РАЗДЕЛ VII. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ШКОЛА

CHAPTER VII. GEOTHERMAL SCHOOL

УДК 550.836 + 551.23

Интерпретация геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы с использованием дифференциальных операторов

М.И. Афонин, А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
univer1999ussr@mail.ru

В работе представлен метод интерпретации данных геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы с использованием аппарата дифференциальных операторов. На основе регулярной 3D-сетки распределения температур с помощью разработанных авторами Python-скриптов методом конечных разностей второго порядка точности рассчитаны пространственные поля модуля градиента и лапласиана. Предложен комплексный количественный критерий локализации зон активной конвективной циркуляции. Результаты интерполированы и визуализированы в программе Surfer в виде вертикального разреза, показавшего высокую сходимость выделенного высокотемпературного ядра с дебитными эксплуатационными скважинами Мутновского месторождения.

Interpretation of Geothermotomography of the North-Mutnovsky Hydrothermal System Using Differential Operators

Mikhail I. Afonin, Alexey V. Kiryukhin

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

This paper presents a method for interpreting geothermotomography data of the North-Mutnovsky hydrothermal system using differential operators. Based on a regular 3D temperature grid, spatial fields of gradient magnitude and Laplacian were calculated by custom Python schemes using second-order finite-difference schemes. A comprehensive quantitative criterion for localizing active convective circulation zones is proposed. The results were interpolated and visualized in Surfer as a vertical cross-section, which showed high convergence of the identified high-temperature core with productive production wells of the Mutnovsky geothermal field.

Введение

Детальный количественный анализ и интерпретация данных геотермотомографии глубоких горизонтов гидротермальных систем является важнейшей прикладной задачей геотермальной вулканологии. Определение пространственных границ зон интенсивного тепломассопереноса необходимо для оптимизации разведки и эксплуатации геотермальных ресурсов. Настоящее исследование направлено на локализацию областей активной конвекции в пределах Северо-Мутновской гидротермальной системы на основе применения дифференциальных операторов первого и второго порядков. При этом мы опираемся на фундаментальные представления о гидрогеологии вулканогенных пород [1], а также на результаты численного моделирования тепло-проницаемой структуры, естественного состояния и истории долговременной эксплуатации резервуаров Мутновского высокотемпературного месторождения [2, 3].

Исходные данные и методика

В качестве исходных данных использован трехмерный цифровой массив геотермотомографии резервуара. Математические принципы и подходы к трехмерной реконструкции температурных полей в геотермальных коллекторах подробно рассмотрены в литературе [4, 5]. Температурное поле задано в виде регулярной 3D-сетки размерностью 201×521×31 узлов с равномерным пространственным шагом 50 м по всем координатным осям. Область численного моделирования ограничена координатами: X от 42 500 до 52 500 м, Y от 11 500 до 37 500 м, Z от −1 500 до 0 м (относительно уровня моря). Параметры расчетной области зафиксированы в табл. 1.

Таблица 1. Параметры расчетной сетки и координаты области моделирования

Параметр расчетной сетки	**Значение параметра**
Размерность сетки (узлы по осям X, Y, Z)	201 × 521 × 31
Шаг дискретизации сетки (м)	50.0
Границы области по оси X (м)	42 500 – 52 500
Границы области по оси Y (м)	11 500 – 37 500
Границы области по оси Z (м)	−1 500 – 0.0

Математический расчет дифференциальных операторов на регулярной расчетной сетке температур $T(x, y, z)$ был полностью реализован в виде специализированных скриптов на языке Python. Для вычисления пространственных массивов модуля вектора градиента температур $|\nabla T|$, отражающего интенсивность локального изменения теплового поля, использовалась центральная конечно-разностная схема первой производной по каждой координатной оси. Для компоненты по оси X расчетное выражение имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \approx \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}}{2h} + O(h^2) \quad (1)$$

где h = 50 м – пространственный шаг дискретизации сетки, а i, j, k – индексы узлов расчетной сетки по осям X, Y, Z. Обоснование второго порядка точности O(h²) данной схемы следует из разложения значений температуры в окрестности узла в ряд Тейлора:

$$T_{i+1} = T_i + h\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{h^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{h^3}{6}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (2)$$

$$T_{i-1} = T_i - h\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{h^2}{2}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h^3}{6}\frac{\partial^3 T}{\partial x^3} + O(h^4) \quad (3)$$

