



УДК 556.3

А. В. Кирюхин<sup>1</sup>, Т. В. Рычкова<sup>1</sup>, Е. О. Дубинина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: avk2@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН,  
Москва, 119 017*

## Анализ гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3 июня 2007 г.

В Долине Гейзеров с 2007 г. осуществляется непрерывный мониторинг гидрогеологического режима с целью выявления динамики изменений после катастрофического оползня 3 июня 2007 г. на гейзерах Великан, Большой, Подпрудном Озере, а также дискретное опробование одиннадцати основных режимных гейзеров и источников. По режимным гейзерам и источникам отмечаются признаки разбавления по основным компонентам глубинного теплоносителя при некотором увеличении компонент, связанных с притоком метеорных вод, обогащённых атмосферным воздухом, что наиболее вероятно связано с инъекцией в гидротермальную систему воды из Подпрудного озера. По данным наблюдений на гейзере Большой, его средний период извержений составил — 64 мин, его активность определяется уровнем Подпрудного Озера. Гейзер Великан показывает тенденцию стабилизации после его уменьшения в первые три года после катастрофического оползня. Средний период 341 мин, годовой темп уменьшения периода 7,2 мин в год. По данным TOUGH2-EOS3 моделирования уменьшение периода его извержений в результате инъекции холодной воды из Подпрудного Озера прогнозируется на 9,4%, и этот прогноз уже подтвердился. Период извержений гейзера Великан в пределах гидрологического цикла показывает сезонное увеличение периода извержений в зимний период (в среднем около 50 мин).

### Введение

Долина Гейзеров расположена в Кроноцком государственном заповеднике на полуострове Камчатка. Здесь обнаружено не менее 57 гейзеров [6], на 13-ти из которых мы проводили систематические наблюдения за циклом активности (Первенец, Тройной, Конус, Малый, Большой, Щель, Фонтан, Великан, Жемчужный, Горизонтальный, Розовый Конус, Бурлящий, Восьмерка). Долина Гейзеров имеет значительную образовательную ценность — здесь можно наблюдать деятельность гейзеров, понять условия формирования гидротермальной системы (условия разгрузки, источники тепла, структура резервуара, роль верхнего водоупора), а также исследовать потенциал геотермальной энергии.

Очень важно выявить механизм формирования и параметры гидротермальной системы, контролируемые гидротермальные взрывы и оползни, осуществлять мониторинг этих параметров с целью прогнозирования возможных природных катастрофических явлений и оценки влияния изменения условий разгрузки/питания на режим гейзеров, оставшихся после катастрофического оползня 3 июня 2007 г.

В работах [2, 17] обсуждаются возможные триггеры катастрофического оползня 3 июня 2007 г.: 1) уклон плоскости скольжения в сторону бассейна р. Гейзерная; 2) увеличение давления до 2–3 бар во флюидной питающей системе; 3) насыщение влажной блока горных пород в период снеготаяния и весеннего паводка; 4) гидротермальная переработка и ослабление плоскости скольжения; 5) взрывы пара вдоль плоскости скольжения. Обнаружение новых термальных разгрузок после 3 июня 2007 г. даёт возможность предположить, что катастрофическому оползню предшествовало увеличение давления в жидкой питающей системе.

Гидротермальная система Долины Гейзеров сформирована в пределах двух термовыводящих линейных зон (разломов), расположенных над предполагаемым частично расплавленным магматическим телом и получает водное питание метеорными водами вдоль выходов риолит-дацитовых экстррузий ( $\xi Q_3^4$ ), в частности через экстррузию Гейзерную. Собрана 3D термогидродинамическая модель гидротермальной системы (10 500 элементов). Термогидродинамическое моделирование TOUGH2-EOS3 показывает, что для формирования гидротер-

мальной системы с параметрами разгрузки, соответствующими нынешним (250–270 кг/с при энтальпии 900 кДж/кг), необходимо до 30 000 лет. Моделирование также показывает, что высокотемпературный флюид поступает по двум зонам на Нижне-Гейзерном и Верхне-Гейзерном полях. Моделирование доказывает формирование двухфазного резервуара под наклонно залегающим водоупором, что имеет потенциал гидротермального взрыва. Параметры модели проверены распределением разгрузки термальных источников и гейзеров, результатами изотопного анализа термального флюида ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ), и показаниями геотермометров.

В данной статье приводятся и обсуждаются последние результаты мониторинга гидрогеологического режима в 2007–2012 гг. на гейзерах Великан, Большой, Подпрудном Озере и девяти основных режимных гейзерах и источниках.

#### **Режим гейзеров, Подпрудного Озера и динамики разгрузки гидротерм в 2007–2012 гг.**

**1. Методика проведения мониторинга.** Для регистрации периодичности извержений гейзеров Великан и Большой с июля 2007 г. были использованы температурные логгеры НОВО U12-015.

Для регистрации уровня Подпрудного Озера использована пара логгеров НОВО U20-001-04. Один логгер регистрировал барометрическое давление, а другой был установлен в озере, чтобы регистрировать суммарное давление столба воды над ним и атмосферного давления. Относительный уровень озера определялся по разнице записей давления. Поскольку озеро Подпрудное пополняется рекой Гейзерной, то его уровень связан с расходом реки. Калибровка расчетной формулы для определения расхода реки по уровню озера выполняется по результатам гидрометрических наблюдений на створах «Плотина» и «Щель». Величина скрытой разгрузки гидротерм оценивается хлоридным методом на наблюдательном створе «Плотина». Начиная с мая 2012 г. для непрерывной записи электропроводности раствора на створе «Плотина» используется логгер НОВО U24-001 (диапазон 0–10 000  $\mu S/cm$ ), что позволяет одновременно оценивать изменения хлор-иона и соответственно динамику изменения величины скрытой разгрузки и тепловой мощности гидротермальной системы.

Самую высокую и стабильную величину разгрузки на Нижне-Гейзерном участке имеет кипящий источник Аверий (около 12 кг/с). Великан — самый мощный гейзер в Долине Гейзеров [17, табл. 3], поэтому они были выбраны для осуществления мониторинга газогидрохимического режима гидротермального резервуара в первую очередь. Кроме того, в этот список включены крупные горячие и кипящие источники и гейзеры на различных участках гидротермальной системы: Первенец, Большой, Трубы, Верхний, Хлоридный, N16 и N17 — кипящие источники, обнаруженные после оползня 3 июня 2007 г., 56 — Кислый Котёл, М — Младенец

(Крепость), N37 — кипящий источник на урезе озера, возникший после оползня приблизительно на месте Артефакта (2011 г.) и переместившийся в 2012 г. на позицию Скалистого (рис. 1). По всем указанным источникам осуществляется газогидрохимическое опробование и отбор проб на анализ изотопного состава воды с целью диагностики и анализа состояния гидротермального резервуара. В 2012 г. опробованы также дополнительно гейзер Бурлящий, источники в верховьях ручьёв Горячий и Тёплый, и источник в зоне отрыва оползня 2007 г.

**2. Режим извержений гейзеров Большой и Великан, изменения уровня в Подпрудном Озере (2007–2012 гг.).** Режим работы гейзера Большой чувствителен к положению уровня озера Подпрудное. Гейзер Большой прекращает извержения тогда, когда относительный уровень озера превышает 25–30 см, так как холодная вода заливается из озера в канал гейзера. Когда уровень озера падает ниже 25–30 см, гейзер Большой вновь начинает извергаться со средним периодом от 45 до 85 мин. Средний период извержений гейзера Большой в течение данного времени наблюдений составил — 64 мин (рис. 2).

В период с 3 июня 2007 г. по август 2012 г. средний период извержений гейзера Великан составил — 341 мин (рис. 3). Снижение продолжительности среднего периода извержений показывает тенденцию стабилизации после его уменьшения в первые три года после катастрофического оползня. В среднем за наблюдаемый период темп уменьшения периода составил 7,2 мин в год.

До катастрофического оползня период составлял 339 мин [1]. Цикличность работы гейзера Великан зависит также от количества атмосферных осадков, попадающих в ванну гейзера.

