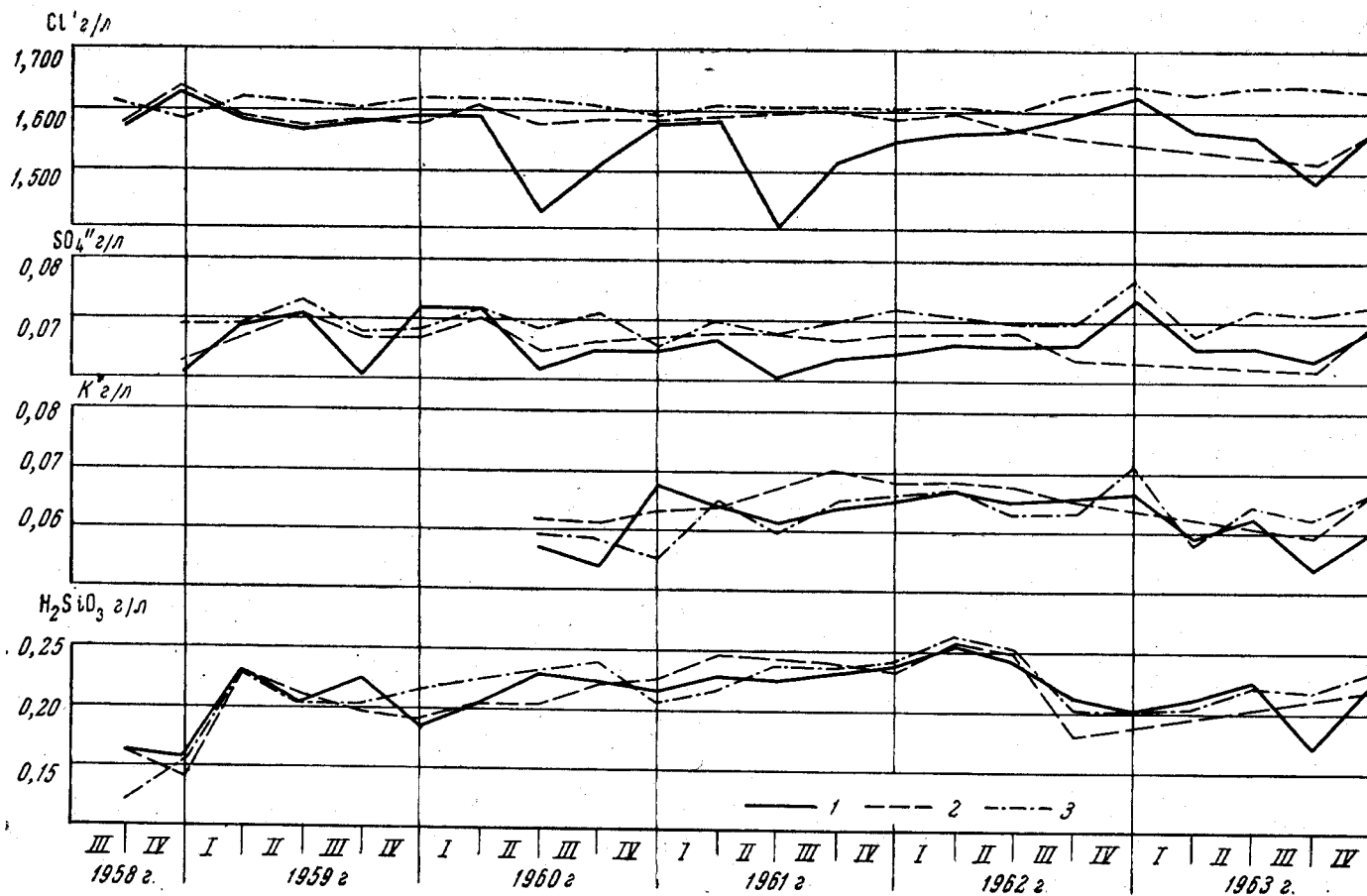


Рис. 56. Изменение характерных компонентов химического состава воды источников:
 1 — Парящего I; 2 — Парящего II; 3 — Гейзера I

I — цикл: 1) наполнение воронки — 52 мин, 2) излив — 1 час 55 мин, 3) извержение — 2 мин 35 сек, 4) парение — 1 мин 50 сек, 5) покой — 2 мин 10 сек.

II цикл: 1) наполнение воронки — 23 мин, 2) излив — 23 мин 35 сек, 3) извержение — 30 мин 30 сек, 4) парение — 1 мин 50 сек, 5) покой — 12 час.

За цикл работы Гейзер II выбрасывает 2250 л воды. В течение месяца наблюдалось около 30 таких циклов. По этим данным, средний секундный расход Гейзера II составляет 0,03 л/сек.

Химический состав воды источников Парящего I, Парящего II и Гейзера II во времени относительно стабилен, изменения незначительны (рис. 56)¹.

В итоге можно сказать, что в режиме термальных вод под влиянием естественных факторов (климатических, гидрологических, геологических), по данным наблюдений за пароводяными источниками в течение 6 лет, существенных отклонений не отмечалось. Конечно, этих данных не достаточно, чтобы судить об изменениях режима источников в естественных условиях за многолетний период.

Режим теплых ручьев

При сравнении приведенных к термальной составляющей расходов теплых ручьев с их естественными расходами видно, что часть ручьев (Левый III и Теплый) имеют смешанное питание, и высокотермальные воды составляют соответственно половину и третью часть их расхода. Другие ручьи (Левый I и Левый II) почти полностью питаются высокотермальными водами.

У ручьев имеющих смешанное питание значительно большие площади водостока, выходящие за пределы сильно прогретого участка, и врез их русел более глубок, чем у ручьев, питающихся высокотермальными водами. Различные условия питания определяют разный характер режима этих ручьев. Для примера опишем два наиболее характерных для каждой из этих групп ручья — Левый III и Левый I.

Средний расход ручья Левого III составляет 11—12 л/сек. В кривой расхода отмечаются сезонные колебания. Наименьшие расходы приурочены к зимним месяцам, к периоду зимней межени; наибольшие — к летним месяцам, к периоду снеготаяния и паводков. В этом смысле режим ручья связан с годичным сушевым режимом рек.

В период осенне-зимней межени ручей питается высокотермальными водами и горячими грунтовыми водами аллювиальных отложений. Кривая расхода в этот период устойчива; на ней отмечаются лишь отдельные эпизодически возникающие «пики».

Большие расходы наблюдались в ноябре 1958 г. — до 23 л/сек и в октябре 1957 г. — 18,3 л/сек. При увеличении расхода в 1,5—2 раза температура воды ручья понижалась лишь на несколько градусов. Такое несоответствие между увеличением расхода и снижением температуры позволяет считать, что увеличение расхода происходило преимущественно за счет подъема грунтовых вод и разгрузки их в русле ручья, а осадки при этом не имели существенного значения.

Большие и устойчивые расходы (13—15 л/сек) начинаются с апреля-мая и продолжаются до августа. В этот период увеличивается доля горячих грунтовых вод в питании ручья.

Температурная кривая воды мало изменяется во времени. Максимальная температура воды достигала +57°, минимальная — +41°С.

