

ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ-ХИМИЧЕСКОЕ (ТНС) МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В ПРОДУКТИВНОЙ ЗОНЕ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ДАЧНЫЙ)

А.В. Кирюхин¹, М.Ю. Пузанков¹, И.Б. Словцов¹, А.Колкер², И.И. Чернев³

¹-Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Пийпа-9, Петропавловск-Камчатский, 683006

²- Университет Аляски, Фэйрбэнкс, Аляска, США 99775

³- АО "Геотерм", Королева-60, Петропавловск-Камчатский, 683980

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Мутновское, вторичные минералы, термогидродинамическое-химическое моделирование, TOUGHREACT.

АННОТАЦИЯ

Данные по разбурированию продуктивной зоны «Основная» на Дачном участке Мутновского геотермального месторождения использованы для калибровки одномерной термогидродинамической-химической (ТНС) модели. Для численного моделирования использована программа (TOUGHREACT), разработанная в Лоуренсовской Беркелевской Национальной Лаборатории Министерства энергетики США. Исходные данные для моделирования основаны на результатах газогидрохимического опробования эксплуатационных скважин (О16, 26, О29W и 4Э), минералогического, рентгеноструктурного и микронзондового анализа образцов извлеченных из продуктивной зоны и вмещающих горных пород в процессе бурения (скважины А2, А3, А4 (2002-2003)) и эксплуатации (скв. 26, 2004). Доминирующими вторичными минералами в продуктивной зоне являются хлорит, вайрацит и кварц. В пределах продуктивной зоны обнаружены также эпидот, пренит, адуляр и альбит. Вайрацит и кварц обычно занимают открытое трещинно-поровое пространство и (или) замещают плагиоклаз. ТНС-моделирование двухфазного потока теплоносителя с исходной температурой 300 °С показывает, что вторичное образование кварца и вайракита является основным фактором, понижающим пористость резервуара. Ломонтит, смектит и иллит образуются в соответствии с результатами моделирования при температурах ниже 230°С. При этих условиях происходит также значительное образование хлорита. Последнее свидетельствует о том, что наблюдаемый в продуктивных зонах хлорит вероятно связан с более ранними стадиями гидротермального минералообразования, до начала циркуляции теплоносителя в продуктивной зоне.

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционный анализ геохимической эволюции гидротермальных процессов проводится отдельно для процесса транспорта тепловой энергии и химических компонент (TOUGH2V2.0) и для процесса химического взаимодействия в системе «вода-порода» [1, 2, 3]. Тем не менее, в трещиноватых горных породах слагающих геотермальные месторождения происходит сложный процесс взаимодействия между химическими реакциями и многофазными потоками флюида и тепловой энергии. В последнее время усиливается интерес к достаточно полному описанию таких сопряженных термогидродинамических и геохимических процессов [4, 5, 6, 7, 8, 9]. В данной статье используется вычислительный код TOUGHREACT [6, 7] для

моделирования взаимодействия восходящего потока геотермального теплоносителя с исходными минералами вмещающих горных пород. В данной статье исходные данные для моделирования основаны на результатах газогидрохимического опробования эксплуатационных скважин Мутновского геотермального месторождения (О16, 26, О29W и 4Э), минералогического, рентгеноструктурного и микронзондового анализа образцов извлеченных из продуктивной зоны и вмещающих горных пород в процессе бурения (скважины А2, А3, А4 (2002-2003)) и эксплуатации (скв. 26, 2004). После чего рассматриваются результаты различных сценариев моделирования и оценивается сходимость этих результатов с фактическими данными по геотермальным месторождениям.

2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ (TOUGHREACT)

Современное понимание процессов теплопереноса и химического взаимодействия в гидротермальных системах может быть представлено следующими образом. Холодная метеорная вода из областей питания опускается по субвертикальным проницаемым зонам (разломы, контакты интрузий). На глубине эта вода преобразуется в высокотемпературный обогащенный NaCl и CO₂ «родительский геотермальный флюид» за счёт теплового и химического обмена с магматическими газами и вмещающими породами. Как правило исходный «родительский геотермальный флюид» в геотермальных системах имеет две компоненты: метеорную воду и магматический флюид. Магматический флюид глубинной генерации является поставщиком таких газов как HCl, HF, SO₂, H₂O, CO₂ и H₂S, которые преобразуются в форму NaCl-CO₂ флюида за счёт взаимодействия с вмещающими магматическими породами. Эти флюиды могут частично задерживаться ниже границы хрупких/пластических деформаций в виде многофазных NaCl - CO₂ включений в кварце (что доказывается сверхглубоким бурением скважины на геотермальном месторождении Какконда (Япония)). Далее восходящие потоки теплоносителя поднимаются по проницаемым зонам («геотермальным резервуарам»), достигая земной поверхности в виде горячих источников и fumarol. Циркуляция от областей водного питания до областей разгрузки управляется перепадом давления и вариациями плотности флюида (вынужденная и свободная конвекция) и проницаемостью вмещающих горных пород.