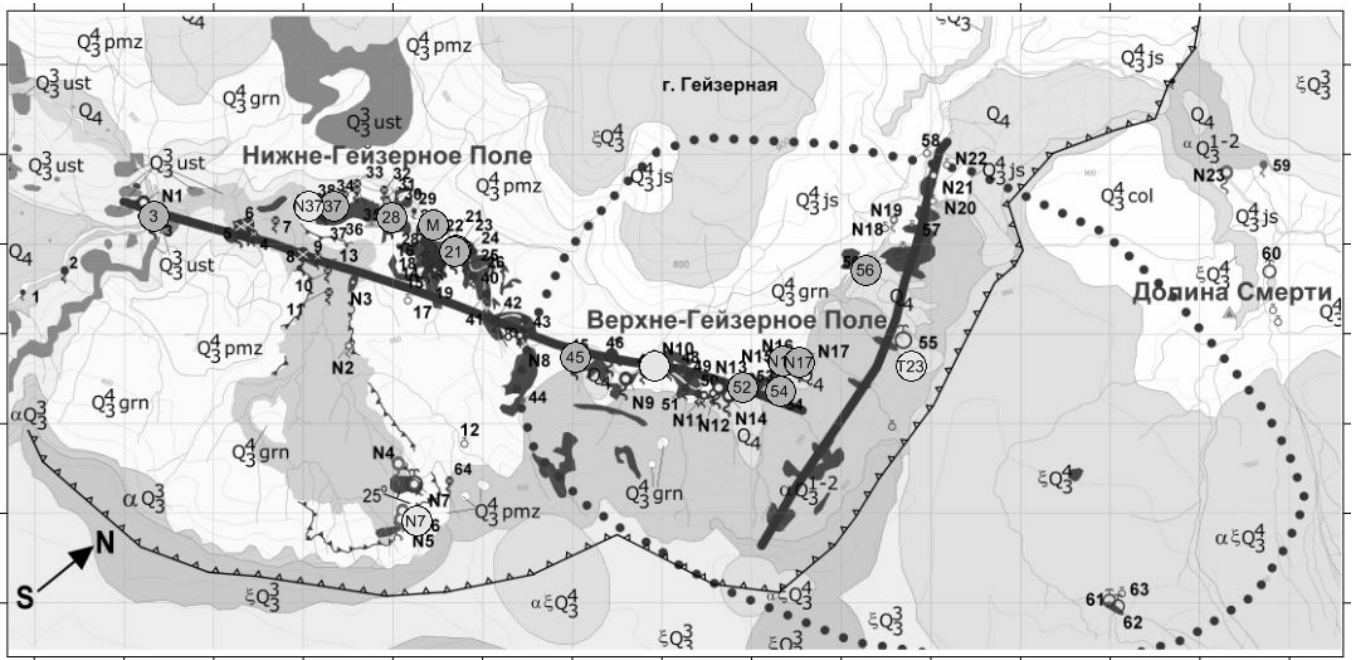
В процессе разрушения плотины рекой Гейзерной происходит систематическое понижение уровня воды в Подпрудном Озере (130 см в течение 4 лет, или около 33 см в год), на это понижение накладываются сезонные изменения уровня озера (рис. 2 и 3).

Анализ взаимосвязи периодичности извержений гейзера Великан с атмосферным давлением показывает, что такая связь отсутствует (рис. 4).

Диаграмма взаимосвязи периодичности извержений гейзера Великан с изменением уровня в Подпрудном Озере выглядит более сложным образом (рис. 5).

Здесь отчётливо видно, что аномальные увеличения периода извержений гейзера Великан происходили при дискретных значениях уровня Подпрудного Озера 10–20 см, –45 см, –70 см, –120 см. Эти уровни соответствуют зимним сезонам 2007/2008 гг., 2008/2009 гг., 2009/2010 гг., 2010/2011 г., 2011/2012 г. (рис. 3).

График изменения периода извержений гейзера Великан в пределах гидрологического цикла с января по декабрь за весь период наблюдений 2007–2012 гг. показывает, что аномальные увеличе-



**Рис. 1.** Пункты мониторинга гидрогеологического режима и дополнительные точки опробования гейзеров и горячих источников Долины Гейзеров в 2012 г. 1 — пункты мониторинга гидрогеологического режима гейзеров и горячих источников Долины Гейзеров в 2012 г. (3 — Первенец, 28 — Большой, 21 — Аверий, 23 — Великан, 45 — Трубы, 52 — Верхний, 54 — Хлоридный, N16 и N17 — кипящие источники, обнаруженные после оползня 3 июня 2007 г., 56 — Кислый Котёл, М — Младенец (Крепость), N37 — кипящий источник на урезе озера, возникший после оползня и находящийся в 2011 г. приблизительно на месте Артефакта); 2 — дополнительные точки опробования (Т23 — источник в верховьях руч. Тёплый, N7 — источник в зоне отрыва оползня, N37 — кипящий источник на урезе озера, возникший после оползня и переместившийся в 2012 г. приблизительно на место гейзера Скалистого.) *Примечание: номера источников и гейзеров соответствуют названиям [2, с. 243] и [17, табл. 2 и 3]; источник без номера — пульсирующий высокодебитный источник в месте впадения руч. Игрушка в р. Гейзерную; прочие условные обозначения, использованные на карте, соответствуют [2, 17].*

ния периода извержений свыше 600 мин. и уменьшения периода ниже 200 мин. происходят только в зимнее время, т. е. имеют выраженный сезонный характер (рис. 6). В среднем, увеличение периода извержений в зимний период по сравнению с летним периодом составляет около 50 мин.

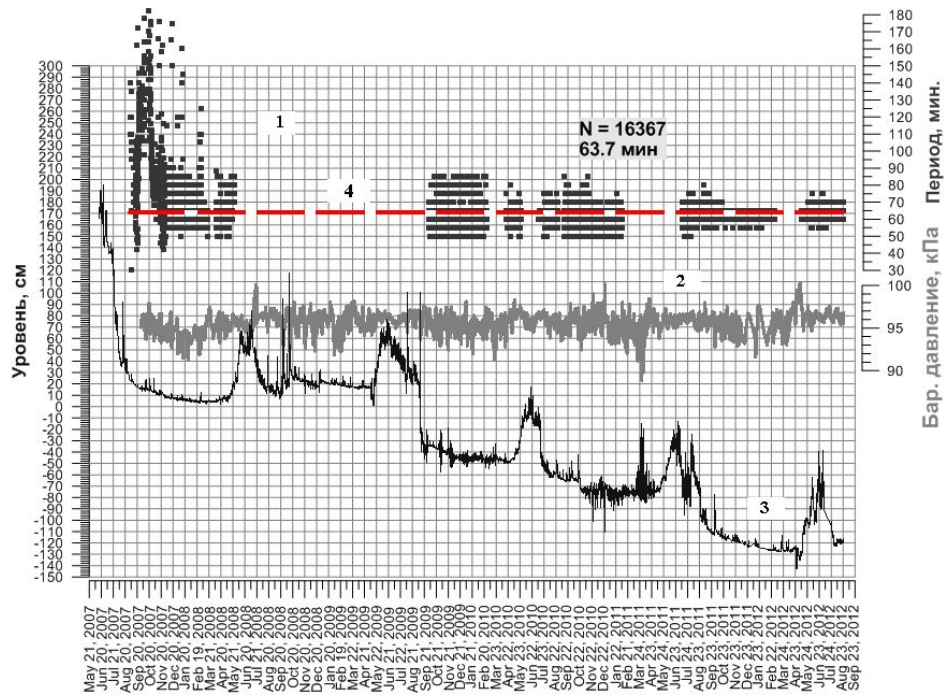
Вероятными причинами такой сезонности являются: 1) Повышенные теплотери с поверхности ванны Великана, имеющей площадь около 4,5 м<sup>2</sup>, в период пониженных температур, усиления ветров (по данным В. М. Степаненко (2012) среднее значение ветроэнергетического потенциала зимой в 4,4 раза превышает аналогичный показатель в летнее время (метеостанция «Семячик») и снегопадов; 2) Снижение в целом расхода гидротермальной системы в период зимней межени в связи с промерзанием областей водного питания.

**3. Динамика изменения естественной разгрузки и тепловой мощности гидротерм.** Для оценки разгрузки термальной глубинной компоненты ( $Q_d$ , кг/с), гидротермальной системы Долины Гейзеров использовался хлоридный метод [10, 6]. В качестве исходных данных использованы расход реки ( $Q_r$ , кг/с) и концентрация хлора в речной воде ( $Cl_r$ , мг/л). Хлоридный метод автоматически компенсирует кипение и разбавление термальных вод.

