



УДК 556.3

А. В. Кирюхин, Т. В. Рычкова, И. К. Дубровская

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006;
e-mail: avk2@kscnet.ru*

3D термогидродинамическое моделирование естественного состояния гидротермальной системы Долины Гейзеров (до оползня 03 июня 2007 г.)

Создана 3D модель естественного состояния гидротермальной системы Долины Гейзеров до оползня 03 июня 2007 г., которая доказывает возможность формирования естественной разгрузки гидротерм с расходом, сопоставимым с наблюдаемым в настоящее время. Спустя 20–30 тыс. лет после включения в основании модели притока глубинного теплоносителя, модельные источники на поверхности достигают энтальпии 500–600 кДж/кг, закипают и переходят в квазистационарный режим разгрузки. Модельная разгрузка соответствует наблюдаемой, модельное температурное поле совпадает с областью распространения известных термоаномалий, модельная температура согласуется с максимальными оценками температуры 210°С по гидрохимическим геотермометрам (Na-K и SiO₂), модельные расходы сравниваются с фактическими данными по разгрузке горячих источников и гейзеров. Важно отметить, что на модели получено формирование двухфазного резервуара под водоупором на левобережье р. Гейзерной, в котором, при возрастании давления могут происходить парогидротермальные взрывы, сопровождающиеся оползневыми процессами.

Введение

Долина Гейзеров (ДГ) расположена в Кроноцком государственном заповеднике на полуострове Камчатка. Впервые она была обнаружена Т. И. Устиновой 14 апреля 1941 г. в каньоне бассейна р. Гейзерной длиной 8 км и глубиной 400 м. В результате геологических и гидрогеологических исследований, проведённых в 1960–1970 гг. (В. В. Аверьев, В. И. Белоусов, Б. В. Иванов, В. И. Кононов, В. М. Сугробов, В. А. Дроздин, В. Л. Леонов, Н. Г. Сугрובה и др.) установлено, что гидротермальная система Долины Гейзеров имеет наибольший расход естественной разгрузки (300 кг/с, 100°С) из двенадцати наиболее крупных высокотемпературных гидротермальных системы Камчатки.

Целью данного исследования является использование доступных гидрогеологических данных для создания и разработки 3D термо-гидродинамической модели для выяснения механизма формирования гидротермальной системы, что, в свою очередь, позволит оценить изменения условий разгрузки/питания после катастрофического оползня 3 июня 2007 г., выявить причины таких катастрофических событий для их прогнозирования в будущем.

Условия формирования гидротермальной системы ДГ

Условия разгрузки. Гидротермальная система Долины Гейзеров представлена четырьмя основными очагами разгрузки гидротерм (рис. 1, 1а): Нижне-

Гейзерное поле (в основном гейзеры и кипящие источники); Верхне-Гейзерное поле (включающее нижний участок разгрузки в виде горячеводных хлоридно-натриевых источников и верхний участок разгрузки в виде паровых струй и пароконденсатных источников) и Долина Смерти (парогазовые струи и пароконденсатные источники). Основная термовыводящая зона восходящего потока вытянута в северо-восточном направлении и трассируется кипящими источниками и гейзерами с суммарной разгрузкой 260–300 кг/с. Другая значимая термовыводящая зона вытянута в северном-северо-западном направлении (параллельно краю кальдеры) и прослеживается фумаролами и термальными полями на Верхне-Гейзерном поле. Указанные выше две проницаемые термовыводящие зоны — основные элементы тепломассопереноса в гидротермальной системе Долины Гейзеров.

Роль водоупора в гидротермальном резервуаре выполняют озёрно-кальдерные отложения Гейзерной пачки (Q₃⁴ grn), залегающие с углом падения 8–25° в северо-западном направлении в сторону бассейна р. Гейзерная. Когда восходящий термальный флюид достигает подошвы этого наклонного водоупорного слоя, то происходит его разделение на паровую и жидкую фазу. Пар движется вверх (по восстанию подошвы водоупора) в северо-восточном направлении, жидкая фаза — вниз (по падению подошвы водоупора) в направлении долины р. Гейзерная, где происходит разгрузка гейзеров и горячих источников.