С учетом вышесказанного, для исследования условий вторичного минералообразования может быть выполнено моделирование вдоль линии тока, т.е. численная модель гидротермальной системы может быть представлена в виде серии последовательно соединенных элементов В 1, R_n-элементов и D 1 (рис .1). В 1 является в модели базовым из которого начинается восходящее движение «родительского геотермального флюида». R_n-элементы представляют собой последовательно соединенные элементы резервуара, через которые происходит движение восходящего потока теплоносителя с постепенным снижением температуры и давления. D 1 – элемент разгрузки, с заданными атмосферным давлением и температурой (1 бар, 10°C). Для упрощения анализа условий химического взаимодействия вода-порода в модели задается установившийся термогидродинамический режим.

Моделирование химического взаимодействия теплоносителя с вмещающими горными породами осуществляется с использованием кода TOUGHREACT [6, 7], дополняющего код TOUGH2 [10]. В рамках кода TOUGHREACT учитывается диффузионный и конвективный транспорт растворенных химических компонентов, при этом предполагается локальное химическое равновесие в жидкой фазе. Растворение

исходных минералов и образование новых минералов рассчитывается с учетом кинетики минералообразования с использованием следующего расходного закона.

$$r = kS(1-Q/K) \exp(E_a/(R \cdot 298.15) - E_a/(RT))$$

Где k - кинетическая константа скорости химического растворения/осаждения при 25°C , моль/с м^2 ; S - удельная поверхность химического взаимодействия, $\text{м}^2/\text{м}^3$; Q - произведение активности; K - константа равновесия для рассматриваемой системы вода-порода; E_a - энергия активации, кДж/кмоль; R - универсальная газовая постоянная, кДж/кмоль К, T - температура, К. При расчетах химических реакций учитывается зависимость соответствующих констант от температуры.

3. НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ВТОРИЧНЫМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМ МИНЕРАЛАМ, ГАЗОГИДРОГЕОХИМИИ ПРОДУКТИВНОЙ ЗОНЫ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (2002-2004 гг)

Бурение дополнительных скважин А2-А4 (2002-2003 гг) позволило получить новые данные по минералогии вторичных гидротермальных минералов непосредственно в продуктивной зоне «Основная» на участке Дачный Мутновского геотермального месторождения (рис. 2).

Скважины А2 и А3 прошли сквозь продуктивную зону «Основная». Моменты прохождения продуктивных зон фиксировались полной потерей циркуляции в скважинах, бурение внутри зон 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 [11]. Продуктивные интервалы, соответствующие положению продуктивной зоны «Основная» были зацементированы и обсажены глухими эксплуатационными колоннами.

В частности при бурении скв. А3 на глубине 894 м произошел провал инструмента 0.5 м с полной потерей циркуляции промывочной жидкости, а затем выбросом пароводяной смеси во время подъема инструмента (июль 2002 г). В этот момент из продуктивной зоны был выброшен образец поперечником ~15см (табл. 1) (образец отобран и предоставлен в ИВиС ДВО РАН И.И. Черневым).

В противоположность этому, образец отобранный из скважины А2 с глубины 1106 м (март 2002 г) представляет собой горные породы, вмещающие продуктивную зону (зона была зацементирована в период углубления скважины) горные породы (образец отобран и предоставлен в ИВиС ДВО РАН И.И. Черневым). Заметим, что «вмещающие породы» также обладают проницаемостью (прохождение их сопровождалось поглощением промывочной жидкости, выбросами газа), но не в такой степени, чтобы обеспечить стабильную продукцию скважины при необходимом устьевом давлении (более 7 бар).

Скважина А4 вскрыла продуктивную зону «Основная» на отметке 232 м (225°C), но была углублена до 950 м, где зафиксирована инверсия температуры 160°C . Наибольший интерес представляют образцы (обломки поперечником до 1-2 см), выброшенные из скважины из интервала глубин 520-580 м, соответствующих глубинам вскрытия продуктивной зоны «Основная» (образцы отобраны и предоставлены в ИВиС ДВО РАН В.Д. Евсеенко). Из приповерхностных трещин с глубин 115-125 м на поверхность был также выброшен образец поперечником ~10 см (табл. 1) (образцы отобраны и предоставлены в ИВиС ДВО РАН В.Д. Евсеенко).

По данным минералого-петрографического исследований материала полученного из пробуренных скважин [8, 9, 12, 13] можно сделать следующий вывод: исходные горные породы подвергаются интенсивной гидротермальной переработке. В составе вторичных гидротермальных минералов преобладают хлорит, вайрацит и окислы железа и титана. В подчиненном количестве присутствует эпидот, пренит, адуляр, альбит. Вайрацит совместно с кварцем выполняет пустоты в породе а также замещает фенокристы плагиоклаза (And). Хлорит развивается за счет изменения основной массы породы в тесной ассоциации с кварц-полевошпатовой массой и окислами.

