

УДК 531.234(571.66)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЧАСТКА ДАЧНЫЙ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В СВЯЗИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ МУТНОВСКОЙ ГЕОЭС 50 МВт

© 2005 г. А. В. Кирюхин, В. Л. Леонов, И. Б. Словцов, И. Ф. Делемень, М. Ю. Пузанков,
А. Ю. Поляков, Г. О. Иванысько, О. П. Батаева, М. Е. Зеленский

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 18.03.2004 г.

Уточнена концептуальная гидрогеологическая модель участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, в соответствии с которой продуктивная зона “Основная” Центрального блока участка Дачный приурочена к плоскости разлома северо-северо-восточного простирания и падением 60° на восток–юго-восток. Разработана детальная численная термогидродинамическая модель продуктивной зоны, обоснованы цели бурения дополнительных скважин в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС, мощностью 50 МВт. Для разработки численной модели использован пакет программ TOUGH2, генератор сеток A-MESH, пакеты компьютерной графики SURFER-8, GRAPH3, DIDGER-3, компилятор Lahey Fortran 90, программы для расчета забойного давления пароводяных скважин DEBIT и HOLA. Для обеспечения необходимой для моделирования точности вычислительной сетки (проблема описания крутопадающих трещин) разработана дополнительная программа MESHED-2 и внесены соответствующие корректировки в исходный текст кода TOUGH2. По результатам моделирования прогнозируется снижение паропроизводительности существующих эксплуатационных скважин с 60–70 до 30 кг/с в первые 10 лет эксплуатации. Для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт необходимо бурение семи дополнительных эксплуатационных скважин в юго-восточном секторе продуктивной зоны “Основная”.

ВВЕДЕНИЕ

На Мутновском геотермальном месторождении построены две геотермальные станции: Верхне-Мутновская (1999 г., 12 МВт) и Мутновская (2002 г., 50 МВт) с суммарной установленной электрической мощностью 62 МВт, что может обеспечить 35% потребности в электроэнергии на Камчатке. Мутновская ГеоЭС с установленной мощностью 50 МВт была запущена в эксплуатацию на участке Дачный в 2002 г., однако обеспечить ее теплоносителем в 2002–2003 гг. удалось лишь на 60–70%, несмотря на бурение 4-х дополнительных эксплуатационных скважин. В связи с этим возникла необходимость в уточнении концептуальной гидрогеологической модели Центрального блока участка Дачный и в разработке более детальной численной термогидродинамической модели, позволяющей обосновать цели бурения дополнительных эксплуатационных скважин и график их подключения для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Концептуальная модель. Концептуальная модель продуктивного резервуара в Центральной

части участка Дачный изображена на рис. 1, 2. Продуктивная зона “Основная” находится в пределах Северо-Мутновской вулканотектонической зоны [1], ее простирание согласуется с простиранием системы наиболее молодых субпараллельных разломов, выделенных В.Л. Леоновым [8]. Продуктивный резервуар (продуктивная зона “Основная”) приурочен к разломной зоне северо-северо-восточного простирания, падением 60° на восток–юго-восток и средней вертикальной мощностью около 240 м (истинная мощность 120 м). Зона “Основная” вскрыта продуктивными скважинами 045, 01, 014, 016, 1, 029W, 26, 24, 4E с высоким устьевым рабочим давлением. Горные породы, вмещающие продуктивную зону, имеют разный состав: диориты, миоцен-плиоценовые песчаники, риолитовые и андезитовые туфы и лавы; однако зона характеризуется отсутствием явного литологического контроля. Кровля продуктивной зоны фиксируется зонами полного поглощения промывочной жидкости при бурении скважин. Анализ распределения координат точек полной потери циркуляции и продуктивных зон по 50-ти скважинам Центрального блока участка Дачный показывает, что 75% зон полной потери циркуляции и 100% всех продуктивных скважин связаны с ± 150 м интервалом, прилегаю-

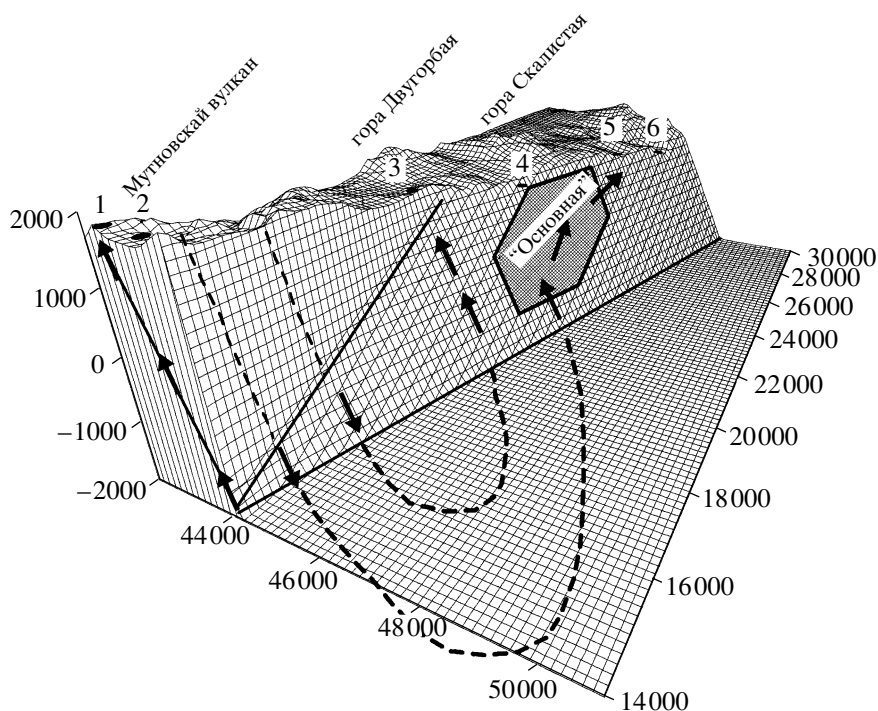


Рис. 1. Блок-схема Северо-Мутновской вулcano-тектонической зоны с вырезом в плоскости продуктивной зоны “Основная”. Вероятные линии тока флюида от области метеорного питания в постройке вулкана Мутновский через область транзита (где происходит нагрев и обогащение магматической составляющей) до продуктивного геотермального резервуара и очагов естественной разгрузки показаны стрелками и пунктиром. Продуктивный геотермальный резервуар (продуктивная зона “Основная”) выделен многоугольником. Следы плоскости, включающей продуктивную зону “Основная”, показаны жирными линиями. Естественные термопроявления на поверхности: 1 – Активная Воронка кратера Мутновского вулкана, 2 – Донное Поле кратера Мутновского вулкана, 3 – Северо-Мутновские Западные, 4 – Дачные, 5 – Пиратовские, 6 – Верхне Жировские.

щим к плоскости “Основной” продуктивной зоны. Ориентация зоны подтверждается также трассерным взаимодействием в субмеридиональном направлении. Плоскость разломной зоны пересекает активное жерло Мутновского вулкана на абсолютных отметках +250...+1250 м на расстоянии 8 км от участка эксплуатации. Здесь, по данным гидроизотопных исследований, находится также область водного питания геотермального месторождения, осуществляемого за счет инфильтрации вод метеорного происхождения и тающих в кратере вулкана ледников. Заметим, что наличие тающего под влиянием повышенного теплового потока в кратере Мутновского вулкана ледника является стабилизирующим фактором водного питания. Тепловое питание продуктивной зоны осуществляется, очевидно, за счет остывания порций магматического материала, аккумулярованных Северо-Мутновской вулcano-тектонической зоной (связана ли пространственно эта магматическая система с магматическим каналом Мутновского вулкана или это изолированные магматические тела, заполнившие трещину гидроразрыва, проходящую через действующий Мутновский вулкан, – неизвестно). Высокотемпературный теплоноситель поднимается

из юго-восточного сектора зоны, имеет температуру более 280°C и находится в жидком состоянии. Там же обнаружена кварц-эпидот-хлоритовая ассоциация вторичных гидротермальных минералов. В средней и верхней части продуктивной зоны “Основная” теплоноситель переходит в двухфазное состояние, характеризуемое вайрацит-хлоритовой ассоциацией вторичных гидротермальных минералов, соотношением $Cl/SO_4 > 1$, превышением значений Na-K геотермометра над прямыми замерами температуры. Четыре дополнительные скважины (A1-A4), пробуренные в 2001–2003 гг. и оборудованные фильтрами за пределами продуктивной зоны “Основная”, показали отсутствие продукции или низкую продуктивность. Парогидротермальный взрыв, произошедший в 300 м к востоку от скважины 045 (июнь 2003 г.) в результате вызванного эксплуатацией понижения уровня в зоне высоких температур, является дополнительным подтверждением изображенной на рис. 2 схемы циркуляции теплоносителя.

Рассмотрим далее более подробно аргументацию ключевых позиций концептуальной модели, изложенной выше.

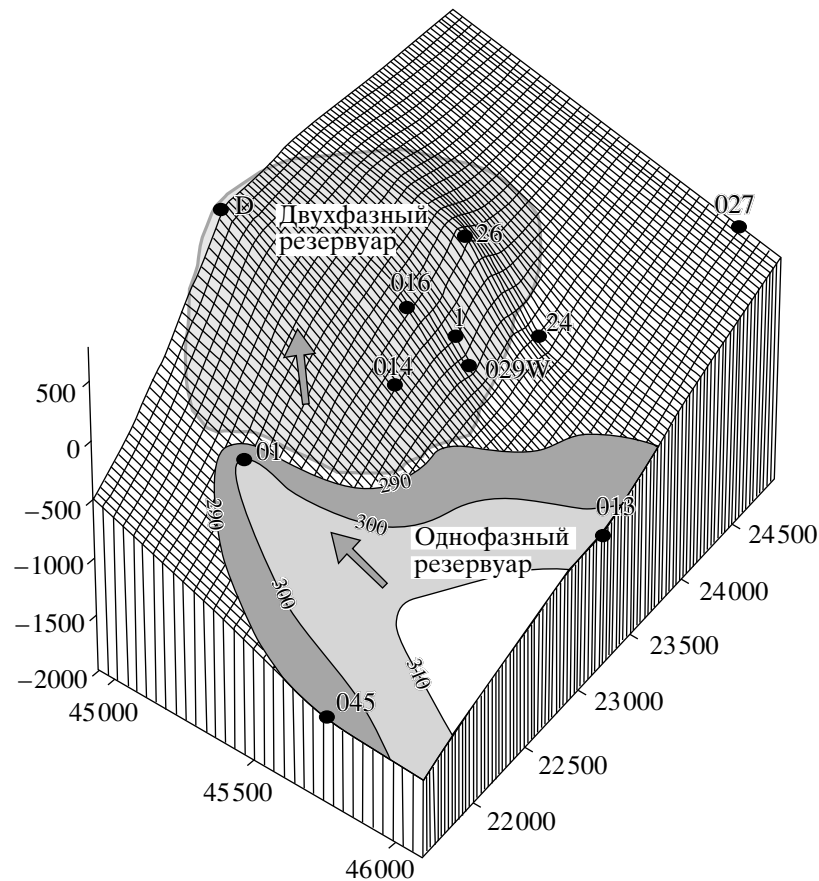


Рис. 2. Блок-схема продуктивной зоны “Основная” ССВ простирания и ВЮВ падения 60°, с распределением температур (изолинии 290, 300 и 310°С) и фазового состояния теплоносителя в пределах зоны. Цифры–точки ее вскрытия продуктивными скв.ами.

Распределение продуктивных зон. Продуктивная зона “Основная” в центральной части участка Дачный вскрыта скважинами 045, 01, 014, 016, 1, 029W, 26, 24, 027, показавшими производительность в процессе длительной эксплуатации или продолжительных опытных выпусков теплоносителя [5]. Продуктивная зона имеет северо–северо-восточное простирание, падение на восток–юго-восток 60°. Простирание продуктивной зоны “Основная” субпараллельно системе разломов Встречный, Термальный, Пологий, Туфовый, Крайний, с юго-запада она ограничена разломом Водопадный, с востока – субмеридиональной зоной аномального магнитного поля (рис. 3, названия разломов по [2, 8]). Для определения глубины залегания кровли и подошвы продуктивной зоны использован каталог скважин (Assaulov S.G., Assaulova N.P. 1996)¹, при этом глубина кровли принималась по минимальной глубине продуктивной зоны, вскрываемой фильтровой частью скважи-

ны, а глубина подошвы – по максимальной ее глубине. С учетом информации по бурению дополнительных скважин А2-А4, пробуренных в период 2001–2003 гг. на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения (Г.А. Рослый, 2003)², параметры продуктивной зоны несколько уточнились. Поверхность кровли продуктивной зоны “Основная” может быть аппроксимирована плоскостью $Z = -1.691076246561 \cdot X + 0.48880109651512 \cdot Y + 65583.1$, угол падения которой на восток–юго-восток составляет 60.4° (рис. 3, табл. 1). Средняя вскрытая вертикальная мощность зоны оценивается в 240 м. Из каталога скважин (Assaulov S.G., Assaulova N.P. 1996)@1 произведена также выборка точек вскрытия кровли продуктивных зон, сопровождающихся полной потерей циркуляции промывочной жидкости при бурении скважин участка Дачный (внутри области, показанной на рис. 3). Существенно, что только кровля продуктивной зоны может быть достоверно идентифици-

¹ Assaulov S.G., Assaulova N.P. Mutnovsky geothermal field. // DATABASE, 1996. (Copy presented to WestJEC for implementation of the Kamchatka Feasibility Study).

² Рослый Г.А. Основные результаты эксплуатационного бурения/Отчет по контракту №589/35806573/9-0011/00. 2003. 35 с.