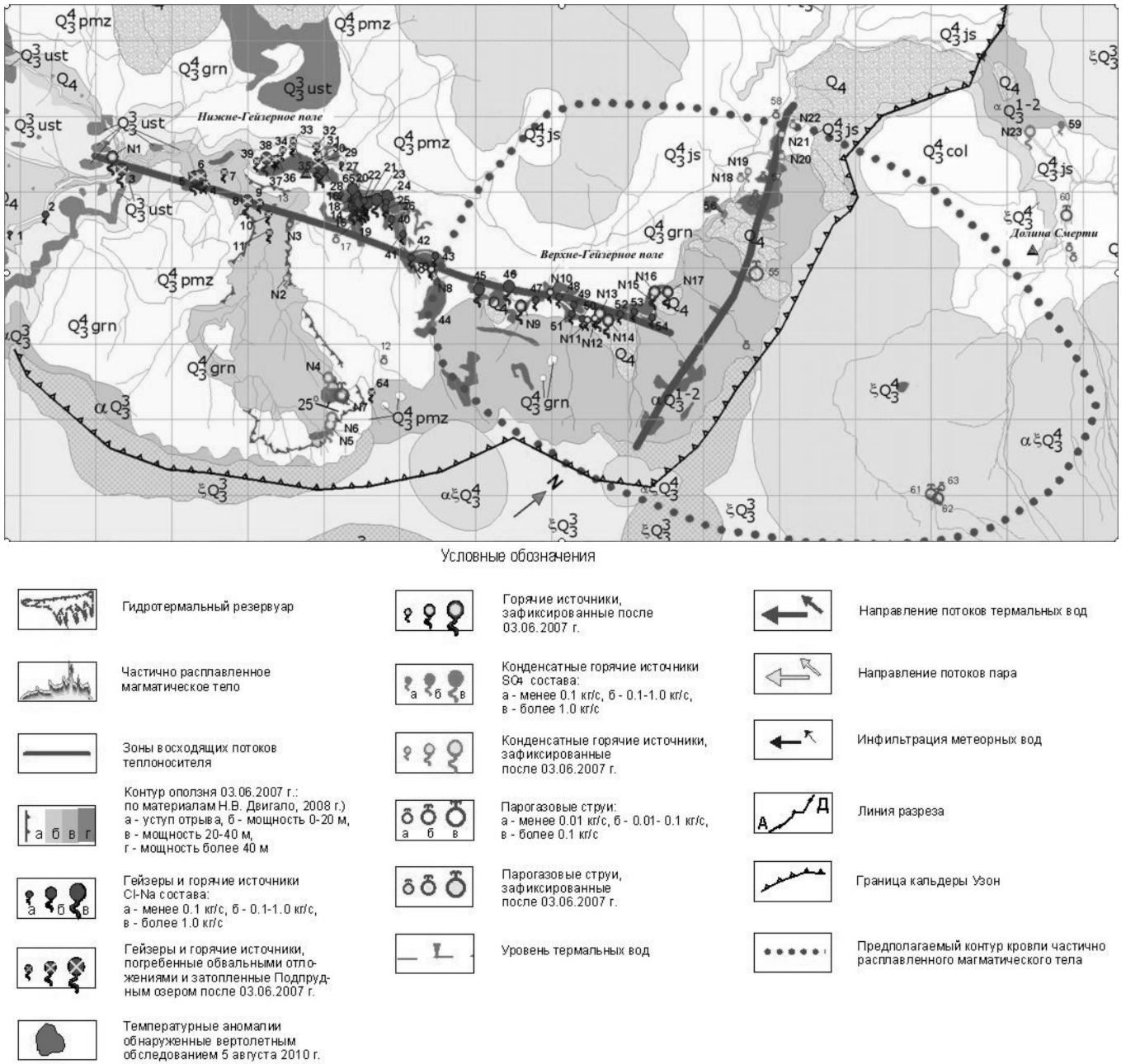


Рис. 1. Основные очаги разгрузки гидротерм в Долине Гейзеров.

Гейзеры и горячие источники Нижнего и Верхнего Гейзерных полей по химическому составу являются в основном нейтральными низкоминерализованными хлоридными натриевыми водами. Уменьшение значений рН вверх по течению в горячих источниках Верхнего Гейзерного поля и Долины Смерти показывает существование двухфазного резервуара в верхней части бассейна р. Гейзерная.