¹ Изменение химического состава источников в летний период 1960 и 1961 гг., возможно, связано с кратковременным отбором воды из скважин. Среднее содержание хлора в источниках и гейзере около 1,6 г/л, сульфат-иона — 909 мг/л.

Наибольшая амплитуда колебания температур, обычно, не превышающая 5°, высокая средняя температура — (+46°) подтверждают вывод о преимущественном питании ручья высокотермальными и горячими грунтовыми водами.

Ручей Левый I имеет расход 2—3 л/сек. Его небольшая протяженность и неглубокий врез на хорошо дренированном прибрежном участке создают условия, неблагоприятные для питания горячими грунтовыми водами.

Как уже было сказано выше, ручей питается высокотермальными водами, разгружающимися в русле ручья в виде мелких источников. В кривой его расхода сезонные колебания не выражены, и в этом отношении она мало отличается от кривых расхода парящих источников. Отдельные повышенные расходы (4,8 л/сек в декабре 1957 г., 3,4 л/сек в январе 1959 г.) здесь были косвенно обусловлены обильными осадками. Амплитуда температурной кривой ручья Левого I достигает 20°С, максимальная — 49°С, минимальная — 29°С. Небольшая температура воды и значительные амплитуды объясняются сильным остыванием воды в широком русле при малой скорости течения.

Химические составы ручьев Левого I и Левого III различаются по концентрации контрольных компонентов. В составе ручья Левого I в 2 раза больше концентрация хлора, борной кислоты и кремневой кислоты. Реакция воды обоих ручьев близка к нейтральной, но pH ручья Левого I несколько больше (до 8,0). Среднее содержание хлора в ручье Левом I — 1,4—1,5 г/л, в ручье Левом III — 0,6 г/л. Такой состав подтверждает вывод о преимущественной доле термальных вод в питании ручья Левого I и по сравнению с ручьем Левым III.

Концентрация хлора в воде ручья Левого I в течение года изменяется. Наибольшее его содержание приходится на летние месяцы, сопровождающиеся значительным испарением. В осенние и зимние месяцы концентрация хлора меньше.

В конечном итоге можно заключить, что изменения в режиме теплых ручьев обусловлены в основном чисто внешними факторами: колебаниями уровня реки, изменением условий разгрузки горячих грунтовых вод, а также выпадающими осадками. Что же касается высокотермальных вод, принимающих участие в питании теплых ручьев, то их режим в течение шестилетнего срока наблюдений в значительной мере был стабильным.

ИЗМЕНЕНИЕ В РЕЖИМЕ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД, ВЫЗВАННОЕ ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ВЫПУСКАМИ

Режим кипящих источников и теплых ручьев

Выпуски термальной воды из скважин северного куста с апреля, а затем из скважин южного куста, находящихся в непосредственной близости от наблюдаемых источников, с июля 1962 г. оказали значительное влияние на режим источников и ручьев.

Если в период одиночных испытаний в 1960—1961 гг. уменьшение дебитов источников не превышало 1 л/сек, то в период одновременных выпусков пароводяной смеси уменьшение достигало нескольких л/сек. Дебит источника Парящего I закономерно начал снижаться с июля — августа 1962 г. К концу года средний дебит его достиг 7 л/сек (рис. 57).

В 1963 г. дебит продолжал снижаться. 25 марта источник стал работать с перерывом, как гейзер (рис. 58). Продолжительность полного цикла была равна 6—7 мин: извержение — 2,5—3 мин, перерыв — 3—3,5 мин. Перед извержением интенсивное выделение пара — 60—90 сек. Дебит, рассчитанный как среднесуточный секундный, составлял 0,6 л/сек.

27 марта источник вновь заработал постоянно. Все последующее время до 19 августа 1963 г. источник периодически переходил на гейзерный режим. Перерыв между постоянным и гейзерным режимом колебался от одного дня до полутора месяцев.

Обычно, гейзерный режим длился 1—2 суток. Самая большая продолжительность его наблюдалась в апреле и была равна 5 суткам. После закрытия скважины 14.VIII 1963 г., появление гейзерного режима было отмечено 1 раз — 19.VIII 1963 г. в течение 6 час.

Впервые наблюдаемый непосредственно переход постоянно действующего кипящего источника в гейзер, и гейзера в источник при гидродинамическом изменении в водоносном горизонте, содержащем высокотемпературные воды, наглядно указывает на единство природы гейзеров и кипящих источников и показывает, что гейзеры являются частным случаем проявления кипящих источников.

Переход в гейзерный режим был связан с уменьшением притока термальных вод, причиной которого явилось только снижение пьезометрической поверхности и уменьшение, следовательно, перепада давления в водоносном горизонте и канале источника. Сечение же канала и температура входящей воды не изменились, т. е. остались постоянными условия для выброса прежнего количества пароводяной смеси.

Рассмотренный пример показывает, что в естественных условиях появление гейзера на месте кипящего источника в большинстве случаев связано со снижением статического уровня подземных вод, как более вероятным явлением, по сравнению с резким ухудшением фильтрационных свойств пород или уменьшением расхода напорного потока. Например, понижение пьезометрической поверхности в зоне разгрузки высоко-

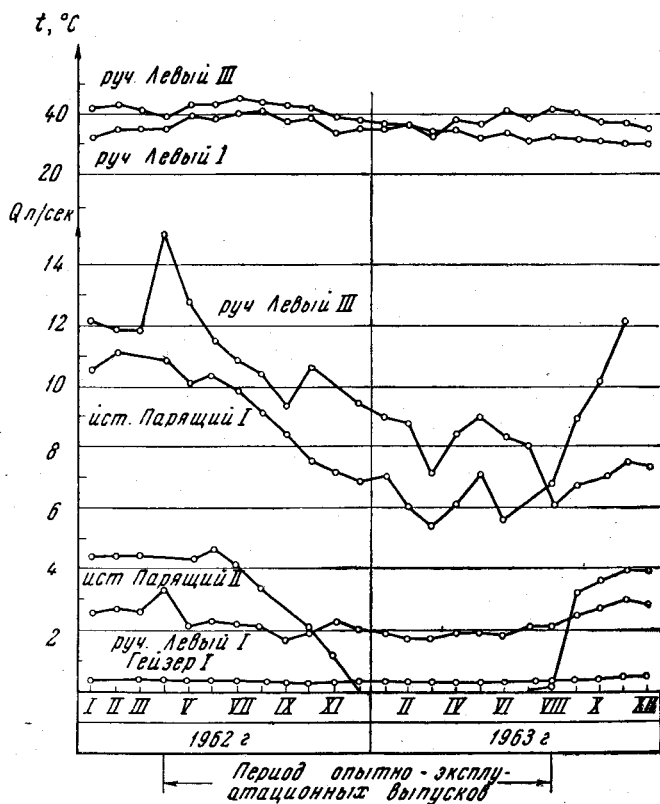


Рис. 57. Графики изменения дебита источников и ручьев и температуры ручьев (1962—1963 гг.)