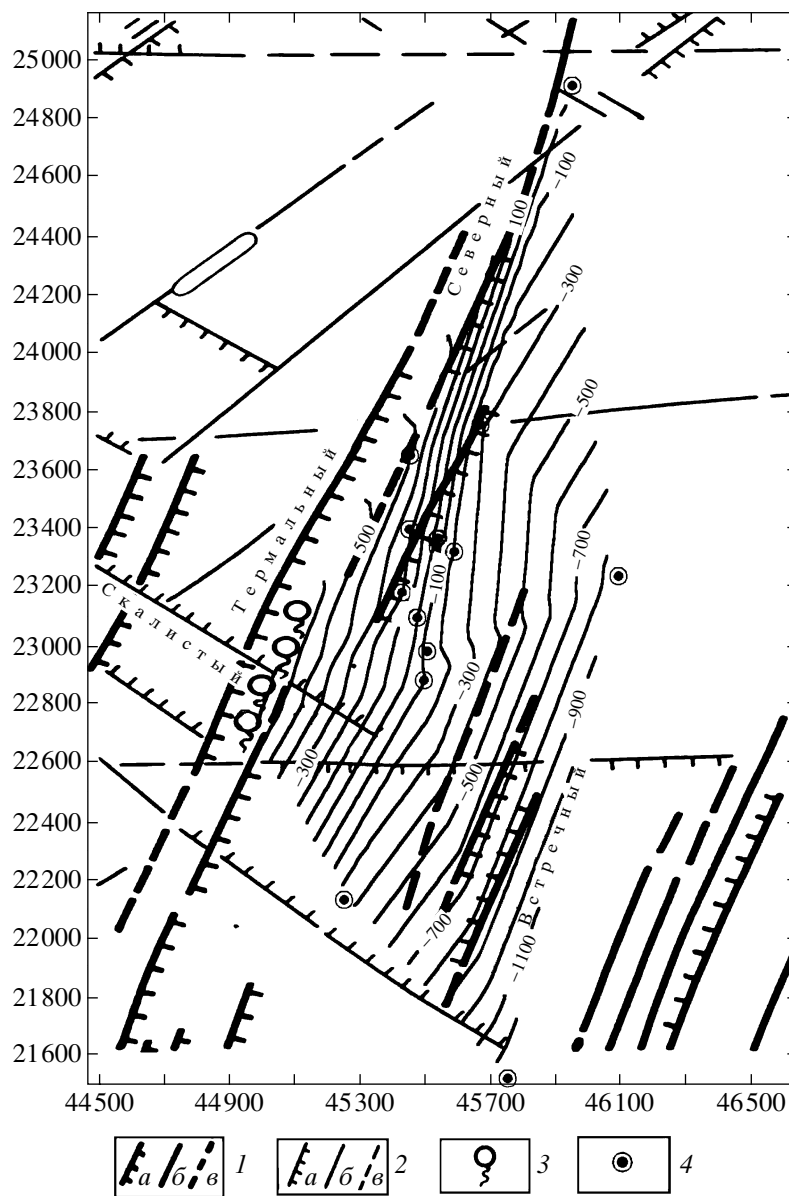


Рис. 3. Структурная схема Мутновского геотермального месторождения по [8] и кровля поверхности (в изолиниях на абс. отм. от -1100 до $+500$ м) продуктивной зоны “Основная” на участке Дачный: 1 – новейшие разрывные нарушения субмеридионального (ССВ $20-30^\circ$) простирания (а – с установленными вертикальными смещениями, б – без установленных вертикальных смещений, в – предполагаемые); 2 – прочие разрывные нарушения; 3 – термопроявления; 4 – точки вскрытия продуктивной зоны геотермальными скв.ами (табл. 1).

рована (потеря циркуляции). Для скважин Э4 и А1 зоны идентифицированы по данным термометрических исследований (И.И. Чернев, 2003)³. На рис. 4 показаны расстояния ($dz \cdot \cos(60.4^\circ)$) от расчетной плоскости до кровли продуктивных зон (зон поглощения) по рассматриваемым скважинам. В интервал ± 150 м попадают 75% всех продуктивных зон и 100% всех продуктивных

скважин. Отстоящие вниз от расчетной плоскости зоны “Основная” нижние зоны поглощения скважин 04, 2Е, 012, 4Е и 011 могут быть связаны с приконтактовыми зонами диоритовых интрузий, которые вскрыты на рассматриваемом участке тремя скважинами (04, 011 и 012) в “лежащем блоке” относительно плоскости зоны “Основная”. Но эти зоны поглощения не подтвердились реальной продуктивностью скважин. Отстоящие вверх от расчетной плоскости зоны “Основная” продуктивные зоны скважин 15, 20 и А1 находят

³ Чернев И.И. Отчеты по бурению скв. А2, А3 и испытаниям скв. 07, 4Э, 027, ОАО “Геотерм”, 2003. 111 с.

Таблица 1. Исходные данные для картирования продуктивной зоны “Основная” участка Дачный Мутновского геотермального месторождения (рис. 3)

№ скважины	X	Y	Z	Глубина кровли, м	Глубина подошвы, м	Кровля, м абс	Подошва, м абс	Вертикальная мощность, м
1	45540	23336	786	820	1100	-34	-314	280
26	45455	23650	816	388	466	428	350	78
016	45432	23181	788	577	832	211	-44	255
027	45953	24912	813	830	1021	-3	-208	191
029W	45591	23320	791	1010	1057	-219	-266	63
01	45254	22131	803	1156	1195	-353	-392	39
014	45499	22881	775	851	993	-96	-218	142
013	46095	23236	802	1660	1951	-858	-1149	291
045	45756	21522	710	1979	2080	-1269	-1370	101
24	45673	23754	793	1081	1300	-288	-507	219
D	44950	22750	775	0		775		
A2-1	45509	22980	776.8	928		-151		
A2-2	45477	23096	776.8	762		15		210
A3-1	45539	23363	785	837		-52		
A3-2	45543	23365	785	828		-43		240
A4	45453	23398	780	548	638	232	142	90
Средняя вертикальная мощность по всем скв.ам, м								169
Средняя вертикальная мощность по скв.ам, вскрывшим зону полностью (1.016,027.24, A2-3, A3-2)								241

Примечание. A2-1, A2-2, A3-1, A3-2 обозначают дополнительные стволы (первый и второй соответственно) скв. A2 и A3.

ся вблизи восточной границы зоны, скв. В-1 и 29 вскрывают, вероятно, оперяющие трещины близ-поверхностных подводящих каналов, связанных с естественными термопроявлениями (Утиные-Котел). Эти зоны поглощения также не подтвердились продуктивностью самих скважин.

Литологический контроль продуктивных зон.

Этот контроль на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения проявлен слабо. На рис. 5 и 6 показано положение продуктивной зоны “Основная” в субмеридиональном и субширотном разрезах. Разрезы спроектированы на меридиональную и широтную оси соответственно, на каждый из разрезов спроектированы два: геологический разрез по скважинам и разрез по скважинам с изображением продуктивных зон/зон полного поглощения. Это вызвано тем, что наиболее ценная геологическая информация получена по данным бурения разведочных колонковых скважин с полным отбором керна (эти скважины использованы при построении геологического разреза), в то время как при бурении эксплуатационно-разведочных скважин большее внимание уделялось продуктивным зонам/зонам полного поглощения (эти скважины использованы для построения разреза с изображением продуктивных зон). Разрезы показывают, что продуктивная зона пересека-

ет все семь основных литологических комплексов, выделяемых различными авторами (Г.М. Асаулов и др., 1987)⁴, [4, 19]: четверичные игнимбриты, туфы, лавы и магматические экструзии кислого состава (Q_1); плиоценовые лавы (Nal_2); плиоценовые риолитовые туфы (Nal_1); миоценовые туфы и лавы ($N_1^{2as_2}$); миоценовые песчаники ($N_1^{2as_1}$); миоценовая интрузивная контактная зона (N_1br); миоценовые диоритовые интрузии (δN_1^2). Вместе с тем, нельзя исключать возможность обнаружения дополнительных продуктивных резервуаров в пределах Центрального блока участка Дачный. Вскрытые на Дачном участке диориты δN_1^2 (скв. 04, 011, 012) могут включать дополнительные источники тепла и зоны повышенной проницаемости в геотермальном резервуаре. Миоцен/плиоценовая структурная поверхность (кровля ($N_1^{2as_2}$)) также может содействовать увеличению горизонтальной прони-

⁴ Асаулов Г.М. и др. Отчет о результатах предварительной разведки на участке Дачный Мутновского месторождения парогидротерм с подсчетом запасов теплоносителя для обоснования проекта строительства первой очереди ГеоЭС мощностью 50 МВт (в 7 книгах). п. Термальный Камчатской обл. 1987.

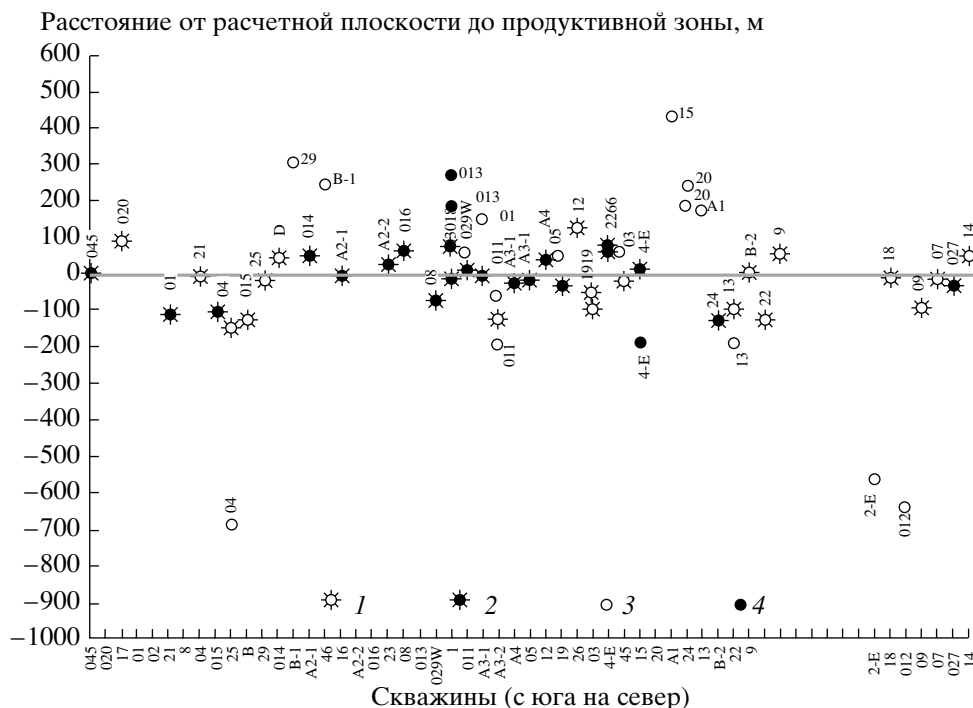


Рис. 4. Расстояние ($dz \cdot \cos(60.4^\circ)$) от расчетной плоскости $Z = -1.691076246561 \cdot X + 0.48880109651512 \cdot Y + 65583.1$ до кровли продуктивных зон (зон поглощения) по скважинам участка Дачный Мутновского геотермального месторождения. 1 – продуктивные зоны; 2 – продуктивные зоны, вскрытые эксплуатационными скв.ами; 3 – зоны полного поглощения; 4 – зоны полного поглощения, вскрытые эксплуатационными скв.ами (табл. 1).

цаемости геотермального резервуара, о чем свидетельствует достаточно однородное распределение температуры на отметке -250 м, вдоль вышеупомянутой поверхности.

Геофизические характеристики. Геофизические данные, полученные для геотермального резервуара не имеют однозначной интерпретации. Комплексы (NaI_1 , $\text{N}_1^2 \text{as}_2$, $\text{N}_1^2 \text{as}_1$, $\text{N}_1 \text{br}$, δN_1^2) характеризуются высокими величинами гамма-активности ($5.5\text{--}9.8$ мкР/час), тогда как комплексы (Q_1 , NaI_2) имеют средние величины ($3.2\text{--}4.5$ мкР/час). Явной корреляции между значениями электросопротивления и литологическими комплексами не обнаружено. Продуктивные интервалы обычно характеризуются величинами сопротивления $30\text{--}100$ Ом.м (скважины 01, 013, 049N, 055), зоны низкого сопротивления ($1\text{--}10$ Ом.м) не всегда совпадают с высокопродуктивными интервалами.

Геолого-геофизический анализ по отдельным скважинам (04, 011, 012) показывает, что комплекс диоритов (δN_1^2), возможно, представляет собой неоднородное сочетание отдельных даек и магматических тел с вертикальной мощностью до 150 м во вмещающей толще, сложенной миоценовыми песчаниками ($\text{N}_1^2 \text{as}_1$).

Газогидрохимические и гидроизотопные индикаторы потоков теплоносителя. Продуктивная зона “Основная” вскрыта продуктивными скважинами “высокого давления” (рабочие устьевые давления могут превышать 12 бар). Она характеризуется $\text{Cl}/\text{SO}_4 > 1$, повышенными показаниями Na-K геотермометра по сравнению с прямыми замерами температуры, в то время как зоны растека и нисходящего движения теплоносителя вскрываются скважинами “низкого давления” и характеризуются $\text{Cl}/\text{SO}_4 < 1$ (табл. 2, 3). Ориентация продуктивной зоны “Основная” подтверждается также трассерным взаимодействием в субмеридиональном направлении [4, 13]. Параметр Cl/SO_4 можно использовать для трассировки линий тока в геотермальном резервуаре (транспорт теплоносителя происходит по направлению уменьшения Cl/SO_4): $045 \rightarrow 01 \rightarrow 014 \rightarrow 1 \rightarrow 24 \rightarrow 4E \rightarrow 5E$ и $013 \rightarrow 029W \rightarrow 1 \rightarrow 24 \rightarrow 4E \rightarrow 5E$ (рис. 2). Анализ вариаций газогидрохимических характеристик в процессе эксплуатации полезен для получения достоверной информации об изменении термодинамического состояния геотермального резервуара и диагностики изменения граничных условий. В табл. 4 приводятся сведения об изменении газового состава теплоносителя в процессе эксплуатации по сравнению с данными опытных выпусков до начала эксплуатации в $1998\text{--}1999$ гг. По увеличению доли метеорных газов (N_2) и

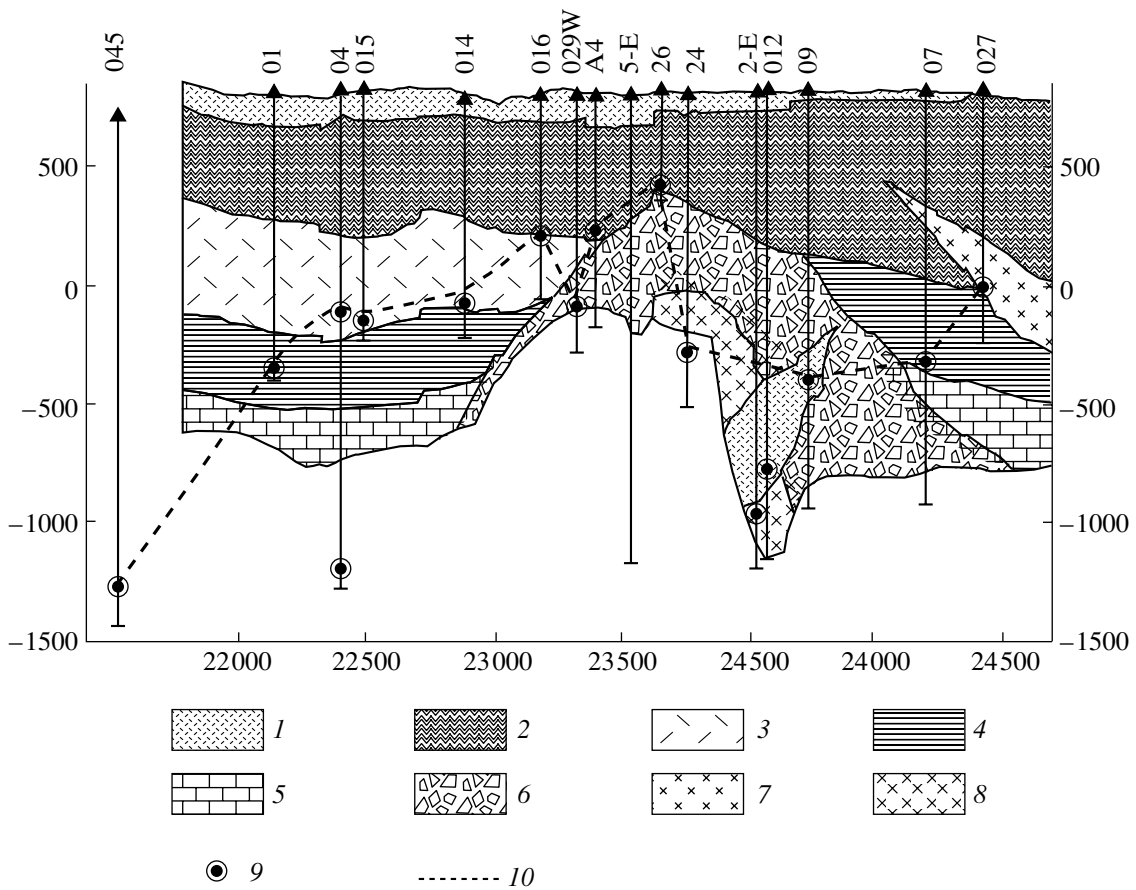


Рис. 5. Геологический разрез (по линии скв. 17–030) (Г.М. Асаулов и др., 1987)⁴, совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скв. 045–027: 1 – четвертичные игнимбриты, туфы, лавы и экструзии кислого состава; 2 – плиоценовые лавы (Nal₂); 3 – плиоценовые риолитовые туфы (Nal₁); 4 – миоценовые туфы и лавы (N₁² as₂); 5 – миоценовые песчаники (N₁² as₁); 6 – миоценовая интрузивная контактная зона (N₁br); 7, 8 – диоритовые интрузии (δN₁²); 9 – точки вскрытия зон полного поглощения; 10 – кровля продуктивной зоны “Основная”.

