

На правах рукописи



Рычкова Татьяна Васильевна

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ (НА ПРИМЕРЕ
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ КАМЧАТКИ)**

Специальность 25.00.07 – Гидрогеология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Петропавловск – Камчатский, 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник
Алексей Владимирович Кирюхин

Официальные оппоненты:

Копылова Галина Николаевна, доктор геолого-минералогических наук, доцент, Камчатский филиал Государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской Академии наук», г. Петропавловск-Камчатский

Аузина Лариса Ивановна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «14» мая 2020 г. в 10-00 ч. на заседании диссертационного совета Д 003.022.01 при Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института земной коры СО РАН и на сайте: <http://crust.ru/images/upload/newsfull184/2106.pdf>

Отзывы об автореферате в 2-х экземплярах, заверенные подписью и печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета. Тел: (3952) 426133; e-mail: akulova@crust.irk.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.г.-м.н.



Акулова Варвара Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В данной работе под природными гейзерами понимаются циклически извергающиеся кипящие термоминеральные источники. Гейзеры являются уникальными гидрогеологическими объектами, но в гидрогеологической учебной литературе не обсуждаются условия их формирования и функционирования, что подтверждает необходимость продолжения их углубленного исследования и популяризации полученных знаний. Наблюдения за гейзерами можно использовать для более глубокого понимания условий формирования высокотемпературных гидротермальных систем (далее ГТС) и связанных с этим катастрофических процессов. Одно из крупнейших гейзерных полей Земли находится в Долине Гейзеров на полуострове Камчатка является объектом международного туристско-познавательного значения. Вместе с тем, гидротермальная система Долины Гейзеров характеризуется высокой оползневой опасностью, что необходимо учитывать при планировании и проведении туристских маршрутов. Выявление причин изменения режима гейзеров и /или прекращение их функционирования в результате природных катастроф 2007, 2014 гг. требует глубокого научного анализа. Влияние новообразованных Подпрудных озер на Гейзерную ГТС можно рассматривать как аналог процессов реинжекции при эксплуатации высокотемпературных геотермальных месторождений. В результате произошедших в Долине Гейзеров катастроф, природа предоставила уникальную возможность наблюдать и изучать широкий спектр современных геологических процессов [Сугробов, 2009].

Степень разработанности исследуемого направления

Фундаментальные основы механизма функционирования гейзеров рассмотрены в публикациях российских ученых: С.П. Крашенинникова, Б.И. Пийпа, Т.И. Устиновой, С.И. Набоко, В.В. Аверьева, В.И. Белоусова, В.И. Кононова, В.Н. Виноградова, Г.С. Штейнберга, В.А. Дрознина, В.М. Сугрובה, Н.Г. Сугробовой, Г.А. Карпова, В.Л. Леонова, А.В. Леонова, А.Б. Белоусова, А.В. Кирюхина, и многих других. Исследованиям природных гейзеров мира посвящены также многочисленные научные работы зарубежных авторов, среди которых следует назвать имена S. Hurwitz, M. Manga, S. Ingebritsen, S. Rojstaczer, J. Rinehard, R. Hutchinson, S. Kieffer.

В результате проведенных исследований выявлены характеристики цикличности в работе гейзеров и предложены различные модели механизма циклических извержений природных гейзеров, в том числе: (1) камерная модель (или модель ловушки пузырьков) [J. Rinehard, 1980, Karlstrom et al., 2013; Vandemeulebrouck et al., 2014]; (2) скважинная модель, предложенная В.В. Аверьевым и А.С. Нехорошевым и получившая количественное выражение в работах [Дрознин, 1980, 1982] и [Ingebritsen S.E., Rojstaczer S.A., 1996]; (3) модель смещения, теоретически обоснованная Штейнбергом Г.С., Мержановым А.С., Штейнбергом А.С. (1981), и воспроизведенная N.M. Saptadji с использованием численного моделирования в 1995 г. Но ни одна из указанных моделей не объясняет, почему температуры в канале гейзера ниже температуры кипения при соответствующем давлении.

Прорыв в понимании функционирования гейзеров наметился после применения термогидродинамических моделей, учитывающих наличие неконденсирующихся газов. Механизм CO₂-газлифта для объяснения извержения гейзера Великан предложен в статье [Kiryukhin, 2016]. Параллельно вопрос о роли растворенных газов в механизме извержений гейзеров также обсуждался в работе [Hurwitz et al., 2016].

Целью работы является исследование механизмов формирования и функционирования гейзеров, в том числе в изменяющихся природных и техногенных условиях.

Основные задачи исследования:

1. Термогидродинамическое-химическое моделирование изменения фильтрационно-емкостных свойств пород риолитового состава при проточной фильтрации термальной воды с химическим составом, соответствующим составу воды гейзеров и условий формирования проницаемого гейзерного канала в вулканогенных породах риолитового состава.

2. Моделирование термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера.

3. Выявление динамики цикличности и содержания хлор-иона в воде режимных гейзеров Великана, Большого, режимных источников Долины Гейзеров и гейзера Шаман (Мутный) в кальдере Узон. Анализ динамики изменения скрытой разгрузки ГТС Долины Гейзеров, проявляющейся в исчезновении старых и появлении новых гейзеров и горячих источников.

4. TOUGH2-моделирование влияния двух Подпрудных озер (Подпрудного озера-1, появившегося в результате оползня 3.06.2007 г. и Подпрудного озера-2, возникшего в результате схода селя 03.01.2014 г.) на режим гейзеров и изменение их термодинамических и гидрохимических параметров.

Методы исследования включают: 1) сравнительный гидрогеологический анализ гидротермальных резервуаров, вмещающих активные гейзеры и палеогейзеры Камчатки и мира, составление их гидрогеологических карт и разрезов; 2) термогидродинамическое-химическое TOUGHREACT и TOUGH2-EOS2 моделирование; 3) проведение и анализ данных режимных наблюдений за интервалом между извержениями основных гейзеров Узон-Гейзерной кальдеры, динамикой суммарной разгрузки ГТС Долины Гейзеров, химическим, газовым и изотопным составом основных гейзеров; 4) термогидродинамическое и трассерное (хлор-ион) TOUGH2-моделирование влияния Подпрудных озер, сформировавшихся в 2007 и 2014 гг., на термогидродинамический режим ГТС Долины Гейзеров.

Для режимных наблюдений использованы автономные логгеры НОВО (США), обеспечивающие получение рядов данных с заданным интервалом времени по температуре, атмосферному давлению и электропроводности подземных вод. Температурные логгеры U12-015 применялись для измерения температур в каналах гейзеров и интервала между извержениями гейзеров; логгеры давления U20-001-04 - для регистрации атмосферного давления и оценки расходов водотоков и уровня Подпрудного озера-1; логгеры электропроводности U24-001 - для оценки изменения концентрации Cl-иона и динамики изменения величины разгрузки ГТС.

При моделировании применялось лицензионное программное обеспечение TOUGH2 v.2, TOUGHREACT v.1, их графический интерфейс PetraSim v. 5.2, а также программы Surfer v. 13, Didger v. 5, Grapher v. 9, MapViewer v. 7. TOUGH2 [Pruess et al, 1999] – вычислительная программа многоцелевого назначения для моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в трещино-пористой среде. Программа разрабатывается с 1991 в Лоуренсовской Беркелевской Национальной Лаборатории (ЛБНЛ, США). Семейство программ TOUGH2 является апробированным инструментом для моделирования тепломассопереноса в высокотемпературных геотермальных резервуарах и прогноза их эксплуатации. TOUGH2 используется для анализа моделей гидрогеологических и гидротермальных процессов, при промышленной эксплуатации геотермальных месторождений и на объектах захоронения промышленных и ядерных

отходов. Программа TOUGHREACT является расширением TOUGH2, служит для анализа процессов тепломассопереноса с учетом химического взаимодействия в системе вода - горная порода.

Научная новизна. 1. С использованием многовариантного TOUGHREACT-моделирования показана возможность формирования проницаемого канала в риолитовых туфах в результате химического взаимодействия термальная вода-порода в режиме проточной восходящей фильтрации.

2. Впервые выполнено TOUGH2-EOS2 многовариантное моделирование термогидродинамического режима истечения газонасыщенного флюида в канале гейзера.

3. Выявлены закономерности изменения циклических характеристик гейзеров и суммарной разгрузки гидротерм в сезонном гидрологическом цикле Долины Гейзеров.

