

**ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В ПРОДУКТИВНЫХ
ЗОНАХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**А.В. Кирюхин¹, М.Ю. Пузанков¹, И.Б. Словцов¹, С.Б. Бортникова², С.В. Москалева¹,
М.Е. Зеленский¹, А.Ю. Поляков¹**

*¹-Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Пийпа-9, г. Петропавловск-
Камчатский 683006, Россия*

²-Институт геологии СО РАН, пр. Ак. Коптюга, 3, Новосибирск 683090, Россия

Поступила в редакцию 25.12.2004 г.

Данные по геохимии флюидов и вторичной минерализации 14-ти геотермальных месторождений Камчатки (Россия) и Японии использованы для калибровки численных моделей связанных термогидродинамических и химических процессов (thermo-hydrodynamic-chemical (ТНС-модели)) (Kiryukhin et al, 2004). Для численного моделирования использована программа (TOUGHREACT), разработанная в Лоуренсовской Беркелевской Национальной Лаборатории Министерства энергетики США. Исследованы условия восходящей фильтрации теплоносителя для следующих случаев: (1) однофазная фильтрация с исходной температурой 260^oС, (2) двухфазная фильтрация, 300^oС, (3) условия «тепловой трубки», 260^oС. На основе расчетов показано, что в однофазном потоке в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне образуются вайрацит, кварц, К-полевой шпат и хлорит. В двухфазном потоке в качестве основных вторичных минералов образуются кварц, К-полевой шпат, вайрацит и кальцит. В «тепловой трубке» существенного образования вторичных минералов не происходит. Образование вторичных минералов может привести к существенному снижению

пористости в течение первых сотен лет и полному «запечатыванию» резервуара. Представлены новые данные газогидрохимическому опробованию и по вторичным гидротермальным минералам, полученные при разбуривании продуктивной зоны «Основная» на Мутновском геотермальном месторождении в 2002-2003 гг. На основании этих данных выполнена корректировка результатов моделирования.

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» (ПК «СЕЛЕКТОР» (Карпов И. К., 1981), CHILLER (Reed, 1982) и EQ3/6 (Wolery, 1992)). 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 (Steefel and Lasaga, 1994; White, 1995; Xu and Pruess, 2001a, b). В данной статье используется вычислительный код TOUGHREACT (Xu and Pruess, 1998 and 2001b) для моделирования взаимодействия восходящего потока геотермального теплоносителя с исходными минералами вмещающих горных пород. В данном случае моделирование используется для того, чтобы понять насколько исчерпывающим является модель для описания наблюдаемых данных по распределению вторичных гидротермальных минералов в продуктивных зонах в широком диапазоне температур на хорошо изученных геотермальных месторождениях Камчатки и Японии. Такие геотермальные месторождения представляют собой удачный объект для тестирования связанных

термогидродинамических -химических (thermo-hydrodynamic-chemical (ТНС)) моделей. В первом разделе статьи приводятся краткие характеристики геотермальных месторождений Камчатки и Японии. Далее следует описание методики моделирования с использованием кода TOUGHREACT. После чего рассматриваются результаты различных сценариев моделирования и оценивается сходимость этих результатов с фактическими данными по геотермальным месторождениям.

ДАнные ПО ГЕОХИМИИ ФЛЮИДОВ И ВТОРИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАМЧАТКИ И ЯПОНИИ

Ниже кратко излагаются основные характеристики использованных при калибровке ТНС-моделей геотермальных месторождений.

Нигорикава (Мори). Вмещающие горные породы – известняки, осложненные дайками андезитов. Флюид Na-Cl-CO₂ состава (8 г/кг) находится в жидкой фазе при температуре 270⁰С.

Мацукава. Геотермальный резервуар сложен спекшимися туфами риолитового и дацитового состава в приконтактной зоне интрузии кварцевых диоритов. В резервуаре наблюдается давление 20-30 бар и температура 200 –240⁰С. Основной вторичный минерал в продуктивных зонах - пиррофилит.

Сумикава. Резервуар сложен измененными андезитами неогенового и палеогенового возраста, интродуцированными гранитами. В продуктивной зоне двухфазные условия с температурой до 300⁰С, продуктивная зона трассируется вайрацитом, эпидотом и хлоритом.

Какконда. Источником теплового питания считается интрузия нео-гранитов (0.19 Ма), вскрытая ниже геотермального резервуаров. Резервуары сложены миоценовыми андезитовыми и дацитовыми туфами. Продуктивные зоны характеризуются однофазным состоянием с температурой 220-260 °С (верхний резервуар) и 280-340°С (нижний резервуар). Резервуары трассируются эпидотом, ангидритом, серицитом, пренитом и К-полевым шпатом. Также обнаружены следующие вторичные минералы: кварц, хлорит, кальцит, плагиоклаз. На глубине 3100 м на термограмме сверхглубокой скважины WD-1a зарегистрирована точка перегиба 380°С, фиксирующая границу между зоной вязко-пластических деформаций и подошвой зоны циркуляции теплоносителя. Ниже этой границы обнаружены интра-кристаллические флюиды представленные газонасыщенными (CO₂, H₂S) Na-Cl рассолами.

Уенотай. Резервуар сложен миоценовыми андезитами и более древними гранитами. Центральная зона в двухфазном состоянии с температурой 300°С, по её периферии - однофазные условия. Продуктивная зона трассируется вторичным кварцем, эпидотом, кальцитом, вайрацитом, в то время как другие цеолиты (ломонтит, морденит) обнаружены за пределами продуктивной зоны.

Окуайзу. Основные продуктивные зоны обнаружены на глубинах 1.0-2.6 км в трещиноватых «зеленых туфах» неогенового возраста (формация субаквальных вулканических пород, измененных до зеленого цвета) в пределах двух разломов северо-западного простирания, примыкающих к юго-восточной границе кальдеры: Чинокезава и Сакурадзава. Теплоноситель характеризуется высокой минерализацией Na-Cl (5-15 г/кг) и газонасыщен (CO₂ , 10 – 80 г/кг), циркуляция при температуре 250-300°С.

Продуктивный резервуар трассируется кальцитом, ангидритом, хлоритом и серицитом.

Приповерхностный резервуар трассируется К-полевым шпатом.

Хачиджо-Джима. Продуктивный резервуар приурочен к системе трещин в неоген-четвертичных андезитах и базальтах, теплоноситель в жидком состоянии. Вторичные минералы обнаруженные в верхней части восходящего потока с температурой 300⁰С: кварц, кальцит и ангидрит. Продуктивные зоны трассируются вайрацитом.

Такигами. Продуктивные резервуары, сложенные андезитовыми и дацитовыми туфами и лавами фиксируются двумя узлами пересекающихся систем трещин и разломов.

Исходный флюид находится в жидком однофазном состоянии с температурой 250⁰С, разгружается в латеральном направлении. Продуктивный резервуар трассируется иллит-хлоритовой ассоциацией. Нижний температурный предел обнаружения ломонтита и вайракита совпадает с изолиниями температуры 150 и 200⁰С, соответственно.

Хачубару. Резервуар приурочен к пяти продуктивным разломам в трещиноватых пироксеновых андезитах. Теплоноситель находится в жидком состоянии при температуре 300⁰С. Гидротермальные изменения в пределах восходящих потоков теплоносителя включают окремненную цеолитизированную зону, полевые шпаты с ангидритом и кальцитом.