3. ТНС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АНДЕЗИТАХ

Во многих случаях на геотермальных месторождениях областей современного вулканизма горные породы вмещающие восходящие потоки теплоносителя представлены андезитами. Для представления общего минералогического состава неизменных андезитов были выбраны несколько основных минералов, в связи с тем, что существующие в настоящее время термодинамические базы данных недостаточно полны и ограничены конечными минералами из серий твердых растворов. Это несущественно влияет на рассматриваемую нами модель, т.к. все порообразующие минералы за исключением кварца неустойчивы по отношению ко вторичным минералам в условиях гидротермального процесса и находятся вне поля своей термодинамической устойчивости.

С учетом вышесказанного, начальный минералогический состав резервуара принимается соответствующим андезиту: 45% анортит (Са-полевой шпат), 26% альбит-high (Na-полевой шпат), 11% санидин (К-полевой шпат), 16% диопсид, 2% кварц. Общая пористость задана 0.1. Кинетические параметры химического взаимодействия даны в работе [8]. При моделировании задавался исходный «родительский геотермальный флюид» с химическим составом соответствующим различным геотермальным месторождениям. Список вторичных гидротермальных минералов рассматриваемых на модели (совместно с исходными) включал следующие: кальцит, ангидрит, low-альбит, вайрацит, ломонтит, морденит, Na, Ca и Mg-сметиты, хлорит, иллит, аморфный кремнезем, кристобалит, опал, каолинит и пренит.

ТНС моделирование двухфазного восходящего потока с базовой температурой 300 °С показывает формирование кварца, К-полевого шпата (микроклина), вайракита, хлорита и кальцита в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне. Эти результаты согласуются с наблюдениями на геотермальных месторождениях Хачубару, Сумикава, Уенотай (Япония) и Мутновское (Камчатка, Россия). Пример моделирования изменения минеральных фаз вдоль восходящего потока теплоносителя (2500 кг/с км²) спустя 1000 лет после начала фильтрации, при условиях соответствующих Мутновскому геотермальному месторождению приводится в работе [8] (начальное значение пористости задано 0.1), однако при моделировании было задано чрезмерно высокое содержание CO₂ в исходном теплоносителе (2140 ppm), как выяснилось в результате дополнительного опробования скважин в 2003-2004 гг.

Таким образом ТНС моделирование процессов формирования геотермальных месторождений показывает существенное влияние термодинамических и кинетических параметров химического взаимодействия, величины массовой скорости восходящего потока теплоносителя на скорость формирования вторичных минералов вдоль направления восходящего потока высокотемпературного теплоносителя (как в

однофазном, так и в двухфазном состоянии). Формирование вторичного кварца и К-полевого шпата может привести к существенному понижению пористости за первые сотни лет и полному запечатыванию проницаемых трещин при массовой скорости восходящего потока теплоносителя более 25 кг/с км^2 .

4. ТНС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В ПРОДУКТИВНОЙ ЗОНЕ МУТНОВСКОГО ГЕОТЕРМАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ДАЧНЫЙ)

Дополнительные данные по исходному газогидрохимическому составу флюида (табл. 1) позволяют уточнить результаты TOUGHREACT-моделирования полученные ранее и представленные в [8, 9, 12]. Газовые и макроэлементные химические анализы выполнялись в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904), начиная с 2003 г отбор проб осуществлялся по методике ASTM E 1675-95a. Микроэлементный состав растворов анализировался методом ICP, прибор IRIS фирмы Jarell Ash Corporation (США) (Бортникова С.Б., 2003). В качестве исходного газогидрохимического состава флюида для TOUGHREACT моделирования условий взаимодействия «вода-порода» в продуктивной зоне «Основная» использованы данные по скв. 029W, данные по скв. 016 и 26 могут быть использованы для калибровки условий в пароконденсатном резервуаре, а данные по скв. 4E для калибровки условий в зоне нисходящего потока отсепарированного теплоносителя. Пересчет на исходный химический состав флюида включал пропорциональный учет паровой, жидкой и газовой фаз (табл. 1) и изменение рН исходного раствора при отделении газовой и паровой фаз [2].

Рис. 3 показывает результаты моделирования изменения минеральных фаз вдоль восходящего потока теплоносителя (2500 кг/с км^2), при условиях соответствующих уточненным данным по газовому и химическому составу теплоносителя Мутновского геотермального месторождения (в работе [8] использованы завышенные значения газосодержания исходного теплоносителя). Полученные результаты в лучшей степени воспроизводят фактические данные по вторичной минерализации в продуктивной зоне, т.к. вторичный кальцит не был обнаружен в скв. А3 при температурах около 270°C . Результаты моделирования показывают возможность существенного снижения пористости продуктивной зоны за счет заполнения ее вторичными минералами в естественных условиях за 1000 лет: в двухфазном потоке при температурах менее 300°C заполнение осуществляется за счет образования кварца и вайракита (рис. 3). При температурах менее 230°C появляется ломонтит, смектиты и иллит. Однако, темпы образования вторичного хлорита, полученные на модели весьма малы (рис. 3), что может свидетельствовать о том, что хлорит, обнаруженный в продуктивной зоне «Основная» был образован до того, как по ней началась активная циркуляция теплоносителя.