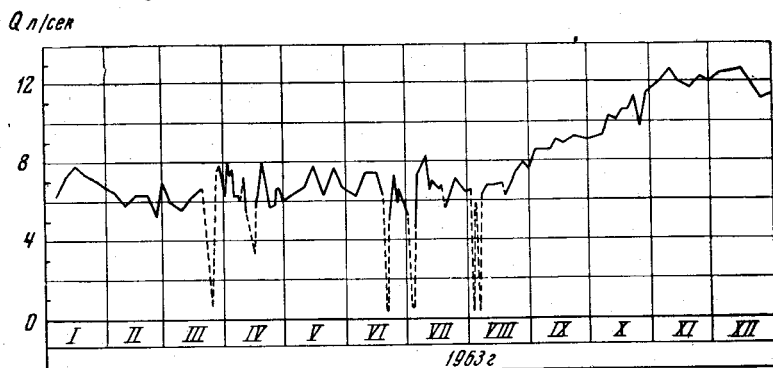


Рис. 58. Дебит источника Парящего I в период опытной эксплуатации

термальных вод может произойти при увеличении вреза гидрографической сети, отметки которой в общем случае контролируют положение статического уровня.

Дебит источника Парящего II стал заметно снижаться с июля 1962 г. 20 октября источник исчез. 21 октября вновь заработал. В дальнейшем источник работал периодически, а 18 декабря совсем прекратил работу. Незадолго до исчезновения, дебит источника уменьшался до 2 л/сек. До конца опытно-эксплуатационных выпусков воронка источника Парящего II оставалась сухой.

Расход Гейзера I в описываемый период снизился до 0,3 л/сек. Время цикла сильно варьировало. Границы между отдельными стадиями цикла часто были нечеткими. Работа Гейзера представляла собой непрерывные слабые всплески в заполненной водой воронке.

Расходы ручьев Левого III и Левого I за время выпусков из скважин соответственно снизились до 8—9 л/сек (Левого III) и до 1,8—1,9 л/сек (Левого I).

Химический состав воды источников за период опытно-эксплуатационных выпусков не изменился. Концентрации главных компонентов химического состава: хлора, сульфат-иона — изменялись в обычных пределах. Заметно снизилось лишь содержание кремневой кислоты.

В теплых ручьях, наряду с уменьшением дебита, значительно уменьшилась концентрация хлора по контрольному определению его 31 мая 1963 г. Особенно это относится к ручью Левому III.

В табл. 53 приводятся дебиты источников и приведенные к термальной составляющей дебиты теплых ручьев на 31 мая 1963 г., когда определялась разгрузка термальных вод гидрохимическим методом, и для сравнения эти же величины на май 1958 г.

В качестве примечания к таблице заметим, что дебит Пульсирующих источников в мае 1963 г. был рассчитан по выносу хлора ручьем Банным за вычетом выноса его скв. 2, 12, 14 и 16.

Дебит источников и теплых ручьев, как видно из таблицы, к концу опытно-эксплуатационных выпусков уменьшился вдвое.

За это время уменьшилось количество паровых струй, выходы которых ранее отмечались по всей площади между ручьем Банным и Паужеткой южнее роторной скважины. Гейзер II действовал значительно реже (1 раз в 3—5 дней, по сравнению с двухразовым в среднем действием его в сутки ранее). В то же время в период опытно-эксплуатационных выпусков на других участках были отмечены усиления поверхностной термальной активности.

В июле 1962 г., когда были открыты скважины южного участка месторождения, на верхнем термальном поле появились новые паровые

Суммарный дебит кипящих источников и теплых ручьев до опытно-эксплуатационных выпусков, в конце и после них

Время наблюдений	Объект наблюдений	Дебит, л/сек		Концентрация хлора, г/л	Вынос хлора, г/сек	Приведенный дебит тепловых ручьев, л/сек	Суммарный расход термальной воды, л/сек
		источников	теплых ручьев				
Май 1958 г. до опытно-эксплуатационных выпусков	Парящий I	9,6	—	—	—	—	—
	Парящий II	5,0	—	—	—	—	—
	Пульсирующие	5,0	—	—	—	—	—
	Теплый	—	5,0	0,8680	4,6004	2,95	—
	Левый I	—	2,35	1,5400	3,6190	2,30	—
	Левый II	—	0,87	1,5400	1,3398	0,85	—
	Левый III	—	12,15	0,5460	6,6339	4,25	—
	Суммарный дебит	19,6	—	—	—	10,35	29,95
Май 1963 г. в конце опытно-эксплуатационных выпусков	Парящий I	7,05	—	—	—	—	—
	Парящий II	—	—	—	—	—	—
	Пульсирующие	2,2	—	—	—	—	—
	Теплый	—	4,1	0,8014	3,2857	2,10	—
	Левый I	—	2,0	1,4042	2,8084	1,80	—
	Левый II	—	0,4	1,4326	0,5730	0,36	—
	Левый III	—	8,7	0,2411	2,0976	1,34	—
	Суммарный дебит	9,25	—	—	—	5,60	14,85
Ноябрь 1963 г. после опытно-эксплуатационных выпусков	Парящий I	11,7	—	—	—	—	—
	Парящий II	3,7	—	—	—	—	—
	Теплый	—	5,4	0,9149	4,95	3,18	—
	Левый I	—	2,8	1,3758	3,84	2,46	—
	Левый II	—	0,9	1,4184	1,28	0,82	—
	Левый III	—	6,4	0,2837	1,81	1,16	—
		Суммарный дебит	15,4	—	—	—	7,62

струи, которые буквально на глазах превращались в кипящие грязевые котлы, поскольку сверху здесь залегают красные глины, образовавшиеся под воздействием древних паровых струй. Постепенно разрозненные небольшие по размерам котлы объединялись в несколько больших грязевых ям, заполненных непрерывно кипящим конденсатом пара. Размер таких ям достигал 10 м. Уровень воды в них ближе к центру поля с плоским рельефом находился вблизи поверхности земли, ближе к южному окончанию поля, представляющего собой пологий склон; уровень воды в котлах расположен на глубине метра и более. Видимого стока из этих котлов нет. Только весной, в период снеготаяния, когда уровень во всех кипящих котлах поднялся за счет поступления талых вод, из отдельных котлов вытекали грязевые ручейки. Вновь образованные котлы достигли наибольших размеров к концу опытно-эксплуатационных выпусков. Они тяготеют к термальной линии, соединяющей источник южный и паровые струи в долине ручья Быстрого, а также скв. 13 и 14.

Новые паровые струи и кипящие котлы несколько позже, в сентябре 1962 г., появились на термальном участке на склоне ручья Быстрого, вблизи скв. № 7. Помимо появления новых струй и котлов, усилили заметно свою деятельность ранее существовавшие термопроявления. В результате этого увеличилась общая площадь термального участка, и это хорошо видно при сравнении фотоснимков проталин в снегу на склоне ручья Быстрого, снятых с одной точки в конце марта 1962 г. и в это же время в 1963 г.

Новые паровые струи в виде кипящих грязевых котлов появились также на низкой правой террасе Паужетки, на правом склоне ручья Банного, ниже по течению от источника Южного. Увеличился по размеру кипящий котел вблизи скв. 16. Глубина его достигла 2 м.

Активизация поверхностной гидротермальной деятельности, если не учитывать данных по изменению режима высокотермальных вод в целом, создает иллюзию значительного повышения температуры гидротерм под влиянием опытной эксплуатации.