уменьшению доли H₂S (табл. 4) можно предположить, что происходит привлечение поверхностных вод в продуктивную зону скв. 016, 029W и 26. Отмечается также уменьшение значений температуры по Na/K геотермометру (20°С для скв. 4E, 4.5°С для скважины 029W) (табл. 2). Однако этих данных пока недостаточно для количественной оценки термогидродинамических изменений в геотермальном резервуаре в процессе эксплуатации. Необходима постановка регулярного газо-гидрохимического мониторинга с отбором проб не менее 1 раза в месяц. Гидроизотопные характеристики теплоносителя, отобранного из эксплуатационных скважин, свидетельствуют об их метеорном происхождении, причем положение области водного питания соответствует абсолютным отметкам +1500...+1600 м, где в кратере Мутновского вулкана находится тающий под влиянием повышенного теплового потока ледник (рис. 1, 7, табл. 5). Более низкие гидроизотопные характеристики

“паровых” скв. 016 и 26 объясняются их продукцией из пароводяного резервуара, где изотопное фракционирование и “облегчение” флюидов происходит в подземных условиях.

Результаты бурения дополнительных скважин. Пробуренные в 2001–2002 гг. на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения четыре дополнительные скважины (A1–A4) оказались непригодными к устойчивой эксплуатации. Скважина A1 была задана за пределами зоны “Основная”, скв. A2 и A3 вскрыли зону “Основная”, но интервалы вскрытия были зацементированы, скв. A4 была задана в пределах истощенного эксплуатацией резервуара и углублена в зону инверсии температуры. В частности, скв. A1 пробурена в северо-восточном направлении субпараллельно простиранию продуктивной зоны “Основная”. Скважины A2 и A3 прошли сквозь продуктивную зону “Основная”. Прохождение продуктивных зон фиксировалось полной потерей циркуляции в скважи-

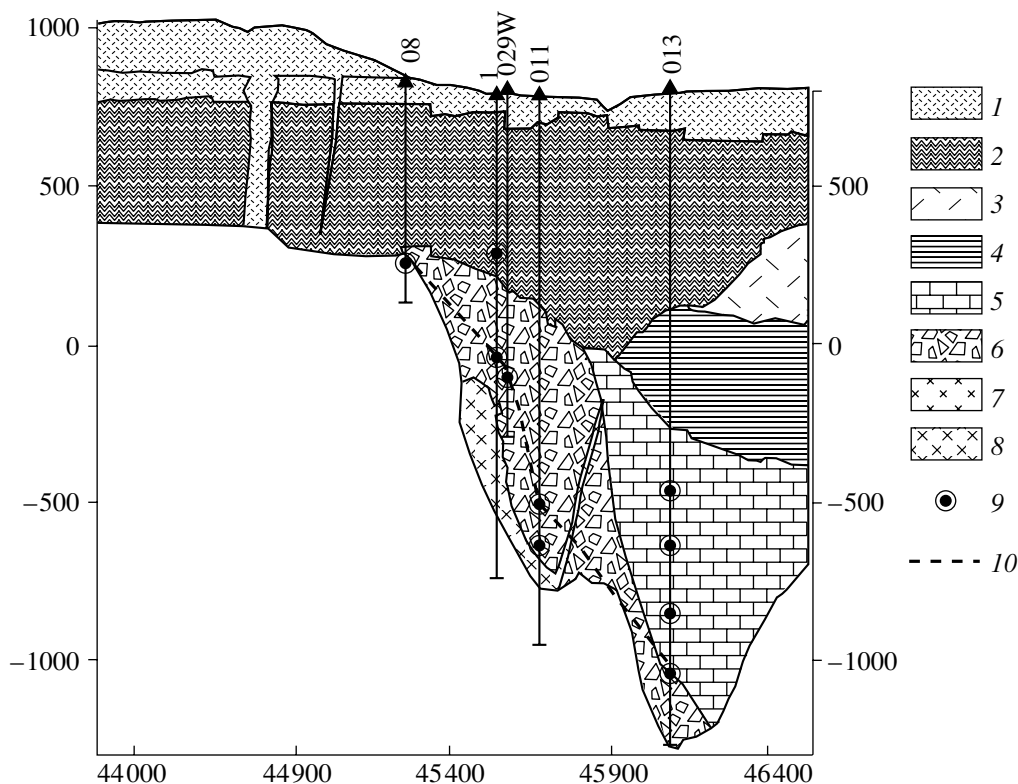


Рис. 6. Геологический разрез (по линии скв. В2–4) (Г.М. Асаулов и др., 1987)⁴, совмещенный с распределением продуктивных зон вдоль линии скв. 08–013. Усл. обозн. см. на рис. 5.

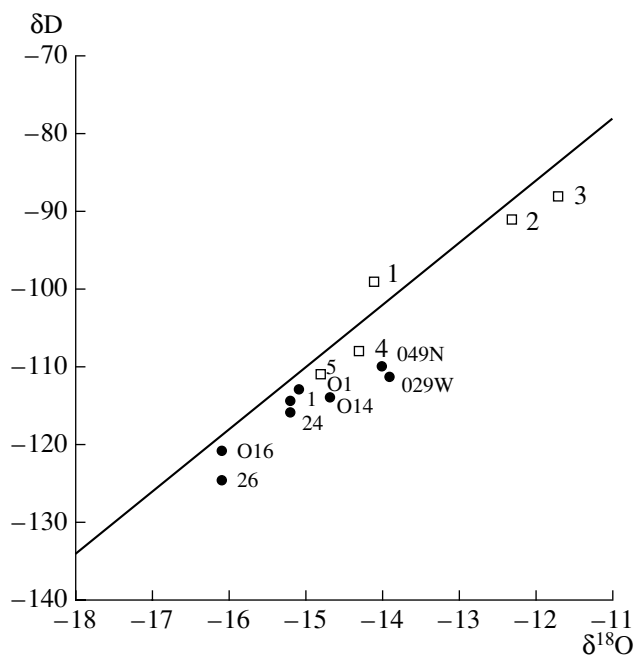


Рис. 7. Гидроизотопный состав теплоносителя из эксплуатационных скв. Мутновского геотермального месторождения и локальных метеорных вод (Кириухин и др., 2000)⁸, [3, 7]. Метеорные воды: 1 – река Фальшивая, +500 м абс.; 2 – река Жировая + 500 м абс.; 3 – ручей Дачный, +800 м абс.; 4, 5 – ручей, вытекающий из подножия ледника в кратере Мутновского вулкана, +1550 м абс.

нах, сопровождалось осложнениями, прихватами бурильного инструмента. В обеих скважинах продуктивная зона “Основная” была пройдена со второй попытки, после проходки 2-го ствола. При этом дальнейшее бурение скважин после прохождения продуктивной зоны “Основная” уже не вызывало никаких проблем (Рослый Г.А. 2003)^{@2}. К сожалению, продуктивные интервалы, соответствующие положению продуктивной зоны “Основная”, были зацементированы и обсажены глухими эксплуатационными колоннами. Скв. А4 вскрыла продуктивную зону “Основная” на отметке 232 м (225°C), но была углублена до 950 м, где зафиксирована инверсия температуры 160°C. Кроме того, на расстоянии 90 м от продуктивной зоны скв. А4 находится продуктивная зона скв. 05, которая уже долгие годы бесконтрольно фонтанирует, снижая давление в продуктивной зоне. Таким образом, отсутствие продукции из скв. А4 является, вероятно, следствием притока холодного флюида из нижних продуктивных зон в продуктивную паровую зону скв. А4 и пониженным давлением в резервуаре в результате “паразитической” эксплуатации скв. 05.

Вторичное гидротермальное минералообразование в продуктивных зонах. Ассоциации вторичных гидротермальных минералов позволяют выявить термогидродинамические характеристики

Таблица 2. Термогидродинамические и гидрохимические характеристики продуктивных скв. ([5] с добавлениями по данным опробования в 1999–2003 гг.)

Скважина	Дата	Расход общий, кг/с	Расход пара, кг/с	Энтальпия, кДж/кг	Устьевое давление, бар	Максим. устьевое давление, бар	T Na–K, °C	Cl/SO ₄
Восходящий поток теплоносителя “Основной”								
045	10.1991	21	16.4	2320	8.4	20.1	291	4.83
01	08.1988	53.2	20.2	1500	9.0	21.9	303	3.06
013	1988	44.8	12.2	1278	8.3	13.5	303	1.70
029W	02.2000	71	14.9	1150	7.3	18.4	268	2.30
029W	02.2003	72.5	16.3	1181	9.2		245	1.64
029W	09.2003						264	1.53
014	09.1988	8.4	5.4	2050	6.8	35.8	266	1.31
1	09.1988	20	7.1	1450	8.2	14.6	276	1.25
24	1988	35		1204			275	1.1
Восходящий поток теплоносителя “Северо-Восточный”								
037	07.1993	24.2	11.1	1665	6.6	11.6	253	1.82
048	07.1996	85.9	32.9	1506	10.1	16.1	270	2.02
049	01–05. 1996	30	7.9	1260	8.2	12.8	253	1.54
Нисходящий поток “Конденсатный”								
012	1987					7.1	240	0.70
03	1987					3.9	262	1.00
011	1987					3.6	228–276	0.30
4E	11.1999	26.9	6.3	1200	7.3	11.8	274	0.98
4E	10.2001	32.8	6.1	1104	7.6	8.9	277	1.08
4E	09.2003						251	0.95
5E	06.2002	36.9	6.8	1097	8.7	11.7	252	0.78
5E	02.2003						267	0.71
5E	09.2003						249	0.74

Примечание. Химические анализы выполнены в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904).

Аналитики: В.К. Марьнова, С.В. Сергеева.

циркулирующих по проницаемым зонам флюидов. В пределах геотермального резервуара выделены следующие зоны гидротермального изменения [4, 19]:

1 – кварц-эпидот-хлоритовая зона, характеризующаяся циркуляцией хлоридно-натриевого теплоносителя с температурой 220–300°C;

2 – вайрацит-пренит-кварцевая зона, характеризующаяся двухфазным состоянием теплоносителя в диапазоне температур 150–240°C и давлений 5–35 бар;

3 – иллит-хлорит-кальцитовая зона, соответствующая нисходящим потокам конденсата SO₄–Cl–HCO₃ состава с температурой 150–220°C.

Это согласуется с результатами термогидродинамического – химического моделирования двухфазного восходящего потока с базовой тем-

пературой 300°C, которое показывает формирование кварца, К-полевого шпата (микроклина), вайракита, хлорита и кальцита в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне [15]. Анализ данных бурения дополнительных скв. А2–А4 показывает, что продуктивная зона восходящего потока “Основная”, вскрываемая продуктивными скв.ами “высокого давления”, характеризуется развитием хлорит-вайрацитовый вторичной минерализации (рис. 8), в то время как зоны растека и нисходящего движения теплоносителя вскрываются скв.ами “низкого давления” и характеризуются отсутствием вайракита. В табл. 6 приводятся результаты минералого-петрографического и рентгено-структурного анализа образцов горных пород, полученных из дополнительных эксплуатационных скв., пробуренных в 2002–

Таблица 3. Химический состав конденсата (с) и сепарата (s) по данным опробования в 1999–2003 гг. эксплуатационных скв. участка Дачный Мутновского геотермального месторождения

Скважина	Дата	pH	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe Общ.
4E c	5.11.98	4.93	3.1	0.02	0.07	<0.01	0.047	0.004	0.014
4E s	5.11.98	9.06	0.3	276.5	53.5	1.42	3	0.003	0.01
016 c	4.01.99	4.78	9.5	0.35	0.1	<0.01	0.4	0.003	0.03
016 s	4.01.99	9.2	1	181	25.7	0.1	8.8	0.033	0.56
26 c	5.02.99	5	6.2	0.02	0.03				
26 s	5.02.99	7.89	2	2.48	0.42	0.001	3	0.028	
029W c	19.02.99	5.3	5.2	2.26	0.55	0.016		0.01	
029W s	19.02.99	9.04	0.3	226	43	1.41	1.94	0.009	
4E c	24.09.03	4.86	4.5	0.65	<0.1	0.003	0.08	<0.003	0.47
4E s	24.09.03	8.26	1.8	220.6	37.1	1.1	3.54	<0.003	0.19
016 c	22.08.03	4.86	7.8	0.025	<0.1	<0.01	0.25	0.0085	0.69
016 s	22.08.03	4.91	6.0	24.4	3.4	0.019	0.56	0.015	0.4
26 c	22.08.03	4.81	9.0	0.13	<0.1	<0.01	0.13	0.018	0.15
26 s	22.08.03	4.91	6.0	1.5	0.55	<0.01	0.45	0.036	6.07
029W c	24.09.03	4.81	6.0	0.13	<0.1	<0.01		0.009	0.5
029W s	24.09.03	8.74	1.8	179.6	32.9	1.0	2.75	<0.003	0.34
5E c	24.09.03	4.47	4.2	<0.46	<0.1	<0.01	0.08	<0.003	0.11
5E s	24.09.03	7.71	1.3	222.1	36.7	1.15	2.9	<0.003	0.17
Скважина	Al ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	B	SiO ₂	As
4E c	0.008	<0.7	3.3	6.1		0.04	0.19	3.6	0.04
4E s	1.36	244.9	249.7	81.1	6.3	4.24	17.7	772.1	3.3
016 c	0.028	0.71	3.84	28.06		0.02	0.43	3.7	0.036
016 s	1.55	36.17	297.8	93.3	9.9	0.75	19.9	476.3	1.25
26 c		<0.35	2.88	17.1		0.02		1.4	0.009
26 s		<0.7	5.76	15.8		0.14	5.5	29.4	0.01
029W c		3.9	1.92	18.3		0.11	2.3	7.6	0.059
029W s		267.7	115.3	72	4.8	2.82	28.5	980.6	6.03
4E c	<0.3	1.4	3.4	11.0		0.08	0.22	3.8	<0.1
4E s	<0.96	200	211.3	78.1		2.9	14.5	189.4	3.54
016 c	<0.3	0.7	1.4	24.4		0.09	0.15	<1.0	<0.1
016 s	0.23	5.7	45.1	30.5		0.2	3.9	9.4	0.12
26 c	<0.3	6.4	1.9	18.3		0.09	0.09	<1.0	<0.1
26 s	<0.3	<0.7	1.4	25.6		0.1	0.31	9.4	<0.1
029W c	<0.3	0.7	2.9	15.9		0.1	0.13	<1.0	<0.1
029W s	0.92	219.8	144.1	53.7		2.9	16.5	190.4	4.61
5E c	<0.3	<0.7	1.9	11.0		0.1	0.07	<1.0	<0.1
5E s	0.98	191.5	259.4	30.5		4.3	11.9	189.4	2.43

Примечание. Химические анализы выполнены в ЦХЛ Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904). Аналитики: В.К. Марьнова, С.В. Сергеева.

