# РАЗДЕЛ II. ГИДРОГЕОЛОГИЯ (ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ И ГИДРОМИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ, ГЕЙЗЕРЫ)

# CHAPTER II. HYDROGEOLOGY (HYDROTHERMAL SYSTEMS, GEOTHERMAL AND HYDROMINERAL RESOURCES, GEYSERS)

УДК 556.3

## Применение геотермотомографии для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и зон конвективной циркуляции теплоносителя в Северо-Мутновской гидротермальной системе (Камчатка, Россия)

**А.В. Кирюхин**[1,2], А.Ю. Поляков[1], О.О. Усачева[1], М.И. Афонин[2]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*
*avkiryukhin2@mail.ru*
[2]*Камчатский Государственный Университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Метод 3D картирования геотемпературных полей основан на сплайн-аппроксимации формулы Грина точечных измерений температуры в геотермальных скважинах и разгрузок термальных источников. В качестве исходных используются данные по 77 скважинам и семи группам термальных источников на площади 13×27 км$^2$ и в диапазоне глубин от поверхности Земли до −1290 м абс. Анализ расчетного 3D распределения температуры представлен в горизонтальных сечениях на отметках −250, −750 и −1250 м абс. и в вертикальных сечениях меридионального и широтного направления. Для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и областей конвективной циркуляции теплоносителя применялись критерии минимального градиента температуры (<0.15 °C/м) при ее повышенных абсолютных значениях (>240 °C).

## The Use of Geothermotomography to Identify Productive Geothermal Reservoirs and Zones of Convective Heat Transfer Circulation in the North-Mutnovsky Hydrothermal System (Kamchatka, Russia)

**Alexey V. Kiryukhin**[1,2], Andrey Yu. Polyakov[1], Olga O. Usacheva[1], Mikhail I. Afonin[2]

[1]*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*
[2]*Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk Kamchatsky, Russia*

The 3D mapping method of geothermal fields is based on spline approximation of Green's formula for point measurements of temperature in geothermal wells and thermal source discharges. The initial data used are from 77 wells and seven groups of thermal sources within an area of 13 x 27 km$^2$ and in the depth range from the Earth's surface to −1290 masl. The analysis of the calculated 3D temperature distribution is presented in horizontal cross-sections at elevations of −250, −750 and −1250 m above sea level, and in vertical cross-sections in the meridional and latitudinal directions. To identify productive geothermal reservoirs and areas of convective circulation of the heat carrier, criteria based on the minimum temperature gradient (<0.15 °C/m) were applied at elevated absolute temperature values (>240 °C).

### Введение

Исследования и использование геофлюидных систем с активной циркуляцией геофлюидных фаз, в частности высокотемпературных геотермальных месторождений в вулканических областях, осложняется их сложным геологическим строением. Классическое геологическое картирование вулканогенно-осадочных стратиграфических подразделений

трудноосуществимо из-за их сильной изменчивости в латеральной плоскости, отсутствия надежных маркирующих горизонтов, или вообще по причине их локального распространения. Картирование разломов затрудняется быстрой динамикой их преобразования из активного в пассивное состояние, связанное с запечатыванием вторичными минеральными фазами или изменением геомеханического состояния.

В этой связи наиболее эффективным доказательным инструментом для 3D картирования геотермальных циркуляционных систем представляется 3D картирование геотемпературного поля. Области с конвективной циркуляцией теплоносителя характеризуются высокой температурой и низкими градиентами температуры геотемпературного поля, указанные параметры могут рассматриваться в качестве индикаторов целевых резервуаров для получения геотермальной продукции (высокодебитных добычных скважин) и утилизации отработанного теплоносителя.

Подробно методика расчета трехмерного геотемпературного поля описана в работах [1–3]). Алгоритмическая реализация 3D картирования геотермальных полей выполнена с помощью комплекта GREEN из библиотеки LIDA – 3 по аппроксимации функций и цифровой фильтрации, разработанной в ВЦ СО АН СССР и пакета графической визуализации Surfer.