Огуни. Резервуар сложен пирокластическими отложениями дацитового состава и андезитами. Исходный флюид в однофазном состоянии с температурой 240⁰С.

Карбонаты кальция отлагаются при эксплуатации скважин выше уровня парообразования.

Огири. Продуктивный резервуар приурочен к разлому Гиньо (простираение 70-75°E, падение 63-72°N, мощность 20 м), содержит жидкий теплоноситель с температурой 232°C, вмещающие горные породы - андезиты. Признаки наложенных или регрессивных гидротермальных изменений отсутствуют. Распределение вторичных гидротермальных минералов конформно с распределением температуры. Вайрацит и хлорит-сметитовая ассоциация указывают на приближение к разлому Гиньо и момент его полного вскрытия при бурении. В продуктивной зоне обнаружены вторичный кварц, вайрацит, К-полевой шпат, хлорит и эпидот. Близповерхностный водоупор, перекрывающий разлом Гиньо, сформирован в результате «самозапечатывания» смектитами, имеет вертикальную мощность 200-400 м.

Фушиме. Продуктивный резервуар в пределах толщи андезито-дацитовых лав и туфов приурочен к двум разломам, связанным с дацитовой интрузией. Один из разломов имеет северо-северо-западное простираение, южнее находится второй разлом имеющий северо-западное простираение. Температуры в продуктивной зоне превышают 300°C на абс. отм. - 1700 м. По содержанию Cl, отношению Br/Cl и стабильным изотопам исходный теплоноситель представляет собой нагретую морскую воду, обогащенную CO₂ (до 12.5 г/кг в паровой фазе). Продуктивные зоны характеризуются распространением хлорита, эпидота и К-полевого шпата, в то время как Na-полевого шпата (альбит) распространен в периферических частях резервуара.

Мутновское (Дачный). Продуктивный резервуар приурочен к разлому северо-северо-восточного простираения, падением 60° на юг-восток-юг и с истинной мощностью 120

м. Поток однофазного теплоносителя (54 кг/с, более 280°C, 1390 кДж/кг) поднимается из юго-восточного сектора. В верхней части продуктивной зоны, где происходит вскипание - обнаружена хлорит-вайраkitовая ассоциация вторичных гидротермальных минералов. Вмещающие разлом горные породы: диориты, миоцен-плиоценовые песчаники, риолитовые и андезитовые туфы и лавы. Приповерхностный пароконденсатный резервуар характеризуется вторичной кальцит-хлорит-иллитовой минерализацией. В работе И.Б. Словцова (2001) отмечается, что характерными вторичными минералами резервуара с преимущественно однофазовой циркуляцией гидротермальных растворов являются кварц, хлорит, эпидот, пирит; двухфазная зона характеризуется развитием вайраkitа и кварца; пароконденсатный резервуар характеризуется развитием иллит-хлорит-кальцитовой вторичных гидротермальных минералов.

Паужетское. Сублатеральный поток однофазного теплоносителя с температурой 180-200°C на глубинах 100 - 800 м в пределах проницаемой толщи псефитовых туфов неоген-четвертичного возраста. Основные вторичные минералы: ломонтит, полевые шпаты, карбонаты и хлориты. В диапазоне температур 160-190°C полевые шпаты представлены альбитом и адуляром, в ассоциации с ломонтитом и кальцитом. К-полевой шпат (адуляр) встречается в высокотемпературной части потока, в то время как Na-полевой шпат (альбит) в зонах инверсий температурного поля.

С учетом изложенного выше, основные вторичные гидротермальные минералы, образующиеся при восходящей фильтрации теплоносителя в высокотемпературных гидротермальных резервуарах включают кварц, вайраkit, К-полевой шпат, хлорит, эпидот, кальцит и ангидрит. Наиболее типичные условия формирования восходящих потоков теплоносителя, наблюдаемые при разбуривании геотермальных месторождений: (1) Однофазный восходящий поток с температурой до 260°C в

основании (примерами таких геотермальных месторождений являются Огири, Такигами, Огуни (Япония), Паужетское (Камчатка, Россия), а также неглубокозалегающие резервуары на месторождениях Нигорикава и Какконда (Япония)), (2) Двухфазный восходящий поток с температурой до 300⁰С (Хачубару, Сумикава, Уенотай, Фушима, Окуайзу, Хачиджо-Джима (Япония) и Мутновское (Камчатка, Россия)), (3) Тепловые трубки с температурой до 260⁰С в основании (Мацукава, Япония). Указанные условия восходящей фильтрации потоков теплоносителя достаточно наглядно фиксируются характерной формой графиков зависимости давления, температуры и паронасыщения от глубины (P-T-S logs) на упомянутых геотермальных месторождениях.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ (TOUGHREACT)

Современное понимание процессов тепломассопереноса 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 фумарол. 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 (Xu and Pruess, 1998 and 2001a), дополняющего код TOUGH2 (Pruess, 1991). 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.

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

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 и T , -температура, К . При расчетах химических реакций учитывается зависимость соответствующих констант от температуры.

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 породообразующие 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 (K-полевой шпат), 16% диопсид, 2% кварц. Общая пористость задана 0.1. Кинетические параметры химического взаимодействия даны в работе (Kiryukhin et al, 2004). 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 восходящего однофазного потока с базовой температурой 260⁰С показывает формирование вайракита, кварца, K-полевого шпата и хлорита в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне, и иллит-сметитовой ассоциации при температурах ниже 230⁰С (что согласуется с наблюдениями на геотермальном месторождении Огири).

ТНС моделирование двухфазного восходящего потока с базовой температурой 300⁰С показывает формирование кварца, K-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 на рис. 2 (начальное значение пористости задано 0.1) (Kiryukhin et al, 2004), 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.

ТНС моделирование условий тепловой трубки, представленных на геотермальном месторождении Мацукава (Япония) показывают отсутствие существенного образования вторичных минералов (кварца, К-полевого шпата, цеолитов) в продуктивной зоне с двухфазными изотермическими условиями, что также соответствует фактическим данными.

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 .

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. 3).

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 (Рослый Г.А., 2003). 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 полным 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 °С), но была углублена до 950 м, где зафиксирована инверсия температуры 160 °С. 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).

В табл. 1 приводятся результаты минералогопетрографического и рентгено-структурного анализа образцов горных пород, указанных выше. В табл. 2 приводятся результаты анализа образцов на микрозондовом анализаторе «САМЕВАХ». В табл. 3 и 4 приводятся данные по газовому и химическому составу теплоносителя из эксплуатационных скважин Мутновского геотермального месторождения полученные в период 1999-2004 гг.

По данным минералого-петрографического исследований материала полученного из пробуренных скважин 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 фенокриты плагиоклаза (And). Хлорит развивается за счет изменения основной массы породы в тесной ассоциации с кварц-полевошпатовой массой и окислами (табл. 1, 2, рис. 4, 5).