4. С использованием TOUGH2-моделирования выполнена оценка гидродинамического влияния и показано отсутствие существенного теплового влияния Подпрудных озер 2007 и 2014 гг. на ГТС Долины Гейзеров в целом.

Основные защищаемые положения:

1. Установлены условия формирования гейзеров в части обоснования модели формирования проницаемого самоизолирующегося канала в артезианско-вулканогенном бассейне, сложенном риолитовыми туфами, и выявления диапазона концентраций CO_2 , необходимых для обеспечения кипения по всему каналу.

2. Режим функционирования гейзеров чувствителен к изменениям локальных гидрогеологических и гидрологических условий: прямая инфильтрация из поверхностных водотоков приводит к прекращению функционирования гейзеров на дне образовавшихся водоемов, но в то же время к повышению частоты извержений гейзеров с каналами разгрузки в надводных условиях. Паводковое повышение давления в поверхностных водотоках и резервуарах грунтовых вод приводит к «подпору» ГТС и временному уменьшению ее суммарной разгрузки.

3. Гидрогеологический эффект Подпрудных озер, образовавшихся в результате обвала-оползня 2007 г. и схода селя в 2014 г. в Долине Гейзеров, выражается в повышении давления в Гейзерном резервуаре и соответствующем увеличении частоты извержений гейзеров при ограниченном термическом и химическом воздействии.

Теоретическая и практическая значимость работы. Изучение режима поверхностных термопроявлений, в том числе гейзеров направлено на уточнение условий формирования ГТС: изменения проницаемости геотермального резервуара, условий его водного питания, циклической разгрузки, источников тепла, роли верхнего водоупора. Результаты моделирования влияния новообразованных Подпрудных озер в Долине Гейзеров на термодинамические и гидрогеохимические параметры гидротермальных резервуаров могут быть использованы при прогнозе эксплуатации высокотемпературных геотермальных месторождений в режиме реинжекции. Данные по гидрогеологическому мониторингу могут быть применимы для среднесрочного (3-4 мес.) прогноза оползневых процессов в Долине Гейзеров при условии осуществления гидрогеологических маршрутных наблюдений в бассейне р. Гейзерной не реже 1 раза в год. Инжиниринг гейзеров (создание искусственных гейзеров) в зонах туризма при соблюдении условий природоохранного законодательства.

Личный вклад автора. 1. В соавторстве с руководителем диссертационной работы составлены схематическая геолого-структурная карта Паужетской вулканотектонической депрессии и концептуальная модель условий формирования Паужетского геотермального месторождения (масштаб 1:100000); гидрогеологическая карта Паужетского геотермального месторождения (масштаб 1:10000); гидрогеологическая карта-схема бассейна р. Гейзерной (на основе геологической схемы В.Л. Леонова,

результатов маршрутных гидрогеологических исследований и вертолетной ИК съемки Долины Гейзеров, выполненной в августе 2010 г.) Автором построены геологические, гидрогеологические разрезы и созданы цифровые карты.

2. Во время полевых работ в Долине Гейзеров (2007-2008, 2019 гг.) автором выполнены рекогносцировочные маршруты, установлены гидрологические створы на р. Гейзерной и рассчитан расход реки; отобраны пробы воды из термальных источников; обработаны и проанализированы инструментальные данные, полученные в результате гидрогеологического мониторинга.

3. Автором проанализирована зависимость интервала между извержениями (параметр ИВЕ, interval between eruptions) гейзера Великан от атмосферного давления, сейсмических событий, метеоусловий и зависимость ИВЕ гейзеров Большой и Великан от уровня воды в Подпрудном озере-1.

4. При активном участии автора собрана и протестирована концептуальная термогидродинамическая 3D модель естественного состояния ГТС Долины Гейзеров и проанализированы результаты моделирования.

5. Автором собраны и протестированы профильные TOUGH2-модели инфильтрации холодной воды из Подпрудного озера-1 и Подпрудного озера-2 в гидротермальный резервуар Долины Гейзеров и проанализированы результаты моделирования.

6. Автором собраны термогидродинамическая-химическая TOUGHREACT-EOS2 модель формирования гейзерного канала и TOUGH2 – EOS2 модель термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера; проанализированы результаты многовариантного моделирования.

Степень достоверности и апробация результатов исследований. Для создания моделей использованы цифровые карты района Долины Гейзеров - топографическая (масштаба 1:2000) и геологическая (масштаба 1:10000); фактические данные мониторинга, проведенного в Долине Гейзеров в период с 2007 по 2015 гг.; координаты горячих источников и гейзеров, полученные по GPS-навигатору; лицензионное программное обеспечение TOUGH2 v.2, TOUGHREACT v.1, PetraSim v. 5.2, а также программы Surfer v. 13, Didger v. 5, Grapher v. 9, MapViewer v. 7. Для режимных гидрогеологических наблюдений в Долине Гейзеров использовались автономные логгеры НОВО, обеспечивающие получение непрерывных рядов данных по температуре, атмосферному давлению и электропроводности подземных вод. Химические, газовые и изотопные анализы отобранных проб флюида проводились в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН, ГИН РАН, ВСЕГИНГЕО, ИГЕМ РАН, ИВиС ДВО РАН.

Результаты работ автора и в соавторстве с научным руководителем диссертационной работы по теме исследования представлены статьями в рецензируемых журналах, в отчетах ИВиС ДВО РАН и РФФИ, на конференциях (в том числе международных): TOUGH Symposium (Berkeley, CA, LBNL, 15-17 May, 2006); International Mineral Extraction from Brines Conference 2006 (Tucson, Arizona, Sept. 6-8, 2006); Geothermal Resources Council (San-Diego, CA Sept. 10-13, 2006); Международный Симпозиум по проблемам эксплозивного вулканизма (П.-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 25-31 марта 2006 г.); XVIII и XIX Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 19-23 июня 2006 г.; Тюмень, 2009 г.); Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University (Stanford, California, January 22-24, 2007); Международный симпозиум «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы» (С.-Петербург, 2007 г.); AGU Conference (San-Francisco, 2008); конференции, посвященные Дню Вулканолога 30 марта 2009, 2013, 2017, 2019 гг. (П.-Камчатский, 2009, 2013, 2017, 2019 гг.); IV Всероссийский симпозиум по вулканологии и

палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика» (П.-Камчатский, 2009 г.); World Geothermal Congress (Bali, Indonesia, 2010; Melbourne, Australia, 2015); 13-th Int. Conf. Water-Rock Interaction, Guanajuato (Mexico, 2010); Третья, четвертая, шестая научно-технические конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (П.-Камчатский, ГС РАН 2011, 2013, ФИЦ ЕГС РАН, 2017); II МНМК «Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии» (Санкт-Петербург, 2017); II Международная научная конференция по проблемам геотермальной вулканологии (GVW - 2018 и 2019) (П.-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2018, 2019 гг.).

Результаты исследований автора опубликованы в 24 публикациях, из них 5 статей - в журналах из перечня ВАК (Вулканология и сейсмология; Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология; Applied Geochemistry Journal).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы общим объемом 165 страниц, включающем **66** рисунков и **26** таблиц. В конце каждой главы приведены наиболее значимые полученные результаты. Общий список использованной литературы состоит из **124** наименований. Полный текст диссертации представлен в диссертационном деле Т.В. Рычковой <http://crust.ru/images/upload/newsfull184/2106.pdf>

Благодарности. Диссертационные исследования выполнялись под руководством доктора г.-м.н., профессора А.В. Кирюхина в ИВиС ДВО РАН. Автор благодарен научному руководителю Алексею Владимировичу Кирюхину за постановку задач и помощь в осуществлении анализа полученных результатов. Полезные советы и ценные критические замечания на этапе подготовки и обсуждения работы автор получила от к.т.н. В.А. Дрозина, д.г.-м.н. В.М. Округина, д.г.-м.н. С.Н. Рычагова, к.г.-м.н. О.А. Гириной, к.г.-м.н. И.Ф. Делеменя, к.х.н. А.В. Сергеевой. Автор также выражает признательность сотрудникам лаборатории тепломассопереноса Усачевой О.О., Воронину П. О., Журавлеву Н.Б. Полякову А.Ю., Черных Е.В. за конструктивную помощь.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. Установлены условия формирования гейзеров в части обоснования модели формирования проницаемого самоизолирующегося канала в артезианско-вулканогенном бассейне, сложенном риолитовыми туфами, и выявления диапазона концентраций CO_2 , необходимых для обеспечения кипения по всему каналу.