Попытки добиться увеличения темпов образования хлорита на модели за счет повышения газосодержания (CO_2) исходного теплоносителя до 400 ppm (возможно, что скв. 029W демонстрирует газогидрохимические характеристики несколько дегазированного флюида, т.к. ее продуктивная зона находится в средней части восходящего потока теплоносителя) не дали существенного результата (рис. 4).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные по разбуриванию продуктивной зоны «Основная» на Дачном участке Мутновского геотермального месторождения использованы для калибровки

одномерной термогидродинамической-химической (ТНС) модели. Для численного моделирования использована программа (TOUGHREACT). Исходные данные для моделирования основаны на результатах газогидрохимического опробования эксплуатационных скважин (О16, 26, О29W и 4Э), минералогического, рентгеноструктурного и микронзондового анализа образцов извлеченных из продуктивной зоны и вмещающих горных пород в процессе бурения (скважины А2, А3, А4 (2002-2003)) и эксплуатации (скв. 26, 2004).

ТНС-моделирование двухфазного потока теплоносителя с исходной температурой 300°C показывает, что вторичное образование кварца и вайракита является основным фактором, понижающим пористость резервуара. Ломонтит, смектит и иллит образуются в соответствии с результатами моделирования при температурах ниже 230°C. При этих условиях происходит также значительное образование хлорита. Последнее свидетельствует о том, что наблюдаемый в продуктивных зонах хлорит вероятно связан с более ранними стадиями гидротермального минералообразования, до начала циркуляции теплоносителя в продуктивной зоне.

Задачи дальнейших исследований с использованием методов термогидродинамического-химического моделирования (TOUGHREACT) включают: (1) Разработку трехмерной термогидродинамической-химической модели Мутновского геотермального месторождения и воспроизведение на ней обнаруженных в продуктивной зоне «Основная» и вмещающих горных породах ассоциаций вторичных минералов, (2) Воспроизведение на модели нисходящих потоков теплоносителя, (3) Воспроизведение на модели условий возвратной закачки отсепарированной воды и конденсата пара, оценка изменений проницаемости и пористости резервуара в результате образования вторичных минералов при реинжекции, оценка и прогноз изменения приемистости реинжекционных скважин.

Авторы выражают признательность Т.Ху, К. Pruess, J. Apps (LBNL) – за консультации по проблеме исследований, Зам. генерального директора ОАО «ДВЭУК» по работе с ОАО «Геотерм» В.Е. Лузину, сотруднику ОАО «Геотерм» Л.К. Москалеву, сотруднику ГУП «Камчатскбургеотермия» В.Д. Евсеенко за помощь в подготовке исходных данных, предоставление образцов горных пород и обсуждение предварительных результатов. Выражается также признательность J. Lawless (WIKM), которым представлены предварительные петрографические описания образцов. Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 03-05-65373 и при поддержке ДВО РАН по проекту 05-ША-08-053.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ. Новосибирск, 1981, 247 с.
2. Reed, M. H., 1982. Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and aqueous phase. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 513-528.
3. Wolery, T. J., 1992. EQ3/6: Software package for geochemical modeling of aqueous systems: Package overview and installation guide (version 7.0). Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-MA-110662 PT I, Livermore, California, 1992.
4. Steefel, C. I., and Lasaga, A.C., 1994. A coupled model for transport of multiple chemical species and kinetic precipitation/dissolution reactions with applications to reactive flow in single phase hydrothermal system. *Am. J. Sci.*, 294, 529-592.
5. White, S. P., 1995. Multiphase non-isothermal transport of systems of reacting chemicals. *Water Resour. Res.*, 31, 1761-1772.
6. Xu, T. and Pruess, K., 2001. Modeling multiphase non-isothermal fluid flow and reactive geochemical transport in variability saturated fractured rocks: Methodology. *Amer. Jour. Science*, 301, 16-33.
7. T. Xu and K. Pruess (2004) Numerical Simulation of Injectivity Effects of Mineral Scaling and Clay Swelling in a Fractured Geothermal Reservoir // *Geothermal Resources Council Transactions Vol. 28*, p.269-276.
8. A.V. Kiryukhin, T. Xu, K. Pruess, J. Apps, I. Slovtsov Thermal-Hydrodynamic-Chemical (THC) Modeling Based on Geothermal Field Data//*Geothermics*, v.33, No.3, 2004, 349-381p.
9. А.В. Кирюхин, Т. Ху, К. Pruess, J.Apps, И. Слозцов, М. Пузанков Моделирование термогидродинамических - химических процессов в геотермальных резервуарах // *Труды международной конференции «Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии»*, Томск, 2004, с. 255-259.
10. Pruess, K., 1991. TOUGH2: A general numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29400, Berkeley, California, 37 p.
11. Рослый Г.А. Основные результаты эксплуатационного бурения / Отчет по контракту №589/35806573/9-0011/00. 2003. 35 с.
12. А.В.Кирюхин, В.Л. Леонов, И. Б. Слозцов, И. Ф. Делемень, М.Ю. Пузанков, А.Ю.Поляков, Г.О. Иванысько, О. П. Батаева, М.Е. Зеленский // Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт // *Вулканология и сейсмология*, 2005, #5, с.1-26.
13. Slovtsov I. B. Rock alteration in the Mutnovsky Hydrothermal System, Kamchatka, Russia// *Proceed. Of Water-Rock Interaction X*, 10-15 July 2001, Villasimius, Italy (R. Cidu ed.), Balkema Swets & Zeitlinger, Lisse, 2001, p. 915-918

