

УДК 517.968:519.612:004.272.43

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ
ГРАВИМЕТРИИ И ОРГАНИЗАЦИЯ УДАЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
МЕЖДУ МВС-1000 И ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ**

Е. Н. Акимова¹, Д. В. Гемайдинов²

Разработан специализированный Web-сервер, предназначенный для запуска программ, реализующих параллельные алгоритмы решения обратной задачи гравиметрии — задачи выделения аномального гравитационного поля в горизонтальном или криволинейном слое и определения переменной плотности в слое на МВС–1000/32 через Web-интерфейс. Комплекс параллельных алгоритмов решения обратной задачи гравиметрии размещен на данном Web-сервере. Параллельные алгоритмы протестированы при решении модельной задачи для синтетического гравитационного поля. Решена задача предварительной обработки гравитационных данных и задача о восстановлении плотности в слое. Проведен анализ эффективности и ускорения параллельных алгоритмов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (код проекта № 06–01–00116). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ-2008; <http://agora.guru.ru/pavt2008>).

Ключевые слова: обратная задача гравиметрии, прямые и итерационные методы, параллельные алгоритмы, многопроцессорные вычислительные системы, Web-сервер, эффективность и ускорение.

1. Введение. Рассматривается задача выделения источников гравитационного поля, локализованных в горизонтальном или криволинейном слое между заданными глубинами, и определения переменной плотности в этом слое.

Решение обратной задачи гравиметрии разбивается на два этапа. На первом этапе необходимо выделение из измеренного гравитационного поля аномального поля от исследуемого слоя. Выделенное аномальное поле служит правой частью базового интегрального уравнения первого рода относительно искомой плотности. Методика предварительной обработки гравитационных данных предложена П. С. Мартышко и И. Л. Пруткиным в работе [1] и сводится к последовательному решению трех задач: решению задачи Дирихле для уравнения Лапласа на всей границе или части границы исследуемой области (исключение боковых источников поля), вычислению интегрального оператора (пересчет поля вверх) и решению двумерного интегрального уравнения первого рода (пересчет поля вниз). Второй этап связан непосредственно с решением линейного двумерного интегрального уравнения Фредгольма первого рода для нахождения переменной плотности в слое [2]. При разработке методов решения задач используются идеи итеративной регуляризации [3].

Для решения задачи предварительной обработки гравитационных данных на многопроцессорном вычислительном комплексе МВС–1000/32 используются параллельные прямые и итерационные алгоритмы, описанные в работе [4]. Для решения задачи о восстановлении переменной плотности в слое по гравитационным данным используются параллельные алгоритмы, описанные в работах [5–7].

Разработан специализированный Web-сервер, предназначенный для запуска программ, реализующих параллельные алгоритмы решения задачи предварительной обработки гравитационных данных и задачи гравиметрии о нахождении переменной плотности в слое на МВС–1000/32 через Web-интерфейс. Спроектирована база данных, в которой хранятся задачи пользователей с входными и выходными данными, создана служба запуска задач и передачи данных между сервером и МВС–1000/32.

Параллельные алгоритмы протестированы при решении модельной задачи для синтетического гравитационного поля. Решена задача предварительной обработки гравитационных данных и задача о восстановлении плотности в слое. Проведен анализ эффективности и ускорения параллельных алгоритмов.

2. Постановка обратной задачи гравиметрии и параллельные методы решения. Рассмат-

¹ Институт математики и механики УрО РАН, ул. С. Ковалевской, д. 16, 620219, г. Екатеринбург; e-mail: aen@imm.uran.ru

² Уральский государственный технический университет, ул. Мира, д. 32, 620002, г. Екатеринбург; e-mail: mitia07@mail.ru

ривается задача о нахождении переменной плотности $\sigma = \sigma(x, y)$ в горизонтальном слое

$$P = \{(x, y, z) \in R^3 : (x, y) \in D, H_1 \leq z \leq H_2\},$$

где H_1, H_2 — константы, либо в криволинейном слое

$$P1 = \{(x, y, z) \in R^3 : (x, y) \in D, H_1(x, y) \leq z \leq H_2(x, y)\}$$

по гравитационным данным, измеренным на площади $D = \{(x, y) \in R^2 : a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\}$ земной поверхности. Используется априорная информация об отсутствии аномалий плотности вне слоя с криволинейными границами $H_1 = H_1(x, y)$ и $H_2 = H_2(x, y)$, такими, что $H_1 < H_2 \quad \forall(x, y)$, и выполняется условие $H_i(x, y) \rightarrow h_i = \text{const}$ при $x \rightarrow \pm\infty$ и $y \rightarrow \pm\infty$; при этом предполагается, что распределение плотности $\sigma = \sigma(x, y)$ внутри слоя не зависит от z (ось z направлена вниз).