Термогидродинамическое-химическое TOUGHREACT-EOS2 моделирование условий формирования проницаемого канала в вулканогенных породах риолитового состава.

Исследования распространения основных гейзерных полей мира показывают, что они приурочены к районам кислого четвертичного вулканизма, где породы, вмещающие высокотемпературные ГТС представлены четвертичными вулканогенно-осадочными образованиями кислого состава. Вода гейзеров характеризуется хлоридно-натриевым составом (гейзеры Old Faithful, Grand в Йеллоустоне, Великан, Хлоридный, Трубы, Большой в камчатской Долине Гейзеров, гейзер Flat в Новой Зеландии); гидркарбонатно-калиевым составом (гейзеры El Tatio в Чили) и гидрокарбонатно-натриевым составом (гейзеры озера Богория (Колумбия) и гейзеры Исландии) [Hurwitz, Manga, 2017].

Для объяснения формирования каналов гейзеров в артезианско-вулканогенных бассейнах, сложенных пирокластическими породами риолитового состава выполнено TOUGHREACT-моделирование, учитывающее взаимодействие воды с горными

породами. Геометрия модели определена в виде цилиндра (рис. 1), осевая часть которого (Tuff1) служит каналом для восходящей фильтрации термальных вод; промежуточная оболочка цилиндра (Tuff2) – вмещающие породы, внешняя часть цилиндра (Fixed) – представляет вмещающие горизонты холодных грунтовых вод. В модели определены изотермические условия.

Моделирование формирования проницаемого канала выполнялось для условия, когда весь канал заложен в зоне развития трещин в массиве, сложенном неизменными риолитовыми туфами (начальный минералогический состав - вулканическое стекло).

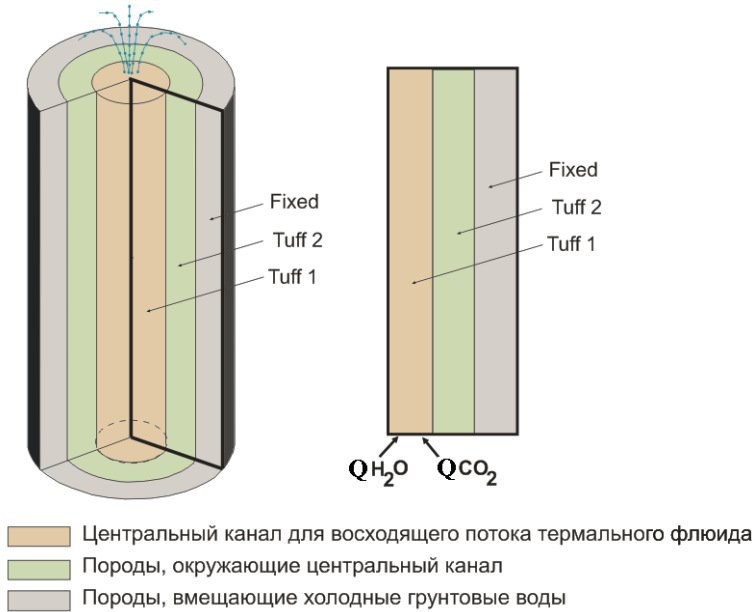


Рис. 1. Радиально-цилиндрическая геометрия термогидродинамической-химической модели TOUGHREACT-EOS2 и срез цилиндра.

	mg/l	mol/kgH2O
pH	8.4	
NH ₄ ⁺	1	7.0·10 ⁻⁰⁵
Na ⁺	605.0	2.64E-02
K ⁺	47.0	1.20E-03
Ca ⁺⁺	22.0	5.50E-04
Mg ⁺⁺	0.0	0.00E+00
SiO ₂	289	4.8E-03
Fe ⁺⁺	0.0	0.00E+00
AlO ₂ ⁻	0.0	0.00E+00
Cl ⁻	872.0	2.46E-02
SO ₄ ⁻	161.0	1.68E-03
HCO ₃ ⁻	68.0	1.12E-03

Таблица 1. Химический состав воды восходящего напорного потока.

В качестве возможных вторичных гидротермальных минералов рассматриваются минеральные фазы, обнаруженные в керне, или шламе при бурении скважин на современных геотермальных месторождениях: кварц, калиевый полевой шпат, клинохлор, кристобалит, ломонтит, морденит, SiO₂ (am), вайрацит, каолинит-al, смектит-ca, смектит-k, смектит-mg, смектит-na, иллит-al, олигоклаз. Химический состав воды определен по составу воды гейзера Великан (табл. 1 и работы [Кирюхин, Рычкова, 2011; Kiryukhin, Rychkova, Dubrovskaya, 2012; Кирюхин, Рычкова, Дубинина, 2015; Kiryukhin, 2016]).

Результаты TOUGHREACT-моделирования показывают, что в результате сосредоточенной напорной проточной восходящей фильтрации термального флюида в осевой части модели формируется пористый (0.36) и проницаемый (сотни Д) канал (рис. 2а) за счет растворения исходного вулканического стекла при генерации вторичных минеральных фаз с меньшим объемом. Результаты также показывают, что в промежуточной оболочке цилиндра в приповерхностных условиях, начиная с глубины 6,5 м и выше, происходит осаждение аморфного кремнезема, что приводит к самоизоляции в верхней части канала за счет уменьшения пористости в 2 раза и уменьшения проницаемости на порядок по сравнению с первоначальными значениями.

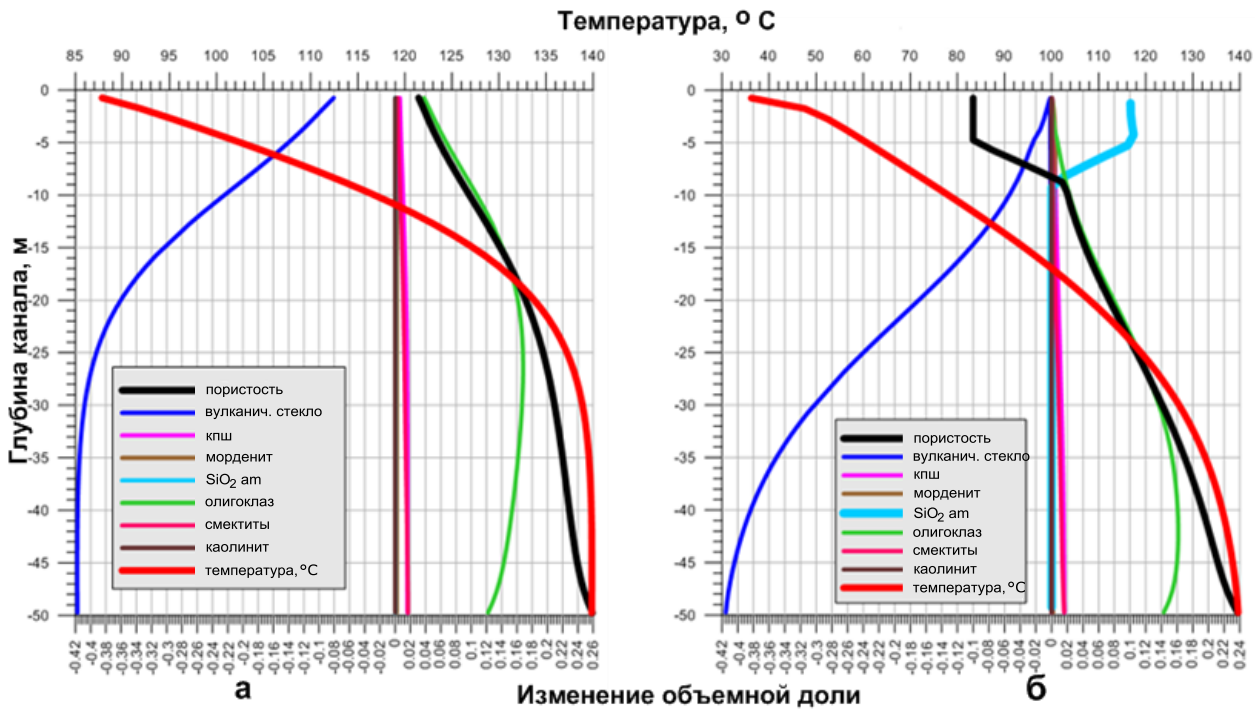


Рис. 2. Профиль гидротермальных преобразований, изменения пористости и распределения температуры по оси (а) и в промежуточной оболочке (б) радиально-цилиндрической модели по результатам TOUGHREACT-моделирования (вариант 1K2, время моделирования 3500 лет).