Условия питания. Область водного питания горячих источников установлена по результатам гидроизотопного опробования воды (δD , δO^{18}) в 1985 и 2010 гг. и находится на абсолютной высоте +500 ÷ +900 м.

Наиболее благоприятные зоны питания совпадают с границей кальдеры, особенно в пределах прогретых участков, допускающих всепогодную инфильтрацию и в пределах липарит-дацитовых экзтрузий (ξQ_3^4) с системой дренирующих магматических каналов.

Источники тепла. Предполагается, что источником тепла для гидротермальной системы Долины Гейзеров является частично расплавленное магматическое тело под Верхне-Гейзерным полем. Контуры этого тела определены по данным радарной интерферометрии спутниковых наблюдений, в результате которых выявлена обширная положитель-

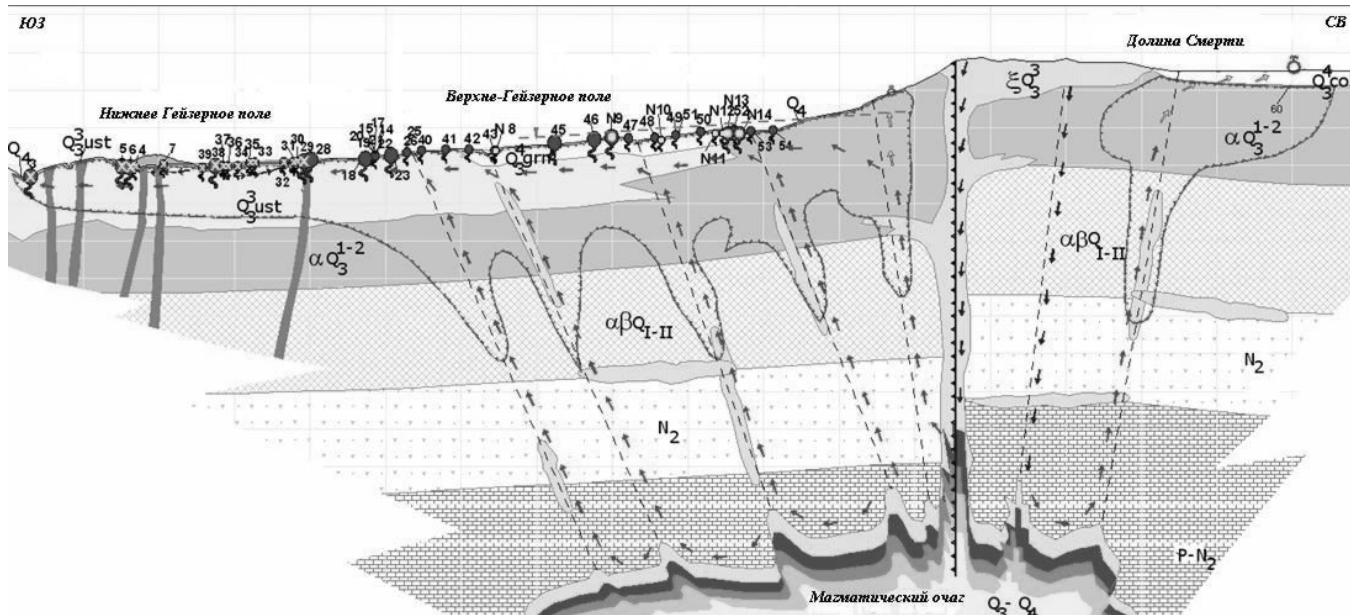


Рис. 2. Концептуальная модель.

ная деформация с амплитудой до 15 см за период 2000–2003 гг. [2].

Контуры распространения предполагаемого магматического очага частично совпадают с отдельными поверхностными температурными аномалиями, обнаруженными в результате ИК съёмки.

Тепло от магматического очага в гидротермальную систему доставляет высокотемпературный флюид метеорного происхождения. Температура притока глубинного теплоносителя оценивается по геотермометрам около 210°C (соответствующая энтальпия 900 кДж/кг). Массовый расход восходящего потока предполагается равным величине разгрузки гидротерм, которая была оценена В. М. Сугробовым хлоридным методом в 300 кг/с [1].