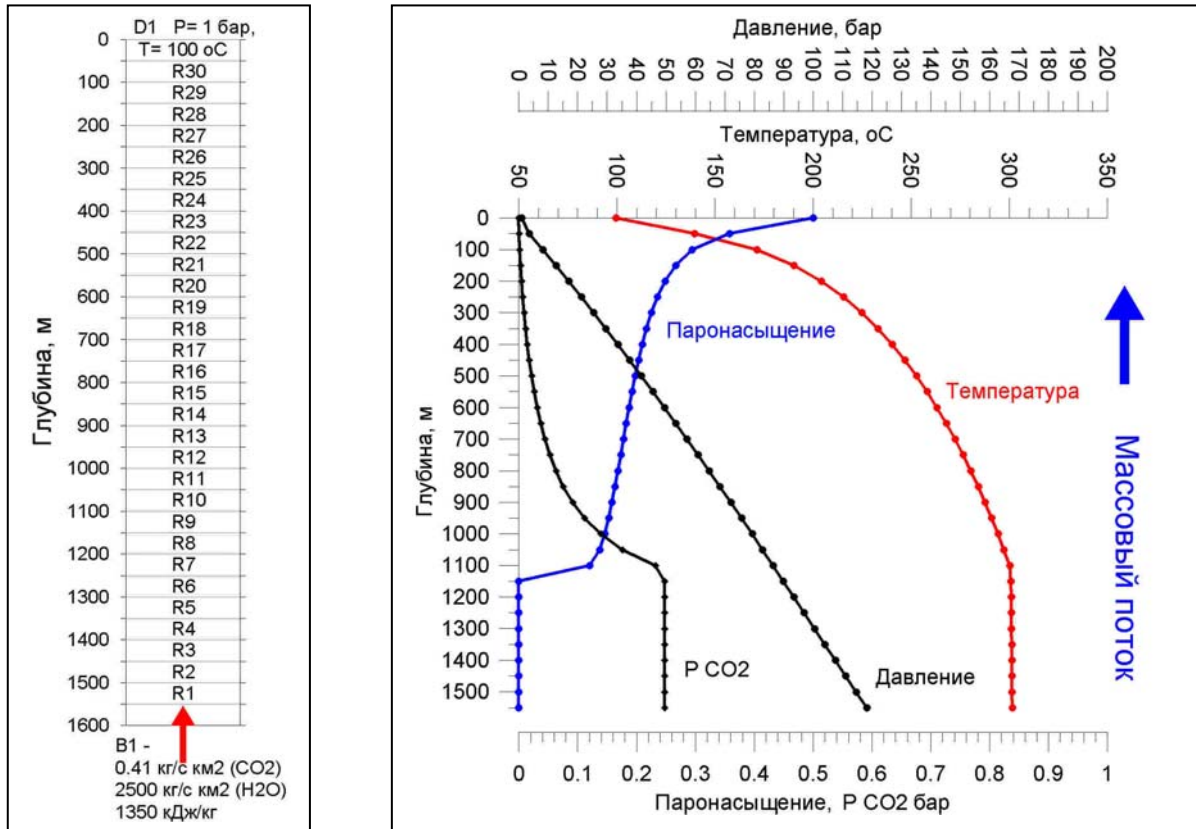


Рис. 1 Геометрия области моделирования (слева) и распределения термогидродинамических параметров вдоль области моделирования (справа).