Вычитание равенства (3) из равенства (2) исключает члены со второй производной (h²) и позволяет выразить первую производную, где главный член погрешности аппроксимации пропорционален квадрату шага h^2, что строго доказывает второй порядок точности. Итоговый модуль градиента определялся по формуле:

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (4)$$

Для вычисления скалярного лапласиана ∇²T, характеризующего кривизну температурного распределения, применялся дискретный оператор на семиточечном шаблоне:

$$\nabla^2 T \approx \frac{T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{h^2} + \frac{T_{i,j,k+1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k-1}}{h^2} + O(h^2) \quad (5)$$

Обоснование порядка точности $O(h^2)$ для оператора Лапласа (5) базируется на сложении рядов Тейлора для симметричных узлов по каждой пространственной оси. При их сложении взаимно уничтожаются нечетные степени шага (h и h^3), а деление результирующего выражения на h^2 оставляет старший член погрешности аппроксимации в виде квадратичной функции $O(h^2)$.

Значения $\nabla^2 T \approx 0$ физически интерпретировались как зоны гладкого поля со стационарным кондуктивным теплопереносом, тогда как отклонения от нуля фиксировали локальные неоднородности и границы динамических флюидных структур.

Результаты и обсуждение

На основе выполненного дифференциального анализа трехмерных массивов геотермотомографии были сформулированы и применены два сопряженных количественных критерия для надежного выделения областей активной конвективной циркуляции теплоносителя:

1. Температурный порог ($T > 240$ °C: ограничивает границы наиболее разогретого высокотемпературного ядра геотермального резервуара, соответствующего двухфазному термодинамическому состоянию теплоносителя (кипящая вода + пар). Выделение данного интервала полностью согласуется с результатами моделирования термогидрогеохимических процессов формирования продуктивных коллекторов в вулканогенных породах Мутновского района, а также физическими моделями эксплуатации магма-гидротермальных суперкритических систем [7].

2. Градиентный порог ($|\nabla T| < 0.12$ °C/м): фиксирует слабую пространственную изменчивость температуры. Минимальные значения модуля градиента служат физическим индикатором выравнивания теплового поля по вертикали вследствие интенсивного конвективного перемешивания флюида.

Полученные расчетные массивы критериев были импортированы в программный комплекс Surfer для финальной двумерной интерполяции и построения вертикального разреза по профилю DD (X = 46 000 м, Y = 12 000–30 000 м).

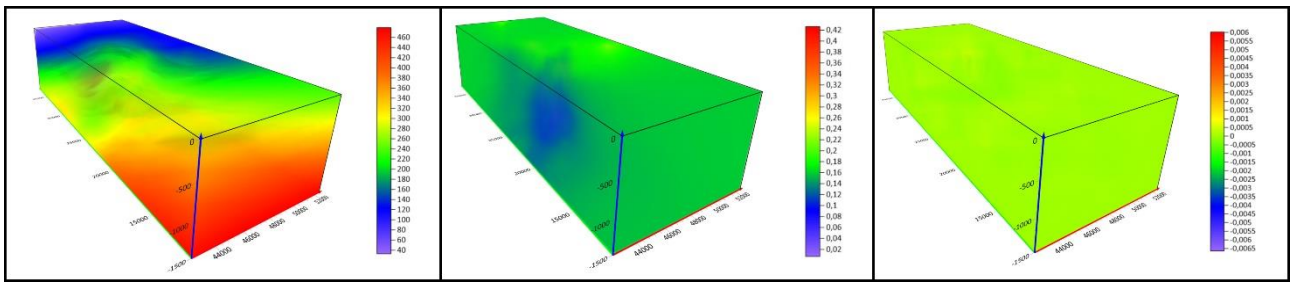


Рисунок 1 – Трехмерные модели элементов температурного поля Северо-Мутновской гидротермальной системы: слева – температура (T), в центре – модуль градиента (|∇T|), справа – скалярный лапласиан (∇²T)