Задача нахождения неизвестной плотности $\sigma(x, y)$ сводится к решению линейного двумерного интегрального уравнения Фредгольма первого рода

$$A\sigma \equiv f \iint_{a \ c}^{b \ d} \left\{ \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + H_1^2(x', y')]^{1/2}} - \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + H_2^2(x', y')]^{1/2}} \right\} \sigma(x', y') dx' dy' = \Delta g(x, y), \quad (1)$$

где f — гравитационная постоянная и $\Delta g(x, y)$ — гравитационный эффект, порождаемый источниками в горизонтальном или криволинейном слое.

После дискретизации уравнения на сетке, на которой задана функция $\Delta g(x, y)$, и аппроксимации интегрального оператора по квадратурным формулам задача (1) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) либо с симметричной положительно определенной матрицей (горизонтальный слой), либо с несимметричной матрицей (криволинейный слой).

Так как уравнение (1) относится к классу некорректно поставленных задач, то СЛАУ, возникающее в результате дискретизации уравнения, является плохо обусловленной и поэтому преобразуется к виду

$$(A + \alpha E)z = b, \quad (2)$$

где α — параметр регуляризации.

В случае криволинейного слоя исходная матрица СЛАУ несимметрична, поэтому такая система предварительно преобразуется к виду

$$(A^T A + \alpha' E)z = A^T b, \quad (3)$$

где A^T — транспонированная матрица и α' — параметр регуляризации.

Для решения уравнений (2) и (3) используются итерационные методы градиентного типа: метод минимальных невязок, метод наискорейшего спуска, метод минимальной ошибки и метод простой итерации (МПИ) в виде

$$z^{k+1} = z^k - \frac{1}{\lambda_{\max}} [(A + \alpha E)z^k - b], \quad (4)$$

где λ_{\max} — максимальное собственное значение матрицы $A + \alpha E$ (симметричный случай).

Условием останова итерационных процессов является выполнение неравенства $\frac{\|Az^k - b\|}{\|b\|} < \varepsilon$.

Численная реализация и распараллеливание итерационных методов для решения обратной задачи гравиметрии (1) выполнены на многопроцессорном вычислительном комплексе МВС-1000/32 с помощью библиотеки MPI [8] на языке Фортран.

Распараллеливание итерационных методов градиентного типа [7] основано на разбиении матрицы A горизонтальными полосами на m блоков, а вектора решения z и вектора правой части b СЛАУ на m частей так, что $n = m \times L$, где n — размерность системы уравнений и m — число процессоров. На каждой итерации каждый из m процессоров вычисляет свою часть вектора решения. В случае умножения матрицы A на вектор z каждый из m процессоров умножает свою часть строк матрицы A на вектор z . В случае матричного умножения $A^T A$ каждый из m процессоров умножает свою часть строк транспонированной матрицы A^T на всю матрицу A . Host-процессор отвечает за пересылки данных и также вычисляет свою часть вектора решения.

Для метода простой итерации (4) максимальное собственное значение λ_{\max} матрицы $A + \alpha E$ находится с помощью степенного метода с использованием параллельного алгоритма умножения матрицы на вектор.

3. Предварительная обработка гравитационных данных и алгоритмы параллельной реализации. Предварительная обработка гравитационных данных, связанная с выделением аномального поля (т.е. получение правой части уравнения (1)), выполняется по методике, предложенной в [1]. Подробное описание методики приводится в работе [4].

Существенный вклад в гравитационное поле слоя оказывают источники, залегающие вне поля. Для решения задачи об определении плотности в слое необходимо выделить поле из этого слоя путем исключения боковых источников поля и источников, залегающих выше и ниже рассматриваемого слоя.

В соответствии с методикой задача предварительной обработки гравитационных данных сводится к последовательному решению трех задач:

1) решению задачи Дирихле для уравнения Лапласа $\Delta u(x, y) = 0, u(x, y)|_{\partial D} = \varphi(x, y)$ на всей или части границы исследуемой области для исключения боковых источников поля; $\varphi(x, y) = U(x, y, 0)$, т.е. искомая функция принимает на границе области D те же значения, что и измеренное на земной поверхности гравитационное поле $U(x, y, z)|_{z=0}$;

2) вычислению интегрального оператора для пересчета поля вверх;

3) решению двумерного интегрального уравнения первого рода для пересчета поля вниз.