**Исходные данные и результаты геотермотомографии**

В качестве исходных данных использованы результаты измерений забойных температур (с использованием автономных термометров ТСУ-I-250, ТСУ-I-220, МСТ-400, а также термометры «Кастер», [4])) во время остановок и выстойки поисково-разведочных скважин в процессе их бурения в Мутновском геотермальном районе (77 скважин), температуры термальных разгрузок (4, 5, 7, 8, 13, 16–17 и 18, рис. 1), также учитывались оценки по геохимическим термометрам и максимальные давления в скважинах с преобладанием пара (пересчитывались на температуру по условиям насыщения), на уровне топоповерхности за пределами термоаномалий задавалась температура 10 ℃. Общее число точек измерений, использованных при расчете 3D температурного поля составило 450, заданное среднеквадратичное отклонение сплайн-аппроксимации 1 ℃.

Расчеты 3D геотемпературного поля проводились на двух регулярных вычислительных сетках: (1) $X \in [40250, 52750]$, $Y \in [11250, 37750]$, $Z \in [-1250, -250]$ с шагом 500 м по всем направлением, общее число узлов сетки составило 4212; (2) $X \in [40000, 53000]$, $Y \in [11000, 38000]$, $Z \in [-1500, 0]$ с шагом 50 м по всем направлением, общее число узлов сетки составило 3246351. На рис. 2, 3 и 4 показаны результаты геотермотомографии 3D геотемпературного поля в горизонтальных сечениях (−250, −750, −1250) м абс. и на вертикальных разрезах.

На срезе −250 м абс. (рис. 2) с севера на юг отчетливо видны четыре термоаномалии с максимальной температурой 230–250 ℃, три из которых эпицентрально совпадают с B-Жировскими (14–15), Дачными (7–8) и C-Мутновскими (4–5) термальными полями, а четвертая не имеет явной разгрузки на поверхности Земли. На срезе −750 м абс. (рис. 2) указанные выше четыре аномалии сохраняются, увеличивая максимальную температуру до 290 ℃. По южной термоаномалии прослеживается тренд увеличения температуры в направлении к Мутновскому вулкану. На срезе −1250 м (рис. 2) сохраняются термоаномалии под Верхне-Жировским участком и восточным флангом Дачного участка, также сохраняется тренд увеличения температуры в сторону Мутновского вулкана и даже экстраполируется сверхкритический геотермальный резервуар с температурой 370–430 ℃.

В меридиональных разрезах (рис. 3) на западных флангах (разрезы AA и BB) и на восточных (разрезы EE и FF) Мутновского геотермального месторождения не видно явных признаков гидротермальной циркуляции в виде аномального продвижения фронта геоизотерм, а вот на разрезах CC и DD (это полоса шириной около 2 км) хорошо просматриваются области конвективного теплопереноса в диапазоне температур от 320 до 240 ℃.