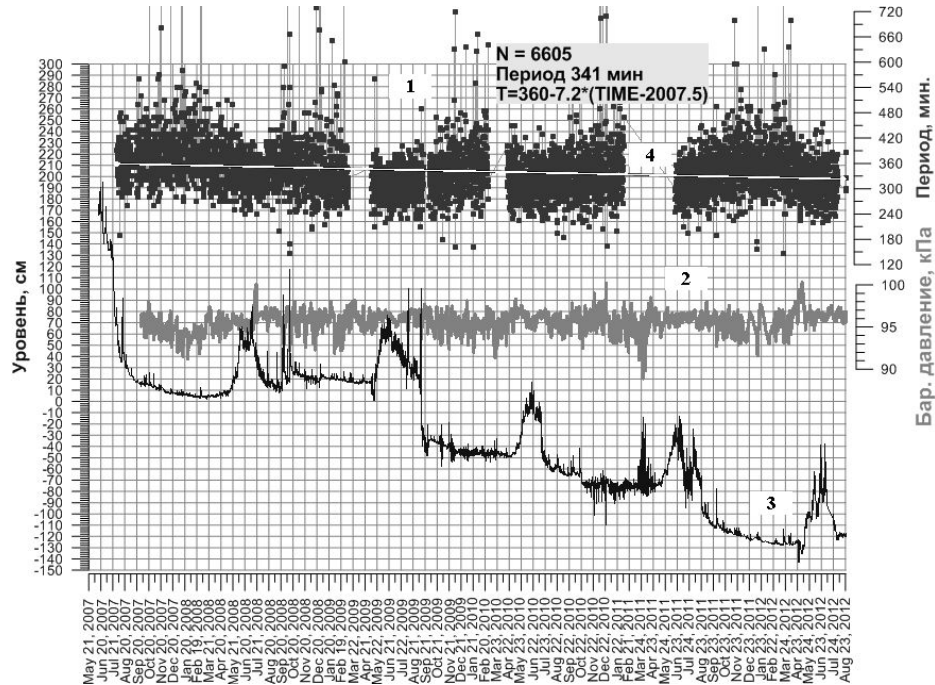
Для учёта фоновой концентрации хлора в метеорной воде (от 1 до 2 мг/л) применяется некоторая корректировка. Расход хлора связывается с глубинной компонентой термальных источников и оценивается как  $Q_r(Cl_r - Cl_b)$ , где  $Cl_r$  — концентрация хлора в речной воде,  $Cl_b$  — фоновая концентрация хлора в метеорной воде. Концентрация хлора в глубинной воде гидротермальной системы (материнский флюид —  $Cl_d$ , мг/л) оценивается по максимальному значению содержания хлора в термальных источниках (для Долины Гейзеров 900 мг/кг). Для расчёта разгрузки глубинной компоненты горячих источников используется следующая формула, полученная из соотношений массового баланса:

$$Q_d = \frac{Q_r(Cl_r - Cl_b)}{Cl_d} \quad (1)$$

Разгрузка глубинной термальной компоненты в Йеллоустонской гидротермальной системе (США) оценивается в 3000 кг/с, и варьирует на 25–50% в пределах гидрологического года. Разгрузка также зависит от сейсмичности, которая определяет степень проникновения метеорных вод в основную магматическую камеру [10].



**Рис. 2.** График зависимости периода извержений гейзера Большой от относительного уровня озера Подпрудное и барометрического давления. 1 – период извержений гейзера Большой; 2 – барометрическое давление; 3 – относительный уровень озера Подпрудное; 4 – средний период извержений гейзера Большой, равный 64 мин.



**Рис. 3.** График зависимости периода извержений гейзера Великан от относительного уровня озера Подпрудное и от барометрического давления. 1 – период извержений гейзера Великан; 2 – барометрическое давление; 3 – относительный уровень озера Подпрудное; 4 – линия, отражающая тенденцию стабилизации снижения продолжительности среднего периода извержений гейзера Великан после его уменьшения в первые три года после катастрофического оползня.

Для Долины Гейзеров разгрузка термальной глубинной компоненты измеряется непосредственно на выходе (Плотина) и входе (Щель) в озеро Подпрудное, всего за период наблюдений с 2007 г. на нижнем створе выполнено 17 прямых измерений (табл. 1).

Средняя величина зафиксированной хлоридным методом термальной разгрузки на створе «Плотина» составляет 219 кг/с, при этом она характеризуется сезонными изменениями с максимумом 324 кг/с — (в апреле 2008 г. в период зимней межени) и минимумом 167 кг/с (июль 2008 г. в период весенне-летнего паводка) (рис. 7, табл. 1). Разгрузка термальной глубинной компоненты может быть выражена в терминах тепловой мощности гидротермальной системы  $W$  (МВт), представляющей собой произведение  $Q_d$  и энтальпии глубинного теплоносителя. Энтальпия глубинного теплоносителя принимается 900 кДж/кг по данным геотермометрии [17]. Среднее значение тепловой мощности гидротермальной системы оценивается в 197 МВт.

На рис. 7 видно, что разгрузка термальной глубинной составляющей и тепловой мощности гидротермальной системы характеризуются локальными минимумами в период весенне-летнего половодья (май-июнь).

**4. Мониторинг газогидрохимических параметров разгрузки теплоносителя.** Разгрузка гейзеров и горячих источников в Долине Гейзеров представлена субщелочными низкоминерализованными хлоридно-натриевыми водами, данные по химическому составу до катастрофического оползня и по результатам опробования в 2010 г. приводятся в работе [17].

Результаты гидрохимического опробования режимных гейзеров и источников в 2011–2012 гг. приводятся в табл. 2 и 3 в виде анализов химического состава и на рис. 8 в виде сравнительного распределения по содержанию хлор-иона.

Сравнение результатов гидрохимического опробования режимных гейзеров и источников в 2010 г. [17, табл. 2] с результатами 2011–2012 гг. (табл. 2, 3) показывает (в целом) стабилизацию содержания хлор-иона (на уровне несколько ниже 2007 г.) и сульфат-иона (на уровне несколько выше 2007 г.) в период 2010–2012 гг. Кроме того, в 2012 г. фиксируется повышение глубинных температур на Верхне-Гейзерном поле по данным  $\text{SiO}_2$  геотермометра (максимальное значение 233° С) и по данным Na-K геотермометра (192° С).

Соответствующие изменения для гейзера Великан до 2007 г. [6], 2010 г., 2011 г., 2012 г.: хлор-ион (831 мг/л, 794 мг/л, 781 мг/л, 780 мг/л), сульфат-ион (154 мг/л, 171 мг/л, 163 мг/л, 288 мг/л),  $\text{SiO}_2$  геотермометр (200° С, 210° С, 171° С, 190° С) и Na-K геотермометр (184° С, 176° С, 173° С, 190° С). Изложенное выше отображено на рис. 8.

Пробы на растворённый газ отбирались погружением пробоотборных трубок в грифоны источников

или ванны гейзеров. Результаты газовых анализов приводятся в табл. 4 и 5.

До катастрофического оползня термальный флюид характеризовался следующим газовым составом:  $\text{CO}_2$  — 54,8 об%,  $\text{N}_2$  — 44,2 об%,  $\text{CH}_4$  — 1,0 об% [3] (вероятно с вычитанием атмосферной составляющей).

По данным анализа проб, отобранных в 2011–2012 гг. доминируют атмосферные газы (табл. 4 и 5) (без вычета атмосферной составляющей). В составе растворённого газа среднее соотношение  $\text{O}_2/\text{N}_2 = 0,33$  значительно превышает атмосферное 0,268, это свидетельствует о существенном растворении атмосферного воздуха в гидротермальном флюиде (что может происходить как за счёт притока метеорных вод в резервуар, так и за счёт смешения пароводяных потоков с воздухом в каналах гейзеров).

После вычета атмосферной составляющей, газовый состав гейзера Великан (проба от 19 октября 2011 г.) характеризуется следующим составом:  $\text{N}_2$  — 56,2 об%,  $\text{CO}_2$  — 38 об%, Ar — 4,2 об%,  $\text{CH}_4$  — 1,6 об%.

Таким образом, газогидрохимические данные после оползня 3 июня 2007 г. показывают признаки разбавления по основным компонентам глубинного теплоносителя (уменьшение содержания Cl-иона на 6%) при некотором увеличении компонент, связанных с притоком охлажденных метеорных вод обогащённых атмосферным воздухом (увеличение содержания  $\text{SO}_4$ -иона на 87%, Ca,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), что, вероятно, связано с инъекцией в гидротермальную систему воды из Подпрудного Озера.

**5. Мониторинг изотопного состава ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) гидротермального флюида.** Опробование кипящих источников в Долине Гейзеров для определения изотопного состава воды выполнялось нами в 1985 и 2010 годах. Пробы G1 на G6 были отобраны в 1985 г. из небольших кипящих источников в бассейне р. Гейзерная между источниками 7 и 24. Пробы 3, М, 21, 23, 45, 52, 54, N16, N17, 56 и 59 были отобраны в 2010 г. на протяжении всей области разгрузки Долины Гейзеров (названия и номера соответствуют названиям в работах (2, 17, табл. 2 и 3)). Результаты определения изотопного состава воды показаны на рис. 6.

