

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА НА ОЦЕНКУ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЗЕМЛИ

Валентина Владимировна Скуридина

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, бакалавр, e-mail: skyriding@gmail.com

Антон Альбертович Дучков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, зав. лаб., e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

Алексей Анатольевич Романенко

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, зав. отделом, e-mail: romanenko.alexey@gmail.com

Дмитрий Евгеньевич Аюнов

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, вед. прогр., e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

В статье описывается параллельная реализация алгоритма расчета геотермического градиента методом Монте-Карло для областей со сложной верхней границей. Ускорение при использовании параллельной версии, достигает 50-70 раз по сравнению с последовательной, что позволяет обеспечивать более высокую точность расчетов. Приводятся результаты тестирования алгоритма на теоретических моделях с известным аналитическим решением и на реальных данных при расчете влияния рельефа на оценку глубинного теплового потока по термограмме из скважины Л-2 (вблизи оз. Байкал).

Ключевые слова: геотермический градиент, метод Монте-Карло, GPU.

PARALLEL IMPLEMENTATION OF ALGORITHM FOR CALCULATING THE INFLUENCE OF RELIEF ON THE ESTIMATION OF HEAT FLOW OF THE EARTH

Valentina V. Skuridina

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str., 2, student (bachelor), e-mail: skyriding@gmail.com

Anton A. Duchkov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Pr. Ac. Koptyuga, 3, head of laboratory, e-mail: duchkovaa@ipgg.nsc.ru

Alexey A. Romanenko

Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, St. Pirogova 2, head of sector, e-mail: romanenko.alexey@gmail.com

Dmitry E. Ayunov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Pr. Ac. Koptyuga, 3, head of laboratory, e-mail: ayunovde@ipgg.sbras.ru

The article describes parallel implementation of calculating geothermal gradient using an algorithm based on Monte Carlo method. Comparing to sequential version, parallel version performs calculations up to 50-70 times faster, which allows achieving higher precision. There are given results of testing algorithm on models with known exact analytical solution, and results of calculations for real data model (well L-2).

Key words: geothermal gradient, Monte Carlo method, GPU.

Геотемпературное поле вблизи земной поверхности нарушается рядом факторов, среди которых в горных районах и в водоемах с неровным дном основное значение имеют нерегулярности рельефа и изменения температуры земной поверхности. Для учета влияния рельефа на геотермический градиент (тепловой поток) рассчитываются так называемые топографические поправки, которые находятся в результате численного решения уравнения Лапласа.

Известно несколько методик расчета топопоправок к измеренному геотермическому градиенту [1]. Мы использовали метод Монте-Карло, основу которого составляет многократное повторение случайных блужданий из рассматриваемой точки модели [2]. Влияние участка границы на конкретную внутреннюю точку определяется вероятностью достижения случайно блуждающей частицей этого участка границы.

Процесс продолжается, пока траектория не выходит на поглощающую границу. При этом решение уравнения Лапласа представляется как математическое ожидание процесса блуждания. На каждом шаге траектории производятся следующие действия:

- 1) Поиск максимального радиуса сферы с центром в данной точке;
- 2) Выбор произвольного направления и радиуса шага;
- 3) При попадании частицы на границу областей с разными теплопроводностями (λ_1, λ_2) переход из области 1 в область 2 происходит с вероятностью $\lambda_1/(\lambda_1+\lambda_2)$;
- 4) Если траектория выходит на границу, то в зависимости от вида границы «частица» либо отражается от нее на шаг h (при этом добавляется значение $hg(r_{k+1})$, где $g(r_{k+1})$ — градиент на границе), либо процесс завершается на «поглощающей» границе (при этом добавляется температура $f(r_{k+1})$).

Для оценки точности вычисляется дисперсия полученного решения:

$$D(\xi) \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^2 .$$

Нами был программно реализован параллельный алгоритм блуждания по сферам для исполнения на GPU на базе технологии CUDA. Реализованный алгоритм был протестирован на нескольких моделях, для которых существует точное аналитическое решение.