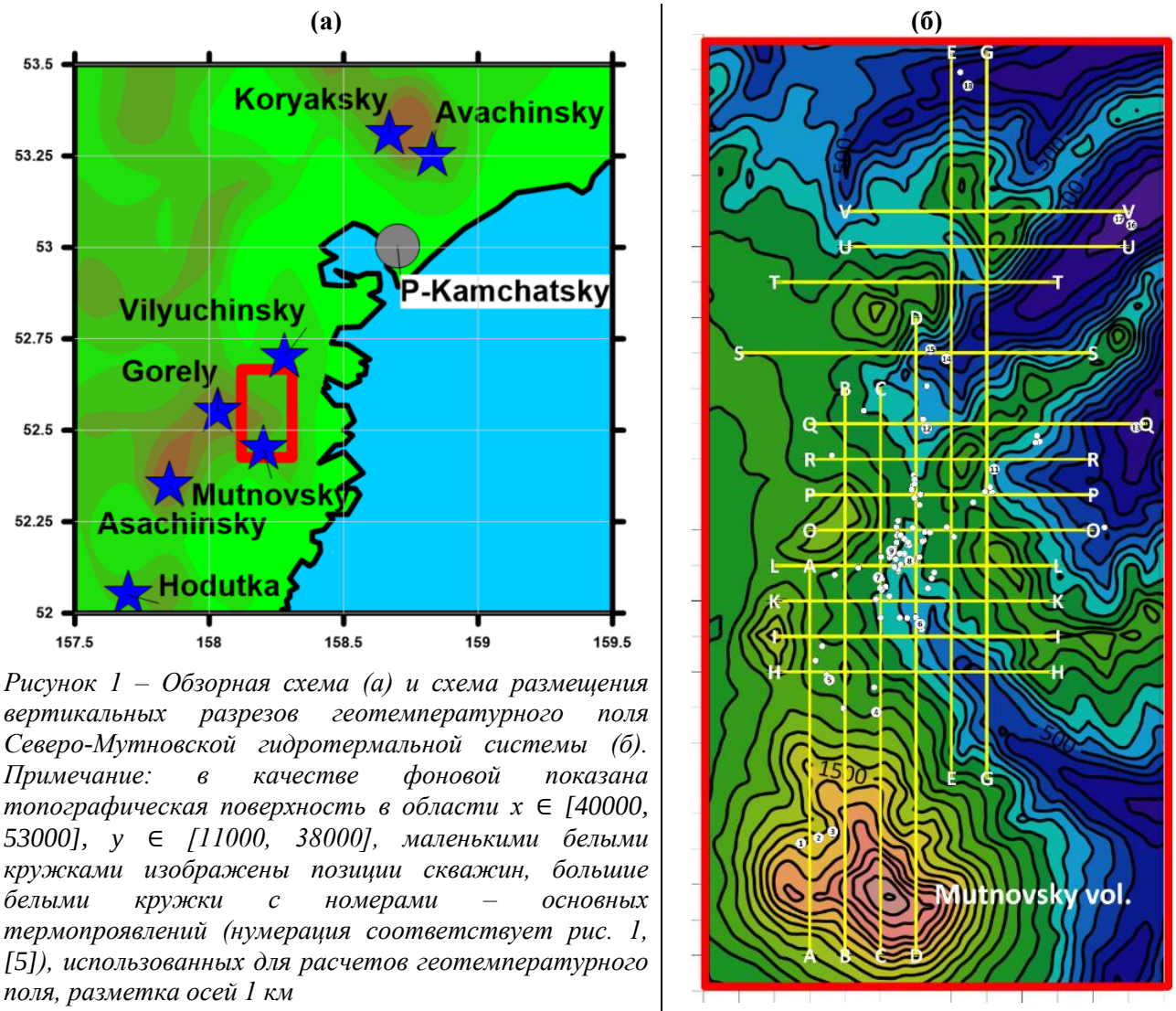



*Рисунок 1 – Обзорная схема (а) и схема размещения вертикальных разрезов геотемпературного поля Северо-Мутновской гидротермальной системы (б). Примечание: в качестве фоновой показана топографическая поверхность в области x ∈ [40000, 53000], y ∈ [11000, 38000], маленькими белыми кружками изображены позиции скважин, большие белыми кружки с номерами – основных термопроявлений (нумерация соответствует рис. 1, [5]), использованных для расчетов геотемпературного поля, разметка осей 1 км*