Моделирование термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера.

Линия зависимости температуры кипения от глубины $T_{\text{sat}}(\text{depth})$ для «чистой воды» разделяет область построения на зоны жидкости и пара (рис. 3). Точки фактически измеренной температуры воды на дне каналов гейзеров перед их извержением (гейзеры Большой (2016, 2017 гг.) и Великан (1994, 2016, 2017 гг.) [Kiryukhin, 2016, 2018]) оказались в зоне жидкого состояния воды со сдвигом на 3-6° C от линии кипения «чистой воды». Для объяснения кипения в канале при температурах ниже кипения рассматривается модель с учетом неконденсирующегося газа CO_2 для инициирования извержений гейзеров.

Для выяснения диапазона значений массового газосодержания CO_2 , необходимого для закипания по всей глубине канала гейзеров, используется TOUGH2 – EOS2 моделирование (в модели используется модуль состояния EOS2 ($\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$)). Геометрия модели также представляет собой цилиндр и соответствует обобщенной модели гейзера (рис. 4).

Результаты моделирования показывают (рис. 3), что при значении массового газосодержания $X_{\text{CO}_2}=0$, линия кипения воды в канале совпадает с линией кипения «чистой воды» для условий Долины Гейзеров. При увеличивающихся значениях X_{CO_2} распределение температуры в канале смещается от линии кипения чистой воды в сторону более низких температур. Точки измерений температуры для гейзеров Большой и Великан соответствуют значениям массового газосодержания CO_2 от 10^{-3} (1 г/л) до 10^{-2} (10 г/л). Результаты также показывают, что начиная с массового газосодержания 10^{-4} (0,1 г/л) и больше, кипение происходит по всей глубине канала (5,5 м), в то время как при значении $X_{\text{CO}_2}=0$, вода в канале кипит до глубины 2,25 м, а глубже кипение отсутствует.

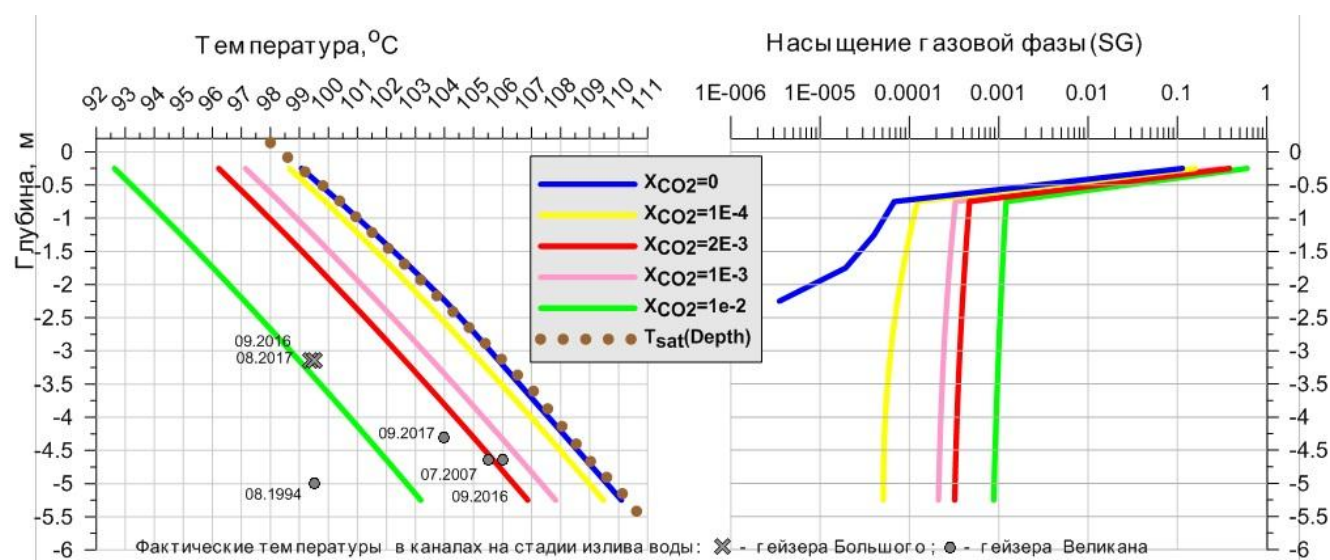


Рис. 3. Графики зависимости температуры и насыщения газовой фазы в канале гейзера Великан по результатам TOUGH2-EOS2 моделирования при заданных различных значениях массового газосодержания CO₂.

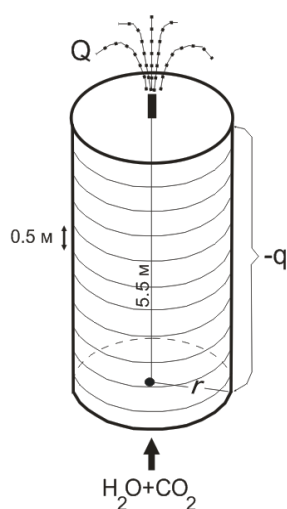


Рис. 4. Геометрия модели TOUGH2 – EOS2 для моделирования режима течения газонасыщенного флюида из канала гейзера.

2. Режим функционирования гейзеров чувствителен к изменениям локальных гидрогеологических и гидрологических условий: прямая инфильтрация из поверхностных водотоков приводит к прекращению функционирования гейзеров на дне образовавшихся водоемов, но в то же время к повышению частоты извержений гейзеров с каналами разгрузки в надводных условиях. Паводковое повышение давления в поверхностных водотоках и резервуарах грунтовых вод приводит к "подпору" гидротермальной системы и временному уменьшению ее суммарной разгрузки.

Режим извержений гейзеров Большой, Великан (2007-2013 гг.) и Шаман (2008-2015). Гейзер Великан. За период наблюдений ИВЕ гейзера Великан снизился на 10.6 - 10.3% (от 375-379 мин. по данным 2004 г. [Дроздин, 2007] до 335 - 340 мин.). Кроме этого, установлено следующее: 1) режим извержений гейзера зависел от количества атмосферных осадков, попадающих непосредственно в ванну гейзера во время обильных снегопадов и тайфунов (максимальный наблюдаемый ИВЕ составил 32 ч во время сильного снегопада 29 февраля 2008 г.); 2) связь ИВЕ гейзера Великан с атмосферным давлением отсутствует, отдельные аномальные увеличения ИВЕ регистрируются во всем

диапазоне изменения атмосферного давления; 3) аномальные увеличения ИВЕ (свыше 600 мин.) и уменьшения (ниже 200 мин.) происходят только в зимнее время, т. е. имеют выраженный сезонный характер (в среднем, увеличение ИВЕ зимой, по сравнению с летом, составляет около 40-50 мин.) (рис. 5). Вероятными причинами такой сезонности являются повышенные теплопотери с поверхности ванны в период пониженных температур, усиления ветра и снегопадов; снижение в целом расхода ГТС в период зимней межени в связи с промерзанием областей водного питания.

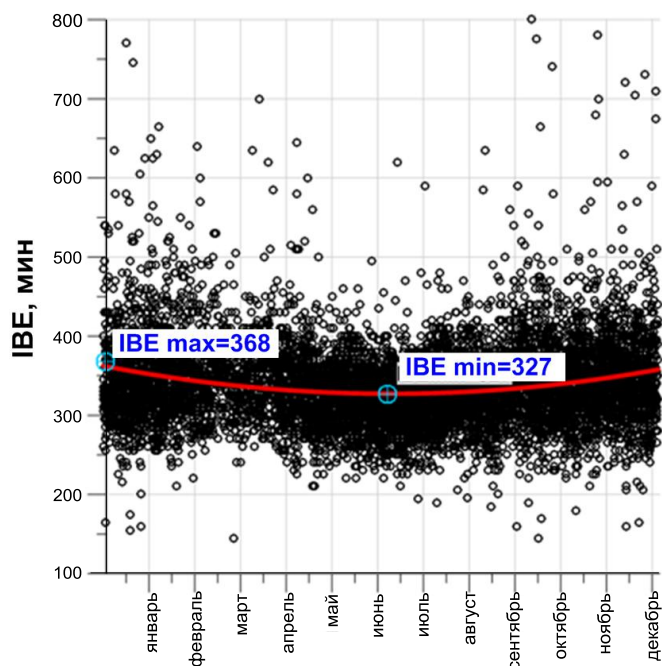


Рис. 5. ИВЕ (мин.) гейзера Великан в пределах гидрологического цикла за период с 2007 по 2014 гг. Красная линия - 2-й порядок аппроксимации точек данных. Шкала ИВЕ обрезана по значению 800 минут.