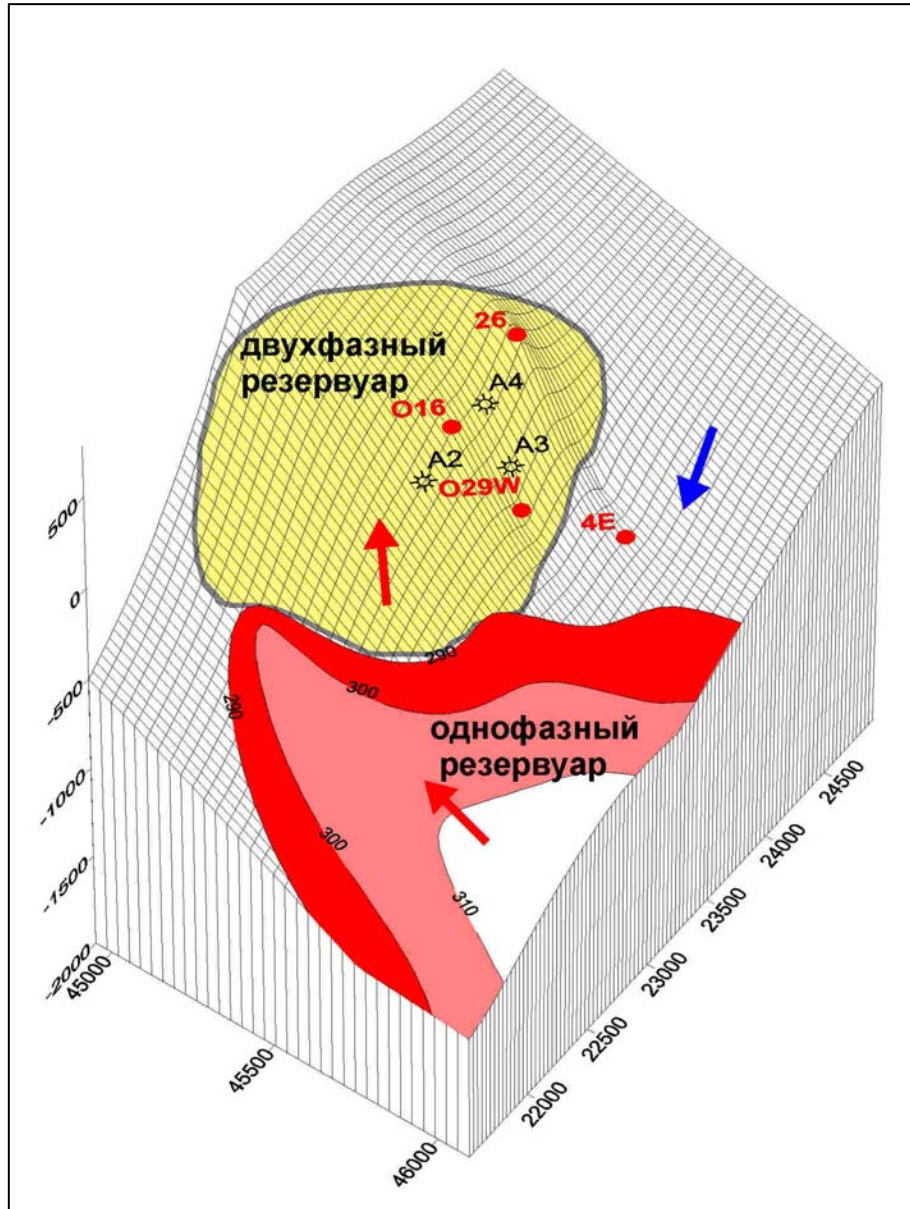


Рис. 2. Блок-схема кровли продуктивной зоны “Основная” ССВ простирания и ЮВВ падения 60° , показано распределение температур и фазового состояния теплоносителя в пределах зоны, точки ее вскрытия продуктивными скважинами (серые кружки), проекции (на кровлю) точек отбора образцов при бурении из скважин А2, А3 и А4 показаны звездочками (для скважин А3 и А4 проекции совпадают с фактическими координатами точек отбора, для скв. А2 – точка отбора находится на 200 м ниже кровли продуктивной зоны), точки газогидрохимического опробования (скважины 016, 26, 029W, 4E) изображены красными кружками. 1-D модель, изображенная на рис. 1 отражает ТНС-процессы вдоль линии скважин 029W- А3 – А4 – 26.