Сходимость точек опробования термальных источников ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) с линией изотопного фракционирования метеорных вод свидетельствует об их преимущественно метеорном происхождении, диапазон изменения  $\delta\text{D}$  от 92 до 102 ‰ (данные 1985 г.) и от 98 до 106 ‰ (данные 2010 г.) — говорит о том, что область водного питания горячих источников находится на +500 ÷ +900 м. абс. (по данным 1985 г.) и от +700 до +1200 м. абс. (по данным 2010 г.). Наиболее благоприятные зоны для водного питания совпадают с областями распространения риолитовых экзотрий с проницаемыми питающими каналами ( $\xi\text{Q}_3^4$ ) и с границей кальдеры, особенно в пределах прогретых участков, допускающих всепогодную

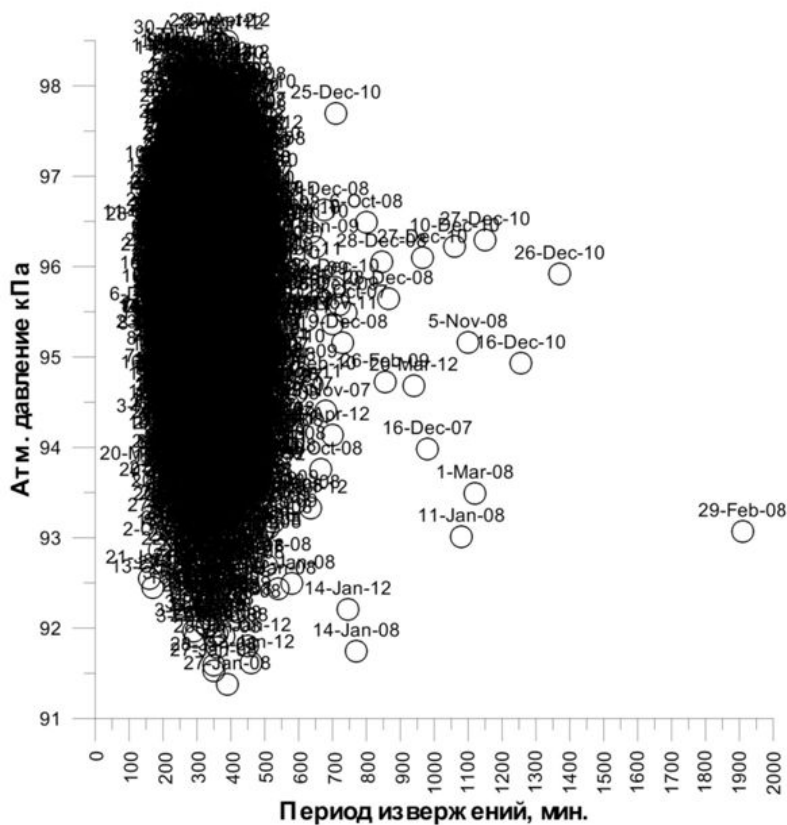


Рис. 4. Взаимосвязь периода извержений гейзера Великан с атмосферным давлением.

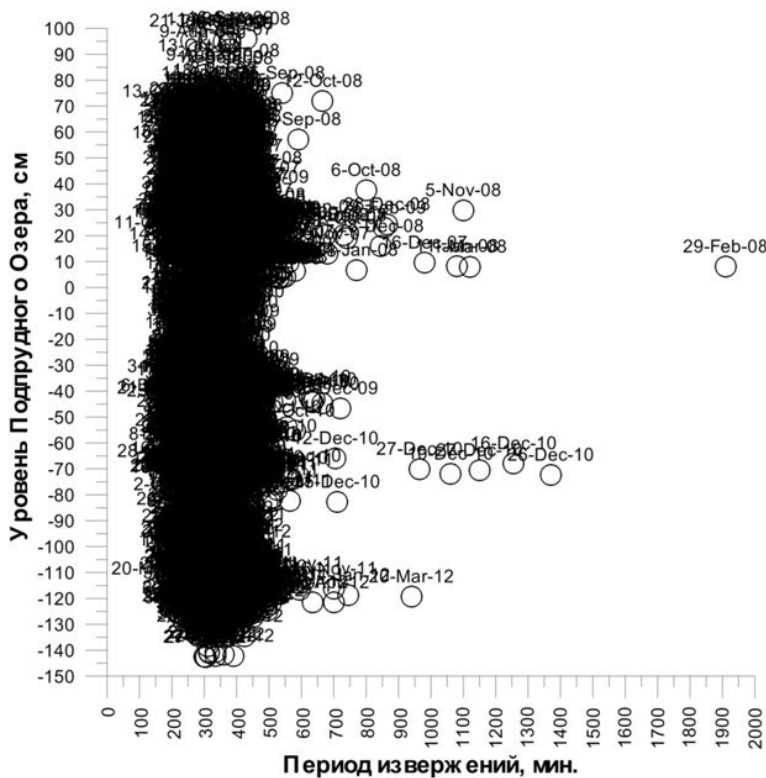
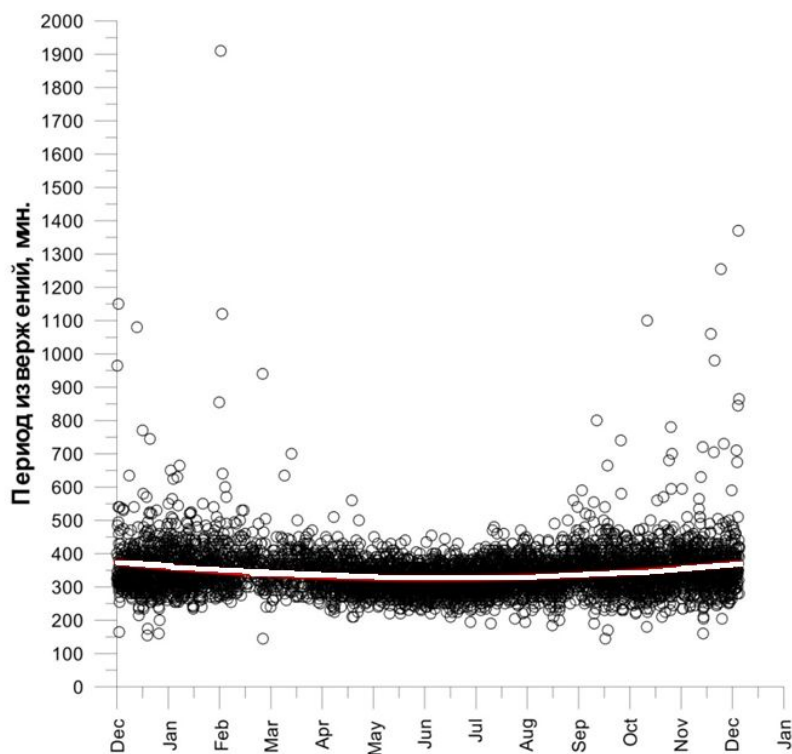
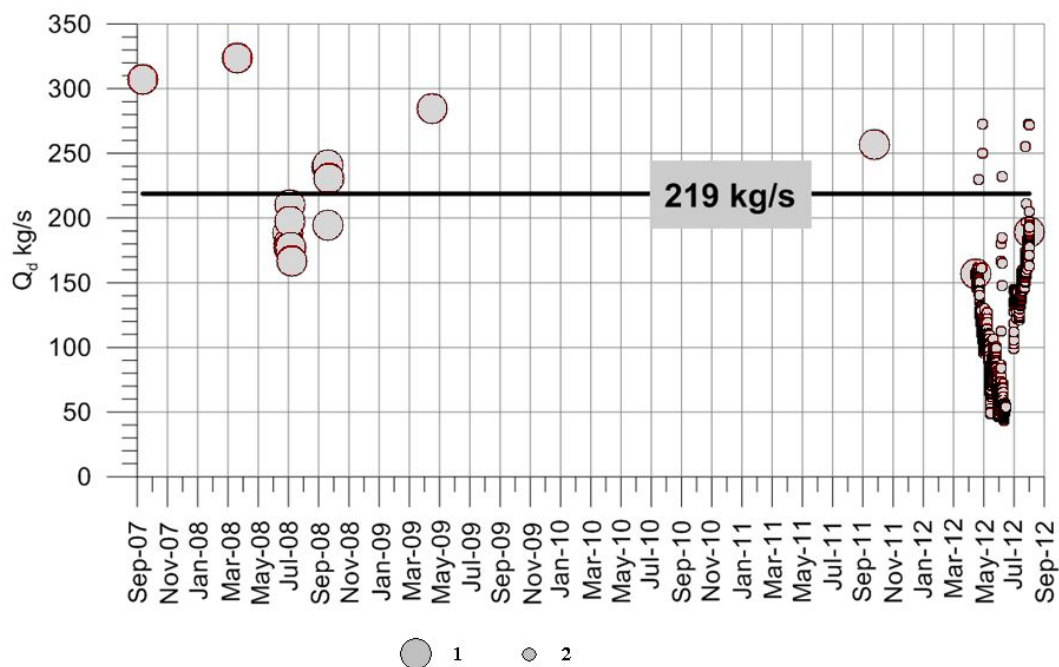


Рис. 5. Взаимосвязь периода извержений гейзера Великан с уровнем Подprudного Озера.



**Рис. 6.** Изменение периода извержений гейзера Великан в годовом гидрологическом цикле по данным наблюдений в 2007–2012 гг.



**Рис. 7.** Изменение разгрузки термальной глубинной компоненты ( $Q_d$ , кг/с) по данным измерений на створе «Плотина». 1 — прямые измерения; 2 — расчётные значения по данным непрерывных записей проводимости на створе «Плотина» с использованием логгера НОВО U24-001.