Таблица 4. Газовый состав паровой фазы эксплуатационных скв. участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, вес. %

Скважина	CO ₂	H ₂ S	He	H ₂	Ar	N ₂	CH ₄	CO	Весовое газосодержание, %	P сепарата, бар
Опытные выпуски 1999 – 2000 гг										
029W	77.4	21.0	0.0000	0.10	0.03	1.5	0.04	0.0004	0.010	8.2
26	83.8	11.3	0.0000	0.20	0.10	4.4	0.17	0.0000	0.108	7.3
016	87.0	10.7	0.0000	0.21	0.07	1.9	0.12	0.0005	0.164	7.5
4E	87.5	9.00	0.0001	0.02	0.11	3.3	0.03	0.0002	0.030	7.5
Эксплуатация, август 2003 г										
029W	87.8	9.74	0.0000	0.02	0.09	2.2	0.16	0.0000	0.036	6.0
26	83.6	7.33	0.0000	0.50	0.21	7.7	0.67	0.0000	0.037	6.0
016	92.1	4.4	0.0000	0.26	0.06	2.7	0.42	0.0000	0.118	6.0
4E	94.3	4.12	0.0001	0.01	0.07	1.4	0.07	0.0000	0.045	6.0
5E	89.4	7.26	0.0001	0.02	0.10	3.2	0.04	0.0000	0.067	6.0

Примечание. Отбор проб осуществлялся по методике ASTM E 1675-95а. Анализы газа выполнены в ЦХЛ Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904). Аналитики: В.Н. Шапарь, С.Ф. Тимофеева.

2003 гг. на Мутновском геотермальном месторождении.

Геотермальные месторождения–аналоги. Геотермальные месторождения аналогичного строения “single fault geothermal fields” обнаружены также в Японии (Огири), где продуктивная зона, из которой получено 30 МВт, – это одиночная продуктивная зона мощностью 20 м, в котором циркулирует теплоноситель (вода) с температурой 232°C, а вмещающие породы – андезиты [11]. К резервуарам такого типа относятся также геотермальные месторождения Окуайдзу (Япония) [16, 17] и Дикси Вэллей (США) [10].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ УЧАСТКА “ДАЧНЫЙ” МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Описание численной термогидродинамической модели. При описании численной модели используется терминология, соответствующая коду TOUGH2 [18]. Численная трехмерная термогидродинамическая модель Мутновского геотермального месторождения (Kiryukhin, 1992)⁵, [14] была разработана с целью выяснения механизма процессов теплопереноса в геотермальном резервуаре в целом и в связи с прогнозом возможных вариантов эксплуатации геотермального месторождения. Однако на модели объемом 62.5 км³, состоящей из 500 основных кубических элементов 500 × 500 × 500 м, невозможно отразить крутопадающую (60°) про-

дуктивную зону СВВ простирания с истинной мощностью 120 м. Нетрудно подсчитать, что при дискретизации области моделирования размеры элемента прямоугольной сетки должны соста-

Таблица 5. Обобщенные данные по гидроизотопному составу теплоносителя эксплуатационных скв. (пересчитаны на исходный теплоноситель с учетом изотопного фракционирования при пароотделении) и поверхностных водотоков Мутновского геотермального месторождения (Кiryukhin и др., 2000)⁶, [5, 6]

Точка опробования	δD	δO ⁻¹⁸	Примечание
Ручей Дачный	-99.0	-14.1	
Река Жирова	-91.0	-12.3	
Река Фальшивая	-88.0	-11.7	
Ручей из Мутновского ледника (кратер)	-108.0	-14.3	
049N	-111.0	-14.8	
014	-109.9	-14.0	Пароводяная скважина
01	-113.9	-14.7	–
1	-112.8	-15.1	–
24	-114.3	-15.2	–
016	-115.8	-15.2	–
26	-120.7	-16.1	Паровая скважина
029W	-124.5	-16.1	–
	-111.3	-13.9	Пароводяная скважина

Примечание. Анализы выполнены В.А. Поляковым в лаборатории ВСЕГИНГЕО (1987–1988 гг.) и М. Такахашаи в Геологической Службе Японии (1996–1999 гг.). При учете изотопного фракционирования в качестве исходного гидроизотопного состава использовались данные по сепарату жидкой фазы.

⁵ Kiryukhin A. Progress Report on Modeling Studies of the Mutenovsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // LBL-32729. 1992. 21 p.

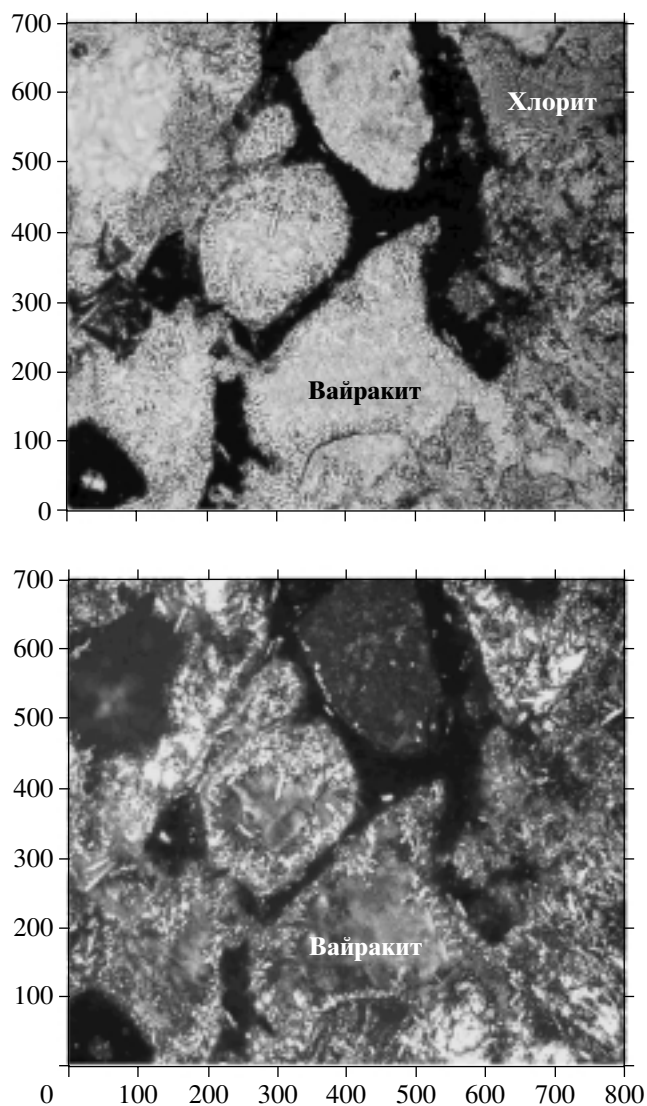


Рис. 8. Фотографии шлифов из образцов, извлеченных из скв. А-3 при вскрытии зоны полного поглощения на глубине 894 м. Верхний снимок – анализатор выключен, нижний – николи скрещены. На нижнем снимке видны полисинтетические двойники в вайраките. М-б снимков в мкм.

вить не более чем $70 \times 80 \times 90$ м, что приводит к модели, состоящей из 124008 элементов, т.е. модель становится фактически неуправляемой. Поэтому, при генерации вычислительной сетки, был использован метод создания сетки, связанной с геометрией моделируемого объекта.

Вычислительная сетка. Геотермальный резервуар представляется в виде верхней продуктивной зоны (А-резервуар), совпадающей пространственно с продуктивной зоной “Основная”, и нижней относительно проницаемой зоны (В-резервуар, включающий скв. 2Е, 5Е и О12). Центры элементов модели А-резервуара помещены на абсолютные отметки кровли продуктивной зоны

“Основная” (ключевые элементы вычислительной сетки: 1, 26, О16, О27, О29W, 01, 013, О45, 24, D (элемент, прилегающий к зоне разгрузки “Котел”), А2, А3, А4, для остальных элементов А-резервуара абсолютные отметки рассчитывались по формуле плоскости, построенной по ключевым элементам вычислительной сетки. Вертикальная мощность всех элементов А-резервуара принята равной 240 м (в соответствии с табл. 1). Центры элементов В-резервуара помещены на абсолютные отметки кровли продуктивных зон скв. 2Е, 5Е и О12. Для создания вычислительной сетки использовался генератор сеток А-MESH, разработанный в ЛБНЛ. Для создания сетки было использовано 24 скв., кроме того, в модель введено 39 дополнительных элементов (F-элементы и D-элемент) для того, чтобы вычислительная сетка оказалась более равномерной, и 12 граничных (инактивных) элементов (В-элементы), которые используются для определения граничных условий (рис. 9). При генерации вычислительной сетки с использованием А-MESH проводилось дополнительное преобразование параметров в D1, D2, AREA в файле CONNE со связями элементов (рис. 10) для учета деформаций элементов модели при их взаимодействии в вертикальной плоскости (в исходной программе А-MESH такого учета не предусматривалось). Кроме того, при генерации параметра BETAX использовался формат F20.14 для достижения точности, гарантирующей отсутствие “паразитической циркуляции”, для чего была разработана дополнительная программа MESHED-2.

“Источники”. “Источники” на модели – это элементы, в которых задается расход глубинного теплоносителя с определенной энтальпией. В соответствии с концептуальными представлениями – это элементы О45, F27, F28, F14, F15, F29, в них задается расход, величина которого определена в результате моделирования естественного состояния (9 кг/с, см. ниже). Заданная в “источниках” энтальпия 1390 кДж/кг соответствует температуре воды 307 °С, находящейся в геотермальном резервуаре в жидком состоянии (рис. 11).

Распределение проницаемости. Начальное распределение проницаемости в А-резервуаре и В-резервуаре модели показано на рис. 11.

Граничные условия. Граничные условия на модели задаются в В-элементах (В 9, В 16, В 14, В 10, В 1, В 8, В 13, В 33, В 32, В 31, В 30 и В 11): $P = \text{const}$, $T = \text{const}$ (или $P = \text{const}$, $S = \text{const}$) (рис. 9). В остальных В-элементах задаются непроницаемые границы. Теплообмен между продуктивной зоной и вмещающими горными породами задается с помощью коэффициента теплообмена $0.0042 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ с инактивным элементом С2 1 с базовой температурой 90°С. Для этого в подпрограмму QLOSS внесены соответствующие корректировки.

Таблица 6. Результаты минералого-петрографического и рентгено-структурного анализа образцов горных пород из скв. А2-А4 Мутновского геотермального месторождения

Скважина	Глубина, м	Вторичные гидротермальные минералы ¹	Вторичные гидротермальные минералы ²	Примечание
А3	894	Преобладание хлоритов (клинохлор, пеннин) и вайракита. Преобразования происходили в один этап, наблюдается полное замещение вторичными минералами	Альбит, кварц, хлорит, вайрацит	Образец поперечником ~ 15 см выброшен на поверхность из продуктивной зоны
А2	1106	Цеолит-адуляр- кальцит –пренит- эпидот-кварц – альбитовая ассоциация. Преобразование сопровождалось локальным дроблением породы. Апикальная часть крупного субвулканического тела	Кварц, плагиоклаз, хлорит, клинопироксен	Керн из скважины
А4-1, А4-2	115–125	Кварц-кальцит-монтмориллонит-цеолитовая (клиноптиллолит) с эпидотом и пиритом ассоциация вторичных минералов низкотемпературной пропилитизации		Образец поперечником ~ 10 см выброшен на поверхность из продуктивной зоны
А4-3	520–580	Преобладает хлорит, а также кварц-вайрацит-адуляр-пренитовая ассоциация	Вайрацит, плагиоклаз, хлорит, глинистые минералы	Образцы в виде нескольких обломков поперечником до 1–2 см выброшены на поверхность из продуктивной зоны

¹ Оптический метод определения (М.Ю. Пузанков).

² Рентгено-структурный метод определения (М.Е. Зеленский).

Моделирование естественного состояния. Для моделирования естественного распределения температур, давлений и фазового состояния в резервуаре на модели были подобраны источники, стоки и распределение проницаемости таким образом, чтобы обеспечить наилучшую сходимость фактических данных и модельных результатов. В качестве фактических данных для калибровки модели использованы данные по давлению, температуре и фазовому состоянию в ключевых элементах (табл. 7). Общий расход восходящего потока теплоносителя, полученный на модели, оказался равным 54 кг/с, соответствующее распределение проницаемости иллюстрируется на рис. 11. Коэффициенты проницаемости в доменах (областях) STEAM, ROCK1, ROCK2 и ROCK3 оцениваются на модели равными 100 мД, 100 мД, 1 мД и 0.01 мД, соответственно. Рис. 12 иллюстрирует сходимость модели с фактическими данными в ключевых элементах модели: получена удовлетворительная сходимость как по отдельным ключевым элементам, так и в целом по ветви восходящего и нисходящего потоков. Последнее особенно четко идентифицируется на рис. 12 (вертикальный градиент давления в зоне восходящего вертикального потока превышает вертикальный градиент давления в зоне нисходящего потока (скв. 012–4Е–07)). На рис. 13 изображено распределение температуры, давления, паронасыщения и поле скоростей фильтрации в продуктивной зоне “Основная” (на рисунке показаны векторы скоростей фильтра-

ции, соответствующие расходам более 1 кг/с по жидкой фазе и более 0.1 кг/с по пару между элементами модели). Восходящие потоки теплоносителя направлены из юго-восточной части продуктивной зоны в ССВ направлении и к области разгрузки парогидротерм (элемент D – “Котел”). Необходимо отметить также, что полученное численное решение для естественного термогидродинамического состояния не является единственным, оно получено в результате подбора параметров модели (источники, распределение проницаемости, задание граничных условий) на основании экспертных оценок. В ряде случаев возможна автоматическая оптимизация поиска решения с использованием программы iTOUGH2. Однако она возможна только для частных случаев вариации определенного класса параметров (например, только для распределения проницаемости).

