УДК 550.341.5

Инверсионное трехмерное термогидродинамическое моделирование условий формирования Северо-Мутновской гидротермальной системы (Камчатка, Россия)

А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, О.О. Усачева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
AVKiryukhin2@mail.ru

Создана трехмерная термогидродинамическая модель 13×27 км в плане, по вертикали от −4 км до топографической поверхности (объем 1699 км³), состоящая из 9828 элементов. Для калибровки модели использованы данные по температуре, пьезометрической поверхности, расходам и концентрациям NaCl. С применеием инверсионного iTOUGH2-EWASG моделирования получены оценки времени формирования системы, мощности тепловых источников магматического происхождения и водного питания. Моделирование подтверждает наличие потенциально продуктивного высокотемпературного резервуара в северо-восточном секторе Мутновского вулкана.

Inverse Three-Dimensional Thermohydrodynamic Modeling of the Formation Conditions of the Severo-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia)

Alexey V. Kiryukhin, Andrey Yu. Polyakov, Olga O. Usacheva

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

A 3D thermohydrodynamic (THD) model was constructed with a plan area of 13×27 km, extending vertically from −4 km to the topographic surface (total volume 1699 km³), and consisting of 9828 elements. The model was calibrated using data on temperature, piezometric surface, flow rates, and NaCl concentrations. Inverse iTOUGH2-EWASG modeling yielded estimates of the system formation time, the power of magmatic heat sources, and the water recharge. The modeling confirms the presence of a potentially productive high-temperature reservoir in the northeastern sector of the Mutnovsky volcano.

Введение

В данной работе рассматривается термогидродинамическая (3D ТГД) модель Северо-Мутновской гидротермальной системы (рис. 1) с калибровкой по данным температуры, давления (пьезометрического уровня) и химического состава (NaCl) по доступным скважинам и значимым термопроявлениям Мутновского геотермального района.

Концептуальная модель

Водное питание обеспечивается таянием ледников в кратере и инфильтрацией воды в постройку Мутновского вулкана (выше +1500 м абс.), что обосновано данными по изотопному составу δD, $\delta^{18}O$ скважин и горячих хлоридно-натриевых источников [1]. Расход циркуляции составляет не менее 80 кг/с. Система проницаемых каналов включает жерло влк. Мутновский-3 (не используется магмой последние 4 тыс. лет), глубина проникновения метеорных вод достигает −6 км абс. На глубине водные потоки перенаправляются в ССВ направлении по структурным поверхностям, из которых наиболее доказательной является кровля домелового фундамента, закартированная по гравиметрическим данным [2] в диапазоне глубин от −4 до −3 км абс.

Мутновский вулкан является источником инжекций магмы, обеспечивающих тепловое питание гидротермальной системы. Последние 5 тыс. лет активность связана с

инжекциями магмы и дегазацией в «активной воронке» (Мутновский-4), на Донном и Верхнем полях (Мутновский-3). Инжекции, осуществляющиеся в форме даек и силлов, идентифицированы как плоско-ориентированные кластеры землетрясений (2009–2026) в северо-восточном секторе вулкана на площади около 60 км² [3]. Тепловая мощность магматических инжекций оценивается по сейсмическим данным в 405 МВт [4], с учетом неопределенности состава магм – в диапазоне 300–1500 МВт.

Для верификации концептуальной модели использована программа iTOUGH2-EWASG [5, 6]. Модуль EWASG описывает геотермальный флюид как трехкомпонентный (вода, NaCl, CO_2) двухфазный, что соответствует ожидаемому диапазону ТГД-условий.