**Таблица 1.** Оценка расхода разгрузки гидротерм хлоридным методом на створе «Плотина»

Дата	$Q_r$ кг/с	$T$ °С	$C_{Cl}$ мг/кг	$Q_{Cl}$ г/с	$Q_d$ кг/с	$W$ МВт
01 октября 2007 г.	1770	21,5	156	276,1	306,8	276,1
08 апреля 2008 г.	1268	24,5	229,8	291,4	323,8	291,4
21 июля 2008 г.	3640	16,5	46,5	169,3	188,1	169,3
22 июля 2008 г.	3520	16,5	46,1	162,3	180,3	162,3
23 июля 2008 г.	3410	17	46,8	159,6	177,3	159,6
24 июля 2008 г.	3510	19,1	53,9	189,2	210,2	189,2
25 июля 2008 г.	3290	17,7	53,9	177,3	197,0	177,3
26 июля 2008 г.	2920	18	54,6	159,4	177,1	159,4
27 июля 2008 г.	2820	18,2	53,2	150,0	166,7	150,0
07 октября 2008 г.	3040	18	71	215,8	239,8	215,8
08 октября 2008 г.	2830	18,9	76,7	217,1	241,2	217,1
09 октября 2008 г.	2460	17,2	71	174,7	194,1	174,7
10 октября 2008 г.	2590	17,6	80,2	207,7	230,8	207,7
07 мая 2009 г.	1230	26	208	255,8	284,3	255,8
16 октября 2011 г.	1675	17,8	138	231,2	256,8	231,2
08 мая 2012 г.	1250	19,3	113	141,3	156,9	141,3
24 августа 2012 г.	1331	27	128	170,4	189,3	170,4

*Примечание.* Расчёты тепломассопотоков выполнялись А. В. Кирюхиным, гидрометрические измерения — А. В. Кирюхиным, Т. В. Рычковой, Е. В. Чёрных, химический анализ — В. К. Марыновой, Карташовой Е. В., В. В. Дунин-Барковской, О. В. Шульгой в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН.  $Q_r$  — расход р. Гейзерной, кг/с,  $T$  — температура р. Гейзерной, °С,  $C_{Cl}$  — концентрация хлор-иона в р. Гейзерной, мг/кг,  $Q_{Cl}$  — массовый расход хлор-иона, г/с,  $Q_d$  — расход скрытой разгрузки гидротерм, кг/с,  $W$  — тепловая мощность разгрузки гидротерм, МВт. При расчётах концентрация хлор-иона в родительском флюиде принималась равной 900 мг/кг, энтальпия — 900 кДж/кг.

**Таблица 2.** Химический состав горячих источников и гейзеров в 2011 г. (в мг/л)

№	pH	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	NH <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	T-Na-K	T-SiO <sub>2</sub>
3	9,1	461,5	144,0	335,8	24,5	24,5	<0,1	26,0	171,6	156,0	169,9
21	9,5	795,2	153,6	554,3	46,2	22,4	<0,1	32,1	180,2	168,9	173,1
23	8,9	781,0	163,2	545,2	47,2	21,6	<0,1	101,3	175,7	172,6	171,4
28	9,1	667,4	144,0	460,0	28,7	24,5	<0,1	12,4	139,2	141,9	156,7
45	10,4	127,8	144,0	208,4	9,1	3,6	<0,1	0,3	214,2	112,9	184,8
52	9,6	454,4	163,2	363,2	22,4	16,8	<0,1	50,7	208,4	140,9	182,9
54	9,4	600,0	115,2	397,2	35,2	18,8	<0,1	29,7	260,0	175,0	198,7
M	6,7	681,6	230,4	528,1	29,9	24,1	<0,1	37,1	214,7	133,6	185,0
N16	9,6	447,3	153,6	340,4	24,2	13,6	<0,1	24,7	183,6	153,6	174,3
N17	9,4	497,0	134,0	381,3	24,8	18,0	<0,1	66,7	158,8	145,6	164,9
N37	9,0	497,0	134,4	344,8	17,0	27,7	<0,1	56,9	102,9	122,3	138,9

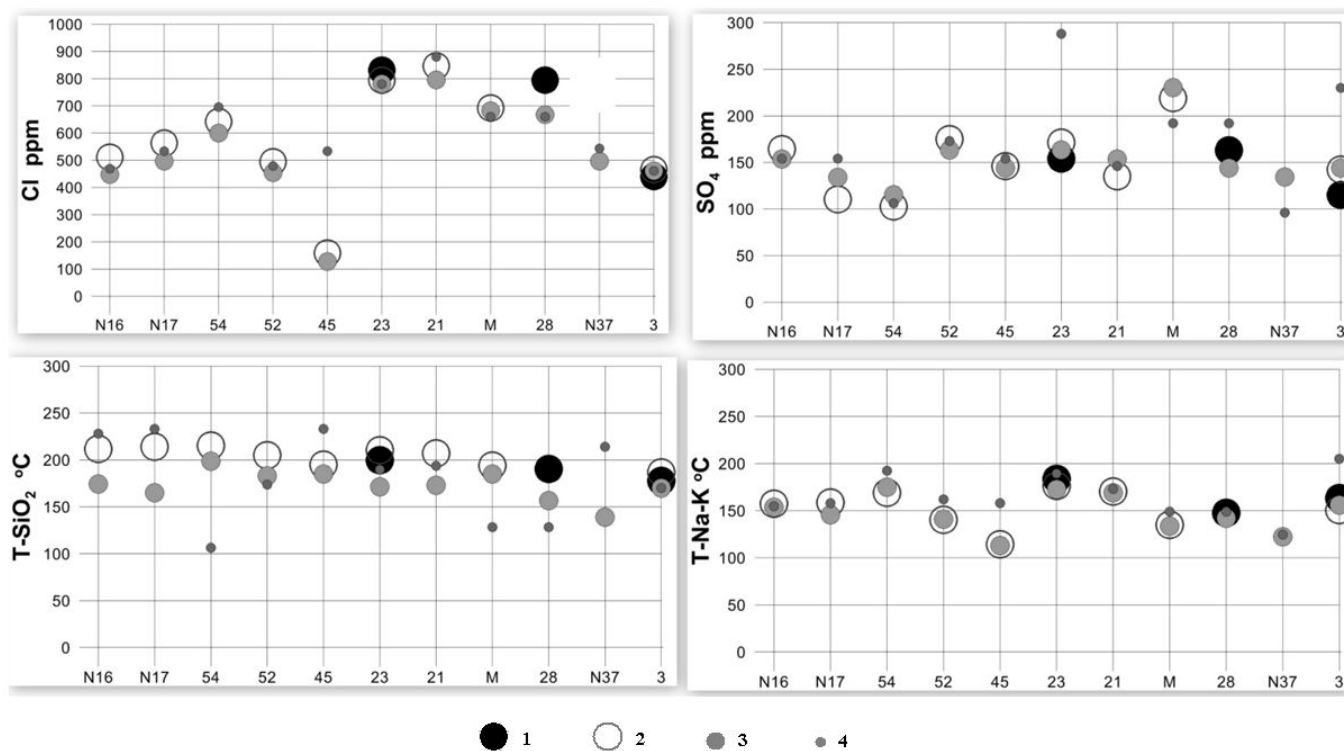
*Примечание.* Пробы отобраны А. В. Кирюхиным (октябрь 2011 г.), проанализированы Л. Н. Гарцевой, Н. А. Соловьевой, В. В. Дунин-Барковской в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. T-SiO<sub>2</sub> и T-Na-K — химические геотермометры [9].



Таблица 3. Химический состав (в мг/л) горячих источников и гейзеров в 2012 г.

№	pH	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	NH <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	T-Na-K	T-SiO <sub>2</sub>
3	8,8	461	230	377	44	22	1,25	70	172	204,9	170,1
21	8,7	880	146	598	52	20	<0,1	88	242	173,1	193,5
23	8,5	780	288	482	49	22	2	117	229	189,4	189,5
28	8,8	660	192	489	33	24	2,3	91	85	148,9	128,5
45	9,7	533	154	390	29	17	<0,1	82	401	157,8	233,0
52	9,1	479	173	360	28	20	0,4	32	182	162,1	173,8
54	7,9	695	106	470	49	14	<0,1	113	55	192,2	106,5
M	8,5	660	192	489	33	24	2,3	91	85	148,9	128,5
N16	8,9	469	154	362	26	15	<0,1	68	377	154,6	227,8
N17	8,9	533	154	390	29	17	<0,1	82	401	157,8	233,0
N37	6,5	543	96	354	18	23	<0,1	68	317	124,8	213,8
Дополнительное опробование в 2012 г.											
56	6,8	3	65	21	11	30	<0,1	<0,6	319		214,3
46	8,4	449	269	393	15	25	<0,1	69	220		186,7
Исток руч. Горячий	7,5	14	20	15	3	12	<0,1	<0,6	132		153,5
Исток руч. Тёплый	6,7	0	44	15	3	8	<0,1	<0,6	135		154,8
Зона отрыва оползня	7,4	3	1	7	2	2	<0,1	<0,6	58		109,0

Примечание. Пробы отобраны А. В. Кирюхиным (август 2012 г.), проанализированы В. В. Дунин-Барковской, О. В. Шульгой в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. T-SiO<sub>2</sub> и T-Na-K – химические геотермометры [9].