Модель наклонного уступа. Известно аналитическое решение для теплового потока на поверхности для произвольного наклонного уступа [3].

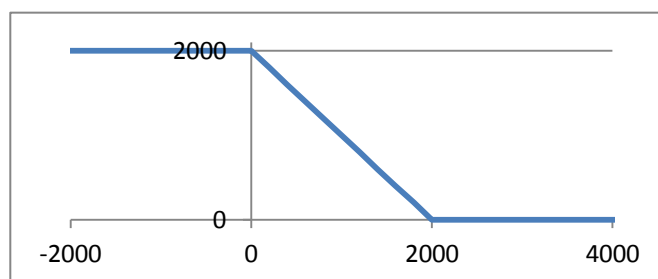


Рис. 1. Схема модели наклонного уступа по осям расстояние (м), поверхность изотермическая

Были рассчитаны значения нормированного температурного градиента для уступа с углом наклона 45° (рис. 1). Расчеты проводились в точках на глубине 20 метров от поверхности. Высота уступа – 2000 м, Расстояние по горизонтали между точками – 200 м. Потом рассчитывался градиент относительно поверхности. Отклонения результата от точного решения показаны на рис. 2. Видно, что наибольшее значение ошибки наблюдается у подножия уступа, вблизи от пикового значения градиента.

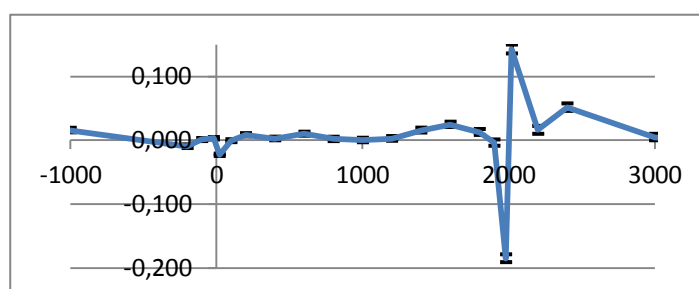


Рис. 2. Оценка точности решения для наклонного уступа. По горизонтальной оси расстояние (м). Значительные расхождения в месте нижнего излома уступа предположительно связано с конечно-разностным приближением при расчете температурного градиента у поверхности

Модель эллипсоида вращения. Известно решение для распределения температуры в модели с включением иной теплопроводности в виде сплюснутого эллипсоида [4]. Для тестирования работы программы рассматривался сплюснутый эллипсоид с вертикальной осью вращения и со следующими параметрами: $a = 1000$ м, $c = 500$ м, $\lambda_{\text{внутр}}=2$, $\lambda_{\text{внеш}}=1$ (рис. 3).

Были проведены расчеты температуры и градиента для 12 точек, находящихся на оси «с» вращения эллипсоида с шагом 50 метров, начиная с глубины 250 м относительно центра. Внутри эллипсоида градиент постоянен, а вне его для данных значений теплопроводности наблюдается постепенное понижение градиента.