Гейзер Большой. Наблюдения показали, что режим работы гейзера Большого в значительной степени определялся уровнем Подпрудного озера-1. При уровне озера выше края ванны, гейзер Большой практически не извергался, так как холодная вода из озера заливалась в канал гейзера (июнь 2010 г.). При снижении относительного уровня озера ниже края ванны, гейзер Большой вновь начинал извергаться. Кроме того, были обнаружены остановки извержений в период весенне-летних паводков (2011, 2012 гг.) и во время осеннего тайфуна-паводка (2013 гг.) несмотря на то, что уровень озера находился ниже кромки ванны. Эти остановки были связаны с неполной герметичностью стенок ванны гейзера и попаданием холодной воды в канал. За период наблюдений с 2007 по 2013 гг. средний ИВЕ гейзера Большого снизился на 41,5 % (от 108 мин. (по результатам измерений до катастрофы [Дрознин, 2007] до 63 мин.).

Гейзер Шаман. С момента появления гейзера Шаман в кальдере Узон (2008 г.) изменялись диаметр его грифона, температура воды в момент извержения и режим извержений, что, вероятно, было связано с проработкой канала. По результатам мониторинга активности нового гейзера Шаман установлено, что средний интервал между его извержениями с августа 2012 г. по май 2014 г. составил 137 мин., хотя в зимний период его ИВЕ иногда достигал 1000 мин. и больше. Средний ИВЕ за июль 2014 г. - май 2015 г. снизился до 129 мин. [Kiryukhin, 2016].

Мониторинг газогидрохимических параметров разгрузки теплоносителя. Разгрузка гейзеров и горячих источников в Долине Гейзеров представлена субщелочными низкоминерализованными хлоридно-натриевыми водами. За период наблюдений с 2007 по 2013 гг. обнаружено разбавление по хлор-иону по сравнению с данными до 2007 г. для гейзера Большого (на 23%) и для гейзера Великана (на 12%). Также обнаружено снижение

концентрации гидрокарбонат-иона для гейзеров Большого, Великана и Первенца, и увеличение температуры по К-На химическому геотермометру для гейзера Великана.

До катастрофического оползня термальный флюид характеризовался следующим составом свободных газов (без вычета атмосферной составляющей): CO_2 - 54.8 об%, N_2 - 44.2 об%, CH_4 - 1.0 об% [Кононов, 1983]. Анализ проб на растворенный газ, отобранных в 2011 и 2012 гг. показал, что в гейзерах и кипящих источниках доминируют атмосферные газы. Анализ проб на свободный газ, отобранных в сентябре 2013 г. из горячего (40°C) газифицирующего источника в 8 м от ванны гейзера Великан показал, что в газовой составляющей гидротермального резервуара, питающего гейзер Великан, преобладает углекислый газ (CO_2 , 61,5%) и азот (N_2 , 32,1%), а также в значительном количестве присутствуют метан (CH_4 , 5,8%) и водород (H_2 , 0,45%).

По данным анализа проб на свободный газ, отобранных после 03.01.2014 г. (в сентябре 2017 и в мае 2018 гг.) из каналов гейзеров Большого и Великана, в газовой составляющей доминируют атмосферные газы N_2 и O_2 (Кирюхин А.В., личн. сообщ.). Это свидетельствует о существенном разбавлении притока CO_2 в гидротермальном флюиде и увеличении притока метеорных вод в резервуар [Kiryukhin, 2018].

Цикличность Гейзерной ГТС. Установлено [Кирюхин и др., 2015], что расход разгрузки термальной глубинной компоненты, рассчитанный гидрохимическим методом [Fournier, R., 1989; Сугробов и др., 2009] по поступлению и выносу рекой хлора (химически устойчивого компонента в высокотемпературной воде), изменяется во времени и линейно связан с уровнем Подпрудного озера-1. При повышении уровня озера разгрузка гидротерм понижается. Наличие такой зависимости происходит из-за подпора области разгрузки гидротерм при повышении уровня грунтовых вод [Kiryukhin et al., 2015]. Установлено, что в период весенне-летнего паводка (май-июнь), глубинная составляющая разгрузки ГТС уменьшается на 31 %. За период наблюдений с 2007 по сентябрь 2013 гг. по данным 19 прямых измерений хлоридным методом на створе «Плотина» средняя величина термальной разгрузки составила 215 кг/с.

3. Гидрогеологический эффект Подпрудных озер, образовавшихся в результате обвала-оползня 2007 г. и схода селя в 2014 г. в Долине Гейзеров, выражается в повышении давления в Гейзерном резервуаре и соответствующем увеличении частоты извержений гейзеров при ограниченном термическом и химическом воздействии.

Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование влияния Подпрудного озера-1 на функционирование гейзеров.

Обвал-оползень 3 июня 2007 г., произошедший в Долине Гейзеров, сформировал плотину, перегородившую долину р. Гейзерной и создал Подпрудное озеро-1 (глубиной > 20 м). Озеро затопило многочисленные горячие источники и постройки гейзеров и стало областью инфильтрации холодной воды в ГТС. Для анализа условий функционирования основного гейзерного резервуара ГТС и оценки влияния Подпрудного озера-1 на гейзерную активность разработана численная 2D модель TOUGH2-EOS1+тассер (рис. 6), включающая моделирование процесса переноса трассера (в качестве которого рассматривался Cl -ион).

Исходные данные для моделирования обоснованы результатами многолетнего мониторинга естественной разгрузки гидротерм. Геометрия профильной 2D модели показана на рис. 6, в плане она соответствует участку наиболее интенсивной разгрузки гидротерм размерами 1 км x 0.1 км.

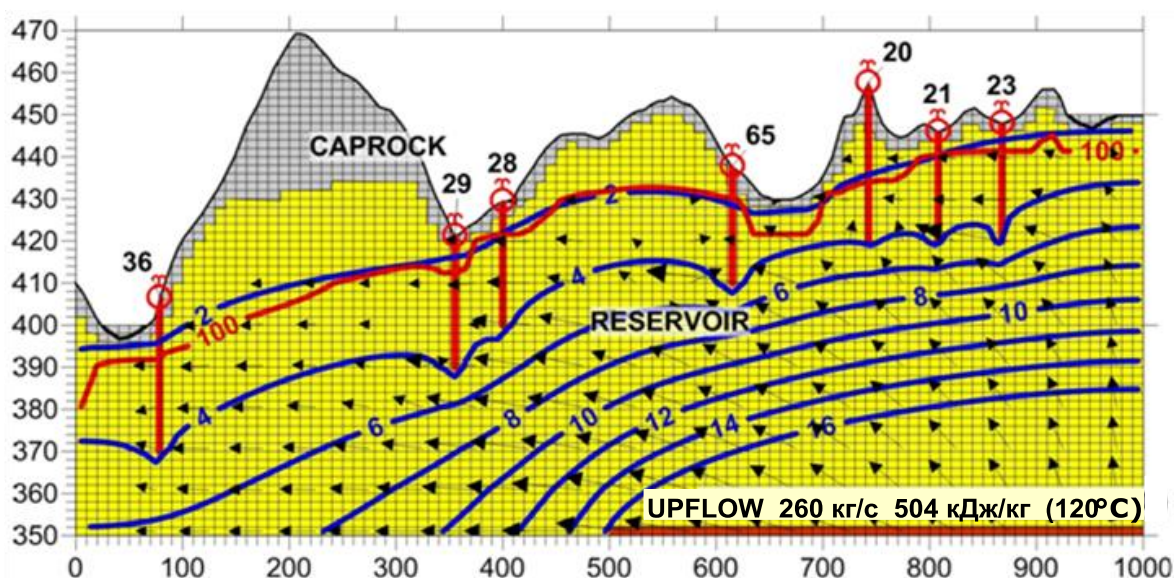


Рис. 6. Профильная термогидродинамическая модель естественного состояния продуктивного гейзерного резервуара Долины Гейзеров (Нижне-Гейзерный участок). Номера основных гейзеров соответствуют табл. 3 в работе [Kiryukhin et al., 2012]. На рисунке показана вычислительная сетка, расположение гейзеров и домены модели: резервуар (RESERVOIR), водоупорный слой (CAPROCK), зона восходящего потока теплоносителя (UPFLOW). Синими линиями показано распределение давления (бар), красная линия соответствует изотерме 100°C, векторами показано поле скоростей фильтрации.