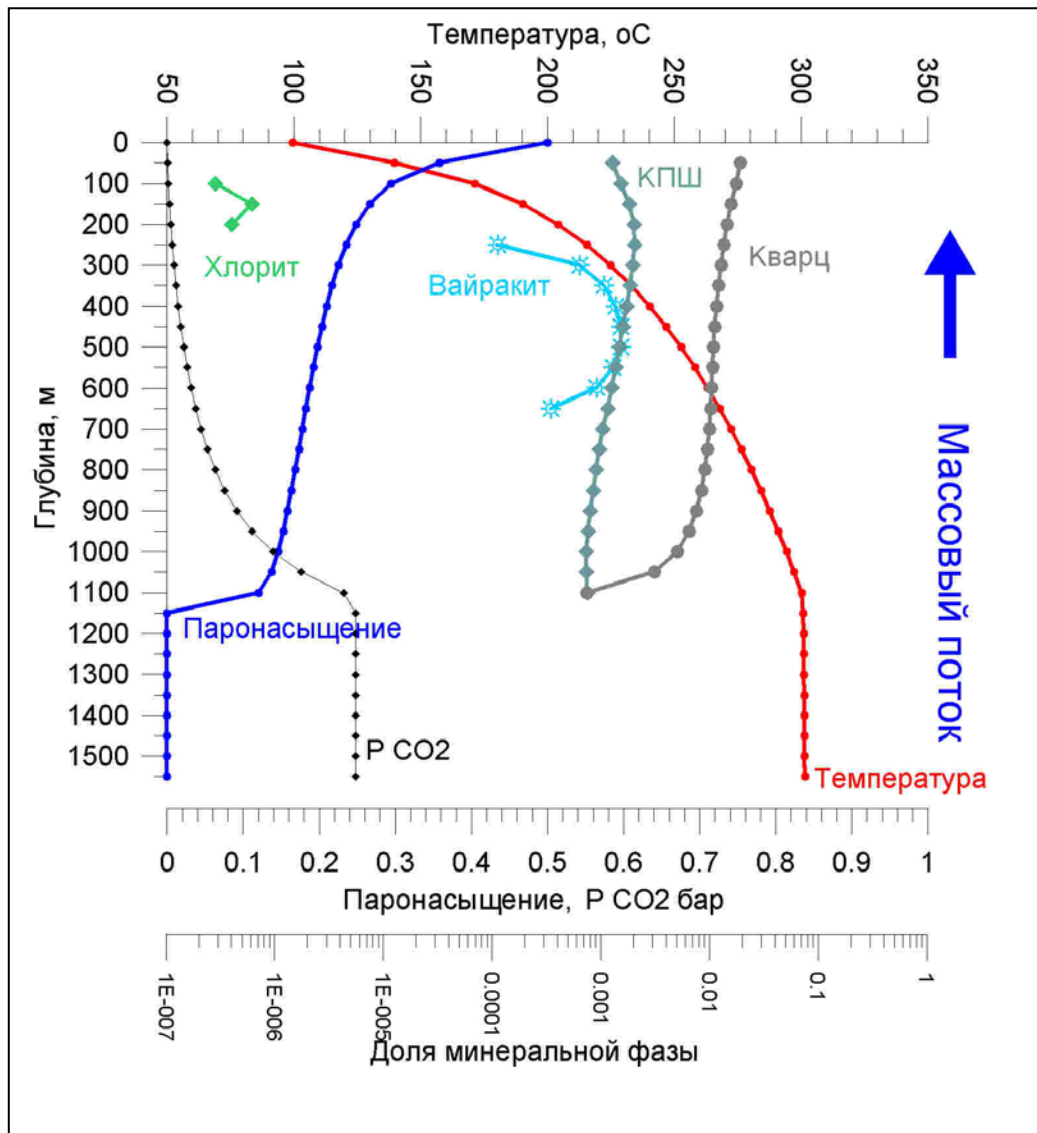


Рис.3 Результаты моделирования (TOUGHREACT) изменения доли минеральных фаз вдоль восходящего потока в андезитах спустя 1000 лет после начала фильтрации (химический состав теплоносителя принят соответствующим исходному геотермальному флюиду Мутновского геотермального месторождения, рассчитанному по уточненным данным опробования и анализа химического и газового состава скв. 029W в 1999-2004 гг.