**Рис. 8.** Изменение содержания Cl, SO<sub>4</sub>, T-SiO<sub>2</sub> и T-Na-K в режимных гейзерах и источниках. 1 — данные до 2007 г. (В. М. Сугробов и др., 2009); 2 — данные 2010 г.; 3 — данные 2011 г.; 4 — данные 2012 г. Примечание: Номера источников и гейзеров соответствуют рис. 1.

**Таблица 4.** Химический состав растворенного газа (об.%) гейзеров и горячих источников Долины Гейзеров в 2011 г.

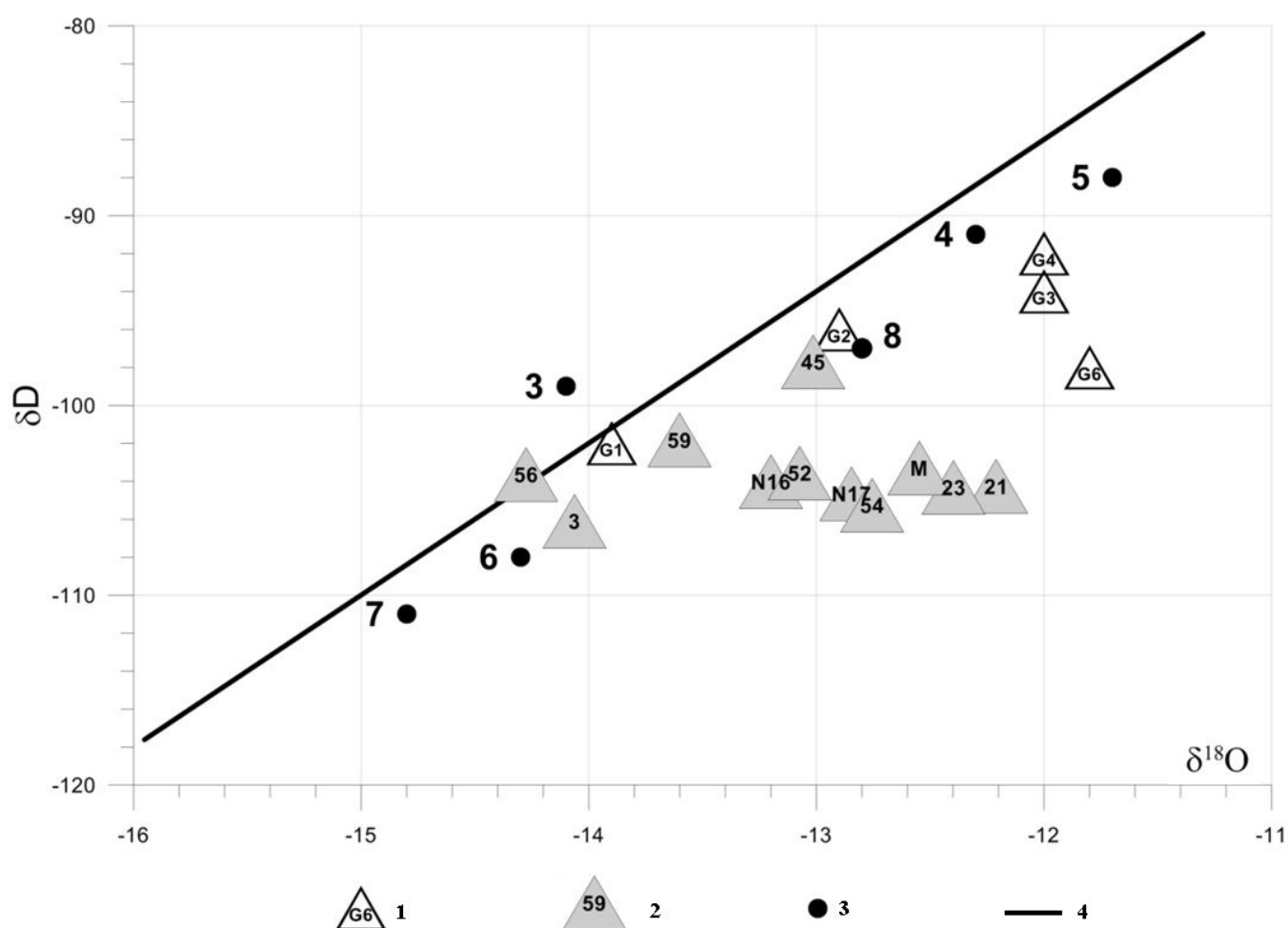
№	H <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Сумма мл/л	Сумма %
3		1,66	27,13	68,56	1,08	0,003	5,18	98,43
21	0,002	1,25	27,21	68,52	0,67		5,87	97,66
23		1,21	18,94	75,46	3,31	0,139	13,46	99,07
23		1,59	25,39	70,36	1,5	9E-04	4,42	98,84
28		0,9	20,41	75,41	0,6	0,005	72,88	97,33
52	0,002	1,66	30,33	65,45		0,004	5,34	98,02
54		1,01	20,71	75,53	0,43	0,004	23,07	97,68
N16	7 · 10 <sup>-4</sup>	1,83	25,13	70,33	0,27		6,86	97,56
N17		0,93	20,47	77,72	нет	0,006	5,06	99,13
N56		0,638	9,5	29,27	58,04	0,06	42,79	97,51

Примечание. Пробы отобраны А. В. Кирюхиным (окт. 2011 г.), проанализированы В. И. Гусевой в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. Номер источника (№) приведен в соответствии с рис. 1.

**Таблица 5.** Химический состав растворенного газа (об. %) гейзеров и горячих источников Долины Гейзеров в 2012 г.

№	H <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Сумма, мл/л	Сумма %
21		1,206	21,36	75,61	0,23	0,001	8,7	98,41
23	0,0200	0,921	20,33	76,07	0,070	0,385	6,6	97,80
28	0,0070	0,996	21,1	73,36	1,91	0,015	6	97,39
54		1,264	14,25	79,36	0,500	0,003	21,7	95,38
N17	0,0050	0,007	19,45	73,05	3,740	0,006	6,4	96,26

Примечание. Пробы отобраны А. В. Кирюхиным (август 2011 г.), проанализированы В. И. Гусевой в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН. Номер источника (№) приведён в соответствии с рис. 1.



**Рис. 9.** Изотопный состав воды кипящих и горячих источников Нижне-Гейзерного и Верхне-Гейзерного полей по данным 1985 и 2010 гг., в сравнении с метеорными водами Камчатки на различных абсолютных отметках (реки, ручьи). 1 — данные 1985 г.; 2 — данные 2010 г.; 3 — метеорные воды с различных отметок (3 — р. Дачный, +800 м абс.; 4 — р. Жировая, +500 м абс.; 5 — р. Фальшивая, +500 м абс.; 6,7 — Мутновский кратер, ручей +1550 м абс.; 8 — холодный ручей в ДГ, +520 м абс.), 4 — глобальная линия метеорных вод. Примечание: Номера кипящих и горячих источников соответствуют рис. 1. Пробы отбирались А. В. Кирюхиным и проанализированы В. А. Поляковым (ВСЕГИНГЕО, Москва, 1985) и Е. О. Дубининой (ИГЕМ, Москва, 2011).

инфильтрацию. Одна из таких экстрезий — риолитовая экстрезия Гейзерная (рис. 1) с отметками от +600 до +1085 м.абс. и площадью поверхности более 6 км<sup>2</sup>.

Положительный сдвиг по  $\delta^{18}\text{O}$  (1–2%) для группы кипящих источников и гейзеров (М, 21, 23, 52, 54, N16, N17) объясняется приуроченностью к зонам восходящих потоков высокотемпературного глубинного теплоносителя. Большие сдвиги по  $\delta^{18}\text{O}$  сопровождаются более высокой концентрацией хлорида. Разделение горячих источников по изотопному сдвигу  $\delta^{18}\text{O}$  на две подгруппы: Нижне-Гейзерного поля (21-Аверий, 23-Великан, М — Младенец (Крепость) и Верхне-Гейзерного поля (N16, N17, 52-Верхний, 54-Хлоридный) — свидетельствует о существовании двух восходящих потоков глубинного теплоносителя. Конденсатные источники 59 и 56 (с низким содержанием хлора) ложатся на линию метеорных вод и по составу близки к метеорным водам, прогретым паром. Вода гейзеров Первенец (3) и Трубы (45) также значительно разбавлена.

#### **Прогнозное TOUGH2-EOS3 моделирование влияния Подпрудного Озера на режим гейзера Великан**

Для осуществления прогноза влияния инъекции холодной воды из Подпрудного Озера (сформировавшегося после катастрофического оползня 3 июня 2007 г.) на гидрогеологический режим гейзера Великан используется TOUGH2-EOS3 моделирование [18]. На численной термогидродинамической модели (полное описание сборки и тестирования модели приводится в работе [17]) была определена внутренняя область, совпадающая с контурами Подпрудного Озера с граничным условием Дирихле (соответствующим уровню воды в озере +423 м).