Дополнительные данные по исходному газогидрохимическому составу флюида (табл. 3, 4) позволяют уточнить результаты TOUGHREACT-моделирования полученные ранее и представленные на рис. 1 (Kiryukhin et al, 2004). В табл. 3 и 4 приводятся сведения по газовому и химическому составу теплоносителя в процессе эксплуатации по сравнению с данными опытных выпусков до начала эксплуатации в 1998-99 гг. 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» необходимо использованы данные по скв. 029W, данные по скв. 016 и 26 могут быть использованы для калибровки условий в пароконденсатном резервуаре, а данные по скв. 4Е для калибровки условий в зоне нисходящего потока отсепарированного теплоносителя. Пересчет на исходный химический состав флюида включал пропорциональный учет паровой, жидкой и газовой фаз (табл. 5) и изменение рН исходного раствора при отделении газовой и паровой фаз (Reed, M. H., 1982).

Рис. 6 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 (Kiryukhin et al, 2004) использованы завышенные значения газосодержания исходного теплоносителя). Полученные результаты в лучшей степени воспроизводят фактические данные по вторичной минерализации в продуктивной зоне (табл. 1 и 2), т.к. вторичный кальцит не был

обнаружен в скв. А3 при температурах около 270 °С. 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°С заполнение осуществляется за счет образования кварца и вайракита (рис. 6). При температурах менее 230°С появляется ломонит, смектиты и иллит. Однако, темпы образования вторичного хлорита, полученные на модели весьма малы (рис. 6), 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 (CO₂) 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. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные по геохимии флюидов и минералогии продуктивных геотермальных резервуаров Камчатки (2 месторождения) и Японии (12 месторождений) использованы для калибровки ТНС-моделей. Исследованы условия восходящей фильтрации теплоносителя в продуктивных геотермальных резервуарах для следующих случаев: (1) однофазная фильтрация с температурой 260°С в основании восходящего потока (тип «Ogiri»), (2) двухфазная фильтрация с температурой 300°С в основании восходящего потока (тип «Hatchubaru»), (3) условия «тепловой трубки», 260°С в основании (тип «Matsukawa»).

ТНС-моделирование однофазного восходящего потока показывает что в качестве основных вторичных минералов в продуктивной зоне образуются вайрацит, кварц, К-полевой шпат и хлорит, а иллит-сметитовая ассоциация формируется при температурах ниже 230⁰С. В двухфазном восходящем потоке в качестве основных вторичных минералов образуются кварц, К-полевой шпат, вайрацит и кальцит. В «тепловой трубке» существенного образования вторичных минералов (кварц, К-полевой шпат, цеолиты) не происходит. Существенное влияние на скорость образования вторичных минералов оказывают термодинамические и кинетические параметры химического взаимодействия и параметры режима восходящей фильтрации. Образование вторичных гидротермальных минералов могут привести к существенному снижению пористости в течение первых сотен лет и полному «запечатыванию» трещин в случае однофазного или двухфазного восходящего потока теплоносителя.

Уточнена модель минералообразования в продуктивной зоне «Основная» Мутновского геотермального месторождения с учетом полученных в 2003-2004 гг дополнительных данных: (1) результатам газогидрохимического опробования эксплуатационных скважин и (2) обнаруженных при разбуривании продуктивной зоны ассоциациям вторичных минералов.

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, сотрудникам ОАО «Геотерм» И.И. Черневу и 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 х.д. №30 от 16.04.2003 г. с ОАО «Геотерм» и при поддержке РФФИ по проекту 03-05-65373.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ. Новосибирск, 1981, 247 с.
2. А.В.Кирюхин, В.Л. Леонов, И. Б. Словоцов, 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, 2004 (сдана в печать)

3. А.В. Кирюхин, Т. Ху, К. Pruess, J.Apps, И. Словцов, М. Пузанков Моделирование термогидродинамических - химических процессов в геотермальных резервуарах // Труды международной конференции «Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии», Томск, 2004, с. 255-259.
4. Рослый Г.А. Основные результаты эксплуатационного бурения / Отчет по контракту №589/35806573/9-0011/00. 2003. 35 с.
5. 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.
6. Pruess, K., 1991. TOUGH2: A general numerical simulator for multiphase fluid and heat flow. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-29400, Berkeley, California, 37 p.
7. 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.
8. 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
9. 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.

9. White, S. P., 1995. Multiphase non-isothermal transport of systems of reacting chemicals. *Water Resour. Res.*, 31, 1761-1772.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

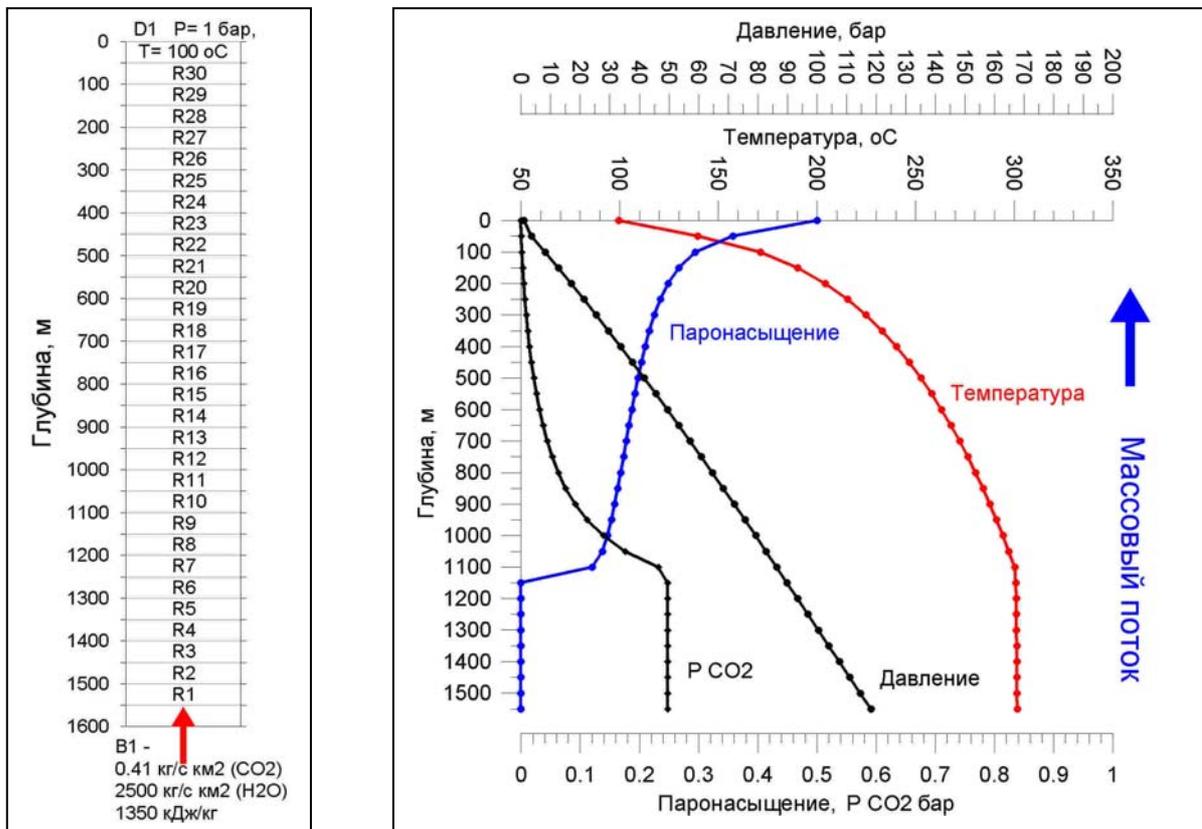


Рис. 1 Геометрия области моделирования (слева) и распределения термогидродинамических параметров вдоль области моделирования (справа).