Сборка 3D термогидродинамической модели

Концептуальная модель гидротермальной системы Долины Гейзеров. Формирование гидротермальной системы Долины Гейзеров происходит в системе разломов надинтрузивной зоны частично расплавленного магматического тела. Питание гидротермальной системы метеорными водами осуществляется на границах кальдеры и через дацит-липаритовые экструзии ($\xi Q_3^3 - \xi Q_3^4$) с глубокими дренирующими каналами. Одна из двух основных термовыводящих линейных зон показана на разрезе (рис. 2); кроме того, разгрузка гидротерм приурочена к контуру надинтрузивной зоны, отдельным дайкам внутри надинтрузивной зоны, и подошве водоупорного слоя, сложенного изменёнными озёрными туфами ($Q_3^4\text{pmz, grn}$), это подтверждается результатами ИК съёмки 2010 г.

Цель моделирования — численное воспроизведение термогидродинамических условий процесса формирования гидротермальной системы Долины Гейзеров для прогноза условий парогидротермаль-

ных взрывов, являющихся триггерами оползневых процессов.

Для моделирования использовалось программное обеспечение TOUGH2-EOS1, а так же пре- и постпроцессор PetraSim 5.¹

Площадь модели составляет $14,5\text{ км}^2$, верхняя граница модели совпадает с топографической поверхностью, нижняя граница задана на абс. отм. -2000 м . Модель состоит из 15-ти слоёв, включающих 10 500 элементов.

Исходные данные для моделирования обоснованы результатами изучения естественной разгрузки гидротерм (гейзеров и горячих источников), инфракрасной съёмки термопроявлений 5 августа 2010 г., геологического картирования М 1:10 000 [1], использованием аналогии с разбуренными геотермальными резервуарами (Паужетский, Мутновский).

В качестве граничных условий на модели определён региональный тепловой поток на подошве фундамента 60 мВт/м^2 (рис. 3), массовый поток 250 кг/с с энтальпией 900 кДж/кг (рис. 4), на границах водного питания задаются постоянные температура, равная 10°C и давление, равное 1 бар (рис. 5).

Модель включает две термопроводящие субвертикальные зоны (рис. 6); вмещающий вулканогенный резервуар плиоцен-четвертичного возраста; третичный осадочный фундамент; область разгрузки гидротерм (Нижне-Гейзерное и Верхне-Гейзерное поля); область водного питания гидротермальной системы (фрагмент юго-восточной границы Узон-Гейзерной кальдеры, экструзия Гейзерная); относительный водоупор, сложенный изменёнными риолитовыми туфами Гейзерной пачки; источник теплового питания (апикальная часть неглубокозалегающего

¹PetraSim 5 User Manual <http://www.petrasim.com>

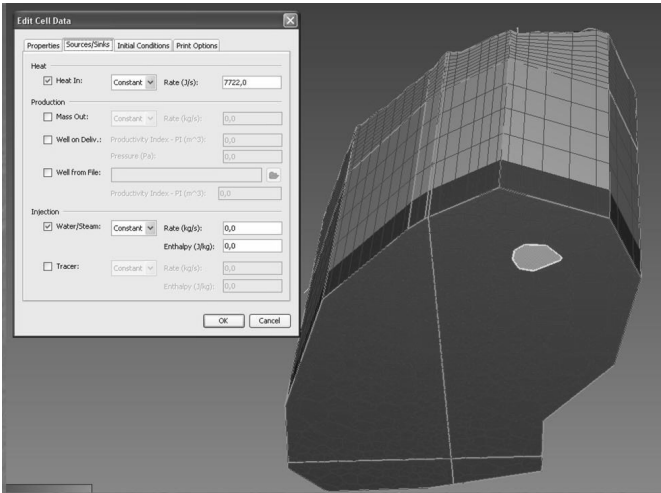


Рис. 3. Определение на модели регионального теплового потока на подошве фундамента 60 мВт/м².