Моделирование эксплуатации. *Исходные данные для калибровки модели.* Калибровка модели может базироваться на имеющихся данных по изменению термогидродинамических характеристик эксплуатационных скв. 016, 26, 029W, 4Е, А2 и 5Е, данных по изменению давления в геотермальном резервуаре, а также косвенных газогидрохимических параметрах, характеризующих термогидродинамическое состояние резервуара. Рассмотрим, в какой степени эти данные могут быть использованы для калибровки модели. Начальные характеристики эксплуатационных скв. определялись с использованием сепаратора С–100–0.5. Парамет-

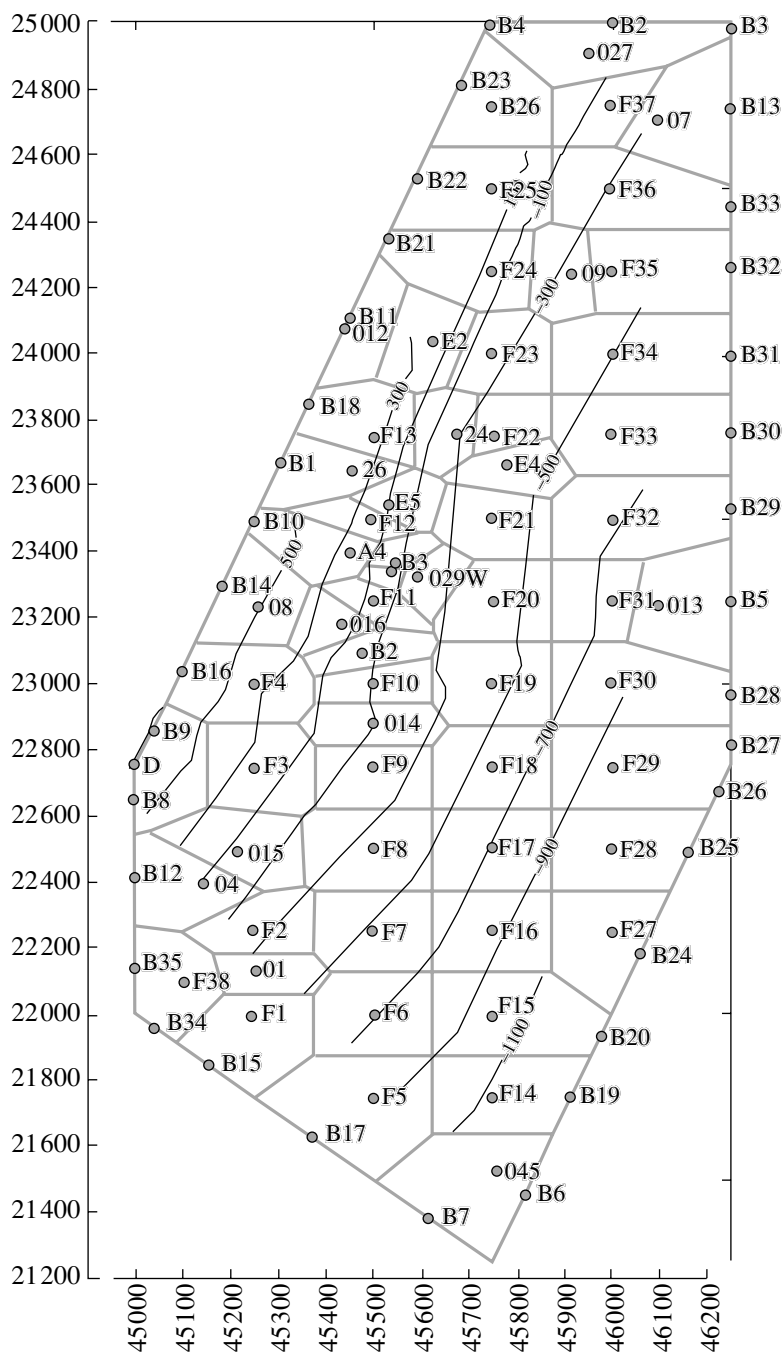


Рис. 9. Геометрия численной модели участка Дачный Мутновского геотермального месторождения: изображены контуры модели (по верхнему резервуару "А"), разбивка на элементы и изолинии абсолютных отметок поверхности центров элементов модели.

ры скв. при устьевых давлениях, близких к рабочим эксплуатационным, представлены в табл. 8. Система мониторинга давления в скв. 012 осуществляется с использованием системы типа "капиллярной трубки", которая заполнена гелием и опущена в скважину на глубину 1500 м. Однако из-за нерегулярной прокачки капиллярной трубки (эту процедуру необходимо осуществлять с ча-

стойкой не менее 1 раза в две недели) полученные в процессе наблюдений данные являются достоверными только в начальный момент измерений (82.5 бар в конце сентября 2002 г.) и после прокачки системы (81.75 бар в августе 2003 г.). Кроме того, желательна установка еще одной системы типа "капиллярная трубка" на участке Дачный для наблюдений за изменением давления непосред-

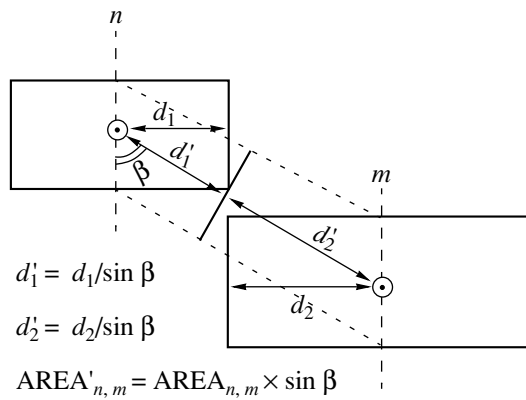


Рис. 10. Преобразования параметров в $d_1, d_2, AREA$ в файле CONNE со связями элементов.

венно в продуктивной зоне “Основная”, а не за ее пределами, в блоках вмещающих плохопроницаемых пород.

В процессе эксплуатации Мутновской ГеоЭС осуществляются регулярные измерения электрической мощности ГеоЭС, расхода пара и сепарата по двум сепараторам (соединенным паропроводом), в которые поступает пароводяная смесь из скв. 016, А2, 029W, 5Е (1-ый сепаратор) и из скважин 26, 4Е (2-ой сепаратор). В целом можно сформулировать следующие выводы по динамике изменения параметров эксплуатационных скв. за период эксплуатации с ноября 2002 по октябрь 2003 г. (рис.14, 15):

1. Суммарная паропроизводительность скв. 016, 26, 029W, 4Е, 5Е и А2 снизилась с 64.9 до 59.4

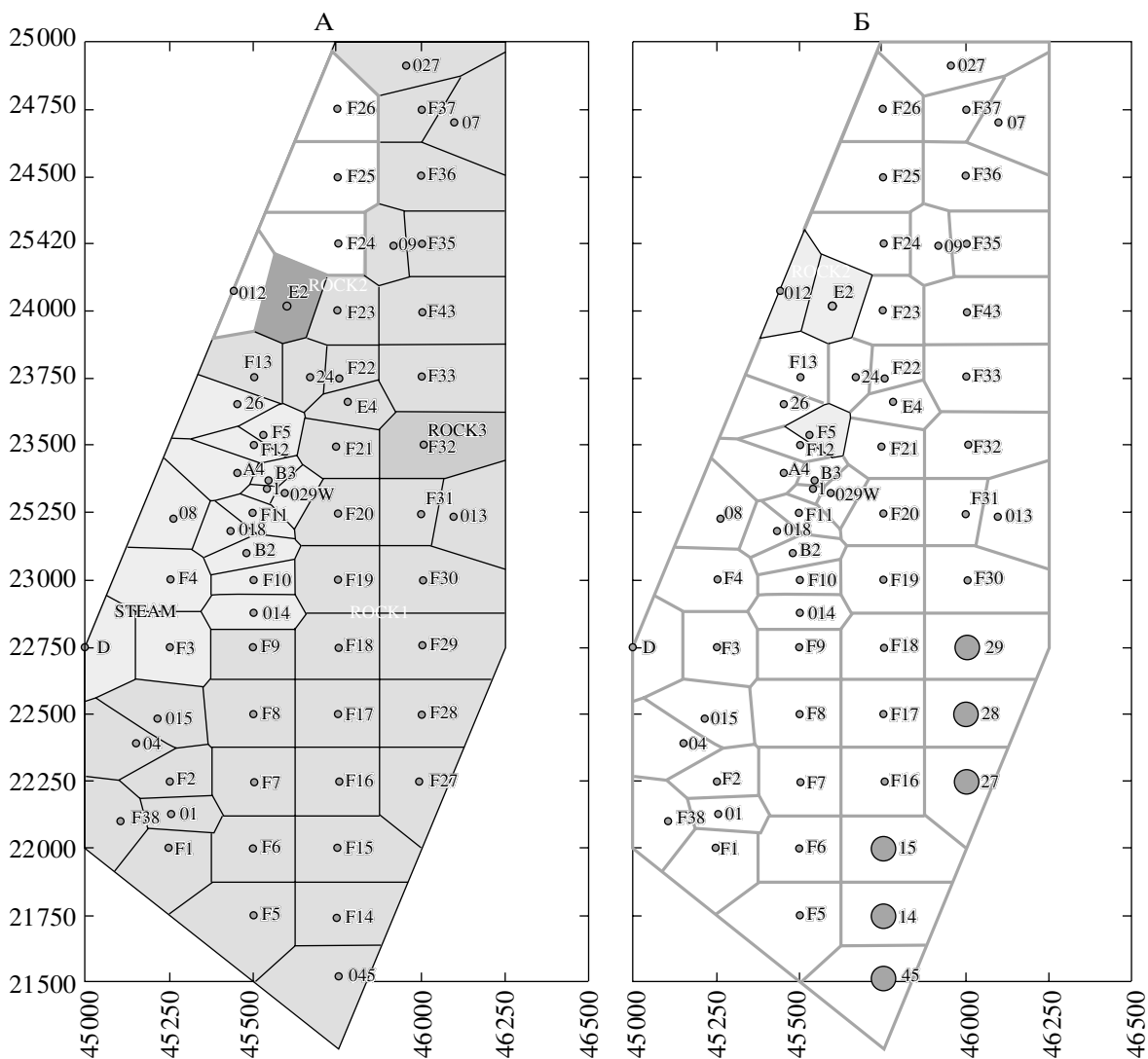


Рис. 11. А – распределение проницаемости в пределах А-резервуара. Коэффициенты проницаемости в доменах (областях) STEAM, ROCK1, ROCK2 и ROCK3 оцениваются на модели равными 100 мД, 100 мД, 1 мД и 0.01 мД, соответственно; Б – распределение проницаемости в пределах В-резервуара. Коэффициент проницаемости в домене (области) ROCK1 оценивается на модели равным 100 мД. “Источники” на модели изображены большими кружками.

Таблица 7. Ключевые элементы для калибровки естественного термогидродинамического состояния

Элемент//скважина	X	Y	Z	T, °C	P, бар абс	Фазовое состояние
1	45540	23336	-34	280 ¹		Однофазное
26	45455	23650	428	226 ²	26	Двухфазное
016	45432	23181	211	244 ²	35.9	Двухфазное
027	45953	24912	-17	230 ⁵	28	Двухфазное
029W	45591	23320	-219	268 ¹	53.4	Двухфазное
01	45254	22131	-353	275 ⁵	59.5	Двухфазное
014	45499	22881	-76	274	58.6	Двухфазное
013	46095	23236	-858	303 ¹		Однофазное
045	45756	21522	-1269	291 ¹		Однофазное
24	45673	23754	-288	275 ¹		Однофазное
D	45000	22750	750	96		Двухфазное
A2	45477	23096	-31.2	281 ³		Однофазное
A3	45543	23365	-43			Однофазное
A4	45453	23398	232	225 ³		Однофазное
5E	45530	23540	-403	260 ³		Однофазное
4E	45780	23663	-278	275 ¹		Однофазное
4E	45780	23663	-637		81 ⁴	Однофазное
07			-326	240	51 ⁴	Однофазное
012	45441	24076	-683	244 ⁵	83.5 ⁶	Однофазное

Примечание. Давления, рассчитанные по температуре насыщения, выделены жирным шрифтом.

¹ Температура рассчитана по Na-K геотермометру (А.В. Кирюхин, 2000)⁶

² Температура рассчитана по CO2 геотермометру (А.В. Кирюхин, 2000)⁶

³ Температура по Na-K геотермометру (Г.А. Рослый, 2001–2003)²

⁴ Точечные замеры прибором Кастера (И.И. Чернев, 2003)³

⁵ Каталог скв. (S.G. Assaulov, N.P. Assaulova 1996)¹

⁶ Капиллярная трубка (И.И. Чернев, 2003)³

Таблица 8. Принятые начальные характеристики эксплуатационных скважин (016, 26, 029W, 4E, и 5E) и результаты расчетов их коэффициентов продуктивности

Скважина	Энтальпия, кДж/кг	Расход, измеренный, кг/с	Устьевое давление, бар абс	Расчетное забойное давление, бар	Давление в резервуаре, модель, бар	Коэффициент продуктивности, кг/с бар
016	2800	17	7.5	12.5	26.7	1.2
26	2800	18	7.5	14.0	25.5	1.6
4E	1200	26.7	9.0	24.5	58.2	0.8
029W	1150	72.5	9.0	50.7	58.5	9.3
5E	1175	39	7.0	21.5	33.5	3.3

Примечание. Значения энтальпии и давления в соответствующих элементах резервуара получены в результате моделирования.

кг/с (8.5%), устьевые давления по всем скв.ам пришлось снизить 016 (8 → 6 ати), 26 (10 → 6 ати), 029W(9.2 → 8 ати), 4E (8.6 → 7.6 ати), 5E (6.8 → 6 ати), и скважина A2 не сумела войти в стабильный режим эксплуатации с приемлемым (более 6 ати) устьевым давлением, т.е. фактически A2 не участвовала в эксплуатации.

2. Суммарный расход сепарата из скв. 016, 26, 029W, 4E, 5E и A2 снизился с 117.5 до 107.5 кг/с (8.5%).