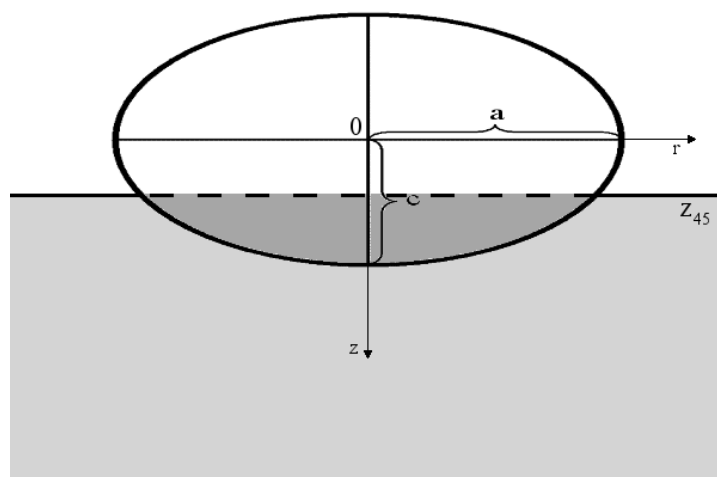


Рис. 3. Схема модели эллипсоида в вертикальном разрезе

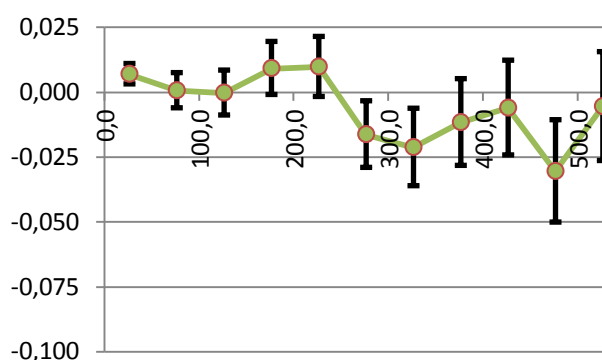


Рис. 4. Оценка точности решения для модели эллипсоида.
По горизонтали глубина (м)

Такие же расчеты проводились для модели с плоской верхней границей и горизонтальной плоской границей между верхним и нижнем слоем, которые контрастны между собой по теплопроводности.

Поправки для скважины Л-2. Были также проведены расчеты изменения нормированного градиента для скважины Л-2 на берегу оз. Байкал.

В качестве модели взят блок пород, имеющий размер 70x100x12 км со скважиной Л-2 в центре (см. рис. 5). Верхней границей области является поверхность суши и дна оз. Байкал. Поверхностная температура повсеместно считалась равной 0°C. На нижней горизонтальной границе (12 км) задается градиент, равный 22 мК/м.

В табл. 1 указаны результаты расчетов до 1100 м с шагом 100 м. Здесь $g_n = g_z/g_{z1}$ — нормированный градиент; g_z — градиент по методу Монте-Карло (ММК); $g_{z1}=22$ мК/м — глубинный градиент.

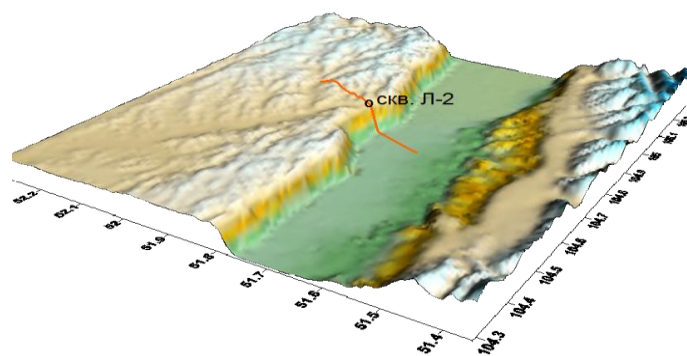


Рис. 5. Топография модели скважины Л-2

Таблица 1

Результаты для скважины Л-2

Интервал глубин, км	$g_H = g_z/g_{гп}$ (измерения)	$g_H = g_z/g_{гп}$ (ММК)	Точность расчета g_H
0,1-0,2	0,85	0,90	0,010
0,2-0,3	0,84	0,90	0,013
0,3-0,4	0,85	0,90	0,016
0,4-0,5	0,85	0,91	0,018
0,5-0,6	0,85	0,91	0,020
0,6-0,7	0,85	0,91	0,021
0,7-0,8	0,86	0,92	0,023
0,8-0,9	0,84	0,92	0,024
0,9-1,0	0,86	0,93	0,026
1,0-1,1	0,86	0,96	0,027

Анализ количества траекторий различной длины. Как выяснилось, с каждой сортировкой число траекторий убывает экспоненциально. Для одной из моделей на разной глубине были проведены оценки числа траекторий, имеющих разную длину. Как выяснилось, вне зависимости от глубины и типа модели графики имеют сходный вид (см. рис. 6).