Для решения задачи Дирихле используется метод разделения переменных (МРП) в сеточной прямоугольной области.

Заметим, что предварительно задача Дирихле для уравнения Лапласа в прямоугольной области D путем изменения правой части уравнения в приграничных узлах сводится к задаче Дирихле для уравнения Пуассона с однородными граничными условиями и новой правой частью $\varphi(x, y)$.

МРП для задачи Дирихле для уравнения Пуассона с однородными граничными условиями в области D имеет вид

$$\phi_k(i) = \sum_{j=1}^{N-1} \varphi(i, j) \sin \frac{k\pi j}{N}, \quad i = 1, \dots, N - 1, \tag{5}$$

$$- \nu_k(i - 1) + (2 + h^2 \lambda_k) \nu_k(i) - \nu_k(i + 1) = h^2 \phi_k(i), \quad \nu_k(0) = \nu_k(N) = 0, \quad i, k = 1, \dots, N - 1, \tag{6}$$

$$u_k(i, j) = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} \nu_k \sin \frac{k\pi j}{N}, \quad i, j = 1, \dots, N - 1, \tag{7}$$

где $\lambda_k = \frac{4}{h^2} \sin^2 \frac{k\pi}{2N}, k = 1, \dots, N - 1$.

Численная реализация и распараллеливание алгоритмов для решения задачи предварительной обработки гравитационных данных выполнены на МВС-1000/32 с помощью библиотеки MPI на языке Фортран.

Распараллеливание метода разделения переменных для решения задачи Дирихле в прямоугольной области реализовано в двух вариантах, отличающихся распределением исходных данных вертикальными либо горизонтальными полосами по процессорам (рис. 1).

В случае горизонтального разбиения исходной области на L подобластей (горизонтального распределения исходных данных по процессорам) суммы в (5) и (7) разбиваются на L частей, и каждый из процессоров вычисляет свою часть функций $\phi_k(i)$ и $u_k(i, j)$, где $k, j = 1, \dots, N - 1$. Краевые задачи (6) решаются методом обычной прогонки [9].

В случае вертикального разбиения исходной области на L подобластей (вертикального распределения исходных данных по процессорам) функции $\phi_k(i)$ и $u_k(i, j)$ для $k, j = 1, \dots, N - 1$ вычисляются на процессорах независимо. Краевые задачи вида (6) решаются с помощью алгоритма распараллеливания прогонки, предложенного в работе [10] для решения краевой задачи для трехточечного разностного уравнения на отрезке.

В соответствии с методикой предварительной обработки гравитационных данных на этапе пересчета поля вверх при вычислении интегрального оператора используется параллельный алгоритм умножения матрицы на вектор; на этапе пересчета поля вниз при решении интегрального уравнения используются параллельные итерационные методы градиентного типа.

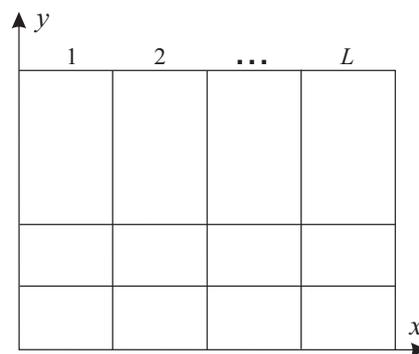


Рис. 1. Разбиение области на подобласти

4. Результаты численных экспериментов и эффективность распараллеливания. Задача выделения аномального гравитационного поля в криволинейном слое между заданными глубинами и задача о восстановлении плотности в этом слое (1) рассматривались для модельной области S_1 , имеющей размеры $10 \times 10 \text{ км}^2$. Криволинейные границы слоя менялись в пределах

$$1.0 \text{ км} \leq H_1(x, y) \leq 2.0 \text{ км}, \quad 1.5 \text{ км} \leq H_2(x, y) \leq 2.5 \text{ км};$$

$\Delta x \approx \Delta y \approx 0.101 \text{ км}$ — шаги сетки и $f = 6.67 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$ — гравитационная постоянная.

После дискретизации исходного уравнения на сетке, на которой задана функция $\Delta g(x, y)$, и аппроксимации интегрального оператора по квадратурным формулам задача (1) сводится к системе линейных алгебраических уравнений с несимметричной матрицей размера $10^4 \times 10^4$.