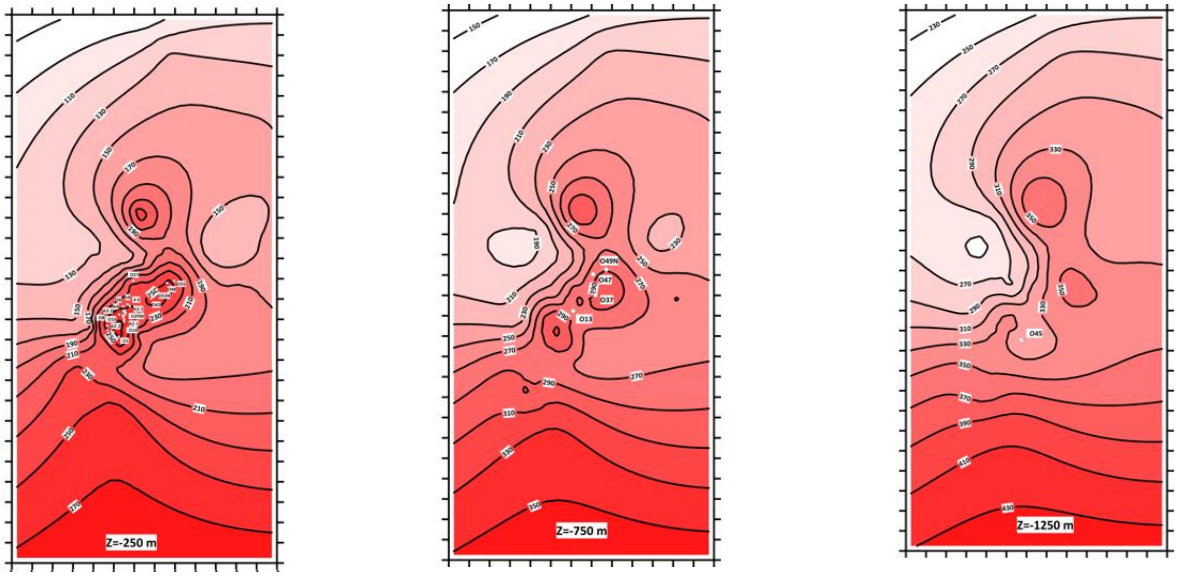



*Рисунок 2 – расчетное распределение температуры в горизонтальных сечениях −250, −750 и −1250 м абс*

Широтные разрезы расположены вкрест потоков теплоносителя и характеризуют распределение температуры в его сечениях (рис. 4). Наиболее явно области конвективной циркуляции фиксируются в разрезах LL, OO и PP в диапазоне температур от 320 до 260 °C,

на разрезе РР даже до 220 °С. При этом проявляется ассиметричной падение осевой плоскости геотемпературного поля на восток. На разрезах НН и II проявлены признаки наличия глубинной геотермоаномалии с температурой выше 320 °С. На рис. 3 и 4 показаны вертикальные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Области с градиентами температуры менее 0.15 °С/м и температурой выше 240 °С на этих разрезах интерпретируются как зоны с конвективной циркуляцией теплоносителя и потенциальной продуктивностью, их можно рассматривать как целевые для постановки бурения разведочно-эксплуатационных скважин.