Прогнозный расход из элемента модели, соответствующий гейзеру Великан, был преобразован в период извержений гейзера  $\tau$  ( $\tau = M/Q$ , где  $M$  — масса извержения Великана (кг),  $Q$  — прогнозный расход Великана (кг/с)). рис. 10 показывает, что инъекция холодной воды из Подпрудного Озера имеет некоторый положительный эффект на активность Великана — его средний расход должен возрасти на 10,3%, а период извержений соответственно должен уменьшиться на 9,4% (и этот прогноз уже подтвердился). Расчёты по прогнозному моделированию выполнялись при условии, что в течение прогнозного времени не произойдет новых катастрофических явлений.

#### **Взаимосвязь режима гейзеров с сейсмическими событиями и гидрологическим циклом**

Реакция гейзеров на изменения сезонного гидрологического цикла связана с зависимостью периодичности их извержений от уровня подземных вод в питающем гидрогеологическом резервуаре (давления в питающем гидротермальном резервуаре) и степени охлаждения канала извержения. Данные по известным гейзерам в Верхнем Бассейне Гей-

зеров (Йеллоустонский национальный парк, США) за период с 1997 по 2006 гг. (Daisy, Castle, Aurum, Depression, Old Faithful) показывают обратную корреляцию периода извержения гейзеров с расходом реки Madison [12]. Коэффициенты корреляции оцениваются от –0,65 до –0,98 (Old Faithful).

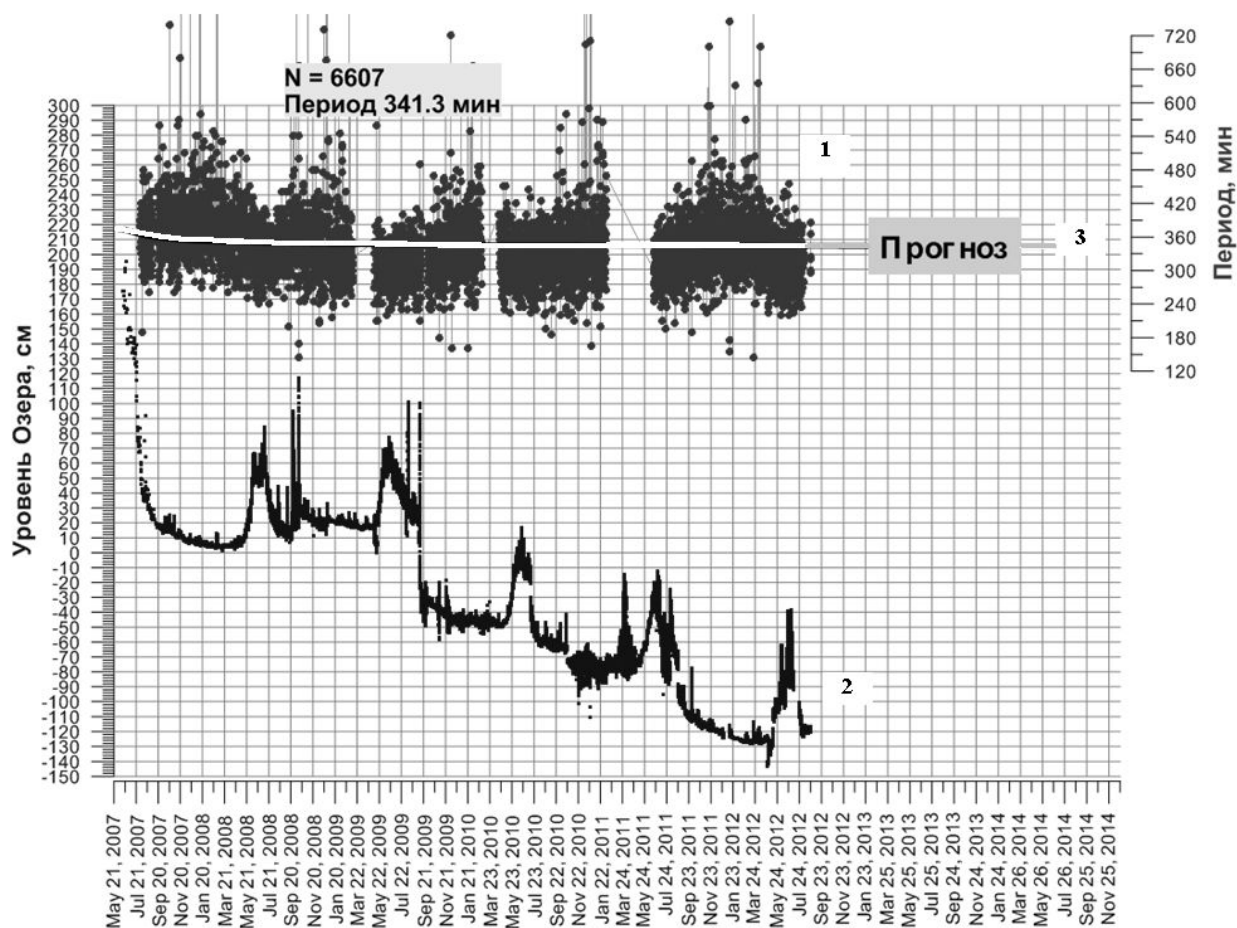
По мнению автора [12]: 1) увеличение периодов извержений, следующих за паводками, объясняется результатом инфильтрации холодной воды и соответствующим охлаждением каналов гейзеров; 2) на период извержения гейзера влияют также следующие факторы: образование ледяных корок и отложений криогенного кремнезёма на поверхности, которые могут уменьшить водное питание гидрогеологического резервуара в зимнее время; 3) длительный засушливый период должен сопровождаться увеличением периода извержений гейзеров и возможно даже прекращением функционирования, а в период с большим количеством осадков интервал извержения гейзеров должен уменьшиться.

Сейсмичность также является фактором, влияющим на период извержения гейзеров. Доказательством этому явились изменения, произошедшие в Йеллоустонской гидротермальной системе через час после разрушительного землетрясения Денали 3 ноября 2002 г. на Аляске ( $M = 7,9$ ) [14, 19]. Этот факт позволяет предположить, что в гидротермальных системах изменения напряженного состояния сопровождается изменением проницаемости пород, раскрытием/закрытием существующих трещин, тем самым, изменяя деятельность гейзеров. Кроме того, предполагается, что землетрясения спровоцировали перераспределение гидротермальных флюидов, колебания газовых пузырей в окружении жидкой гидротермальной фазы и локальное повышение давления в поровом пространстве [15].

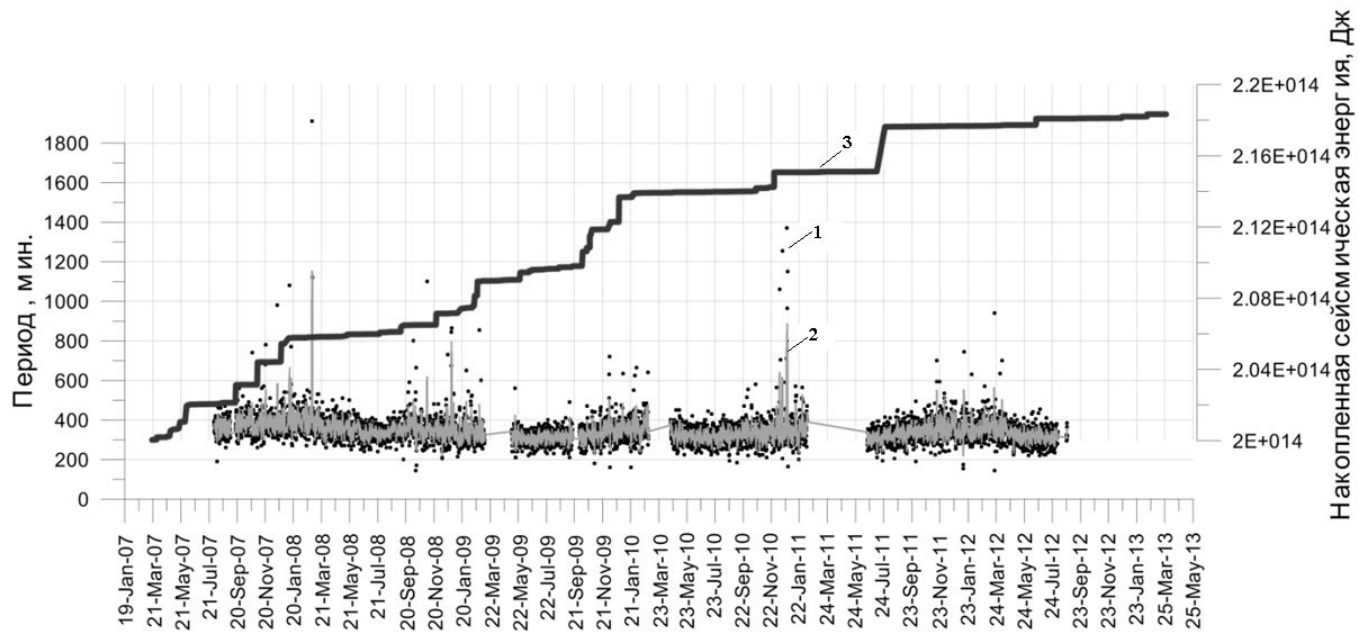
Кроме того, в процессе исследований гейзеров Йеллоустонского национального парка выяснилось, что между некоторыми гейзерами даже на большом расстоянии существует гидравлическая связь. Это указывает на то, что резервуары, питающие гейзеры, включают высокопроницаемые горизонтальные каналы [14].