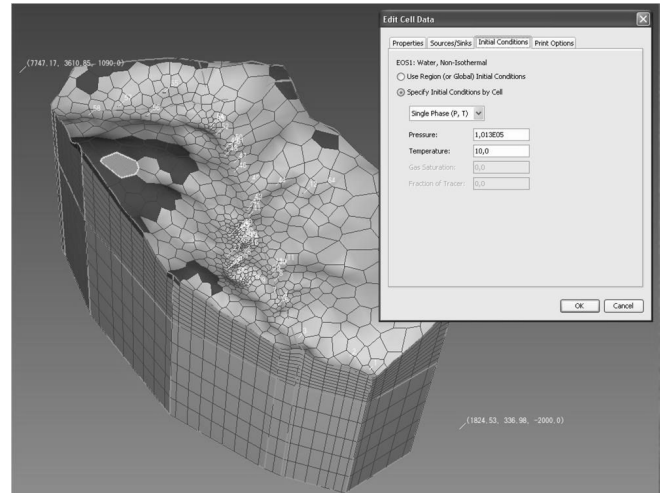


Рис. 5. Определение на модели постоянной температуры, равной 10° С и давления, равного 1 бар (заданы на границах водного питания).

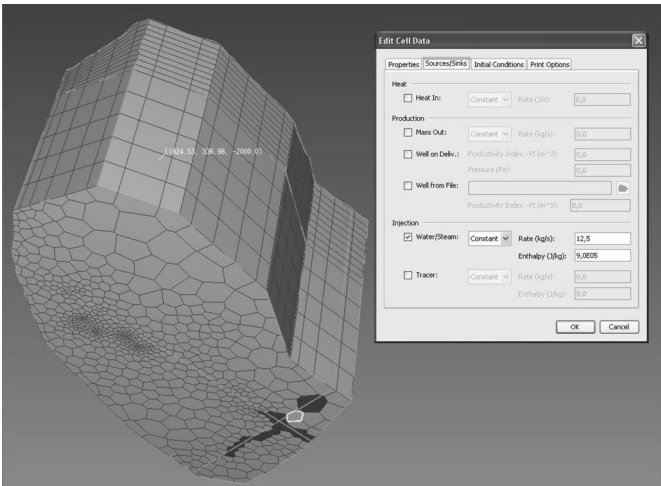


Рис. 4. Определение на модели массового потока, равного 250 кг/с с энтальпией 900 кДж/кг.

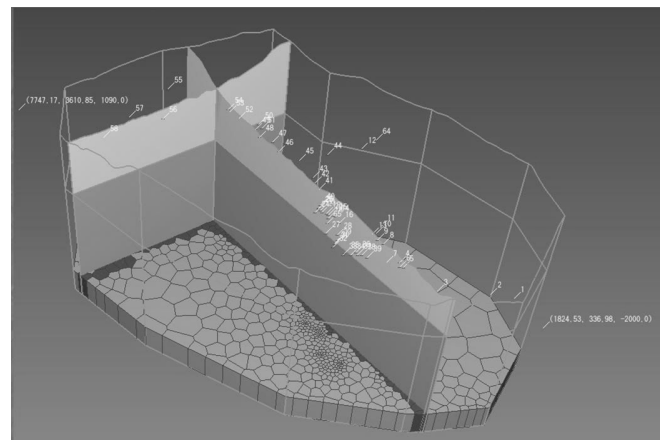


Рис. 6. Модельные термовыводящие субвертикальные зоны.

магматического очага под Верхне-Гейзерным полем).

Результаты моделирования

На первом этапе моделирования воспроизведены условия формирования гидротермальной системы Долины Гейзеров на интервале времени 0–100 тыс. лет. Результаты моделирования показывают возможность формирования естественной разгрузки гидротерм с расходом, сопоставимым с наблюдаемым в настоящее время при условии включения в основании модели притока глубинного теплоносителя (спустя 30 тыс. лет). При таком условии модельные источники на поверхности достигают энтальпии 500–800 кДж/кг, закипают и переходят в квазистационарный режим разгрузки.

Модельное температурное поле (рис. 30) охватывает область распространения известных термоаномалий и модельная температура согласуется с максимальными оценками температуры 210° С по гидрохимическим геотермометрам (Na-K и SiO₂).

Важно отметить, что на модели получено формирование двухфазного резервуара под водоупором на левобережье р. Гейзерной (рис. 30).

В результате возрастания давления в двухфазном резервуаре могут происходить парогидротермальные взрывы, сопровождающиеся оползневыми процессами. Модельный анализ показывает, что давление может достигать 12 бар на глубине 230 м в районе фумаролы Подрыва (паровая струя в зоне отрыва катастрофического оползня 3 июня 2007 г.).