Однако температуры в наблюдательных скважинах, расположенных в районе образования новых паровых струй, как будет показано ниже, не изменились, за исключением скв. 21, удаленной на юго-юго-восток от Верхнего термального поля на 400 м.

В то же время под влиянием интенсивного отбора высокотермальных вод произошло снижение статического уровня. Величина снижения уровня на участке водозабора, по данным наблюдений за скв. 7 и 8, составила 14 и 31 м при расположении их относительно ближайшей опытной на расстоянии соответственно 150 и 75 м. Понижение статического уровня на участке водозабора естественно уменьшало гидростатическое давление,

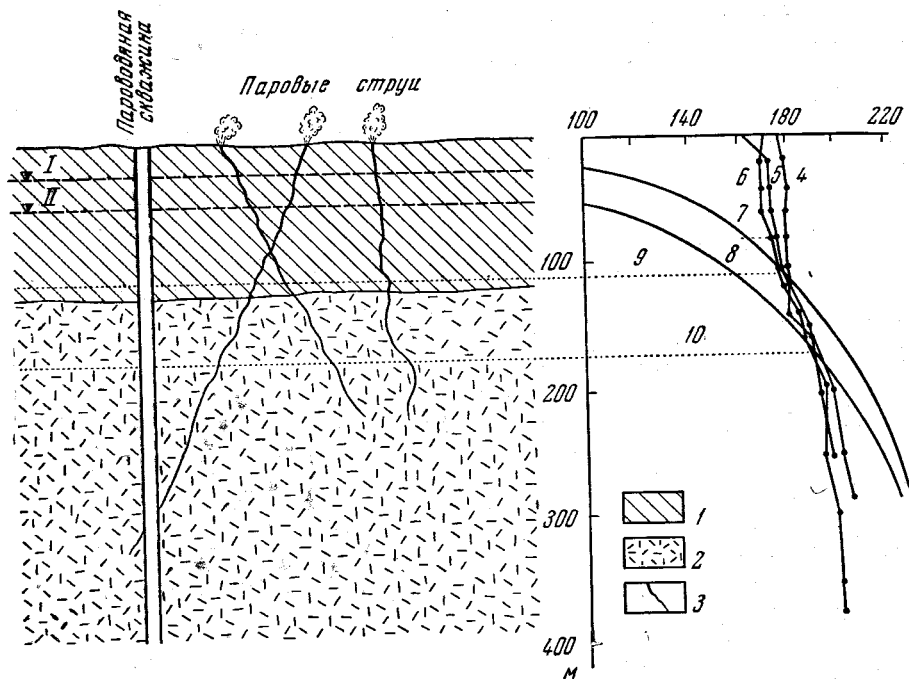
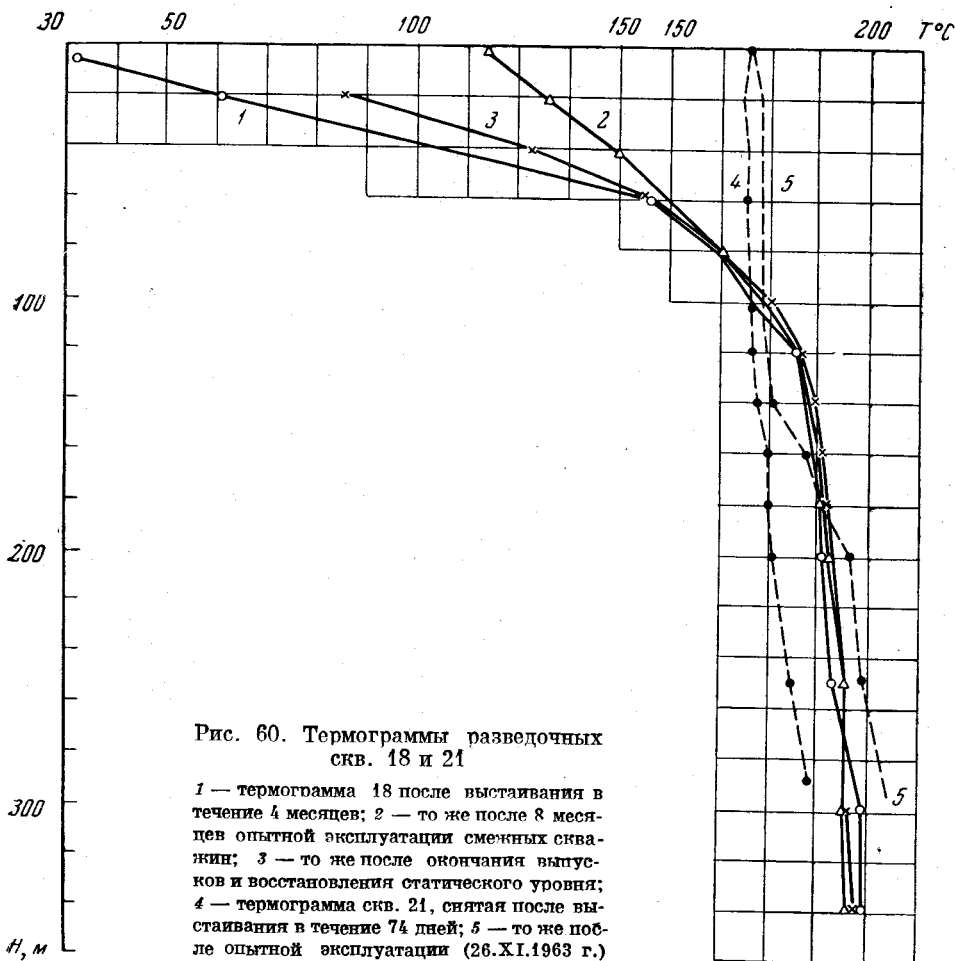


Рис. 59. Образование паровых струй в результате эксплуатации высокотермальных вод Паужетского месторождения

I — первоначальное положение статического уровня; II — положение статического уровня в период опытной эксплуатации

1 — водонепроницаемые породы; 2 — обводненные породы; 3 — трещины; цифры на рис. 4, 5, 6 — термограммы скв. 21, 14, 13; 7, 8 — кривые точек кипения в зависимости от глубины и положения статического уровня; 9, 10 — уровни вскипания



что давало возможность при прочих равных условиях вскипанию воды на большей глубине и более интенсивному отделению пара. Именно это обстоятельство в нашем случае является причиной усиления передвижения пара к поверхности. Схема отделения пара при понижении статического уровня показана на рис. 59. Сравнивая термограммы разведочных скв. 13, 14 и 21 и кривые точек кипения в зависимости от глубины при нормальном гидростатическом давлении, смещенные относительно поверхности земли в зависимости от положения статического уровня, видно, что при I положении давление насыщенного пара на верхней границе должно быть больше данного гидростатического давления, чтобы произошло вскипание, так как измеренная фактическая температура меньше температуры насыщения ($T_{\text{факт}} < T_{\text{насыщ}}$). II положение статического уровня соответствует такому гидростатическому давлению, когда $T_{\text{факт}} > T_{\text{насыщ}}$. В этом случае в верхней части водоносного комплекса будет происходить вскипание воды повсеместно, и при наличии даже небольших трещин в водонепроницаемых породах пар будет передвигаться к поверхности.