Отметим также, что гейзеры в Йеллоустоне слабобучувствительны к Земным приливам и отливам, испытывают слабое влияние изменений атмосферного давления.

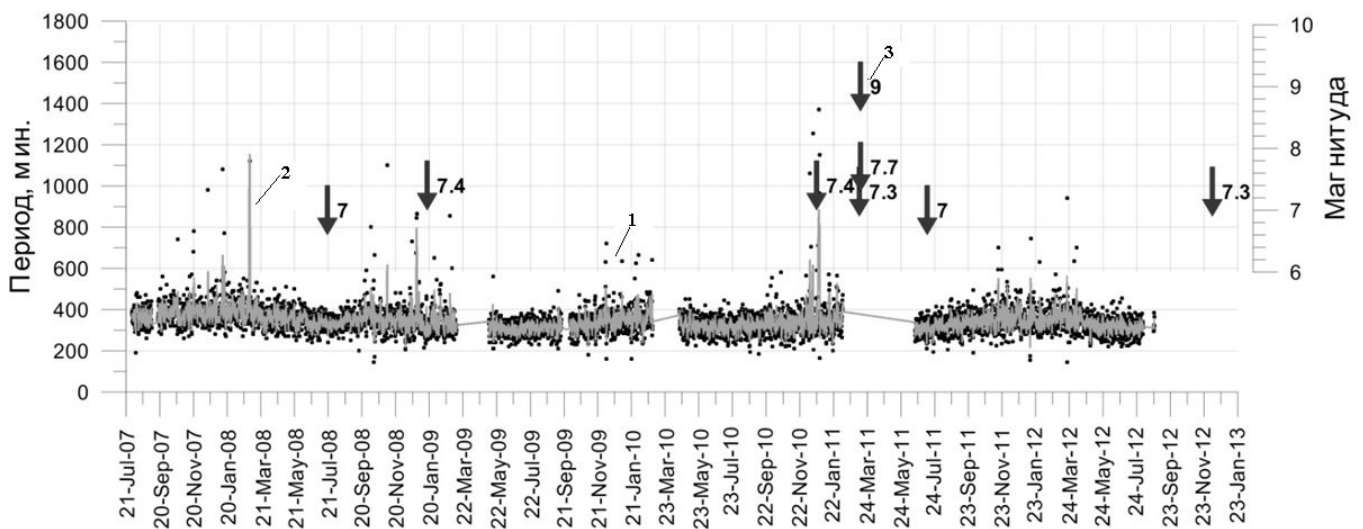
Сопоставление кумулятивного графика сейсмической энергии (по региональному и глобальному каталогам) с динамикой изменения периода извержений гейзера Великан (Долина Гейзеров, Камчатка) пока не позволило обнаружить однозначной синхронизации этих изменений с сейсмическими событиями (рис. 11 и 12). Можно лишь отметить (рис. 11), что одно из сильных региональных землетрясений (27 ноября 2010 г.,  $M = 5,2$ ) происшедшее в 40 км к ССВ от Долины Гейзеров могло инициировать замедление периодичности Великана. Из трёх сильных ( $M > 7$ ) землетрясений в радиусе 3500 км — одно



**Рис. 10.** Прогноз изменения периода извержений гейзера Великан по данным TOUGH2-EOS3 моделирования [16]. 1 — фактический период извержений гейзера Великан; 2 — относительный уровень Подпрудного Озера; 3 — прогноз изменения периода извержений гейзера Великан.



**Рис. 11.** Период извержений гейзера Великан и региональная сейсмичность (радиус 200 км, глубина до 40 км). 1 – период извержения гейзера Великан (мин); 2 – график сейсмических событий по датам (Дж); 3 – накопленная сейсмическая энергия (Дж).



**Рис. 12.** Период извержений гейзера Великан и глобальная сейсмичность (радиус 3500 км, глубина до 40 км,  $M \geq 7$ ). 1 – период извержения гейзера Великан (мин); 2 – график сейсмических событий по датам (Дж); 3 – значение магнитуды.

синхронизировано с замедлением периодичности Великана в тот же период времени.

### Выводы

Зарегулированность и инерционность Великана позволяют рассматривать его как потенциальный предвестник катастрофических событий.

Авторы признательны В. А. Злотникову, В. А. Дрознину, В. Л. Леонову, В. М. Сугробову, В. Н. Двигало, И. Ф. Делемену, Е. В. Чёрных, Л. П. Вергасовой, М. Ю. Пузанкову, А. Б. Белоусову, С. А. Чиркову, О. О. Мирошник, Е. О. Дубининой, Е. В. Карташёвой, В. И. Гусевой, Р. Черкашину, П. А. Кирюхину, Н. Соловьеву, А. В. Мушинскому, А. Ю. Полякову — за помощь в выполнении исследований в Долине Гейзеров. А также выражают благодарность Т. И. Шпиленку — директору Кроноцкого государственного биосферного заповедника, и В. Н. Чеброву — директору Камчатского филиала геофизической службы РАН за помощь при транспортировке в Долину Гейзеров.

Работа осуществлялась при поддержке проекта РФФИ 129-05-00 125а и ДВО РАН 12-III-A-08-170, 12-I-П27-04.

### Список литературы

1. Дрознин, В.А. 2007. (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru/>).
2. Кирюхин А. В., Рычкова Т. В. Условия формирования и состояние гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011, № 3, С. 238-253.
3. Кононов В. И. Геохимия термальных вод в областях современного вулканизма. Москва, Наука. 1983. 212 с.
4. Леонов А. В. Каталог основных объектов в Долине гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) 2011 г. 208 стр. Версия 8 октября 2011 г.
5. Степаненко В. М. Отчёт о выполнении программы научно-исследовательских работ по теме «Комплексные метеорологические исследования в Кроноцком заповеднике» за 2012 гг., М. МГУ, 2012, 42 с.
6. Сугробов В. М., Сугрובה Н. Г., Дрознин В. А., Карпов Г. А., Леонов В. Л. Долина Гейзеров — жемчужина Камчатки. // Научный путеводитель. Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, 2009, 108 с.
7. Устинова Т. И. Гейзеры Камчатки. Москва. Географиз, 1955.
8. A. Belousov, M. Belousova, and A. Nechayev Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism // GEOLOGY, March 2013; Vol. 41; no. 3; P. 1-4 doi:10.1130/G33366.1
9. Fournier, R.O. Application of water chemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In: Geothermal Systems. Principle and Case Histories, Edited by Rybach, L. and Muffler, L.J.P.), 1981.P.109-143.
10. Fournier, R. Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park Hydrothermal System. // Ann. Rev. Earth Planet Sci. 1989. 17 P.13-53.
11. Hutchinson R. A., Westphal J. A., Kieffer S. W. In situ observations of Old Faithful Geyser // Geology, October 1997 P.875-878.
12. Hurwitz S., Kumar A., Taylor R., Heasler H. Climate-induced variations of geyser periodicity in Yellowstone National Park, USA // Geology, June 2008, P.451-454.
13. Hurwitz S., Hunt A.G., Evans W.C. Temporal variations of geyser water chemistry in the Upper Geyser Basin, Yellowstone National Park, USA // Geochem. Geophys. Geosyst., 13, Q12 005, doi:10.1029/2012GC004 388
14. Husen S., Taylor R., Smith R. B., Heasler H. Changes in geyser eruption behavior and remotely triggered seismicity in Yellowstone National Park produced by the 2002 M 7,9 Denali fault earthquake, Alaska // Geology; June 2004, P. 537-540.
15. Ingebritsen S.E., Rojstaczer S.A. Geyser periodicity and the response of geysers to deformation // Journal of geophysical research, Vol. 101, No, B10, October 10, 1996 P. 891-905.
16. Kiryukhin A. V. Inverse Modeling Of The Natural State Of The Geysers Valley Hydrothermal System (KRONOTSKY Nature Reserve, Kamchatka) Preceding Of The Giant Landslide // Vol. 53A-2585 AGU Abstract, 4-9 Dec. 2011, San Francisco, USA
17. Kiryukhin A. V., Ryckova T. V., Dubrovskaya I.K. Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // Applied Geochemistry Journal, 2012, № 27, 1753-1766.
18. Pruess, K., Oldenburg C., and Moridis, G., TOUGH2 user's guide, Version 2.0. // Rep. LBNL-43 134, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, California. 1999. 198 p.
19. Rojstaczer S., Galloway D. L., Ingebritsen S. E., Rubin D.M. Variability in geyser eruptive timing and its causes: Yellowstone National Park // Geophysical research letters, Vol. 30, 2003, P. 1-4.