Выводы

Гидротермальная система Долины Гейзеров контролируется системой двух термовыводящих линейных зон (разломов), расположенных над предполагаемым частично расплавленным магматическим телом и получает водное питание метеорными водами вдоль контура Узон-Гейзерной кальдеры и через липарито-дацитовые экструзии (ξQ₃⁴). Быстрая эрозия долины приводит к увеличению разгрузки гидротерм, цикличности работы гейзеров

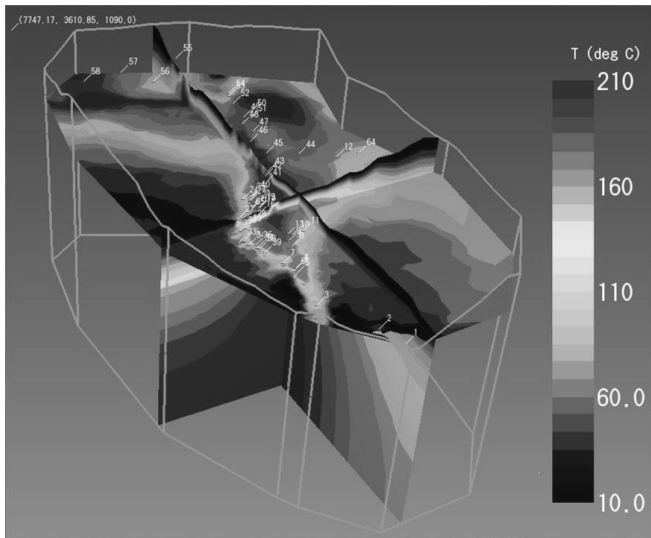


Рис. 7. Модельное температурное поле.

и оползневым явлениям. Термогидродинамическое моделирование показывает, что для формирования гидротермальной системы с параметрами разгрузки, соответствующими нынешним (250 кг/с при энтальпии 900 кДж/кг) необходимо от 30 000 до 100 000 лет. Моделирование также показывает формирование парового резервуара под наклонно залегающим водоупором, что имеет потенциал гидротермального взрыва.

Авторы признательны О. П. Батаевой, В. А. Злотникову, В. А. Дрознину, В. Л. Леонову, В. Н. Двигаю, В. А. Норватову, И. Ф. Делемену, Е. В. Черных, Л. П. Вергасовой, М. В. Пузанкову, Ю. Ф. Манухину, Ю. Е. Тищенко, О. М. Топчиевой, Ю. В. Фроловой, О. В. Зеркаль, И. Р. Абубакирову, К. А. Чиркову и О. О. Мирошник за помощь при подготовке данной

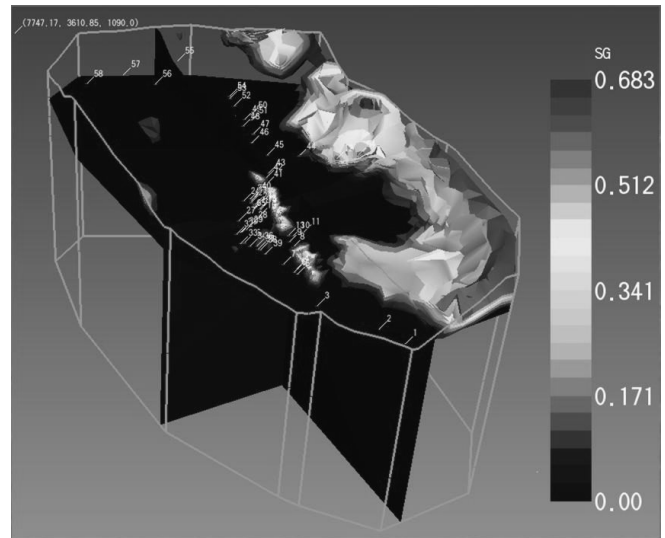


Рис. 8. Формирование двухфазного резервуара под водоупором на левобережье р. Гейзерной.

статьи. 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 выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 09-05-00605-а.

Список литературы

1. Сугробов В. М., Сугрובה Н. Г., Дроздин В. А., Карпов Г. А., Леонов В. Л.. Долина Гейзеров — жемчужина Камчатки. Научный путеводитель. Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, 2009, 108 с.
2. Lundgren P., Lu Z. 2006. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations. Geophysical Research Letters 33, L06301, 4 p.