На самом деле пароотделение происходит неравномерно потому, что действительные условия на каждом конкретном участке отличаются от тех, которые показаны на схеме, несмотря на то, что при построении ее использованы фактические термограммы скважин, взяты средняя мощ-

ность верхнего водоупора (она колеблется от 65 до 145 м) и наиболее вероятная величина снижения статического уровня.

Поэтому нельзя считать случайным появление новых выходов пара в районе действующих скважин и в пределах или вблизи естественных термальных площадок. Дело в том, что понижение уровня в действующей скважине, как показали опытные работы, колеблется от 90 м до 170 м, т. е. вблизи скважины создается минимальное гидростатическое давление. Образование же естественных паровых струй указывает на наличие трещин в водоупорных породах. Кроме того, выход пара вблизи скважин более вероятен еще и потому, что, в случае пересечения скважиной трещин в толще водоупорных пород, вода с высокой температурой свободно попадает по стволу скважины в зону пониженного гидростатического давления, и вскипание ее возможно раньше, чем такие условия возникнут на верхней границе водоносных пород. Это хорошо видно на рис. 60. В таких же условиях образуются в сущности естественные выходы пара, но только роль искусственных каналов выполняют достаточно крупные трещины.

Небезынтересно отметить, что возникновение выбросов пара вблизи скважин на месторождении Вайракей или выход пара по старым фумаролам, описанные Дж. Г. Смитом (J. H. Smith, 1961), подобны рассмотренному явлению отделения пара. Только в этом случае очевидно, что гидростатическое давление в породах до эксплуатации было уже меньше давления насыщения.

На Паужетском месторождении в процессе бурения и даже длительных выпусков из отдельных скважин прорывов пара не наблюдалось. Это еще один факт, свидетельствующий о том, что причиной появления паровых струй является снижение пьезометрической поверхности высокотермальных подземных вод.

Изменение дебита источников и теплых ручьев после опытно-эксплуатационных выпусков

Закрытие скважин, участвующих в опытно-эксплуатационных выпусках, привело к довольно быстрому восстановлению до прежней величины дебита кипящих источников и большинства теплых ручьев. Увеличение дебита Парящего I началось сразу же после закрытия скважин, что было связано с близостью расположения его от центра южного куста скважин. Спустя два месяца, дебит источника составлял более 10 л/сек (рис. 58).

Вновь стал действовать источник Парящий II. Вода в грифоне появилась 22 августа (скважины были закрыты 14 августа), дебит при изливе вначале был равен 2,5 л/сек. К 20.XI 63 г. он составлял 3,7 л/сек и был, таким образом, несколько меньше среднего дебита источника до опытно-эксплуатационных выпусков.

Постепенно увеличивался расход теплых ручьев, дренирующих сток мелких выходов термальной воды и грунтовый поток.

Среднесуточный секундный дебит Геизера I к 20 ноября 1963 г. даже несколько увеличился и составил 0,5 л/сек.

Суммарный расход термальной воды, разгружающейся в виде названных источников, на 20 ноября 1963 г. составил 23 л/сек.

Уменьшение разгрузки произошло за счет уменьшения выноса хлора в основном ручьем Левым III и связано, видимо, с перераспределением по площади выходов термальной воды.

Большинство вновь образованных выходов пара исчезли спустя 5—7 месяцев после окончания опытно-эксплуатационных выпусков. К этому времени, как мы увидим ниже, практически восстановились статические уровни в скважинах. На месте бурлящих грязевых котлов сохранились глубокие ямы, иногда заполненные холодной водой поверхностного стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ПО СКВАЖИНАМ ЗА РЕЖИМОМ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

Статический уровень в наблюдательных скважинах

Наблюдения за изменением статического уровня производились на скв. 5, 6, 7, 8, 18 и Р-1. Причем первые три были расположены по крайним опытного водозабора.

В кривой снижения статического уровня в наблюдательных скв. 7 и 8 выделяются 4 участка, которые соответствуют характерным этапам выпусков.

В апреле происходило снижение уровня под влиянием работы скв. 4, в мае — при работе всех скважин северного куста. Следующий порог снижения уровня в июле 1962 г. связан с открытием скважин южного куста и одновременным выпуском пароводяной смеси из скважин северного куста. За эти месяцы произошло наибольшее понижение статического уровня, связанное с взаимодействием скважин.

Во время четвертого, наиболее длительного этапа работы скважин с октября уровень в наблюдательных скважинах снизился незначительно. Снижение статического уровня в этот период характеризует его изменения во времени при относительно установившемся отборе термальных вод скважинами. Наименьшее снижение статического уровня было отмечено в скв. 5 и 6, что связано с их удаленностью от опытных скважин. К концу выпусков статический уровень в этих скважинах практически не изменился.

Статический уровень в роторной скважине, которая являлась единственным объектом наблюдения за изменением режима термальных вод, заключенных в толще третичных отложений, снизился за период выпусков более, чем на 2 м.

Восстановление статического уровня в разведочных скважинах после проведения опытно-эксплуатационных выпусков

После закрытия опытных скважин 14 августа 1963 г., сразу же начался подъем уровня как в наблюдательных, так и опытных скважинах. Естественно, что скорость и величина повышения уровня в наблюдательных скважинах соответствовала скорости его снижения в период опытно-эксплуатационных выпусков и находилась в зависимости от расстояния этих скважин до опытных. Например, быстрый подъем уровня наблюдался в скв. 8, наименее удаленной от условного центра северного куста скважин.

Восстановление уровня в опытных скважинах (наблюдения за ним проводились только на скв. 4, 10, 11, 15) происходило приблизительно с одинаковой скоростью.

Интенсивный подъем уровня в опытных наблюдательных скважинах наблюдался впервые спустя полтора — два месяца с начала восстановления уровня. К концу года, т. е. после пятимесячного выстаивания, статический уровень по прямым замерам его хлопущкой или манометром, в случае самоизливающихся скважин, не восстановился до первоначального, за исключением скв. 5 и Р-1.

Неполное восстановление уровня в таких скважинах, как 8, 4, 11, 10, 15, на наш взгляд, объясняется уменьшением температур в верхней части ствола, увеличением, следовательно, объемного веса воды, что снижает величину напора. Влияние изменения объемного веса воды в зависимости от температуры на положение статического уровня было показано выше. Так, по расчету пластового давления в скв. 8, с учетом измене-

ния температуры при одиночном опробовании и во время восстановления уровня, видно, что высота столба воды в первом случае (температура выше) больше столба воды согласно последнему замеру на 1,5 м. Следует учесть при этом, что расчет пластового давления производился по средней температуре.

Судя по характеру кривых, восстановление уровня (пластового давления) завершилось или было близко к этому 20 ноября 1963 г. Наибольшие расхождения в положении статического уровня, помимо влияния температурного фактора, возможно, связаны с нарушением водонапорно-упругого режима пласта.

В целом изложенное выше позволяет считать, что положение пьезометрической поверхности восстановилось полностью, и это также свидетельствует о небольших изменениях режима под влиянием опытной эксплуатации.