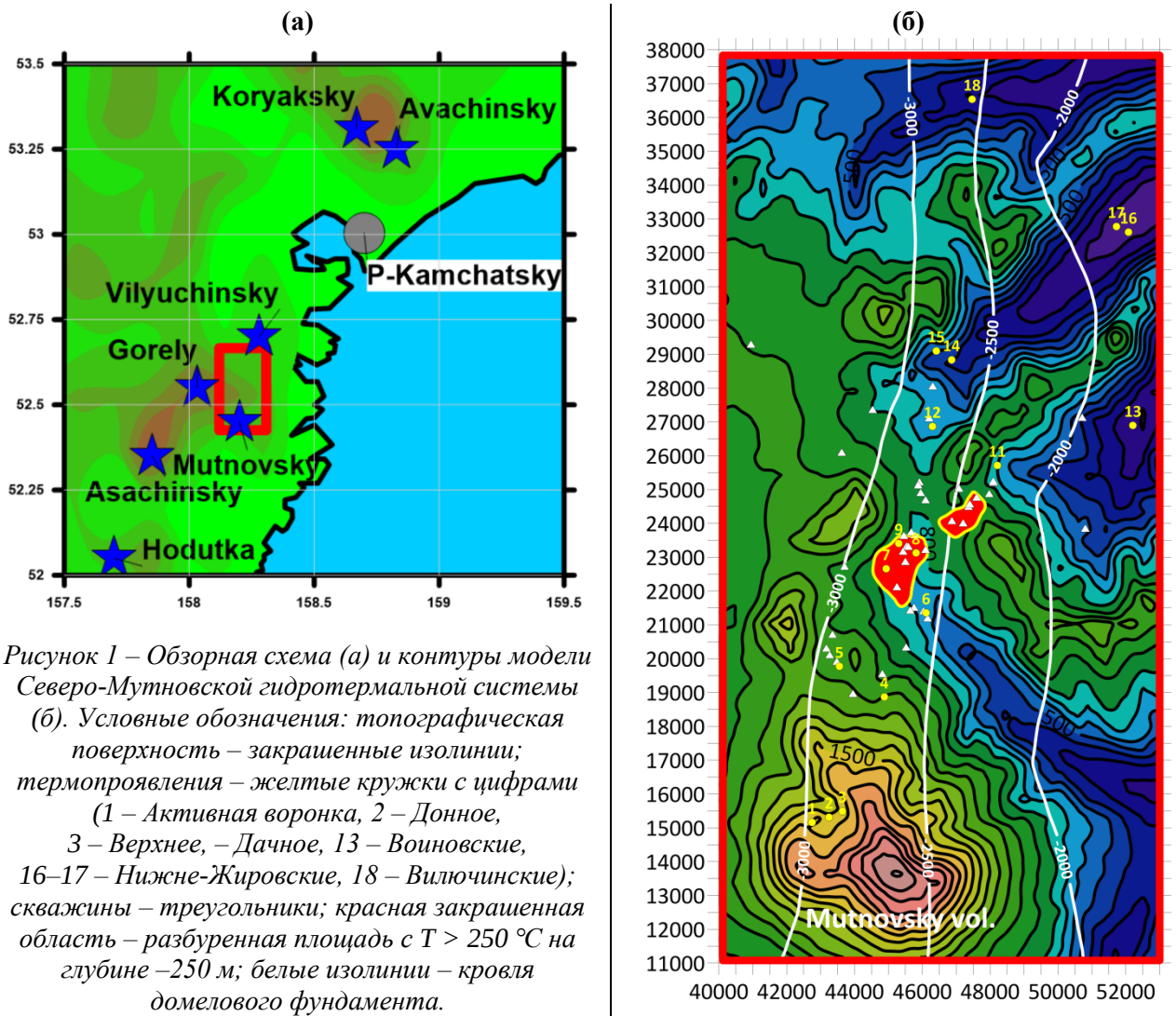


Рисунок 1 – Обзорная схема (а) и контуры модели Северо-Мутновской гидротермальной системы (б). Условные обозначения: топографическая поверхность – закрашенные изолинии; термопроявления – желтые кружки с цифрами (1 – Активная воронка, 2 – Донное, 3 – Верхнее, – Дачное, 13 – Воиновские, 16–17 – Нижне-Жировские, 18 – Вилючинские); скважины – треугольники; красная закрашенная область – разбуренная площадь с T > 250 °C на глубине –250 м; белые изолинии – кровля домелового фундамента.

Сборка 3D ТГД модели

Модель (9828 элементов) охватывает область 13.0×27.0 км (объем 1699 км³) в вертикальном диапазоне от −4000 м до топографической поверхности. Использована семислойная прямоугольная сетка 26×54×7, размер базового элемента 500×500×500 м. Поверхность кровли домелового фундамента представлена слоем мощностью 200 м (желтая заливка на рис. 2). Зонирование включает домены: ROCK1 (вмещающие породы), BASE1 (фундамент, фоновый тепловой поток 60 мВт/м²), DUMMY (приповерхностные элементы, P = 1 бар, T = 10 °C), KSURF (флюидопроводящая кровля фундамента), RESER и RESE2 (высокотемпературный и среднетемпературный резервуары), RECHG и RECH2 (области водного питания), HEATM (зона магматических инжекций), BCSEA (прибрежная разгрузка в океан 260 м ниже уровня моря, P = 26 бар) (рис. 2).