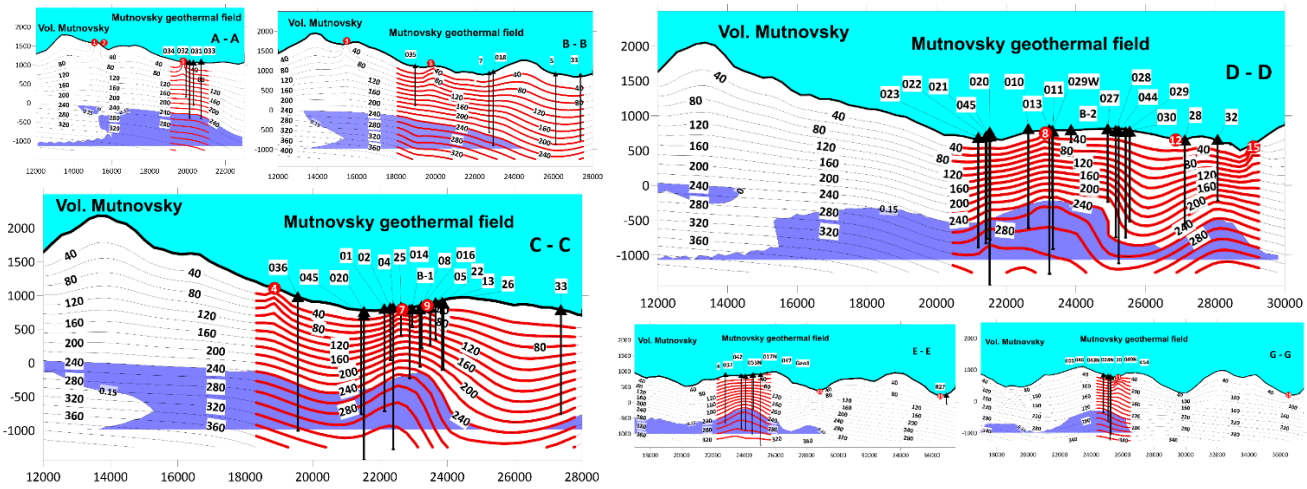



*Рисунок 3 – Вертикальные субмеридиональные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Позиции разрезов показаны на рис. 1. Области с градиентами температуры менее 0.15 °С/м и значениями температуры выше 240 °С закрашены синим цветом. Наиболее достоверная область показана красными жирными геоизотермами*

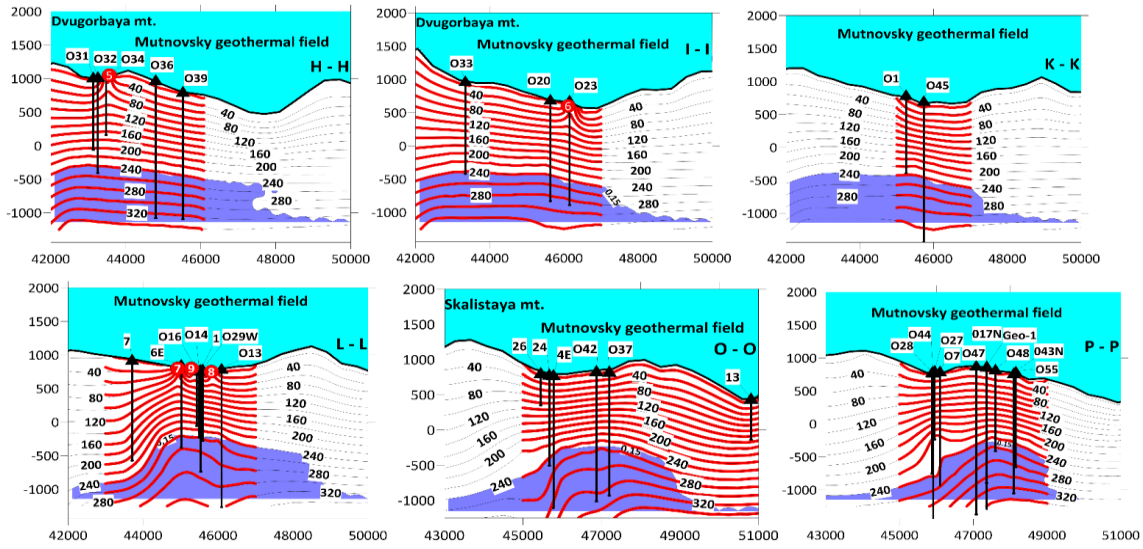



*Рисунок 4 – Вертикальные субширотные разрезы с совмещенными распределениями температуры и градиентов температуры. Позиции разрезов показаны на рис. 1. Области с градиентами температуры менее 0.015 °С/м и значениями температуры выше 240 °С закрашены синим цветом. Наиболее достоверная область показана красными жирными геоизотермами…*

**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. *Масуренков Ю.П.* 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.