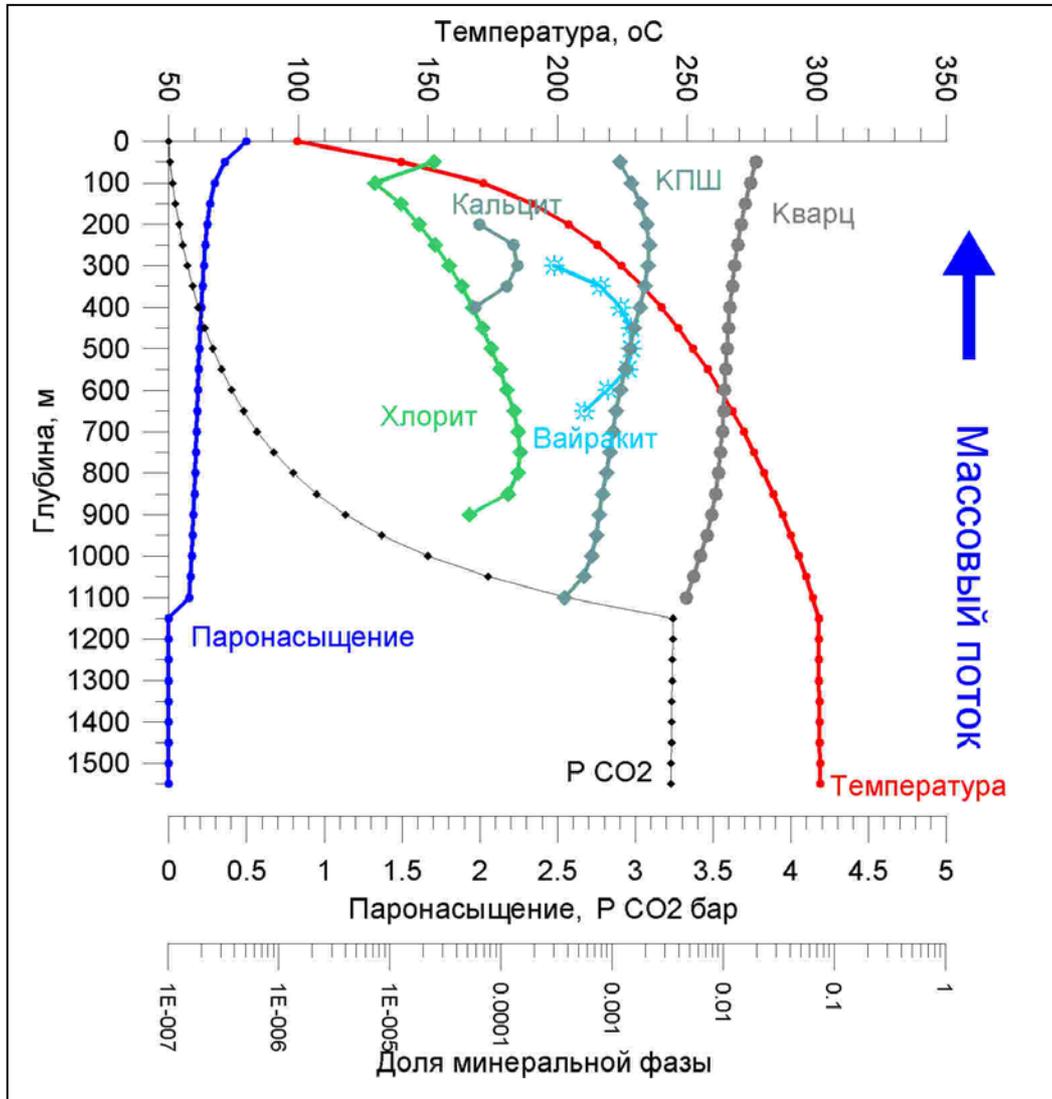


Рис.2 Результаты моделирования (TOUGHREACT) изменения доли минеральных фаз вдоль восходящего потока в андезитах спустя 1000 лет после начала фильтрации (химический состав теплоносителя принят соответствующим исходному геотермальному флюиду Мутновского геотермального месторождения, рассчитанному по данным опробования и анализа химического и газового состава скв. 029W в 1999 г (Kiryukhin et al, 2004).

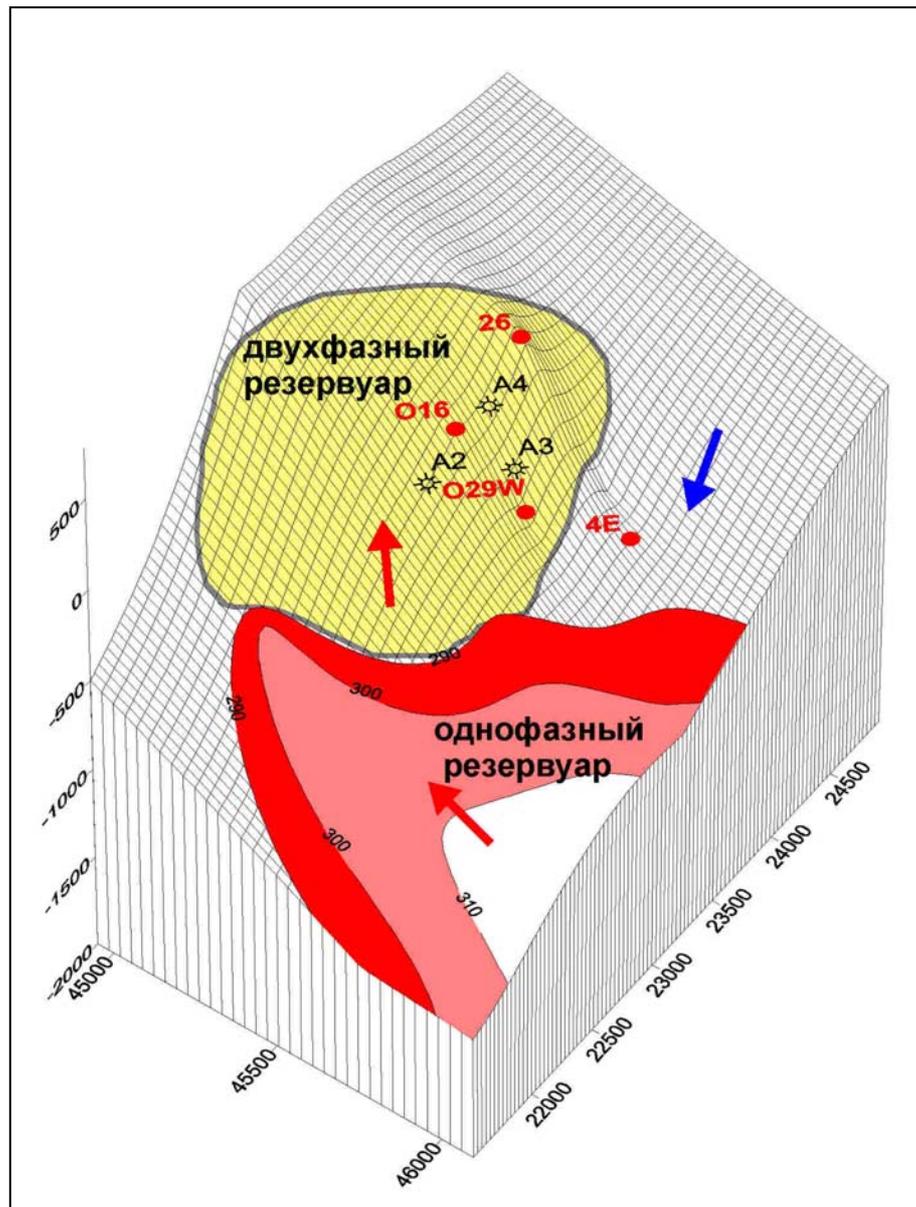


Рис. 3. Блок-схема кровли продуктивной зоны “Основная” ССВ простирания и ЮВВ падения 60° , показано распределение температур и фазового состояния теплоносителя в пределах зоны, точки ее вскрытия продуктивными скважинами (серые кружки), проекции (на кровлю) точек отбора образцов при бурении из скважин 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.