Изменение температур в наблюдательных скважинах

Температуры в скважинах по всему стволу периодически измерялись во всех наблюдательных скважинах. Термограммы, за исключением скв. Р-1, показывают, что небольшие изменения температур¹ в отдельных скважинах наблюдались в приустевой и призабойной частях, тогда как в интервале водоносного комплекса Паужетской свиты сколько-нибудь заметных изменений не произошло.

Некоторое уменьшение температуры на 2—4°С было отмечено в призабойной части скв. 5, 6 и 17, расположенных по периферии участка, выбранного для эксплуатационного водозабора. Изменение температур по всему стволу наблюдалось в роторной скважине по замеру в марте 1963 г. Температура увеличилась в интервале водоносного комплекса. Максимальная температура была замерена на глубине 200 м — +19,4°С. Но это повышение вряд ли произошло за период выпусков. Дело в том, что термограмма, с которой сравниваются температуры, полученные в последнее время, была снята еще в 1958 г. при опробовании скважины. До начала выпусков вблизи нее опробовались скв. 12 и 16, длительное время работала скв. 2. Выпуски из этих скважин, возможно, еще ранее привели к повышению температуры в интервале водоносного комплекса Паужетской свиты. Кстати, заметим, что температура в скв. 12 и 16 на сходных глубинах также составляла величину, близкую к замеренной в роторной скважине.

Более интересным фактом является увеличение температуры на глубинах, ниже 500 м по сравнению с точечным замером температуры в 1961 г. на глубине 680 м (143°С и 178°С). Увеличение температуры сопровождалось ростом энтальпии пароводяной смеси на устье скважин до 150 ккал/кг при опробовании в апреле — мае третичного водоносного комплекса в роторной скважине. Эти изменения, наряду с падением статического давления, отмеченного выше, свидетельствуют о том, что опытно-эксплуатационные выпуски привели к захвату скважинами, заложенными в псефитовые туфы, термальных вод, заключенных в третичных отложениях, и передвижению более нагретых вод второго водоносного комплекса к участку искусственной разгрузки.

¹ Здесь и далее, если нет специальных пояснений, сравнение идет с температурой, замеренной в скважинах после выстаивания в период одиночных испытаний.

*Температура в действующих и наблюдательных скважинах
после окончания опытно-эксплуатационных выпусков
и выстаивания*

По окончании выпусков температура в большинстве скважин измерялась дважды. Первый раз, спустя 5—12 дней после закрытия действующих скважин, а второй — после выстаивания последних в течение 85—105 дней (измерение температуры производилось в ноябре 1963 г.).

В первом случае наиболее резкое изменение температуры было отмечено в скв. 4, 11, 12 и 13 в интервале залегания обводненных пород. Как известно, в этих же скважинах наблюдалось уменьшение энтальпии пароводяной смеси в процессе опытной эксплуатации. Исключение составляет только скв. 12, температура в которой уменьшалась в целом по всей глубине, тогда как энтальпия несколько увеличилась. Правда, рост ее, возможно, связан с увеличением притока воды с нижней части вскрытых

Таблица 54

Температура водоносного комплекса Паужетского месторождения до и после

№ скв.	Интервал залегания, м	Температуры, измеренные перед одиночными испытаниями		Температуры, измеренные после опытно-эксплуатационных выпусков, Т, °С. Выстаивание 85—105 дней	
		на верхней и нижней границах туфов	максимальная Т, °С глубина, м	на верхней и нижней границах туфов	максимальная Т, °С глубина, м
2	51,2—260	—187	187	147—186	$\frac{186^*}{200-261}$
5	25—227	131—139	$\frac{152}{350}$	133—137,5	$\frac{151}{300}$
6	52—248,6	128—154	$\frac{157}{385^*}$	136—154	$\frac{154}{250-317^*}$
7	65,7—219,8	177—193	$\frac{193}{219,8}$	177—193	$\frac{193}{219,8}$
8	83—313	168—176	$\frac{176}{300-327^*}$	151—177	$\frac{177}{250-300}$
10	85—319,5	152—179	$\frac{179}{300-326^*}$	164—178	$\frac{179}{250}$
11	64,5	141—164	$\frac{164}{200-244^*}$	130—162	$\frac{162}{312^*}$
12	43	171—192	$\frac{192}{260^*}$	148—187	$\frac{187}{200-250^*}$
13	90—349,8	174,5—199	$\frac{200}{375^*}$	169,5—199	$\frac{199}{300-373^*}$
15	86,7—2	122—172	$\frac{172}{140-286^*}$	131—172	$\frac{172}{180-290^*}$
17	51—261,1	158—192	$\frac{192}{250-336^*}$	159—192,5	$\frac{193}{250}$
18	90,5—337,4	175—196	$\frac{196}{349^*}$	176—199	$\frac{199}{300-340^*}$
21	145,1—290	178,5—188,5	$\frac{188,5}{290^*}$	183—203	$\frac{203}{287}$

* На забое температура не измерялась из-за непрохождения термометра.

водоносных туфов, где температура, как видно из термограммы, возросла. В остальных скважинах, в которых удалось провести термометрию, температура практически не изменилась, как, кстати следует заметить, не изменилось и теплосодержание пароводяной смеси (скв. 15, 16, 20). На этих термограммах, несмотря на указанные изменения, по-прежнему четко выделялась граница обводненных пород с вышележащими водоупорными слоями (рис. 60).

Результаты измерения температуры, которые проводились спустя 3 месяца после окончания опытно-эксплуатационных выпусков в бывших опытных наблюдательных скважинах, представляют большой интерес как свидетельство восстановления, если можно так выразиться, первоначальных геотермических условий.

Сравнение значений температур в скважинах, измеренных до и после опытной эксплуатации, показывает, что существенных различий в температуре и характере термограмм нет (табл. 54). Исключение составляет только скв. 21, температура в которой резко возросла в нижней части ствола и на глубине 287 м достигла 203° С. Это максимальная температура, полученная на разведанном участке месторождения (рис. 60). Небольшие увеличения температуры отмечались в скв. 7, 10, 15, 18. Относительно резкое уменьшение температуры было зафиксировано только в единственной скв. 12. Причина этого изменения неясна.

Таким образом, температурный режим на разведанном участке в целом оказался подобным условиям, зафиксированным до начала опытной эксплуатации. Изменения, которые имели место, свидетельствуют о некотором перераспределении тепла, которое происходит под влиянием отбора воды (усилением водообмена) и, вероятно, о подтягивании с юго-востока термальных вод (пара) более высокой температуры (данные скв. 21).

Изменение химического состава термальных вод

Ежемесячный отбор проб воды и пара на химический анализ позволил довольно детально представить себе картину изменения химического состава воды по скважинам на участке эксплуатационного водозабора.

Эти изменения иллюстрирует график колебания концентраций характерных ион-градентов химического состава воды: хлора, сульфатов, калия и кремневой кислоты отдельных скважин (рис. 61).