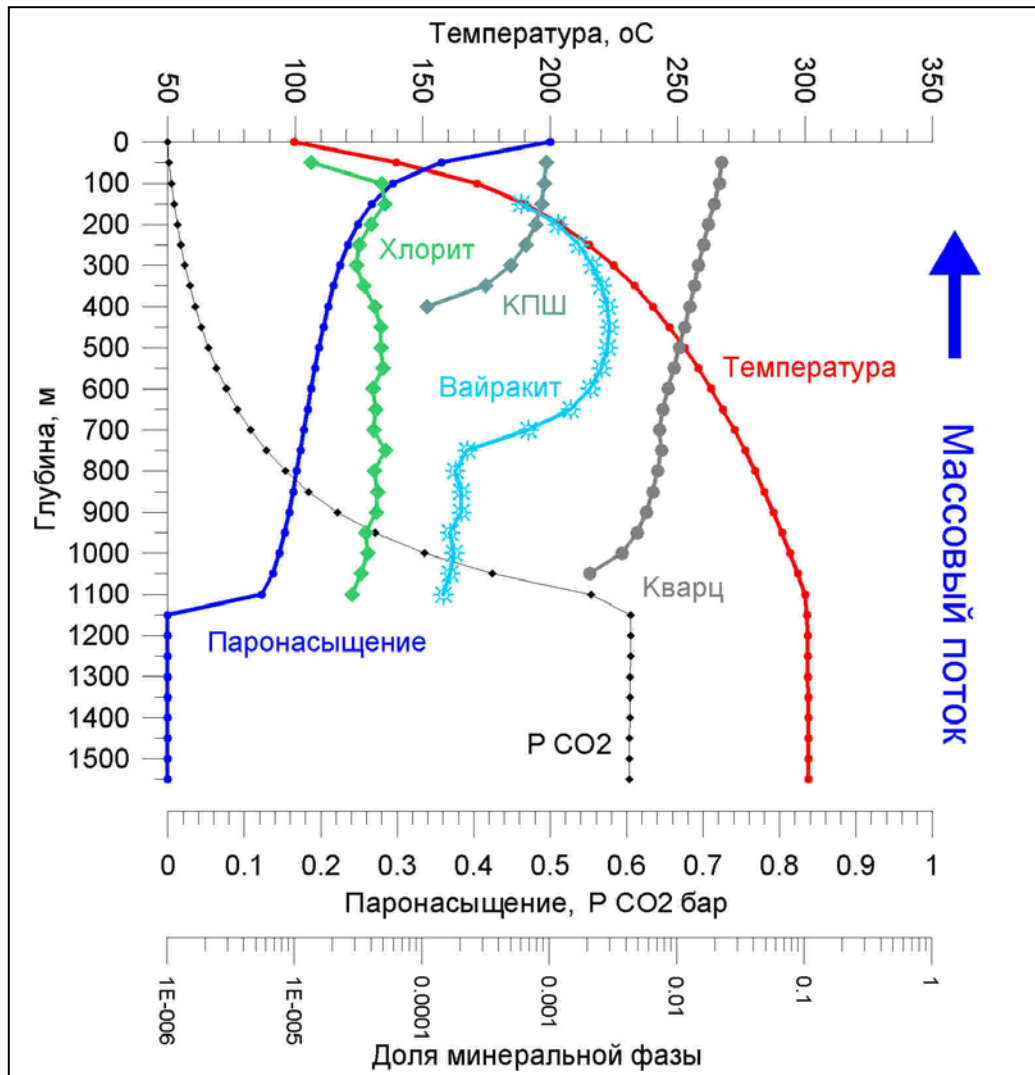


Рис.4 Результаты моделирования (TOUGHREACT) изменения доли минеральных фаз вдоль восходящего потока в андезитах спустя 1000 лет после начала фильтрации (химический состав теплоносителя принят соответствующим исходному геотермальному флюиду Мутновского геотермального месторождения, рассчитанному по уточненным данным опробования и анализа химического и газового состава скв. 029W в 1999-2004 гг, за исключением весового содержания CO_2 , которое принято равным 400 ppm.

Таблица 1. Исходные данные для ТНС-моделирования: химический состав пересчитанный на исходный теплоноситель (в мг/л), вскрываемый скважинами О16, 26, 4Е и 029W (по данным опробования в 1999 и в 2003 гг). Доля паровой фазы, принятая при расчетах показана в первой строке таблицы. Индекс «s» для значений рН означает сепарат, что требует корректировки с учетом потери газовой фазы CO₂ (для рН=9.04 (скв. 029W) скорректированное значение рН=7.37). Жирным шрифтом выделены основные компоненты химического состава (primary species) и их значения используемые при TOUGHREACT моделировании.

Химический состав флюида	Скважины							
	1999 г				2003 г			
	О16	26	4Е	029W	О16	26	4Е	029W
Q _s	1	1	0.2646	0.2396	1	1	0.2166	0.2396
рН	4.8	5.0	9.06s	9.04s	4.9	4.8	8.26s	8.74s
NH ₄ ⁺	9.5	6.2	1.0	1.5	7.8	9.0	2.4	2.8
Na⁺	0.4	0.0	203.3	166.7	0.0	0.1	173.0	132.1
K⁺	0.1	0.0	39.4	31.8	0.0	0.0	29.1	24.2
Ca²⁺	0.4	0.0	2.2	1.4	0.3	0.1	2.8	2.0
Fe²⁺³⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.3	0.4
Al³⁺	0.0		1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7
Cl⁻	0.7	0.0	180.1	197.8	0.7	6.4	157.0	161.8
SO₄²⁻	3.8	2.9	184.5	85.3	1.4	1.9	166.3	106.7
HCO₃⁻	28.1	17.1	61.3	57.3	24.4	18.3	63.6	43.3
F ⁻	0.0	0.0	3.1	2.1	0.1	0.1	2.3	2.2
B	0.4		13.1	21.5	0.2	0.1	11.4	12.2
SiO₂	3.7	1.4	568.8	723.0	0.0	0.0	149.2	140.0
As	0.0	0.0	2.4	4.4	0.0	0.0	2.8	3.4
CO ₂	2116.2	1278.8	49.3	16.7	2197.9	577.3	143.4	125.9
H ₂ S	207.8	115.4	8.8	3.4	105.6	59.2	6.3	14.0
O ₂	32.9	34.3	0.7	0.2	33.7	19.8	15.3	27.1