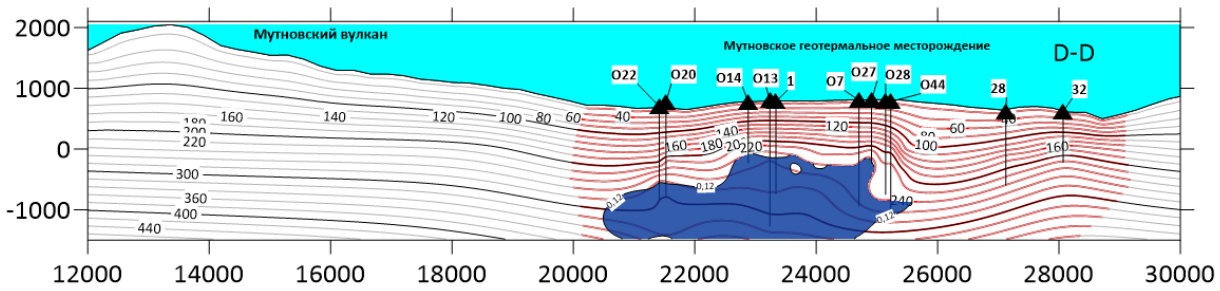


Рисунок 2 – Вертикальный разрез DD с изотермами и выделенными зонами конвективной циркуляции

Построенный разрез (рис. 2) наглядно визуализирует пространственную геометрию конвективных ячеек и положение восходящих гидротермальных потоков. Отмечена высокая сходимость пространственного положения выделенного конвективного ядра с интервалами заложения наиболее дебитных эксплуатационных скважин Мутновского геотермального месторождения (включая скважины 013, 014, 022, 027).

Выводы

1. С использованием разработанных Python-скриптов выполнена дифференциальная обработка данных 3D-геотермотомографии Северо-Мутновской гидротермальной системы конечно-разностным методом второго порядка точности.

2. На основе совместного анализа полей температуры и модуля градиента обоснован комплексный критерий ($T > 240$ ℃, $|\nabla T| < 0.12$ ℃/м), позволивший локализовать зоны активного конвективного перемешивания теплоносителя.

3. Проведенная в программной среде Surfer визуализация вертикального разреза по профилю DD подтвердила пространственную связь выделенного конвективного ядра с продуктивными зонами эксплуатационных скважин Мутновского месторождения.

Исследование выполнено по теме FWME-2024-0007
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Гидрогеология вулканогенов / *А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин.* СПб: Наука. 2010. 395 с.

2. *Kiryukhin A.V.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / *A.V. Kiryukhin, O.O. Usacheva, P.A. Kiryukhin* // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. Vol. 356. pp. 36–51. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2018.02.010.

3. *Кирюхин А.В.* Инверсионное моделирование естественного состояния и истории эксплуатации Мутновского геотермального месторождения 1986–2006 годов / *А.В. Кирюхин, О.О. Усачева* // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 163–169.

4. *Kiryukhin A.V.* Three-dimensional temperature field reconstruction in geothermal reservoirs based on the spline approximation of Green's formula / *A.V. Kiryukhin, D.M. Fage, S.L. Perveev, D.N. Gusev* // Stanford Geothermal Workshop. 1989. P. 135–141.

5. *Кирюхин А.В.* Применение геотермотомографии для выявления продуктивных геотермальных резервуаров и зон конвективной циркуляции теплоносителя в Северо-Мутновской гидротермальной системе (Камчатка, Россия) / *А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, О.О. Усачева* // Journal of Volcanology and Seismology, 2026, Vol. 20. No. 6 (в печати).

6. *Кирюхин А.В.* Моделирование термогидрогеохимических условий формирования продуктивных резервуаров в вулканогенных породах / *А.В. Кирюхин, С.В. Шадрина, М.Ю. Пузанков* // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 90–104.

7. *Pashkevich R.I.* Numerical simulation of exploitation of supercritical enhanced geothermal system / *R.I. Pashkevich, V.V. Taskin* // Proceedings, 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University. 2009. SGP-TR-187.