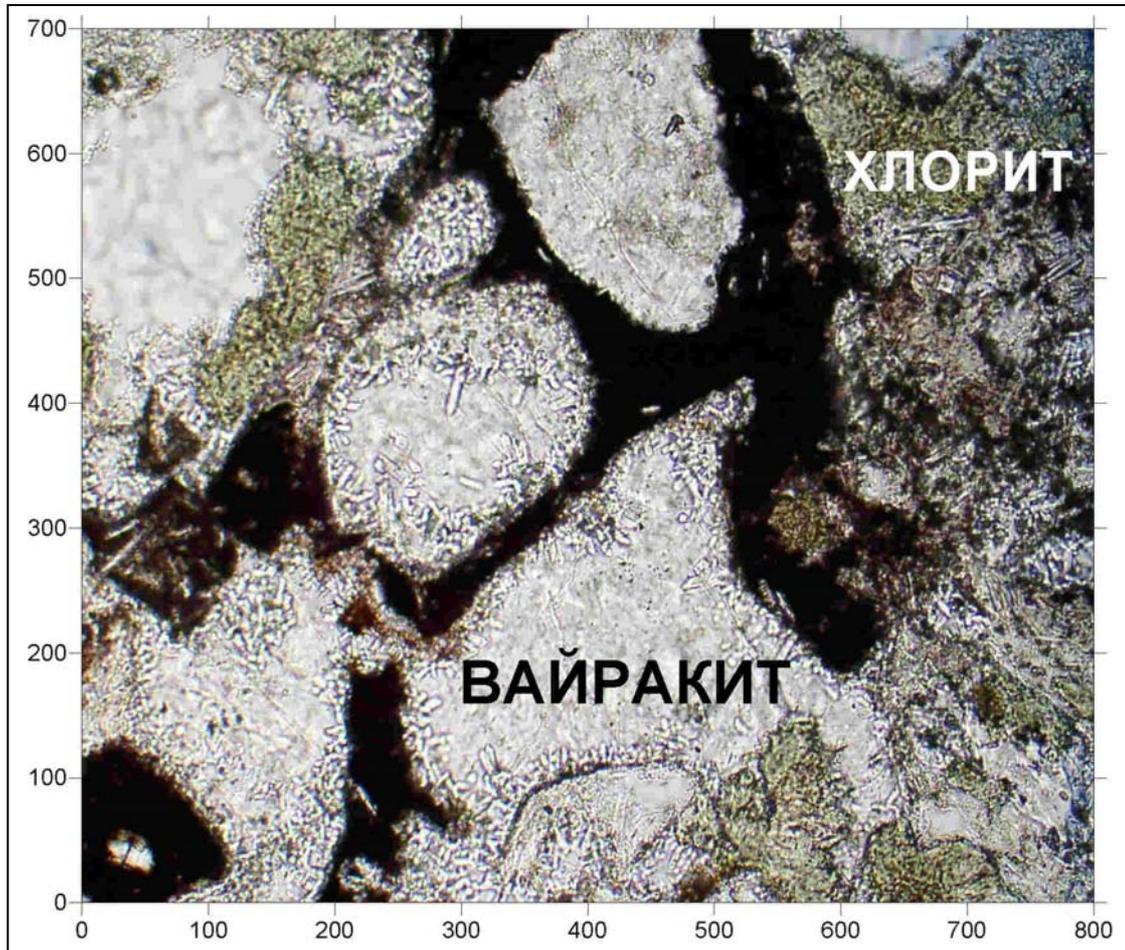


Рис. 4 Фотография шлифа, выполненного из образца извлеченного из продуктивной зоны на глубине 894 м (скважина А-3, Мутновское геотермальное месторождение, 2002): полное замещение вторичными гидротермальными минералами (хлорит, вайрацит, лейкоксен; в мелких эвгедральных кристалликах - кварц). Масштаб снимков в мкм.

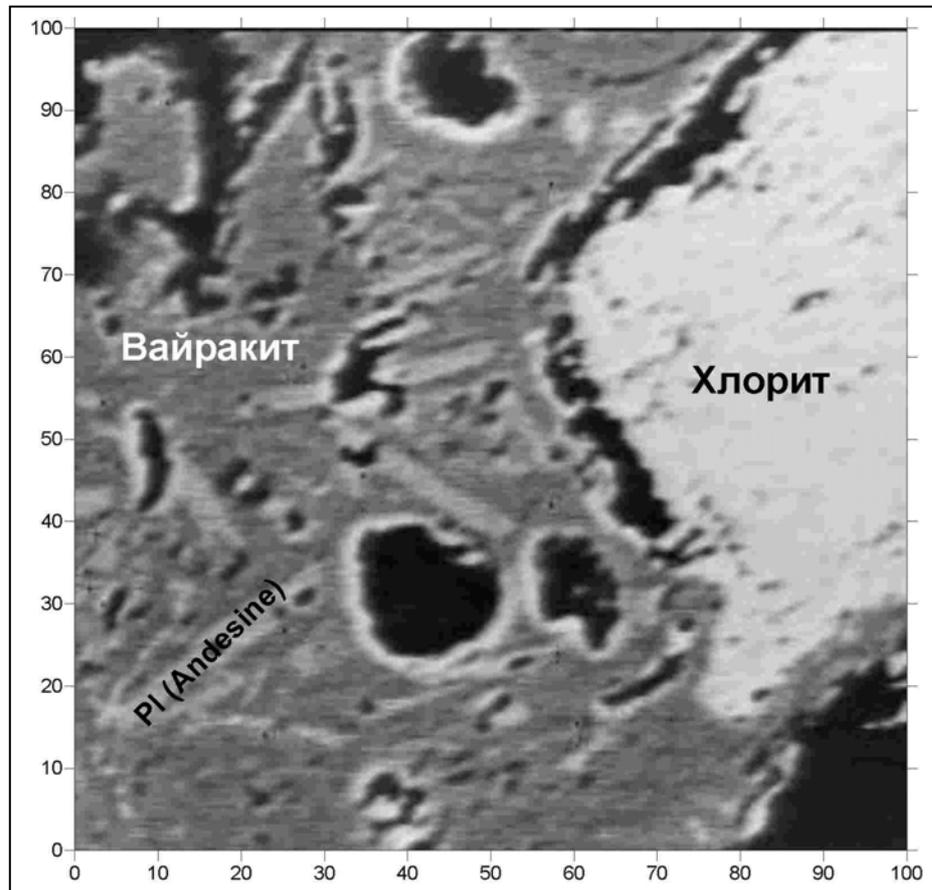


Рис. 5 Фотография анализируемых минеральных фаз, выполненная на микроанализаторе в ИВиС ДВО РАН. Масштаб в мкм. Образец извлечен из продуктивной зоны на глубине 894 м (скважина А-3, Мутновское геотермальное месторождение, 2002)