Данные для калибровки

Калибровка проводилась по четырем основным наборам данных: 1) Температурное поле: 60 репрезентативных калибровочных точек, полученных путем 3D сплайновой аппроксимации 450 замеров (забои скважин после восстановления, горячие источники, фумарольные поля и фоновая температура поверхности 10 °C). 2) Пьезометрическая поверхность: из-за двухфазного состояния теплоносителя в резервуаре калибровка по давлению выполнялась через задание граничных условий самоизлива для 4-х групп Cl-Na источников на отметке −250 м. 3) Расходы разгрузок: суммарные расходы трех активных групп источников: Воиновские (V) – 22 кг/с, Нижне-Жировские (NZ) – 36 кг/с, Вилючинские (VL) – 35 кг/с. 4) Гидрохимия (NaCl): концентрации хлоридов, пересчитанные на пластовые условия: Термальные источники: 220 ppm (V), 296 ppm (NZ), 329 ppm (VL). Добычные скважины: 330 ppm (скв. 029W), 301 ppm (скв. 4E), 234 ppm (скв. 037), 229 ppm (скв. 048).

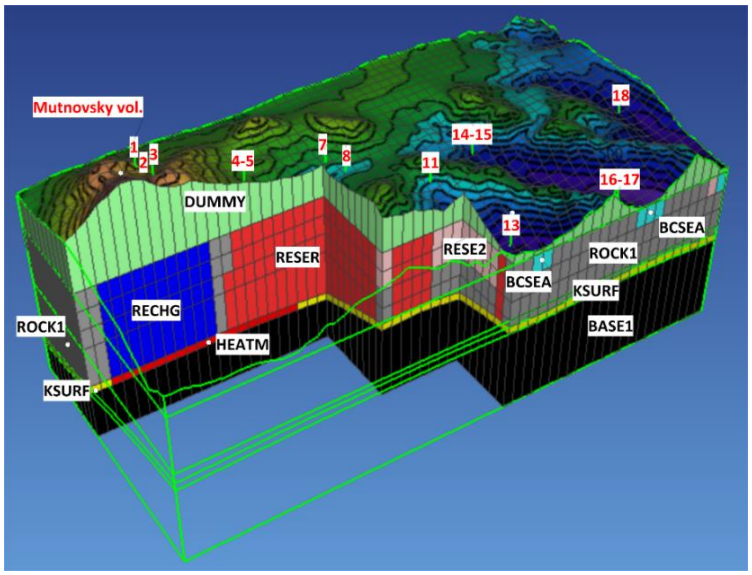


Рисунок 2 – Зонирование 3D ТГД модели Северо-Мутновской гидротермальной системы

Инверсионное моделирование

Оцениваемыми параметрами при проведении инверсионного моделирования являлись проницаемости K1 и K2 активного пространства, тепловая мощность магматических источников q, параметры пористости Ф. Всего рассмотрено 10 вариантов моделирования, ключевые варианты приведены в табл. 1, где варианты #2C и #2E (выделены жирным шрифтом) по показателям невязок (ΔT, ΔQ, ΔNaCl) являются наилучшими.

Таблица 1. Ключевые варианты инверсионного моделирования. Показаны невязки вариантов модели с калибровочными данными: по температуре ΔT, по расходу разгрузок ΔQ, по концентрации ΔNaCl

Вариант	**Оцениваемые параметры**	**ΔT, °C**	**ΔQ, кг/с**	**ΔNaCl, г/л**
#2	q; RECHG = 200 кг/с	−30.0	+44.2	+6.5
#3	q; RECHG = 100 кг/с	+30.3	+15.7	+8.4
#4	q, K1	−17.3	+10.2	+8.8
#4A	q, K1, K2	−17.3	+10.3	+8.8
#6A	q, K1, K2; t = 50 тыс. лет	−57.1	−7.0	+1.6
#8	q, K1, K2; без магм. Cl	−33.0	−0.3	+2.7
#2A	Ф (RESER, RECHG)	−14.6	+49.6	+5.8
#2C	**Ф, q**	**−24.4**	**+26.2**	**+0.005**
#2E	**прямое: Ф = 0.013; q = 1520 МВт**	**−1.2**	**+3.4**	**+0.43**