Наибольшие изменения в химическом составе произошли в скв. 4 и 11 на северном участке месторождения. По данным анализа проб, взятых в этих скважинах, следует, что в воде значительно увеличилась концентрация сульфат-иона и уменьшилась концентрация хлор-иона и калия. Эти изменения были зафиксированы по скв. 4 после первого месяца откачек. Так, содержание сульфатов увеличилось с 80 мг/л до 220 мг/л, содержание хлора уменьшилось с 1400 мг/л до 1200 мг/л. Постепенно в течение всего периода выпусков падала концентрация кремневой кислоты. По скв. 11 изменения концентраций указанных компонентов по абсолютной величине были меньше. Общая минерализация воды, взятой из этих скважин, уменьшилась незначительно.

В составе воды, взятой на анализ из скв. 10, было зафиксировано небольшое увеличение концентрации хлор-иона на 60 мг/л и незначительное увеличение общей минерализации и калия. Содержание кремнекислоты, так же как и по данным скв. 4 и 11, несколько увеличилось. Химический состав воды, отобранной из скв. 15, практически остался неизменным.

На южном и юго-восточном участках месторождения химический состав термальной воды принципиально не изменился. Можно отметить только незначительное уменьшение калия в скв. 12, 20, уменьшение концентрации кремнекислоты и некоторое увеличение хлор-иона в скв. 13, 20 (на 50—100 мг/л). Для всех рассматриваемых скважин за период опытно-экс-

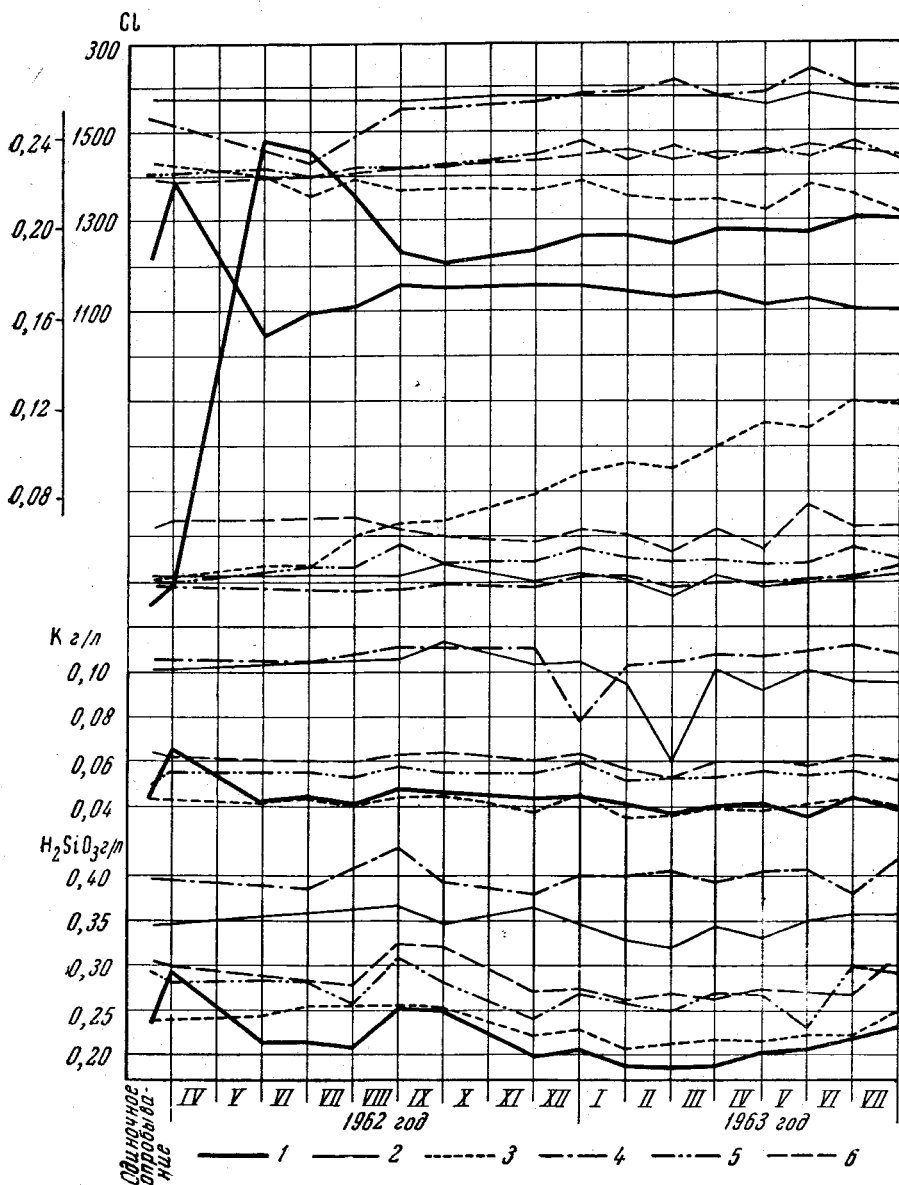


Рис. 61. Концентрация характерных компонентов химического состава термальной воды в период опытно-эксплуатационных выпусков
Скважины: 1 — 4, 2 — 10, 3 — 11, 5 — 15, 6 — 16

платационных выпусков было отмечено уменьшение концентрации анализируемых газов в паровой фазе (CO_2 , H_2S и NH_3), причем в скважинах северного куста содержание уменьшилось больше. В конце выпусков расширилась в северо-западном направлении зона распространения термальных вод с концентрацией хлора более 1600 мг/л. Это несомненно свидетельствует об увеличении притока высокотемпературных вод к искусственной зоне разгрузки — к скважинам северного куста. В то же время интенсивный отбор воды скв. 4 и 11 привел к тому, что к зоне их влияния произошло подтягивание вод, видимо, из нижележащих отложений, которые

характеризовались меньшим содержанием хлора и большим содержанием сульфатов (по данным опробования роторной скважины).

Уменьшение концентрации газа в паре и, следовательно, в термальной воде на глубине можно объяснить более интенсивным водообменом, связанным со значительным отбором термальной воды — 125 кг/сек, на сравнительно небольшой площади разведанного участка. На юге участка это можно объяснить тем, что в процессе одиночного опробования скважина захватывала отсепарированный пар, обогащенный газом при отделении его от термальной воды. Ранее отмечалось, что трещинные зоны с паром были вскрыты скв. 13 и 21. Длительный выпуск пароводяной смеси из скважин, видимо, приводил к истощению таких «ловушек», и скважины отбирали только постоянно возобновляющуюся порцию термальной воды с относительно установившимся химическим составом.

* * *

Изучив режим термальных вод в период опытной эксплуатации, можно сделать следующее заключение. Главным следствием опытно-эксплуатационных выпусков явилось снижение пьезометрической поверхности высокотермальных вод. Это привело к уменьшению дебитов термальных источников и к сокращению суммарной естественной разгрузки на 22%. Одновременно, в силу той же причины, усилилось подземное отделение пара, в результате чего возникли новые паровые струи и грязевые котлы. С другой стороны, образование депрессионной воронки вызвало усиленное перетекание термальных вод из глубины залегающего третичного комплекса в водоносный комплекс Паужетской свиты.

Изменения в динамике термальных вод в отдельных случаях сказались на их химизме. Так, в скв. 4 и 11 из-за усилившегося притока вод из третичных отложений уменьшилось содержание хлора и выросло содержание сульфатов. Однако в целом по месторождению химизм гидротерм, так же как и их температура, не претерпели существенных изменений.