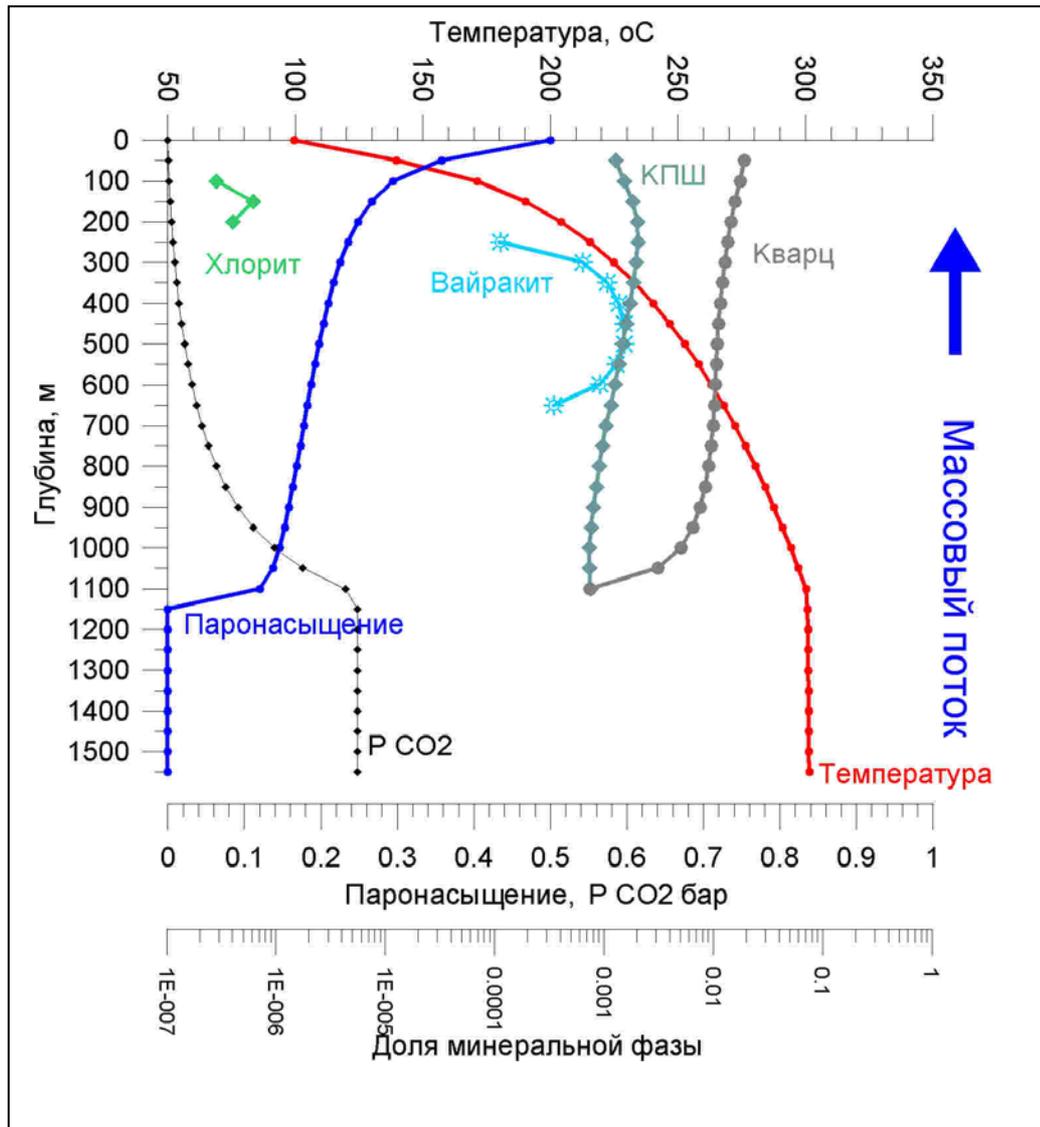


Рис.6 Результаты моделирования (TOUGHREACT) изменения доли минеральных фаз вдоль восходящего потока в андезитах спустя 1000 лет после начала фильтрации (химический состав теплоносителя принят соответствующим исходному геотермальному флюиду Мутновского геотермального месторождения, рассчитанному по уточненным данным опробования и анализа химического и газового состава скв. 029W в 1999-2004 гг.