Исходя из вышеприведенного, вытекает общая закономерность снижения суммарного расхода скв.. О динамике изменения их индивидуальных расходов (по пару и воде) сделать определенные

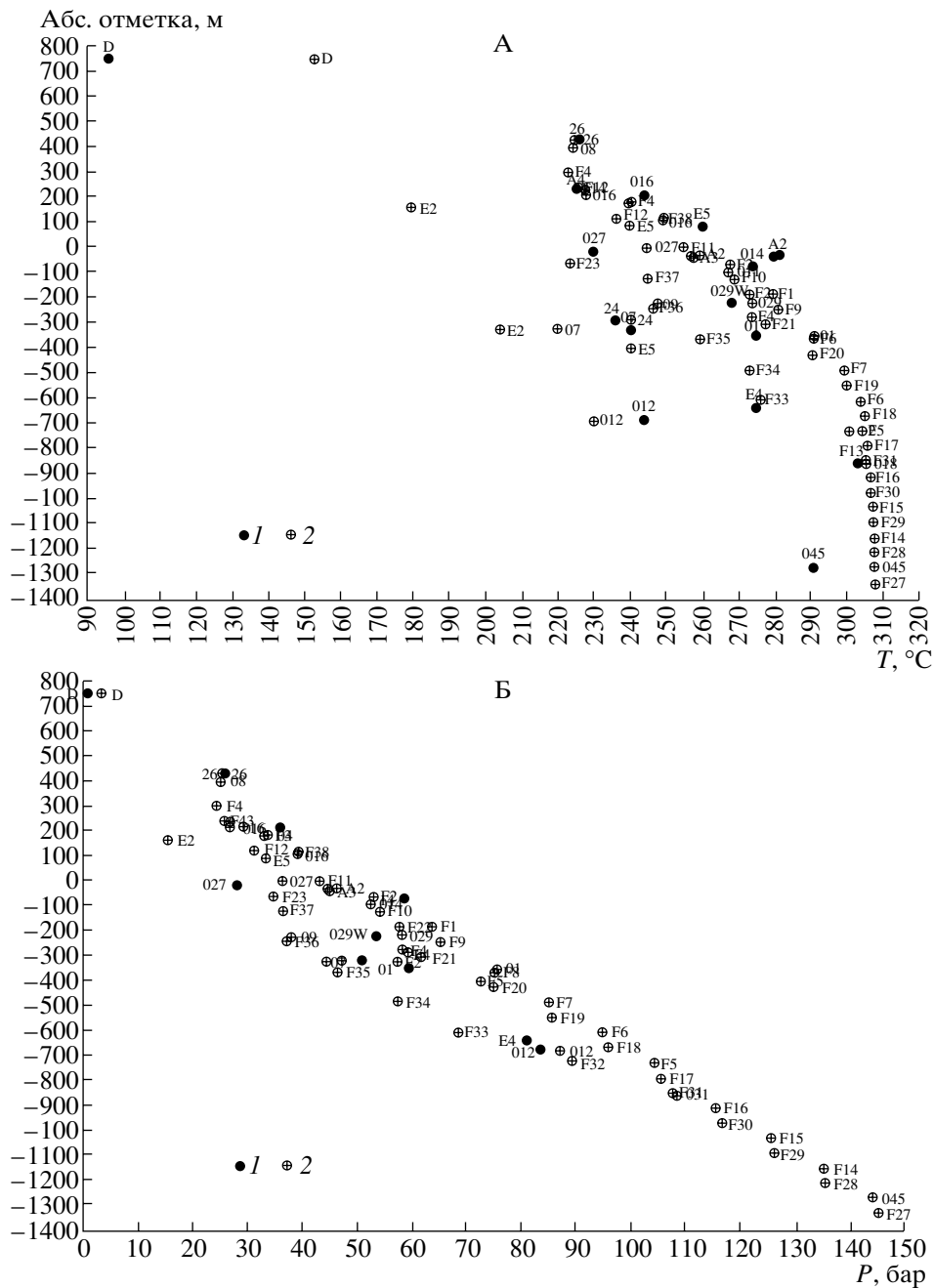


Рис. 12. Моделирование естественного термогидродинамического состояния: А – распределение температур в вертикальном разрезе (1 – фактические значения температуры, 2 – модельные значения температуры); Б – распределение давлений в вертикальном разрезе. 1 – фактические значения давления; 2 – модельные значения давлений.

выводы пока трудно. Можно лишь предполагать, что скв. 016 и 26 остались “паровыми” с энтальпией около 2760 кДж/кг (это подтверждается при их опробовании с использованием мини-сепараторов).

Задание на модели динамики взаимодействия “резервуар – скважина”. Для моделирования термогидродинамического режима эксплуатации была использована дополнительная подпрограмма

ДЕВИТ [3, 14] как вспомогательная для представления работы пароводяных скв.. Расход определяется из следующего уравнения: $Q = PI \cdot (P_r - P_b(WHP, Q, h, d))$, где Q – массовый расход скв.; PI – коэффициент продуктивности скв.; P_r – давление в резервуаре, $P_b(WHP, Q, h, d)$ – забойное давление, зависящее от Q , энтальпии теплоносителя h , устьевое давление WHP и конструктивных особенностей скв. d (зависимость диаметра скв. от глуби-

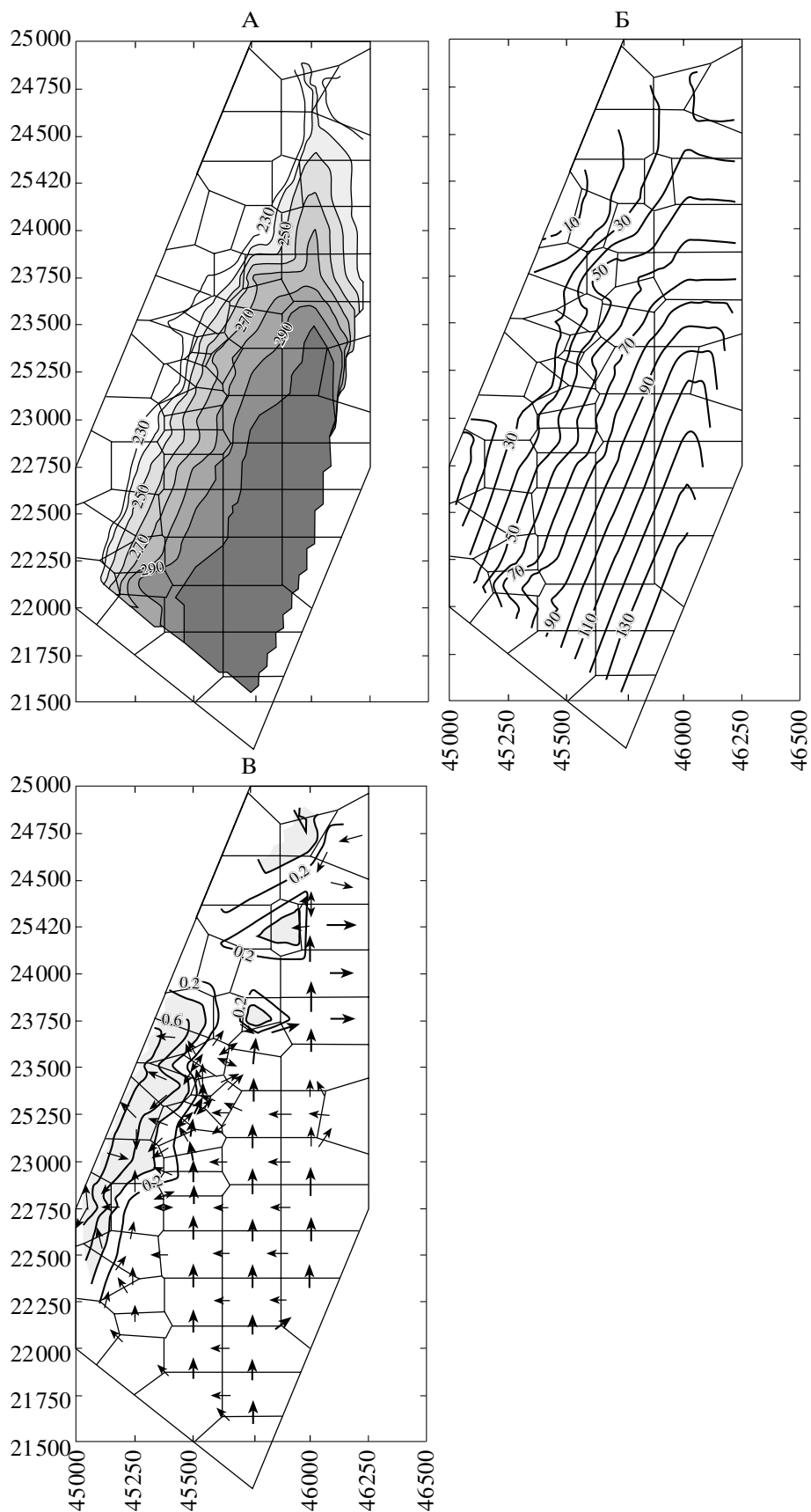


Рис. 13. Моделирование естественного состояния в продуктивной зоне "Основная" (А-резервуар): распределение температуры (А); распределение давления (бар) (Б); распределение паронасыщения и поле скоростей фильтрации (В).

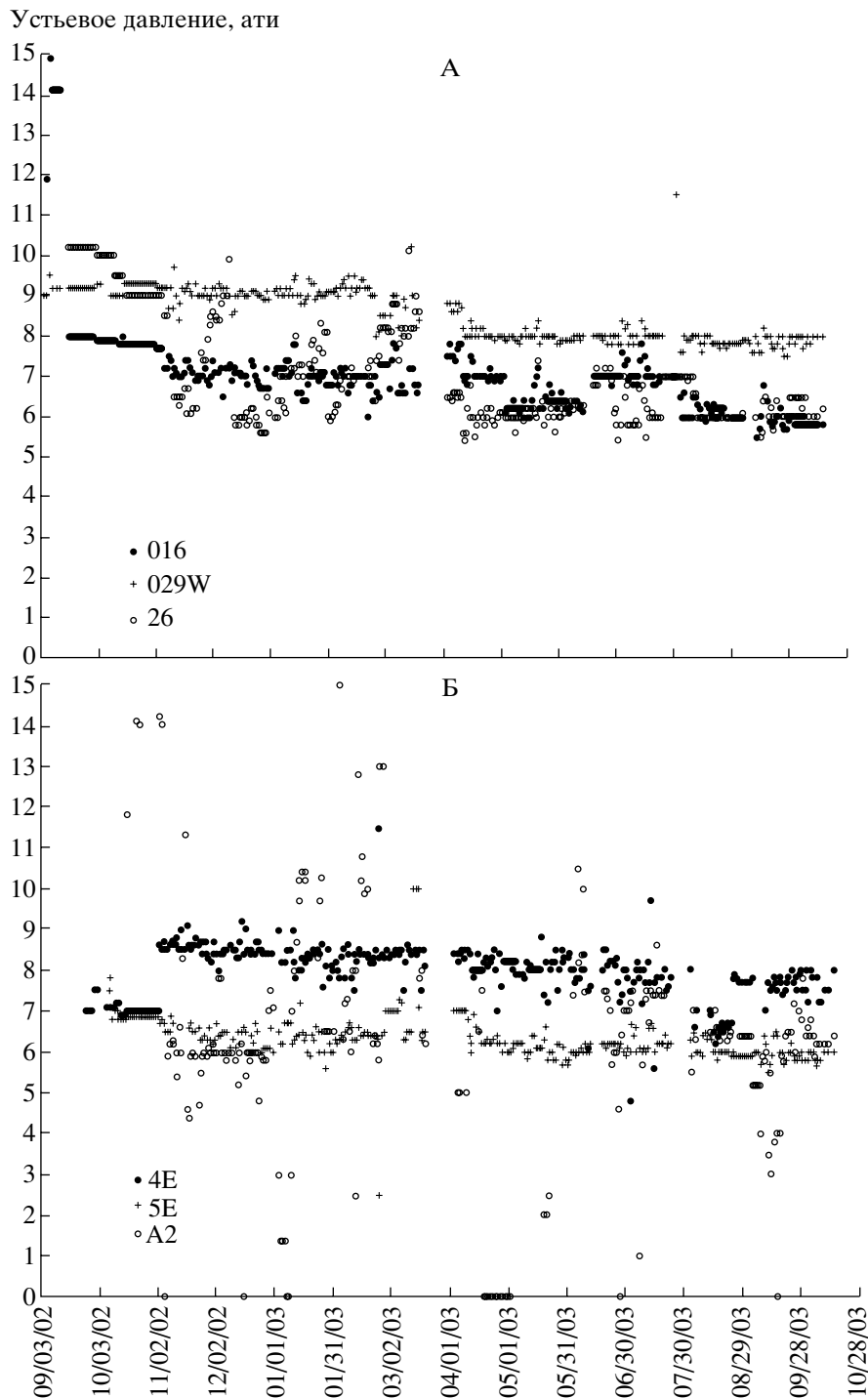


Рис. 14. Изменение устьевое давления (ати) в процессе эксплуатации геотермальных скв. 26, 016, 029W (А) и 4Е, 5Е, А2 (Б) по данным ОАО “Геотерм”.

ны). Величина забойного давления $P_b(WHP, Q, h, d)$ вычислялась заранее в виде таблиц с помощью программы NOLA [9]. В табл. 8 показаны результаты расчетов коэффициентов продуктивности пяти эксплуатационных скв.. Для расчетов использованы начальные данные по расходам и устьевым давлениям; значения давления в резервуаре и

энтальпии принимались по результатам моделирования в соответствующих элементах модели. Таблицы расчетного забойного давления иллюстрируются рис. 16. На рис.16, А показано, что для “водных” скв. (Е4, 029W, Е5) с энтальпией 1150–1200 кДж/кг (до 1650 кДж/кг) снижение энтальпии резервуара ниже 1100 кДж/кг приводит к рез-

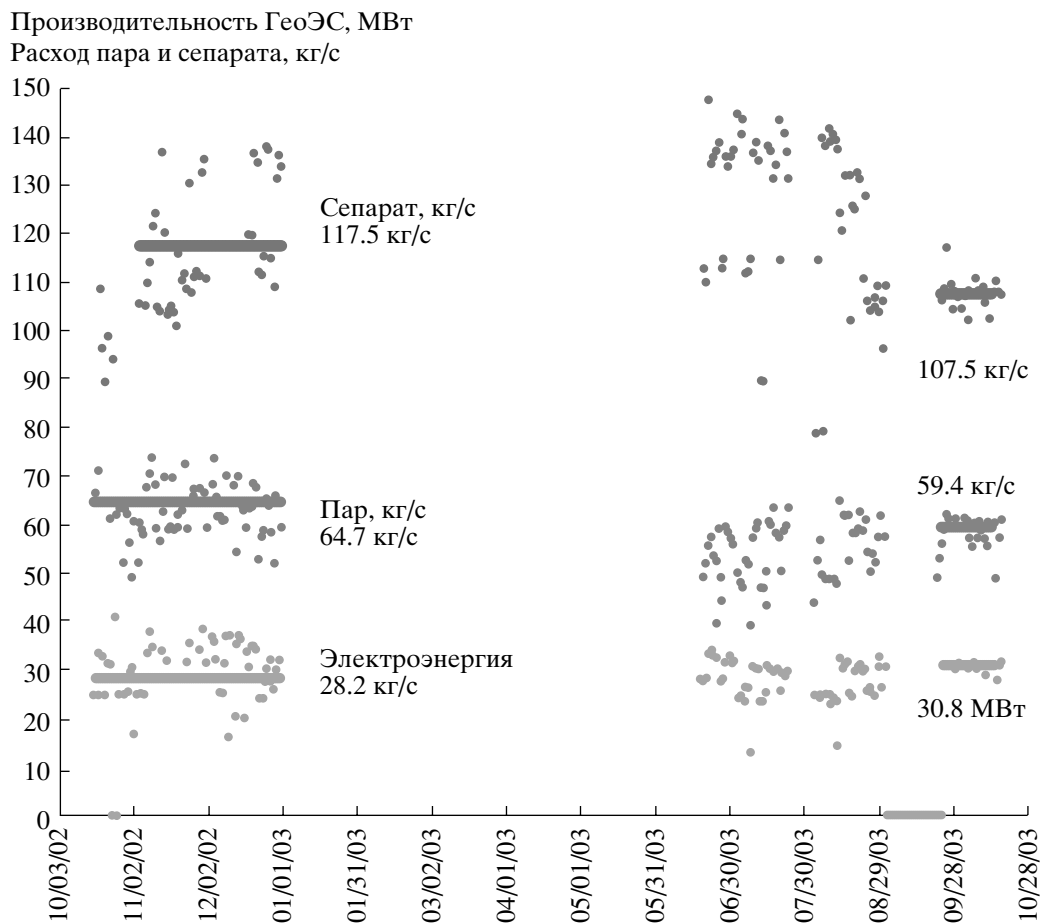


Рис. 15. Изменение электрической мощности Мутновской ГеоЭС (МВт), суммарного расхода пара (кг/с) и сепарата (кг/с) в процессе эксплуатации (по данным ОАО “Геотерм”).