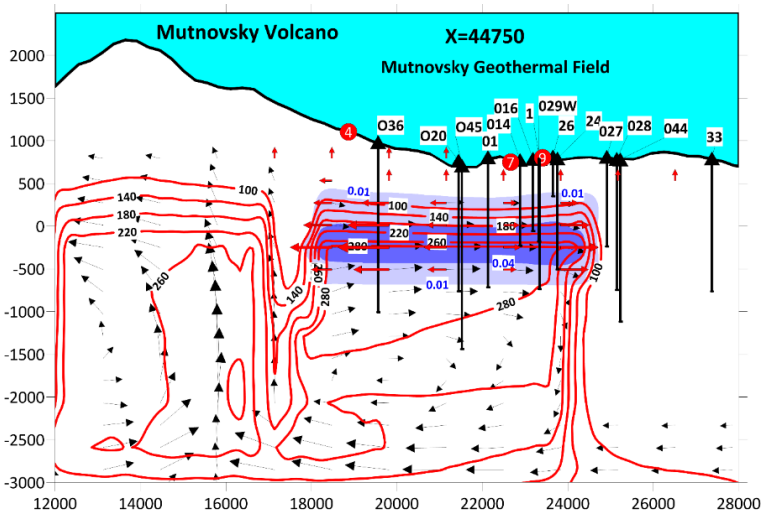


Рисунок 3 – Изолинии температуры (красные), насыщения газовой фазой Sg (синие области), массовые потоки флюида (черные тонкие стрелки) и газовой фазы (красные толстые стрелки)

Результаты и обсуждение

Заключительный вариант моделирования (#2E) при водном питании 100 кг/с, пористости 0.013 и мощности тепловых источников 1520 МВт (6.23 МВт/элемент) за 4.95 тыс. лет обеспечивает минимальные невязки: $\Delta T = -1.2$ °C, $\Delta Q = 3.4$ кг/с, $\Delta NaCl = 0.43$ г/л. На вертикальном разрезе (рис. 3) показано, что продуктивный резервуар находится в состоянии слабого кипения (Sg = 0.01–0.04) при T = 270–280 °C. Область водного питания под вулканом прогрета за счет свободной конвекции до 220–250 °C, несмотря на поглощение 100 кг/с холодной воды.

Заключение

Установлено время формирования Северо-Мутновской гидротермальной системы до 50 тыс. лет, с наиболее активной фазой в последние 5 тыс. лет. Ключевыми параметрами, обеспечивающими калибровку, являлись мощность тепловых источников магматического происхождения ~1500 МВт (контролирует температуру); средняя пористость циркуляционной системы ~0.01 (контролирует разбавление NaCl и время водообмена); величина водного питания ~100 кг/с (контролирует расходы разгрузок). Отсутствие значимых утечек из гидротермальной системы во вмещающие породы подтверждает её замкнутый характер. Моделирование подтвердило наличие потенциально продуктивного высокотемпературного резервуара в северо-восточном секторе Мутновского вулкана, что имеет важное практическое значение для размещения новых разведочных скважин. В будущих исследованиях планируется привлечение данных по давлению в наблюдательных скважинах (30, 012) для уточнения проницаемости и регуляризация весовых коэффициентов невязок различной природы.

Работа выполнена по теме FWME-2024-0007 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с использованием данных уникальной научной установки «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем / *А.В. Кирюхин.* Санкт-Петербург: ООО «Эко-Вектор Ай-Пи». 2020. 431 с. ISBN 978-5-907219-02-1.

2. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки / Ред. *Ю.П. Масуренков*. М.: Наука, 1980. 172 с.

3. *Kiryukhin A.V.* Magma fracking and production reservoirs beneath and adjacent to Mutnovsky volcano based on seismic data and hydrothermal activity / *A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, P.O. Voronin et al.* // Geothermics. 2022. Vol. 105. P. 102474. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102474.

4. *Polyakov A.Yu.* Three-Dimensional Thermohydrodynamic Model of the Mutnovsky Magma–Hydrothermal System / *A.Yu. Polyakov, A.V. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Seismology. 2026. Vol. 20. №. 1. pp. 204–210. DOI: 10.1134/S074204632670003X

5. Finsterle S. iTOUGH2 V7.0 Command Reference. Rep. LBNL-40041 rev. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 2014.

6. *Pruess K.* TOUGH2 user's guide, Version 2.0. Rep. / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab. 1999.