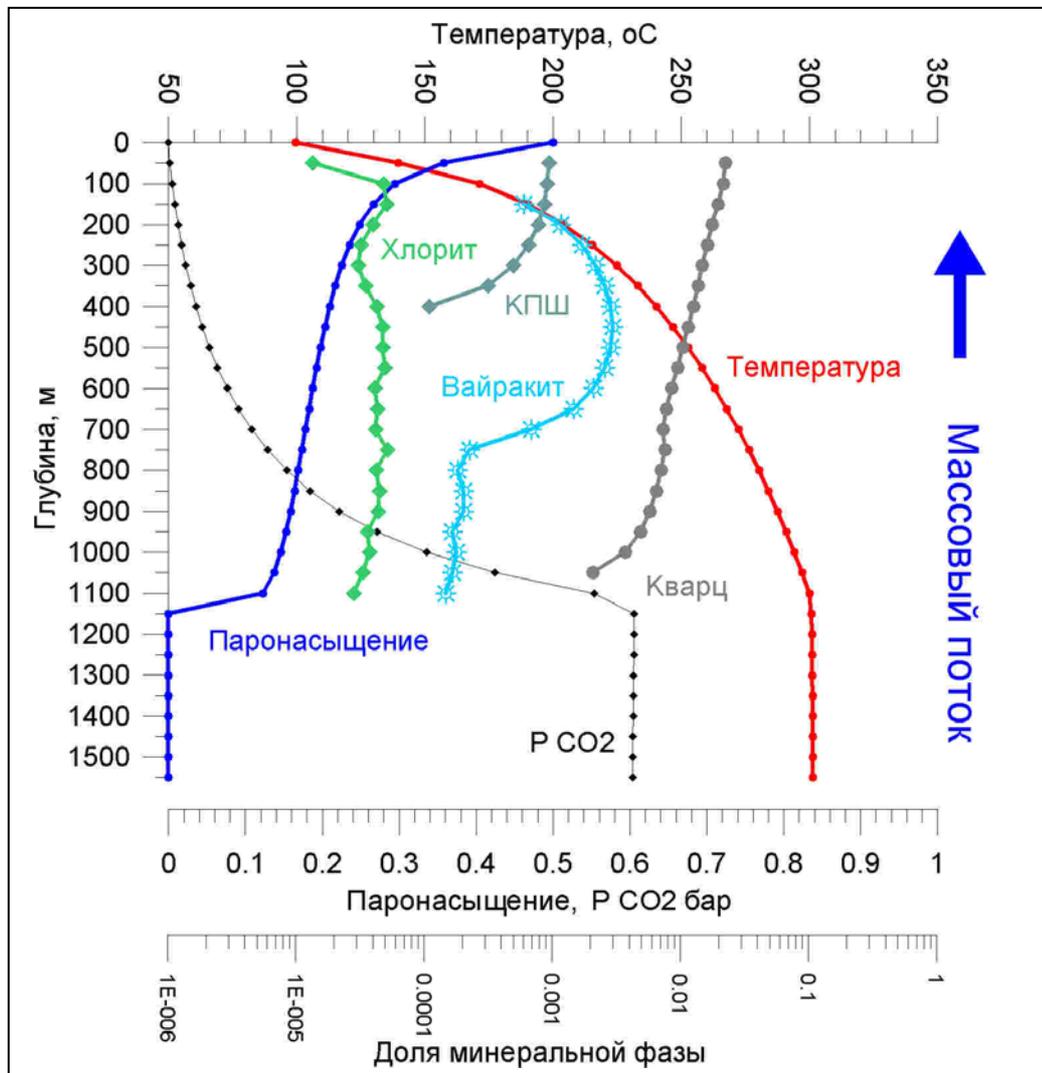


Рис.7 Результаты моделирования (TOUGHREACT) изменения доли минеральных фаз вдоль восходящего потока в андезитах спустя 1000 лет после начала фильтрации (химический состав теплоносителя принят соответствующим исходному геотермальному флюиду Мутновского геотермального месторождения, рассчитанному по уточненным 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. Результаты минералого-петрографического и рентгеноструктурного анализа образцов горных пород из скважин А2 –А4 Мутновского геотермального месторождения.

Скважина	Глубина, м	Ассоциирующие вторичные гидротермальные минералы Краткая характеристика изменений	Примечание
А2	1106	$\pm(\text{Zeo})\pm\text{Cal}\pm\text{Prh}+\text{Lx}+\text{Ep}+(\text{Ad})+\text{Ab}+\text{Qtz}+(\text{Chl}^*)$ Постепенные изменения с образованием преимущественно Chl завершались локальным дроблением породы; секущие микропрожилки сложены агрегатами Ad+Ab+Qtz и мелкими зернами Zeo, Cal, Prh и Ep	Керн из скважины, андезибазальт
А3	894	$\pm\text{Hem}+\text{Lx}+\text{Ep}\pm\text{Prh}\pm\text{Ad}+\text{Ab}^*+\text{Qtz}^*+(\text{Wai}^*)+(\text{Chl}^*)$ Порода в значительной степени перекристаллизована. Резко преобладают хлориты и вайрацит.	Образец поперечником ~15см; выброшен на поверхность из продуктивной зоны, шлак андезибазальта
А4-1, 2	115-125	$\text{Py}+\text{Ep}+\text{Cal}+\text{Zeo}+\text{Chl}-\text{Sm}+\text{Ab}+\text{Qtz}^*+\text{Chl}^*$ Изменения неравномерные. Главными минералами являются Chl и Qtz. Zeo и Cal слагают тонкие, прерывистые микропрожилки.	Образец поперечником ~10 см; выброшен на поверхность из продуктивной зоны, андезитовый туф
А4-3	520-580	$\pm\text{Cal}+\text{Sf}+\text{Py}+\text{Ep}+\text{Ab}+\text{Qtz}^*+\text{Ad}\pm\text{Prh}+(\text{Wai}^*)+(\text{Chl}^*)$ Преобладает хлорит. Гидротермальные изменения завершались образованием вкраплений и микропрожилков, сложенных Wai, Prh, Ad и Qtz.	Обломки поперечником до 1-2 см, выброшены на поверхность из продуктивной зоны, андезит

Примечание. Py - пирит; Lx - лейкоксен; Ep – эпидот; Cal – кальцит; Prh – пренит; Ad – адуляр; Ab – альбит; Qtz – кварц; Chl – хлорит; Wai – вайрацит; Zeo – неустановленный цеолит; Chl-Sm – смешаннослойный хлорит-сметит; Hem - гематит. Звездочкой помечены символы минералов, диагностированных рентгено-структурным методом, для заключенных в скобки – определялся состав на микроанализаторе «Самебах» ИВиС ДВО РАН (см. также табл. 1), присутствие остальных подтверждено только оптическим методом. По образцам из каждого интервала глубин просмотрено не менее 8 шлифов; ± - означает присутствие данного минерала не во всех шлифах. Цеолит, слагающий микропрожилки в андезитовых туфах из выбросов с интервала глубин 115-125 м скв. А4, по оптическим свойствам предварительно определен как клиноптилолит(?). Минералогопетрографическое изучение шлифов осуществлялось с использованием микроскопа AxioLab (М.Ю. Пузанков), рентгеновского диффрактометра ДРОН-3 (М.Е. Зеленский), микрозондового анализатора "САМЕВАХ" (С.В. Москалева, В.М. Чубаров)

Таблица 2. Представительные составы (мас.%) вторичных гидротермальных минералов горных пород из скважин А2 –А4 Мутновского геотермального месторождения.

Минерал	Chl	Chl	Chl	Chl	Chl	Wai	Wai	Wai	Wai	Wai	Wai
NN/скважина	24/A2	19/A3	20/A3	4/A4	7/A4	4/A3	17/A3	22/A3	10/A4	14/A4	45/A4
SiO ₂	31.89	28.54	28.07	27.78	27.74	59.50	57.12	55.90	57.05	54.68	54.68
TiO ₂	0	0.04	0.09	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0.04
Al ₂ O ₃	17.11	19.14	19.78	19.91	20.13	19.80	22.15	21.67	21.26	22.28	22.43
FeO	17.35	25.37	24.77	24.61	25.4	0.22	0.31	0.25	1.01	0.87	0.45
MgO	21.03	14.23	14.06	14.91	14.37	0.02	0	0.03	0.30	0.06	0.19
CaO	0.17	0.11	0.22	0.12	0.06	10.74	10.66	10.86	10.43	11.43	11.71
Na ₂ O	0.20	0	0	0	0.01	1.72	1.61	1.78	0.61	0.63	0.62
K ₂ O	0.10	0.06	0.04	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.23	0.41	0.23
MnO	0.29	1.56	1.55	1.35	1.10	0	0	0	0	0	0
H ₂ O**	12.03	11.55	11.51	11.54	11.53	8.36	8.32	8.18	8.23	8.12	8.14
Сумма	100.17	100.60	100.09	100.25	100.38	100.41	100.21	98.70	99.12	98.48	98.49

Примечание. Составы минералов определялся на микроанализаторе «Самбах» ИВиС ДВО РАН; значения для H₂O** - расчетные. Расшифровку символов минералов см. в табл.

Таблица 3. Газовый состав эксплуатационных скважин Мутновского геотермального месторождения (опробование осуществлялось А.В. Кирюхиным и А.Ю. Поляковым, анализ проводился В.Н. Шапарём и И.Ф. Тимофеевой в ЦХЛ ИВ ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904)).