кому снижению расхода (вплоть до прекращения работы скв.), так как соответствующая величина необходимо для работы скв. забойного давления резко увеличивается. На рис. 16, Б показано на примере “паровых” скв. с энтальпией выше 1800 кДж/кг (скв. 016 и 26 имеют начальную энтальпию около 2800 кДж/кг), что более существенным фактором снижения производительности является снижение давления в резервуаре, так как величина забойного давления слабо зависит от энтальпии.

Калибровка модели. Для достижения сходимости фактических данных и результатов моделирования (по расходу эксплуатационных скв. и снижению давления в резервуаре) коэффициент сжимаемости горных пород задан равным $5.0 \cdot 10^{-7} \text{ Па}^{-1}$ в домене STEAM, и $5.0 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$ – в остальных доменах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДАЧНОГО УЧАСТКА МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДО 2012 г.

Прогноз суммарной паропроизводительности группы скв. (016, 26, E4, 029W, E5). На модели

рассмотрена эксплуатация группы скв. 016, 26, 029W, E4 и E5 при их одновременном включении и работе в течение 10 лет (до 2012 г.) при заданном давлении на устье эксплуатационных скв. (табл. 8) и при реинжекции 84 кг/с сепарата с энтальпией 700 кДж/кг в скв. 027 (вариант № 1). Изменение граничных условий в процессе эксплуатации геотермального месторождения принято по сценарию “непроницаемая граница” (если расход отбора теплоносителя превышает естественный приток глубинного теплоносителя в резервуар, то введением этого условия обеспечивается выполнение естественного требования того, что граница “запирается” при падении давления в резервуаре ниже давления на границе). Рассмотрен также вариант № 2 эксплуатации, аналогичный варианту № 1, но с увеличением эксплуатационной нагрузки за счет размещения в элементах 016, 26, 029W, E4 и E5 аналогичных дополнительных скв. (по две скв. с параметрами скв. 016 в элементе “016” ... и т.д., всего десять скв.), что эквивалентно увеличению начальной нагрузки в 2 раза по сравнению с вариантом № 1. На модели производилось автоматическое отключение “водных”

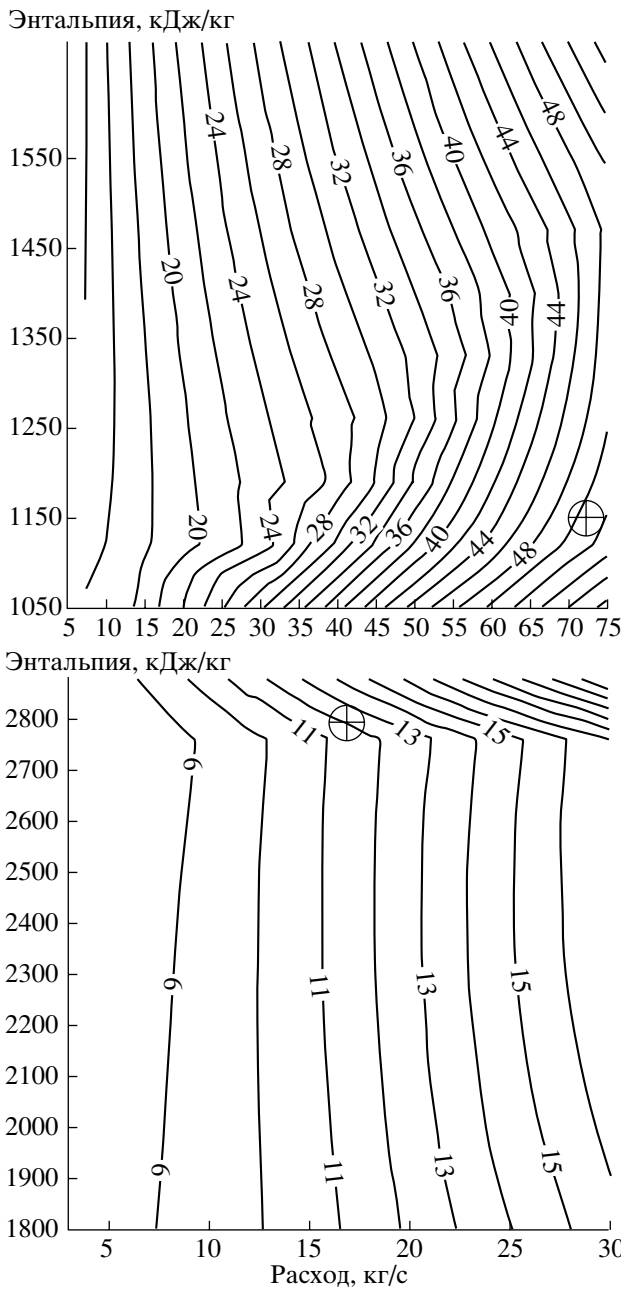


Рис. 16. Зависимость забойного давления в скв.ах 029W (А) и 016 (Б) от расхода и энтальпии при устьевом давлении 7.0 и 7.5 бар абс, соответственно. Крестиком в кружке обозначается точка, соответствующая “начальным модельным параметрам” скв. (табл. 7).

сква. при снижении их расхода ниже 10 кг/с и “паровых” скв. при снижении их расхода ниже 5 кг/с или при снижении давления в резервуаре ниже устьевого давления эксплуатационных скв. Результаты моделирования показаны на рис. 17, 18. По 1-му варианту (рис. 17) в течение первых 10 лет эксплуатации происходит плавное экспоненциальное снижение паропроизводительности группы скв. 016, 26, 029W, Е4 и Е5 с 64 кг/с до 33 кг/с,

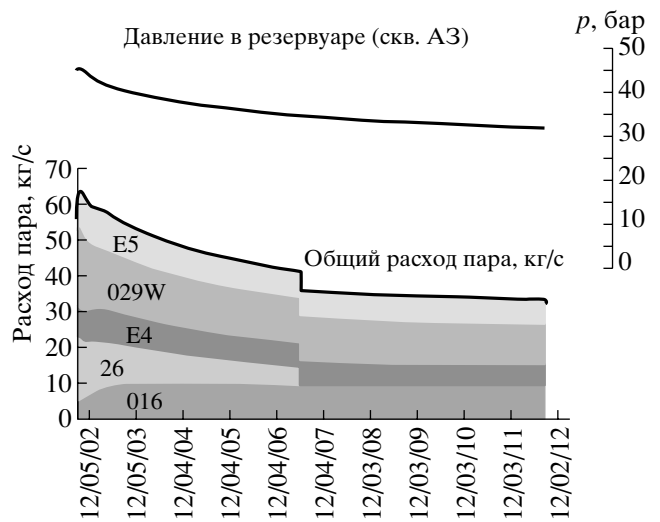


Рис. 17. Вариант № 1: прогноз изменения паропроизводительности группы скв. (016, 26, Е4, 029W, Е5) и изменения давления (А3) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения.

при этом скв.а 26 выключается на 5-м году эксплуатации. Снижение давления в резервуаре за 10 лет эксплуатации (элемент А3) составит 13 бар. По 2-му варианту (рис. 18) в течение первых 10 лет эксплуатации происходит более резкое экспоненциальное снижение паропроизводительности группы из десяти скв. (2 · (016, 26, 029W, Е4 и Е5)) с 130 до 40 кг/с, при этом скв. 26 и 5Е выключаются на 2-м и 5-м году эксплуатации соответственно. Снижение давления в резервуаре за 10 лет эксплуатации (элемент А3) составит 18 бар. Из результатов моделирования вытекает важное практическое следствие: бурение дополнительных эксплуатационных скв. в пределах многоугольника с вершинами из скв. 016–26–Е4–029W экономически нецелесообразно.

Моделирование достаточного условия обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт. Для обеспечения Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт необходимо 95 кг/с пара. Возможность повышения паропроизводительности продуктивной зоны “Основная” за счет использования ее юго-восточного сектора (область, ограниченная в плане многоугольником из скв. 029ДВ, 016, 01, 045 и 013) может быть исследована с помощью моделирования. С этой целью в элементах модели F18, F19, F20, F30, F29, F17, F16, соответствующих продолжению продуктивной зоны “Основная” в направлении области поступления глубинного теплоносителя, установлены дополнительные эксплуатационные скв. с соответствующими номерами. Технически указанные дополнительные скв. могут быть пробурены из точек, соответствующих позициям скв. 013 и 010, как скв. направленного бурения, при этом параметры отклонений от вертикали не выше параметров от-

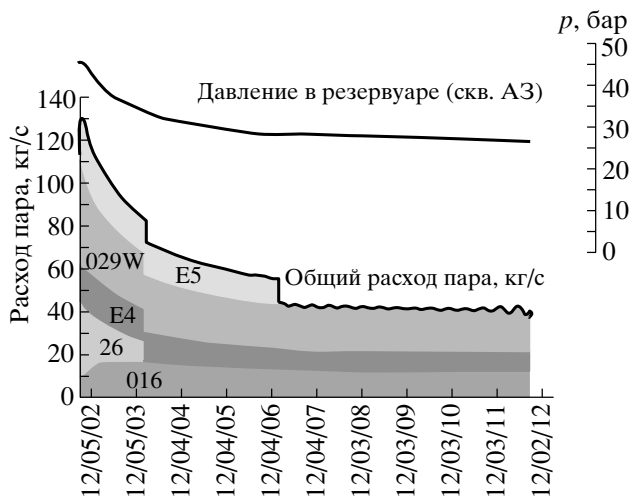


Рис. 18. Вариант № 2: прогноз изменения паропроизводительности группы скв. 2 (016, 26, E4, 029W, E5) и изменения давления (А3) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения. На модели задано увеличение начальной эксплуатационной нагрузки скв. (016, 26, E4, 029W, E5) в соответствующих элементах модели в 2 раза.

клонений пробуренных ранее на участке Дачный скв. А2 и А3. На рис. 19 изображены возможные точки заложения дополнительных эксплуатационных скв. и проекции указанных скв. на горизонтальной плоскости, в табл. 9 – основные параметры бурения дополнительных эксплуатационных скв. Задание указанных дополнительных эксплуатационных скв. на модели осуществлялось аналогично заданию на модели скв. 016, 26, 029W, E4 и E5. Давление на устье дополнительных эксплуатационных скв. задавалось равным 7 бар абс., коэффициент продуктивности 1.0 кг/с бар. При расчетах таблиц забойного давления внутренний

диаметр дополнительных эксплуатационных скв. принимался равным 246 мм до глубины 900 м и 168 мм – при больших глубинах. На модели рассмотрены сценарий эксплуатации группы скв. 016, 26, 029W, E4 и E5 при их одновременном включении при заданном давлении на устье эксплуатационных скв. (табл. 8) и при реинжекции 84 кг/с сепарата с энтальпией 700 кДж/кг в скв. 027. При этом включение дополнительных эксплуатационных скв. на модели осуществлялось таким образом, чтобы обеспечить суммарную паропроизводительность не ниже 95 кг/с в течение 10 лет эксплуатации. В итоге оказалось, что искомым графиком подключения дополнительных эксплуатационных скв. должен иметь следующий вид (рис. 20, Б). Изменение суммарной производительности всех эксплуатационных скв. с учетом подключения дополнительных скв. показано на рис. 20, А. Хотя в течение первых 10 лет эксплуатации произойдет снижение паропроизводительности группы скв. 016, 26, 029W, E4 и E5 с 63 до 27 кг/с, при этом скв. 26 выключится на 5-м году эксплуатации, а скв. E4 выключится на 10-м году эксплуатации (рис. 20, А), тем не менее будет обеспечена суммарная паропроизводительность от 94 до 112 кг/с в течение 10 лет эксплуатации (рис. 20, Б). Это обеспечит в целом потребность в теплоносителе существующей Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт (для 1 МВт электроэнергии достаточно 1.9 кг/с пара при давлении 7 бар абс, см. рис. 15). Снижение давления в резервуаре за 10 лет эксплуатации (элемент А3) составит 22.7 бар.