Моделирование выполнялось в несколько этапов: 1) воспроизведение естественного состояния локальной части термальной разгрузки ГТС; 2) в условиях инфильтрации холодной воды из озера через каналы затопленных гейзеров 36, 29 и 28 (Конус, Малый, Большой) в течение 3-х лет; 3) то же, но при условии возобновления извержений гейзера 28 (Большой) в течение последующих 3-х лет; 4) моделирование влияния дополнительной области инфильтрации холодных вод выше гейзера Великан. Результаты моделирования предшествующих этапов использовались в качестве начальных условий для создания последующих моделей.

Результаты моделирования в условиях инфильтрации холодной воды из озера показывают увеличение давления от 2 до 3 бар в той локальной части резервуара, где по каналам гейзеров происходила инфильтрация холодной воды в течение первых 3-х лет: (Конус (36), Малый (29), Большой (28)) (рис. 7). Наиболее значительное снижение температуры (-109,5° С) отмечено в зоне поглощения в канале гейзера Конус и (-3,3 °С) в канале гейзера Малый, там же на модели фиксируется снижение концентрации хлор-иона до фоновых значений. В зоне действующих гейзеров значимых изменений давления, температуры и концентрации хлор-иона не фиксируется, но даже небольшое повышение давления сопровождается там увеличением модельного расхода разгрузки на 1,7 - 5,5 %.

После возобновления извержений, расход гейзера Большого (3-й этап моделирования) увеличился на 52,6 %. Если допустить, что расход самоизлива обратно пропорционален ИВЕ гейзера (чем быстрее заполняется канал гейзера – тем чаще он извергается), то это согласуется с фактическими наблюдениями.

Для гейзера Великан результаты моделирования второго и третьего этапа не показали значительного уменьшения его ИВЕ в условиях гидродинамического подпора озера в отличие от фактически наблюдаемого (снижение на 10,6-10,3 %, что было отмечено выше). В связи с этим, в четвертом варианте моделирования рассмотрена возможность с областью инфильтрации на 100 м выше по течению гейзера Великан.

Результаты показали увеличение давления в резервуаре под гейзером и возрастание расхода его разгрузки на 5,9 %, что объясняет наблюдаемое уменьшение ИВЕ.

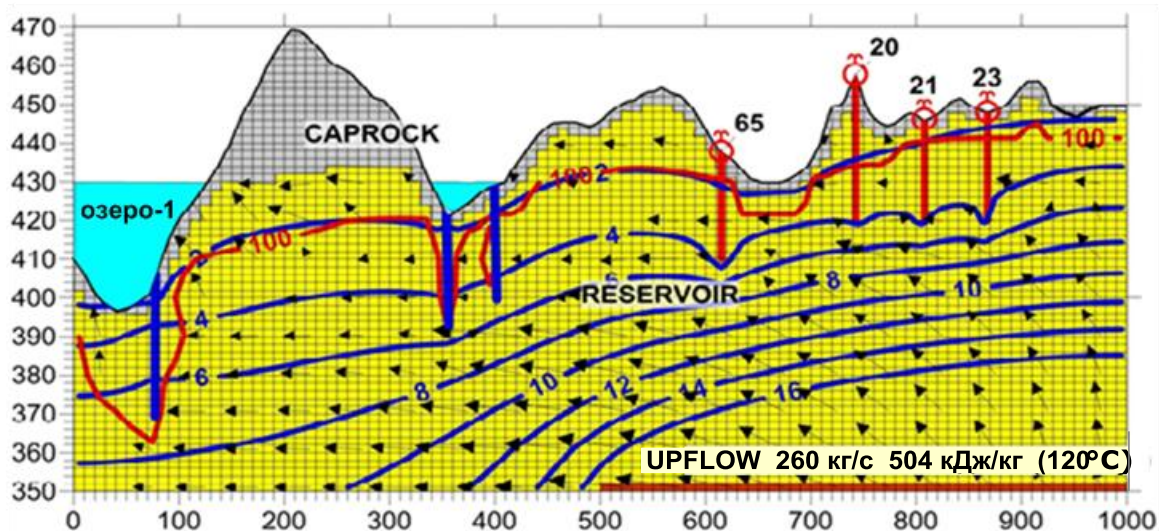


Рис. 7. Профильная термогидродинамическая модель нарушенного состояния продуктивного гейзерного резервуара Долины Гейзеров (Нижне-Гейзерный участок) после катастрофического обвала 03.06.2007 г. и появления 1-го Подпрудного озера. Условные обозначения те же, что и на рис. 6. Синими жирными линиями показаны каналы затопленных гейзеров, заданные на модели как границы с постоянной температурой 10°C и гидростатическим распределением давления.

Таким образом, по результатам моделирования обнаружено, что основными изменениями в параметрах термодинамической системы Долины Гейзеров, вызванными гидродинамическим подпором Подпрудного озера-1, являются увеличение давления в продуктивном гейзерном резервуаре, синхронизированное с увеличением расхода разгрузки и уменьшением ИВЕ гейзеров (что согласуется с фактическими данными по гейзерам Большой и Великан).

Фактическим подтверждением увеличения давления в резервуаре вследствие инфильтрации холодной воды служит факт появления новых кипящих хлоридных источников на левом берегу р. Гейзерной (вблизи затопленных гейзеров 30-31, 34-37) и это удалось воспроизвести на модели. С другой стороны, на рассматриваемых моделях, даже при задании дополнительной области инфильтрации, не удалось объяснить отмеченное уменьшение (по сравнению с данными до 2007 г.) концентрации хлор-иона на 13 и 23% для гейзеров Великан и Большой соответственно.

Локальная часть модельного резервуара со значительным охлаждением и разбавлением по хлор-иону (рис. 7), была также рассмотрена дополнительно. Для этого выполнялись моделирование 25-летней инфильтрации из Подпрудного озера-1. Результаты моделирования показывают, что термогидродинамический режим становится квазистационарным к концу первого года существования Подпрудного озера-1.

Термогидродинамическое TOUGH2 моделирование влияния Подпрудного озера-2 на функционирование гейзеров.

3.01.2014 г. в верхнем течении р. Гейзерной на левом берегу произошел обвал риолит - дацитовый экструзии ($\alpha\xi Q_3^4$), вызвав сход селя, который полностью заблокировал кипящий источник 54 (Хлоридный), горячие источники 56 (Кислый Котел), N16 и N17 (возникшие после оползня-обвала 3.06.2007), и значительно повредил гейзеры

в районе Нижне – Гейзерного поля, в том числе и канал гейзера Великан. Сель 3.01.2014 г. создал дамбу и еще одно озеро – Подпрудное озеро-2.

После схода селя установлены изменения термогидродинамических - химических параметров для двух основных гейзеров. В гейзере Большом произошло очередное снижение ИВЕ от 60 мин. (2007-2013 гг.) до 30 мин. Несмотря на то, что он вскоре установился на 44 мин., появилась тенденция к удвоению (утроению) ИВЕ с некоторыми "пропущенными" (или менее мощными) извержениями. Кроме того, в воде гейзера произошло увеличение pH и снижение концентрации гидрокарбонат-иона [Kiryukhin et al., 2018].

В гейзере Великан произошло изменение ИВЕ (от 340 мин в 2007-2013 гг.): в апреле 2014 г. был зарегистрирован интервал 90 мин., затем, линейно увеличиваясь, к сентябрю 2014 г. достиг 130 мин., к сентябрю 2016 г. был равен 40 мин. Произошло увеличение pH, снижение концентрации HCO_3 , дальнейшее снижение концентраций Cl -иона, свободного CO_2 , и температуры воды в канале.

Влияние нового озера на указанные выше параметры было также оценено с помощью профильной TOUGH2 - EOS1 + трассер модели. Геометрия модели, включающей моделирование процесса переноса Cl -иона, изображена на рис. 8. Модель представляет собой локальную часть ГТС Долины Гейзеров от Устьевого до Верхне-Гейзерного участков.