Скважина	Дата	Весовое газосодержание %									В паровой фазе при давлении 6 бар
		CO ₂	H ₂ S	He	H ₂	Ar	N ₂	CH ₄	CO	O ₂	
O16	4 янв 1999	84.31	8.28	0.000010	0.13	0.12	5.77	0.08	0.00	1.31	0.251
26	5 фев 1999	79.43	7.17	0.000035	0.18	0.21	10.73	0.14	0.00	2.13	0.161
E4	5 ноя 1998	74.50	13.36	0.000183	0.03	0.27	10.73	0.06	0.00	1.03	0.025
O29W	19 фев 1999	77.39	15.86	0.000024	0.11	0.10	5.18	0.05	0.00	1.15	0.009
Среднее за 1999 г		78.91	11.17	0.000063	0.11	0.17	8.11	0.08	0.00	1.41	0.11
O16	22 авг 2003	85.52	4.11	0.000028	0.66	0.18	8.12	1.06	0.00	0.35	0.257
26	22 авг 2003	62.08	6.37	0.000074	1.44	0.69	26.41	1.93	0.00	1.09	0.093
E4	24 сент 2003	63.68	2.79	0.000000	0.00	0.51	26.19	0.02	0.00	6.81	0.104
O29W	24 сент 2003	57.75	6.42	0.000000	0.01	0.88	22.44	0.06	0.00	12.43	0.091
Среднее за 2003 г		67.26	4.92	0.000025	0.53	0.56	20.79	0.77	0.00	5.17	0.14
O16	3 авг 2004	76.36	6.34	0.000041	0.06	0.22	13.63	0.04	0.00	3.36	0.170
26	3 авг 2004	72.69	4.32	0.000056	0.09	0.10	18.50	0.08	0.00	4.23	0.173
E4	17 авг 2004	63.09	4.02	0.000000	0.00	0.42	25.69	0.00	0.00	6.78	0.109
O29W	3 авг 2004	65.02	6.86	0.000000	0.02	0.35	21.94	0.00	0.00	5.81	0.126
O55	21 сент 2004	42.30	10.34	0.000000	0.00	0.59	37.6	0.04	0.00	9.13	0.083
O37	21 сент 2004	54.06	12.44	0.000000	0.04	0.44	26.1	0.31	0.00	6.62	0.114
O48	21 сент 2004	66.88	5.87	0.000000	0.00	0.36	21.4	0.00	0.00	5.45	0.145
Среднее за 2004 г		69.29	5.38	0.000024	0.04	0.27	19.94	0.03	0.00	5.04	0.14

Примечание: среднее рассчитывается по скв. 016, 26, E4 и 029W.

Таблица 5. Исходные данные для ТНС-моделирования: химический состав пересчитанный на исходный теплоноситель (в мг/л), вскрываемый скважинами O16, 26, 4E и O29W (по данным опробования в 1999 и в 2003 гг). Доля паровой фазы, принятая при расчетах показана в первой строке таблицы. Индекс «s» для значений pH означает сепарат, что требует корректировки с учетом потери газовой фазы CO₂ (для pH=9.04 (скв. O29W) скорректированное значение pH=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			
	O16	26	4E	O29W	O16	26	4E	O29W
Q _s	1	1	0.2646	0.2396	1	1	0.2166	0.2396
pH	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
Ca ²⁺	0.4	0.0	2.2	1.4	0.3	0.1	2.8	2.0
Fe ²⁺³⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.3	0.4
Al ³⁺	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
SO ₄ ²⁻	3.8	2.9	184.5	85.3	1.4	1.9	166.3	106.7
HCO ₃ ⁻	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
SiO ₂	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

Таблица 4. Химический состав конденсата (с) и сепарата (s) по данным опробования в 1999-2003 гг. эксплуатационных скважин участка Дачный Мутновского геотермального месторождения (в ppm).

Сква- жина	Дата, д., мес., г.	pH	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Li ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺³⁺ Сумма -рное	Al ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	F ⁻	B	SiO ₂	As	
4E c	5.11.98	4.93	3.1	0.02	0.07	<0.01	0.047	0.004	0.014	0.008	<0.7	3.3	6.1		0.04	0.19	3.6	0.04	
4E s	5.11.98	9.06	0.3	276.5	53.5	1.42	3	0.003	0.01	1.36	244.9	249.7	81.1	6.3	4.24	17.7	772.1	3.3	
016 c	4.1.99	4.78	9.5	0.35	0.1	<0.01	0.4	0.003	0.03	0.028	0.71	3.84	28.06		0.02	0.43	3.7	0.036	
016 s	4.01.99	9.2	1	181	25.7	0.1	8.8	0.033	0.56	1.55	36.17	297.8	93.3	9.9	0.75	19.9	476.3	1.25	
26 c	5.02.99	5	6.2	0.02	0.03						<0.35	2.88	17.1		0.02		1.4	0.009	
26 s	5.02.99	7.89	2	2.48	0.42	0.001	3	0.028			<0.7	5.76	15.8		0.14	5.5	29.4	0.01	
029W c	19.02.99	5.3	5.2	2.26	0.55	0.016		0.01			3.9	1.92	18.3		0.11	2.3	7.6	0.059	
029W s	19.02.99	9.04	0.3	226	43	1.41	1.94	0.009			267.7	115.3	72	4.8	2.82	28.5	980.6	6.03	
4E c	24.09.03	4.86	4.5	0.65	<0.1	0.003	0.08	<0.003	0.47	<0.3	1.4	3.4	11.0		0.08	0.22	3.8	<0.1	
4E s	24.09.03	8.26	1.8	220.6	37.1	1.1	3.54	<0.003	0.19	<0.96	200	211.3	78.1		2.9	14.5	189.4	3.54	
016 c	22.08.03	4.86	7.8	0.025	<0.1	<0.01	0.25	0.0085	0.69	<0.3	0.7	1.4	24.4		0.09	0.15	<1.0	<0.1	
016 s	22.08.03	4.91	6.0	24.4	3.4	0.019	0.56	0.015	0.4	0.23	5.7	45.1	30.5		0.2	3.9	9.4	0.12	
26 c	22.08.03	4.81	9.0	0.13	<0.1	<0.01	0.13	0.018	0.15	<0.3	6.4	1.9	18.3		0.09	0.09	<1.0	<0.1	
26 s	22.08.03	4.91	6.0	1.5	0.55	<0.01	0.45	0.036	6.07	<0.3	<0.7	1.4	25.6		0.1	0.31	9.4	<0.1	
029W c	24.09.03	4.81	6.0	0.13	<0.1	<0.01		0.009	0.5	<0.3	0.7	2.9	15.9		0.1	0.13	<1.0	<0.1	
029W s	24.09.03	8.74	1.8	179.6	32.9	1.0	2.75	<0.003	0.34	0.92	219.8	144.1	53.7		2.9	16.5	190.4	4.61	
5E c	24.09.03	4.47	4.2	<0.46	<0.1	<0.01	0.08	<0.003	0.11	<0.3	<0.7	1.9	11.0		0.1	0.07	<1.0	<0.1	
5E s	24.09.03	7.71	1.3	222.1	36.7	1.15	2.9	<0.003	0.17	0.98	191.5	259.4	30.5		4.3	11.9	189.4	2.43	

Примечание. Макроэлементные химические анализы выполнены в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН (аттестат аккредитации RU.0001.511904). Аналитики: В.К. Марынова, С.В. Сергеева, а также в ОИГМ СО РАН (г. Новосибирск).