Выводы. 1. Уточнена концептуальная гидрогеологическая модель участка Дачный Мутновского геотермального месторождения. Продуктивный резервуар (продуктивная зона “Основная”) приурочен к разломной зоне северо-северо-восточного простирания, падением 60° на восток-

Таблица 9. Основные параметры дополнительных эксплуатационных скважин

Дополнительные эксплуатационные скважины	Координаты устья, м			Рассчитанные координаты точки вскрытия продуктивной зоны, м			Параметры дополнительных эксплуатационных скважин				
	X	Y	Z	X	Y	Z	Вертикальная глубина, м	Расчетная глубина до продуктивной зоны, м	Проектная глубина, м	Смещение в плане, м	Угол отклонения от вертикали
013-F30	46095	23236	802	46000	23000	-972	1774	1792	2042	254	8.2
010-F16	46446	22634	815	45750	22250	-912	1727	1901	2151	795	24.7
010-F17	46446	22634	815	45750	22500	-791	1606	1755	2005	709	23.8
013-F18	46095	23236	802	45750	22750	-670	1472	1588	1838	596	22.1
013-F19	46095	23236	802	45750	23000	-549	1351	1414	1664	418	17.2
013-F20	46095	23236	802	45750	23250	-427	1229	1277	1527	345	15.7
010-F29	46446	22634	815	46000	22750	-1093	1908	1963	2213	461	13.6

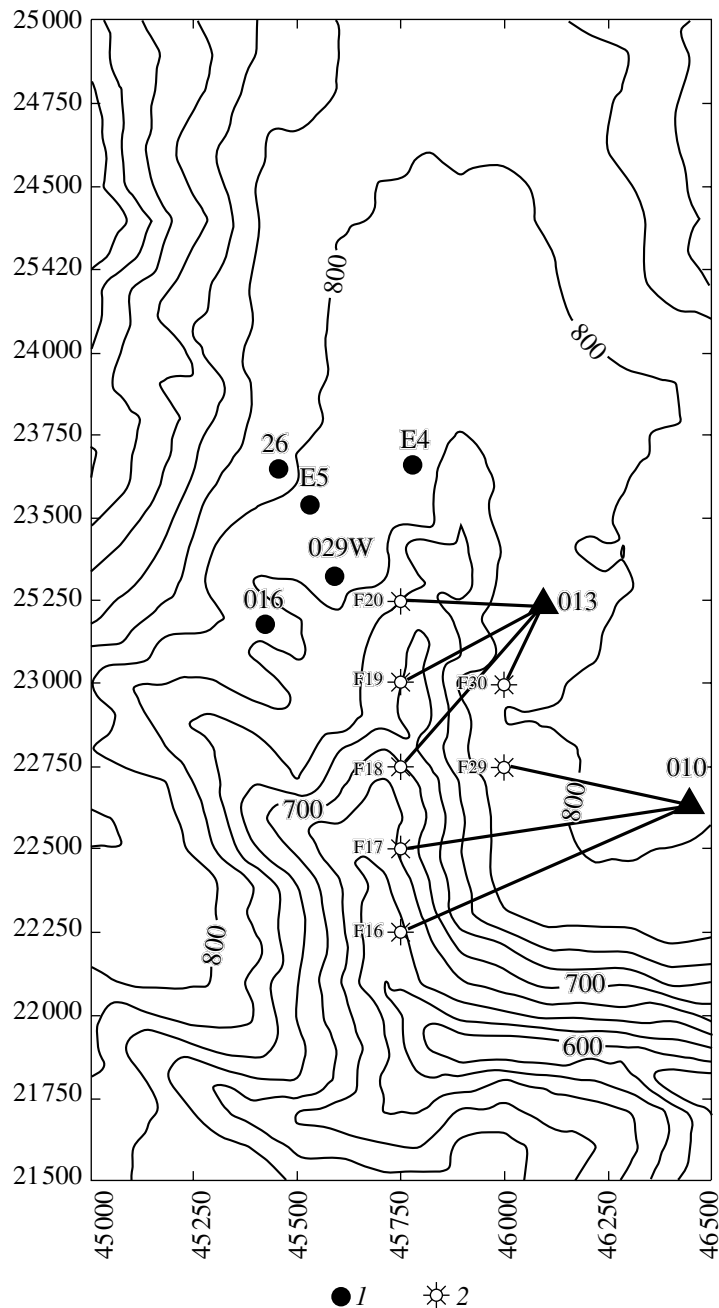


Рис. 19. Схема размещения дополнительных эксплуатационных скв. (010-F16, 010-F17, 010-F29, 013-F18, 013-F19, 013-F20, 013-F30) для обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт с центрального блока участка Дачный: 1 – эксплуатационные скважины; 2 – дополнительные скв..

юго-восток и средней вертикальной мощностью около 240 м (истинная мощность 120 м). Кровля продуктивной зоны фиксируется зонами полного поглощения промывочной жидкости при бурении скв. и продуктивными скв.ами. Плоскость продуктивной зоны пересекает активное жерло Мутновского вулкана на абсолютной отметке +250... +1250 м на расстоянии 8 км от участка эксплуатации, где по данным гидроизотопных исследований находится также область водного питания ге-

отермального месторождения, осуществляемого за счет инфильтрации вод метеорного происхождения и тающих в кратере вулкана ледников. Высокотемпературный теплоноситель поднимается из юго-восточного сектора зоны, где теплоноситель имеет температуру более 280°C и находится в жидком состоянии, в средней и верхней части продуктивной зоны “Основная” теплоноситель переходит в двухфазное состояние. Потoki восходящего теплоносителя фиксируются вайракиит-хлори-

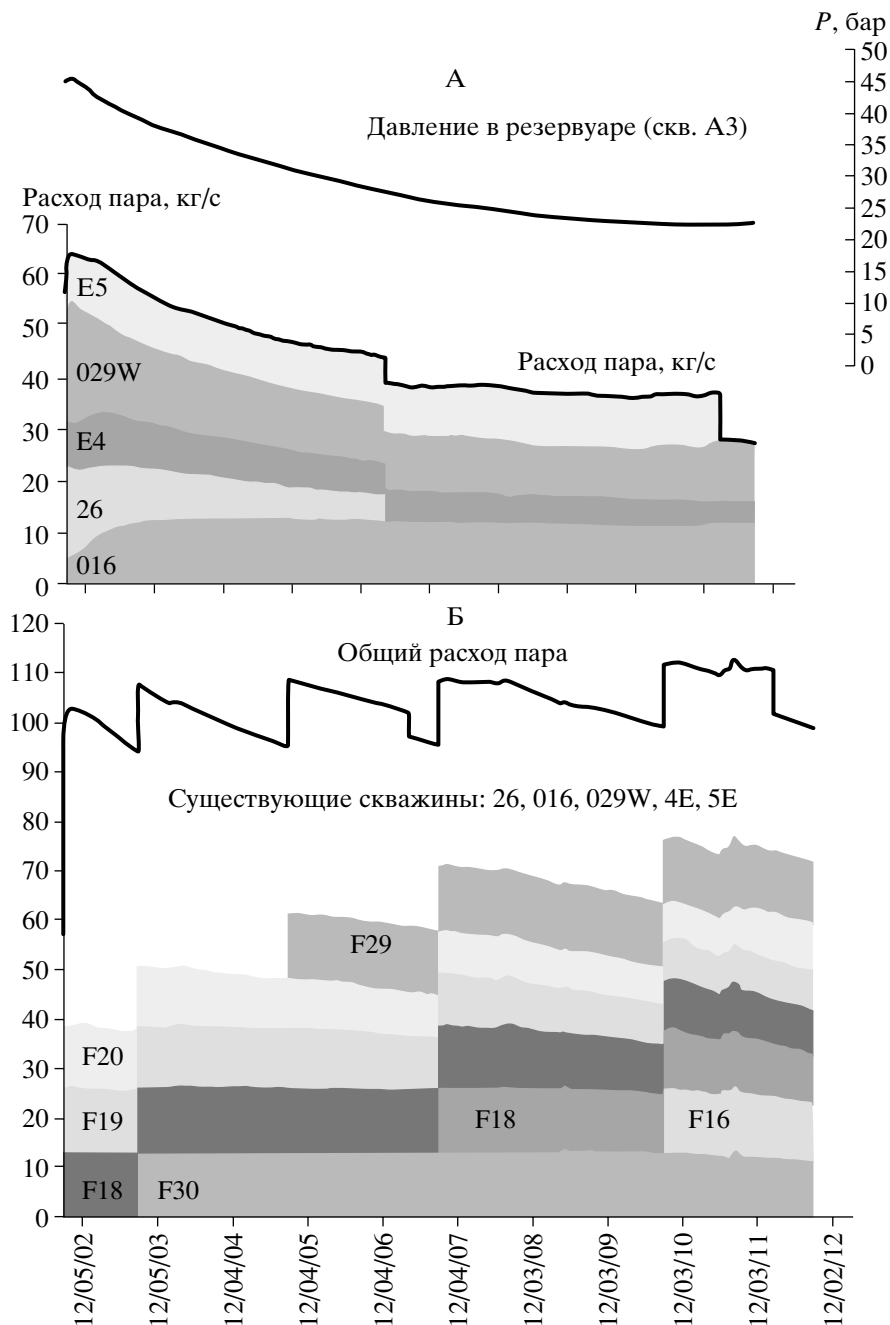


Рис. 20 А – прогноз изменения паропроизводительности группы скв. (016, 26, E4, 029W, E5) и изменения давления (А3) на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения при эксплуатации в режиме полного обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт. **Б** – прогноз изменения суммарной паропроизводительности скв. на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения при эксплуатации в режиме полного обеспечения теплоносителем Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт.

товой ассоциацией вторичных гидротермальных минералов, соотношением $Cl/SO_4 > 1$, превышением значений Na-K геотермометра над прямыми замерами температуры.

2. Результаты численного моделирования. Построена численная термогидродинамическая модель участка Дачный Мутновского геотермального

месторождения, включающая продуктивную зону “Основная”. Результаты численного моделирования показывают, что неравномерная загрузка существующими эксплуатационными скв.ами (016, 26, E4, 029W и E5) продуктивной зоны “Основная” на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения ограничивает ее паропроизводительность 60–70 кг/с с перспективой снижения до

30 кг/с в первые 10 лет эксплуатации. Увеличение нагрузки эксплуатации в рамках контура вышеупомянутых скв. нецелесообразно.

3. Результаты численного моделирования также показывают, что обеспечение Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт теплоносителем с центрального блока участка Дачный в течение 10 лет эксплуатации возможно. Решение задачи осуществляется путем бурения семи дополнительных эксплуатационных скв., цели бурения и график ввода в эксплуатацию которых изложены в основном тексте статьи.

4. Рекомендации по программе мониторинга в процессе эксплуатации Мутновского геотермального месторождения. Получение достоверной информации о термодинамическом состоянии геотермального резервуара в процессе эксплуатации необходимо для калибровки модели и обоснования режима устойчивого обеспечения ГеоЭС 50 МВт теплоносителем. В этой связи рекомендуется проведение регулярных (раз в месяц) измерений расхода паровой и жидкой фазы индивидуальных эксплуатационных скв. (трассерный метод с использованием SF₆ и NSA трассеров [12]) и их регулярное газогидрохимическое опробование (по методике ASTM E 1675–95a), а также мониторинг давления в центральной части резервуара (скв. 03 или 011).

Авторы выражают признательность заместителю генерального директора ОАО “ДВЭУК” по работе с ОАО “Геотерм” В.Е. Лузину и начальнику департамента ОАО “Геотерм” В.М. Моргуну за помощь в постановке задачи, сотрудникам ОАО “Геотерм” И.И. Черневу и Л.К. Москалеву за помощь в подготовке исходных данных для моделирования и обсуждение предварительных результатов. Работа выполнялась в рамках х.д. № 30 от 16.04.2003 г. с ОАО “Геотерм”, при поддержке РФФИ по проекту № 03–05–65373, при поддержке Министерства Образования РФ по проекту 02.01.023 и при поддержке ДВО РАН по проекту № 03–3–А–08–069.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакин Е.А., Курсанов И.Т., Курсанова Т.П. Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: Изд-во ДВНЦ, 1976. С. 85–114.
2. Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм / Под ред. Сугробов В.М. М.: Наука, 1986. 209 с.
3. Кирюхин А.В., Сугробов В.М. Модели теплопереноса в гидротермальных системах Камчатки. М.: Наука, 1987. 149 с.
4. Кирюхин А.В., Гусев Д.Н., Делемень И.Ф. Высокотемпературные гидротермальные резервуары. М.: Наука, 1991. 161 с.
5. Кирюхин А.В., Такахаши М., Поляков А.Ю. и др. Исследование условий водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода (¹⁸O) и водорода (D) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 54–62.
6. Кирюхин А.В. Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений. Владивосток: Дальнаука, 2002. 216 с.
7. Кирюхин А.В., Лесных М.Д., Поляков А.Ю. и др. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51–60.
8. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.
9. Aunzo Z.P., Bjornson G., Bodvarsson G.S. Wellbore models GWELL, GWNACL and HOLA. Users Guide // Draft. 1991. 81 p.
10. Bodvarsson G. Long-Term Monitoring of high- and low-enthalpy fields under exploitation: Modeling and Management of geothermal systems // WGC Short Courses. Japan, 2000. P. 77–96.
11. Goko K. Structure and hydrology of the Ogiri field, West Kirishima geothermal area, Kyushu, Japan // Geothermics. 2000. V. 29. № 2. P. 127–149.
12. Hirtz P.N., Kunzman R.J., Broaddus M.L., Barbita J.A. Developments in tracer flow testing for geothermal production engineering // Geothermics. 2001. V. 30. P. 727–746.
13. Kiryukhin A.V. High temperature fluid flows in the Mутновsky hydrothermal system, Kamchatka // Geothermics. 1993. V. 23. № 1. P. 49–64.
14. Kiryukhin A.V. Modeling Studies: the Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics. 1996. V. 25. № 1. P. 63–90.
15. Kiryukhin A.V., Xu T., Pruess K., Apps J. et al. Thermal-Hydrodynamic-Chemical (THC) Modeling Based on Geothermal Field Data // Geothermics. 2004. V. 33. № 3. P. 349–381.
16. Mizugaki K. Geologic structure and volcanic history of the Yanaizu-Nishiyama (Okuaizu) geothermal field, Northeast Japan // Geothermics. 2000. V. 29. № 2. P. 233–256.
17. Nitta T., Tsukagoshi S., Adachi M., Seo K. Exploration and development in the Okuaizu geothermal field Japan // Resource Geol. 1995. V. 45. P. 201–212 (In Japanese with English abstract).
18. Pruess K. “TOUGH2 Users Guide, Version 2.0” // LBL–43134, Nov. 1999.
19. Slovtsov I.B. Rock Alteration in the Mутновsky Hydrothermal System, Kamchatka, Russia // WRI Symp. Italy, 2001. P. 4.

Modeling the Utilization of Area Dachnyi, Mutnovskii Geothermal Field in Connection with the Supply of Heat-transfer Agent to the 50 MW Mutnovskii Geologic Power Station

**A. V. Kiryukhin, V. L. Leonov, I. B. Slovtsov, I. F. Delemen, M. Yu. Puzankov,
A. Yu. Polyakov, G. O. Ivanysko, O. P. Bataeva, M. E. Zelenskii**

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 663006, Russia*

A conceptual hydrogeologic model has been updated for area Dachnyi, Mutnovskii geothermal field, in which the productive zone "Osnovnaya" of the Central Block in area Dachnyi is inferred to be along a fault plane striking north-northeast and dipping south-east-east at an angle of 60 degrees. A detailed numerical thermohydrodynamic model of the productive zone has been developed, a feasibility study has been carried out to furnish evidence of the need of additional boreholes to be drilled in order to supply heat-transfer agent to the 50 MW Mutnovskii geologic power station. The tools used to develop the numerical model include the TOUGH2 program package, the A-MESH mesh generator, SURFER-8, GRAPHER-3, DIDGER-3 computer graphics packages, the Lahey FORTRAN 90 compiler, programs for computing the face pressure at the DEBIT and HOLA steam-and-water boreholes. In order to ensure an accuracy of the computation mesh that would be sufficient for the modeling (the problem of describing high-angle faults) we have developed an additional program MESHED-2 and have made appropriate modifications in the TOUSH2 source code. The modeling predicts a lowering of steam production in the existing production boreholes from 60–70 to 30 kg/s during the first 10 years of utilization period. If the 50 MW Mutnovskii geologic power station is to be supplied with enough heat-transfer agent, one needs to drill seven additional development boreholes in the southeastern sector of the "Osnovnaya" production zone.