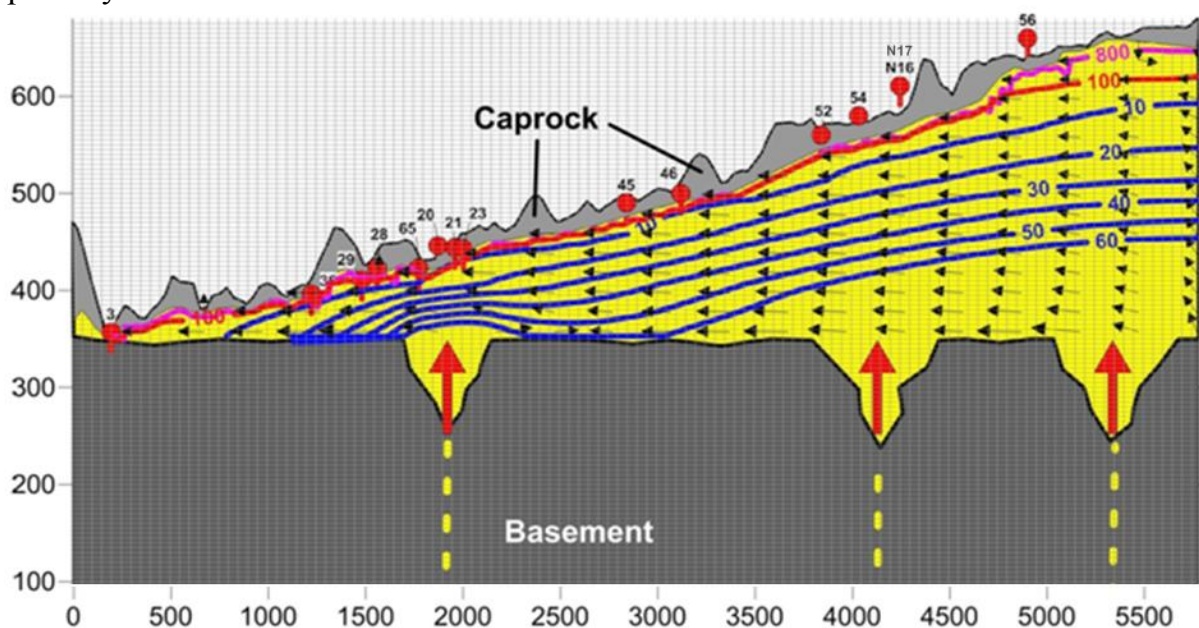


Рис. 8. Моделирование естественного состояния гейзерного резервуара до возникновения Подпрудных озер. На рисунке показана вычислительная сетка, зонирование модели и расположение гейзеров (красные кружки с номерами, соответствующими названиям из табл.3 в работе [Kiryukhin et al., 2012]), распределение давления, бар (синие линии), изотерма 100°C (красная) и линии концентрации хлор-иона, равной 800 мг/л (сиреневая), векторы показывают поле скоростей фильтрации.

Для калибровки модели по проницаемости резервуара использованы данные по расходам разгрузки гейзеров и источников 3, 29, 28, 65, 20, 21, 23, 45, 46, 52, 54 и N16 (нумерация соответствует табл.1.1). На модели рассмотрено влияние Подпрудного озера-2 при различных значениях давления подпора (являющегося суммарным значением давления водяного столба и атмосферного давления 1 бар): 2.5 бара, 4 бара и 7 бар. В каждом из вариантов моделирования в домене INJEC задавалась температура воды 10°C . Время моделирования во всех вариантах составляло 20 лет.

Результаты моделирования инфильтрации холодной воды из Подпрудного озера-2 (рис. 9). Во всех вариантах моделирования в зонах водопритока ближайших к озеру гейзеров и горячих источников фиксируются незначительные увеличения расходов, связанные с подпором 2-го Подпрудного озера, но не выявлены какие-либо изменения по температуре и массовой доле хлора в термальной воде. А в ячейках модели, расположенных непосредственно под озером, кроме обнаруженных незначительных изменений по давлению, воспроизводятся изменения по температуре и концентрации хлор-иона:

1. При заданной глубине озера 15 м в ячейках модели непосредственно под озером отмечено падение температуры (на 0,3-16,0 °С) и в 15 ячейках уменьшение массовой доли хлора (до глубины 30-35 м). Отсутствие изменений концентрации Cl^- глубже позволяет утверждать, что ниже границы 30-35 м метеорная вода не проникла. Ниже этой границы отмечено только понижение температуры на 0,2-7,0 °С.

2. При заданной глубине озера 30 м в ячейках модели непосредственно под озером отмечено понижение температуры (на 12,2-16,0° С), снижение массовой доли хлора еще в 3 ячейках (до глубины 35-40 м). Отсутствие изменений по концентрации Cl^- на глубинах больше, чем 35-40 м, позволяет предполагать, что ниже этой границы метеорная вода не проникла. Ниже отмечено только понижение температуры на величину от 0,4 до 12,5° С.

3. При заданной глубине озера 60 м в ячейках модели непосредственно под озером также отмечено падение температуры (на 4,0-30,0° С), снижение массовой доли хлора еще в 7 ячейках (до глубины 40-45 м). Ниже границы проникновения метеорных вод (40-45 м) также отмечено только понижение температуры на величину от 9,0 до 1,2° С.

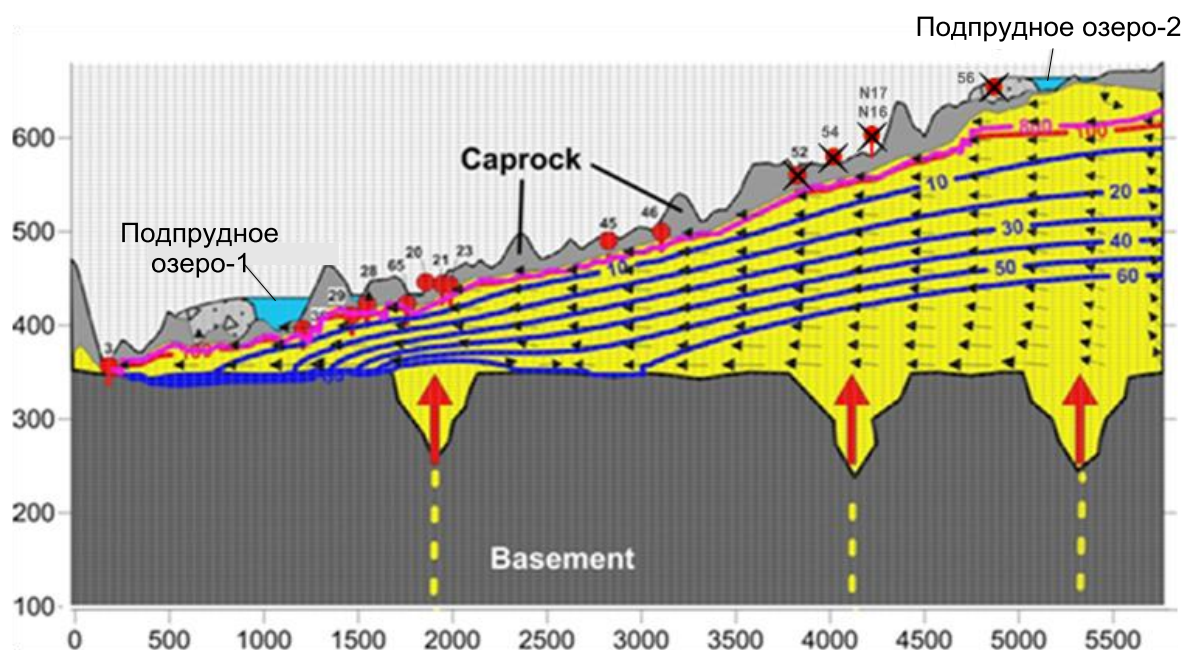


Рис. 9. Моделирование состояния гейзерного резервуара через 20 лет после возникновения Подпрудного Озера-2 (вариант III). Перечеркнутые красные кружки – горячие источники, исчезнувшие после схода селя 03.01.2014 г. Остальные обозначения те же, что и на рис. 9.