Анализ полученного ускорения. В табл. 3 приводятся значения ускорений, полученные при исполнении параллельной версии программы на графической карте Tesla C2070, в сравнении с последовательной версией, исполнявшейся на одном ядре процессора Intel Core i5-460M (2.53 ГГц).

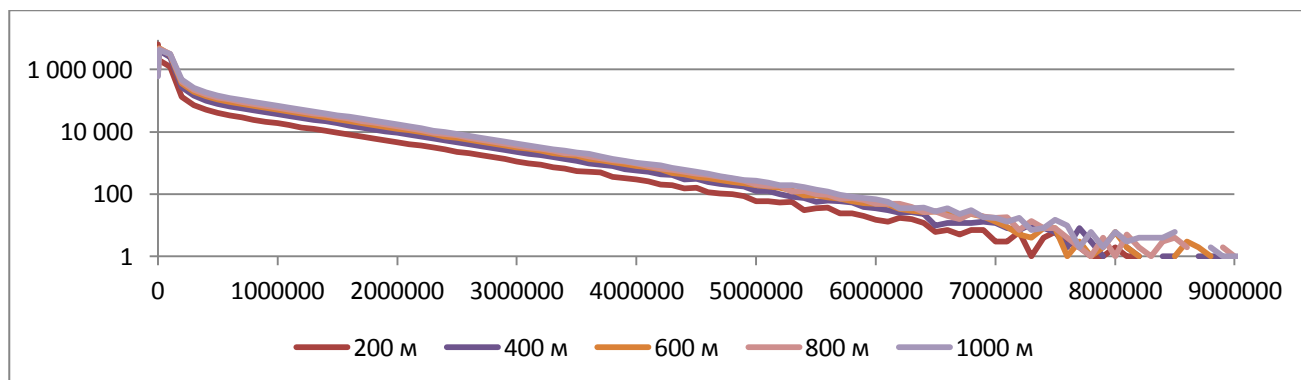


Рис. 6. Распределение траекторий по длинам, сравнение для измерений на разной глубине. Здесь по оси абсцисс указаны длины траекторий (число шагов), по оси ординат – число траекторий данной длины (логарифмическая шкала)

Таблица 3

Ускорение CPU/GPU для разных тестовых моделей

Число траекторий	Модель плоских слоев	Модель наклонного уступа	Модель эллипсоида
100 000	47,1	3,8	21,0
1 000 000	68,4	18,6	49,3
10 000 000	71,3	46,9	59,3

При дальнейшем увеличении числа траекторий прирост ускорения замедляется, однако для 10^7 траекторий погрешность результата составляет сотые доли градуса (для температуры) и зачастую эта точность является достаточной.

Таким образом, параллельная реализация алгоритма была опробована на тестовых моделях с известным аналитическим решением и на реальных данных по скважине Л-2 (вблизи оз. Байкал). Показано, что на данный момент удалось добиться существенного (в отдельных случаях в 71 раз) сокращения времени работы программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Powell W.G., Chapman D.S., Balling N., Beck A.E. Continental heat flow density / In: Handbook of terrestrial heat flow Commission, Kluwer Acad. Publisher. 1988. P. 167-222.
2. Соболев И.Н. Численные методы Монте-Карло. М.:ФИЗМАТЛИТ, 1973, 312с.
3. Lachenbruch, A.H. 1969. The Effect of Two-Dimensional Topography on Superficial Thermal Gradients / U.S. Geol. Surv. Bull. 1203-E (1957). P. 8-14.
4. Корытникова Н. Н. О связи глубинных температур с термическими коэффициентами горных пород и формой глубинных структур // Известия АН СССР. География и геофизика, № 3, 1943. 115 с.