После окончания опытной эксплуатации произошло быстрое восстановление статического уровня термальных вод, и дебиты источников достигли первоначальных значений. Восстановился режим гейзеров. Исчезли и заглохли паровые струи и грязевые котлы, возникшие в ходе круглогодичной работы скважин.

Таким образом, суммарный отбор скважинами термальной воды с расходом 120—125 л/сек при давлении пара на устье 1,8—2,0 ата в течение года не изменил существенно режима подземных вод, что является гарантией надежной работы эксплуатационного водозабора с указанным расходом.

Опыт проведения в Паужетском месторождении режимных наблюдений, позволивших довольно однозначно судить о направленности изменения режима высокотермальных вод в процессе их интенсивного отбора, говорит о возможности и необходимости применения режимных наблюдений по общепринятой программе при изучении и оценке ресурсов высокотермальных подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверьев В. В.* Особенности динамики пароводяных скважин.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1960, вып. 18.
- Аверьев В. В.* Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1961, вып. 19.
- Аверьев В. В., Святловский А. Е.* Вулкано-тектонические структуры южной Камчатки.— Изв. АН СССР, серия геол., 1961, № 6.
- Апрелков С. Е.* Игнимбриты Гольгинских гор (Южная Камчатка). Сб. «Туфолавы и игнимбриты».— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1961, вып. 20.
- Белоусов В. И.* Вторичное минералообразование на Паужетском месторождении термальных вод.— В кн.: «Геологические и геофизические исследования в вулканических областях». Изд-во АН СССР, 1963.
- Белова М. Б., Васильев Г. М.* и др. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Камчатки. М. Гос. научно-техн. изд-во нефтяной и горючеголитературы, 1961.
- Гонсовская Г. А.* Состояние вулкана Копчелева летом 1951 г. Бюлл. Вулканол. ст., 1954, № 21.
- Иванов В. В.* Основные закономерности формирования и распространения термальных вод Камчатки.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1958, вып. 13.
- Крашенинников С. П.* Описание земли Камчатки. Изд-во Главсевморпути, 1949.
- Малеев Е. Ф.* Пирокластическая природа игнимбритов юга Камчатки.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1961, вып. 20.
- Набоко С. И.* Гейзеры Камчатки.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1954, вып. 8.
- Набоко С. И., Сильниченко В. Г.* К вопросу о метаморфизме гидротермальных растворов и вулканогенных пород при их взаимодействии.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1960, вып. 18.
- Набоко С. И.* Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. Изд-во АН СССР, 1963.
- Набоко С. И., Пийп Б. И.* Современный метаморфизм вулканических пород в районе Паужетских гидротерм.— Труды Лабор. вулкан. АН СССР, 1961, вып. 19.
- Негорюшев А. С.* К вопросу о теории действия гейзеров.— Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 5.
- Пийп Б. И.* Термальные ключи Камчатки. Изд-во АН СССР, 1937.
- Пийп Б. И.* Маршрутные геологические исследования на юге Камчатки.— Труды Камчатской Вулканол. станции, 1947, вып. 3.
- Пийп Б. И., Иванов В. В., Аверьев В. В.* Паужетские высокотермальные воды Камчатки как источник геотермической энергии.— Труды конференции ООН по новым источникам энергии. Рим, 1961.
- Сугробов В. М.* Паужетские гидротермы Камчатки как пример высокотемпературной водонапорной системы.— В сб.: «Гидрогеотермические условия верхней части земной коры». Изд-во «Наука», 1964.
- Устинова Т. И.* Камчатские гейзеры.— Труды Лабор. гидрогеолог. проблем, 1949, т. 2.
- Устинова Т. И.* Камчатские гейзеры. Географгиз, 1955.
- Vanwell C. J., Cooper E. R., Thompson E. K., McCree K. J.* Physics of the New Zealand thermal area N 2.— Dep. Scient. and Industr. Res., Bull. N 123, 1957.
- Ellis, Wilson S. H.* The hut from the Wairakei-Taupo thermal region calculated from chloride output. 1955.
- Facca G., Tonani F.* Natural steam exploration in USA.— Bull. geofis. teorica et appl., Giugno, N 14, 1962.
- Facca G., Tonani F.* Natural steam geology and geochemistry.— United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961.
- Grange L. J.* Geothermal steam for power in New Zealand. Wellington, 1955.
- Smith J. H.* Harnessing of geothermal energy and geothermal electricity production — United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961.
- Smith J. H.* Production and utilization of geothermal steam.— N. Z. Engng, N. 13/10, 1958.
- Steiner A. H.* Hydrothermal alteration of Wairakei, New Zealand.— Rept, from Econ. Geology, 1953.
- White D. E.* Preliminary evaluation of geothermal areas by geochemistry, geology and shallow drilling.— United Nations Conf. on New Sources of energy, Rome, 1961.
- Woods D. J.* Drilling mud in geothermal drilling.— United Nations Conf. on New Sources of Energy, Rome, 1961.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение (В. В. Аверьев)	3
------------------------------------	---

Часть первая

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Геологический очерк района (В. В. Аверьев и В. И. Белоусов)	8
Геологическое строение Паужетского месторождения высокотермальных вод (В. И. Белоусов)	23
Естественные термоявления на Паужетском месторождении (В. В. Аверьев и Н. Г. Сугрובה)	31
Температура в недрах Паужетского месторождения по данным разведочных скважин (В. М. Сугроров и Н. Г. Сугрובה)	43
Обводненность пород Паужетского месторождения и условия циркуляции высокотермальных вод (В. М. Сугроров при участии В. В. Аверьева)	49
Химический состав термальных вод, вскрываемых скважинами (В. М. Сугроров)	64
Гидротермальный метаморфизм пород и минералообразование (С. И. Набоко, Г. А. Каршов и А. П. Розникова)	76

Часть вторая

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Технология буровых работ (В. М. Дудченко, Ю. А. Краевой, Е. Л. Краевая)	120
Методика и результаты геофизических исследований (Г. П. Декин, Ю. А. Краевой, Г. П. Яроцкий)	134
Геофизические исследования в скважинах (В. М. Сугроров)	136
Гидрогеологическое опробование скважин (В. В. Аверьев)	144
Характеристика пароводяных разведочных скважин (В. М. Сугроров)	168
Опытная эксплуатация Паужетского месторождения (В. М. Сугроров)	176
Режим высокотермальных подземных вод и влияние на него опытной эксплуатации (Н. Г. Сугрובה, В. М. Сугроров)	189
Литература	207

Паужетские горячие воды на Камчатке

Утверждено к печати Институтом вулканологии СО АН СССР

Редактор издательства О. М. Ванюкова
Технический редактор Н. Д. Новичкова

Сдано в набор 24/V 1965 г. Подписано к печати 27/VIII 1965 г.
Формат бумаги 70×108¹/₁₆. Печ. л. 13=17,81 усл. л. Уч.-изд. л. 16,6.
Тираж 1300 экз. Т-11465. Изд. № 305/65. Тип. зак. № 2566.

Цена 1 р. 36 к.

Издательство «Наука» Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука» Москва, Г-99, Шубинский пер., 10