Таким образом, по результатам моделирования обнаружено, что в возможном диапазоне повышения давления за счет подпора 2-го Подпрудного озера в продуктивном гейзерном резервуаре не происходит существенных изменений. Даже с экстремальным значением давления 7 бар на модели не было значительного теплового воздействия озера

на геотермальный резервуар в течение 20 лет. В зонах водопритока даже ближайших к озеру источников N 16 и 54 не произошло существенных изменений их расхода разгрузки, а также содержания Cl-иона в воде. Озеро создало под собой небольшую холодную линзу, которая кондуктивно (за счет теплопроводности) охлаждает локальную часть резервуара ниже границы контакта с озерными водами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий формирования и функционирования гейзеров, а также анализ результатов мониторинга за основными гейзерами и горячими источниками после образования двух Подпрудных озер привели к следующим выводам:

1. TOUGHREACT-моделирование показало, что в неизменных риолитовых туфах формирование самоизолирующихся каналов разгрузки термальных вод (в том числе каналов гейзеров) происходит вследствие увеличения пористости и проницаемости в осевой части восходящего потока термальных вод, вызванного гидротермальными преобразованиями с растворением исходного вулканического стекла, и уменьшением пористости и проницаемости в периферической оболочке восходящего потока термальных вод, вызванного гидротермальными преобразованиями с осаждением аморфного кремнезема (гейзерита).

2. TOUGH2-EOS2-моделирование показало, что для кипения по всей глубине канала и извержения гейзеров достаточно присутствие неконденсирующихся газов с величиной массового газосодержания от 0.0001 (0.1 г/л) и больше. Для гейзеров Большого и Великана фактическое массовое газосодержание CO₂ оценивается от 1 до 10 г/л.

3. По результатам мониторинга гидрогеологического режима Долины Гейзеров после катастрофического оползня 3.06.2007 и до селя 3.01.2014 г. происходили существенные изменения в состоянии гейзеров Великан и Большой:

а) в гейзере Большом активность гейзера определялась уровнем Подпрудного озера-1, и извержения были возможны лишь при уровне, исключающем прямой залив холодной воды в канал гейзера; его IBE снизился на 42 %, отмеченное разбавление термальной воды в канале по хлору составляет 23 %;

б) в гейзере Великан IBE снизился на 11 %, и его величина зависела от количества атмосферных осадков, попадающих в ванну гейзера, обильных снегопадов и тайфунов; обнаружено, что аномальные значения IBE имеют выраженный сезонный характер с увеличением на 40-50 мин. в зимний период, что связано с более интенсивным охлаждением ванны гейзера; отмеченное разбавление воды в канале гейзера по хлору на 12 %;

в) связь IBE гейзера Великан с атмосферным давлением не выявлена;

4. Определено среднее значение глубинной составляющей водной разгрузки ГТС на нижнем створе плотины Подпрудного озера-1 (215 кг/с); отмечено снижение ее величины на 31% в период весенне-летнего паводка; установлена обратная зависимость разгрузки глубинной составляющей от уровня озера, что связано с подпором термального потока за счет инфильтрации метеорных вод из озера.

5. TOUGH2-EOS1+tracer моделирование показало, что семилетняя инфильтрация холодных вод из Подпрудного озера-1 приводит к возрастанию давления в гидротермальном резервуаре за счет гидродинамического подпора, соответствующему увеличению модельной разгрузки оставшихся на поверхности гейзеров, появлению новой термальной разгрузки по контуру Озера и понижению температуры воды в каналах затопленных гейзеров. Вместе с тем, данная модель не показывает существенного изменения температуры в геотермальном резервуаре в целом и наблюдаемого снижения концентрации хлор-иона в гейзерах Большой и Великан.

6. TOUGH2-EOS1+tracer- моделирование показало, что Подпрудное озеро-2 не оказывает существенного влияния на термогидродинамические характеристики гейзеров.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ (ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК) ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кирюхин А.В., Асаулова Н.П., Манухин Ю.Ф., **Рычкова Т.В.**, Сугробов В.М. Использование численного моделирования для оценки эксплуатационных запасов месторождений парогидротерм (на примере Паужетского геотермального месторождения) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 56-76.

2. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.** Условия формирования и состояние ГТС Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2011. № 3. С. 238-253.

3. Kiryukhin A.V., **Rychkova T.V.**, Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // Applied Geochemistry Journal. 2012. № 27. P. 1753-1766.

4. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.**, Дубинина Е.О. Анализ гидрогеологического режима ГТС Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3-20.

5. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.**, Сергеева А.В. Моделирование условий формирования проницаемых каналов гейзеров в районах кислого вулканизма // Вулканология и сейсмология. 2020. № 2. С. 1-13.

ДРУГИЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

6. Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., Finsterle S., **Rychkova T.V.**, Obora N.V. Modeling the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia, Using iTOUGH2 // Proc. TOUGH Symposium, Berkeley, CA, LBNL, 15-17 May. 2006. 8 p.

7. Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., **Rychkova T.V.**, and Obora N.V. Modeling the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // В сборнике: Transactions - Geothermal Resources Council GRS 2006. Annual Meeting: Geothermal Resources – Securing Our Energy Future. San-Diego, CA, Sept. 10-13 2006. Volume 30. P. 819-825.

8. Kiryukhin A.V., Asaulova N.P., **Rychkova T.V.**, Obora N.V., Manukhin Y.F., Vorozheikina L.A. Modeling and forecast of the exploitation the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 22-24, 2007. SGP-TR-183. 8 p.

9. Kiryukhin A. V., **Rychkova T.V.**, Chernykh E.V., Vergasova L.P. Geysers Valley, Kamchatka: Why Landslide of 3-June-2007 Took Place and What Happens After // AGU Conference, San-Francisco. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008EO480011>.

10. Кирюхин А.В., Асаулова Н.П., Манухин Ю.Ф., **Рычкова Т.В.**, Сугробов В.М. Расширение ресурсного потенциала геотермальных месторождений на основе новых технологий извлечения геотермальной энергии (на примере Паужетского геотермального месторождения) в монографии ИПКОН РАН "Комплексное освоение недр: расширение минерально-сырьевой базы России". Москва: ИПКОН. 2009. С. 121-131.

11. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.**, Дроздин В.А., Черных Е.В. Анализ гидрогеологических условий в гидротермальной системе Долины Гейзеров (Камчатка) после катастрофического обвала-оползня 3 июня 2007 г. // Материалы IV Всероссийского

симпозиума по вулканологии и палеовулканологии "Вулканизм и геодинамика" 22 - 27 сентября 2009 г. г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 599-604.

12. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.**, Дрознин В.А., Черных Е.В. Исследования тепломассопереноса в гидротермальной системе Долины Гейзеров (Камчатка) после катастрофического обвала-оползня 3 июня 2007 г. // Материалы Всероссийского XIX Собрания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Тюмень. 2009. С. 51-56.

13. Kiryukhin A.V., **Rychkova T.V.**, Droznin V.A., Chernykh E.V., Puzankov M.Y., Vergasova L.P. Geysers Valley Hydrothermal System (Kamchatka): Recent Changes Related to Landslide of June 3, 2007 // Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010. 6 p.

14. Kiryukhin A.V., **Rychkova T.V.**, Puzankov M.Y., Vergasova L.P. Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // В сборнике: Water-Rock Interaction – Proceedings of the 13-th International Conference on Water-Rock Interaction. WRI-13 2010. С. 917-920.

15. Kiryukhin A. V. and **Rychkova T. V.** Functioning of Natural and Natural–Engineering Systems Formation Conditions and Natural State of the Hydrothermal System in the Valley of Geysers (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) // ISSN 0097_8078. Water Resources. 2012. Vol. 39. No. 7. P. 722–736.

16. Кирюхин А.В., **Рычкова Т.В.**, Дубинина Е.О. Исследования гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // В сборнике: Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. г. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. 2013. С. 461-465.

17. **Рычкова Т.В.** Моделирование влияния инъекции холодной воды на гидротермальный резервуар на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров // Материалы XX ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога "Современный вулканизм и связанные с ним процессы", 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2017. С. 200-203.

18. **Рычкова Т.В.**, Сугробов В.М., Кирюхин А.В., Батаева О.Б. Изменения гидрогеохимического режима гейзеров в результате эволюционных и катастрофических процессов // Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 2017. Выпуск 5. С. 117–125.

19. **Рычкова Т.В.** TOUGH2- EOS1 моделирование и статистика для анализа изменения гидрогеохимического режима гейзеров Великан и Большой (Долина Гейзеров, Камчатка) // в сборнике: Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Материалы Шестой научно-технической конференции. г. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН. 2017. С. 319-324.

20. **Рычкова Т.В.**, Кирюхин А.В. Моделирование некоторых частных условий формирования и функционирования гейзеров // Материалы XXII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога "Вулканизм и связанные с ним процессы", 28-29 марта 2019 г. г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2019. С. 221-224.