На этапе решения задачи предварительной обработки гравитационных данных при решении задачи Дирихле использовался параллельный метод разделения переменных (5)–(7) с горизонтальным распределением исходных данных по процессорам. Для решения интегрального уравнения использовался параллельный итеративно регуляризованный метод простой итерации (4) с параметром регуляризации $\alpha = 0.0001$. На этапе решения задачи о восстановлении плотности в слое использовался параллельный итеративно регуляризованный метод наискорейшего спуска с параметром регуляризации $\alpha = 0.001$.

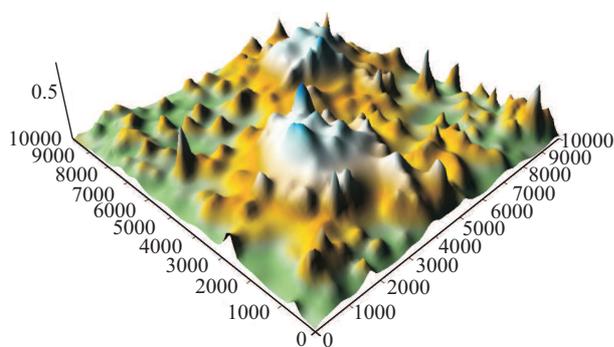


Рис. 2. Исходное модельное гравитационное поле $g(x, y)$ для области S_1

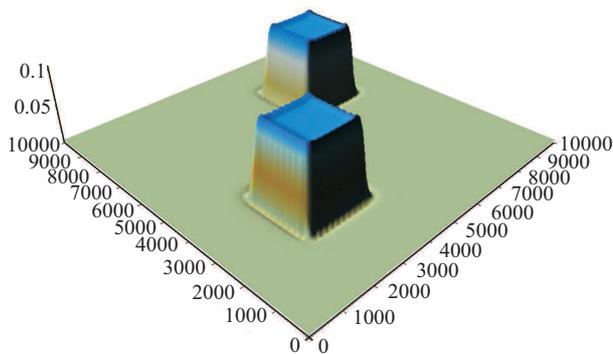


Рис. 3. Исходное распределение плотности $\sigma(x, y)$ в слое для области S_1

На рис. 2 изображено исходное модельное (синтетическое) гравитационное поле. Данное поле определялось путем решения прямой задачи гравиметрии — определения правой части в уравнении (1) по некоторому исходному распределению плотности в слое $\sigma(x, y)$ с добавлением влияния 1000 точечных источников, лежащих выше исследуемого слоя, таким образом, что максимум поля точечных источников составлял 120 процентов от максимума поля слоя. На рис. 3 изображено исходное распределение плотности в слое.

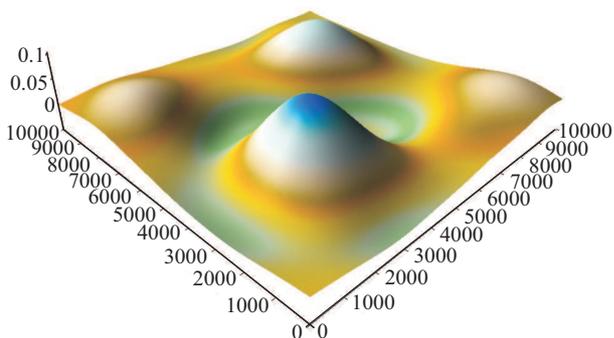


Рис. 4. Выделенное аномальное поле $\Delta g(x, y)$ для области S_1

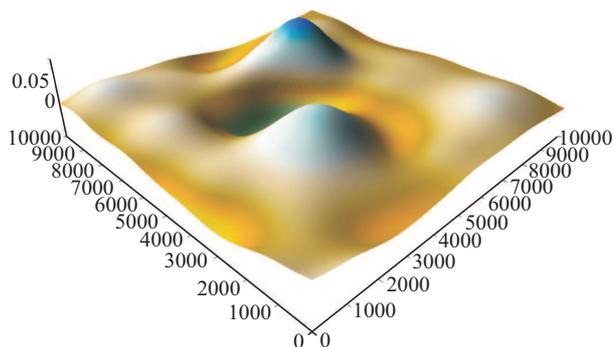


Рис. 5. Распределение восстановленной плотности $\sigma(x, y)$ в слое для области S_1

На рис. 4 изображено аномальное поле, выделенное из исходного в соответствии с методикой предварительной обработки гравитационных данных.

На рис. 5 изображено распределение плотности в слое, восстановленной по выделенному аномальному полю. Максимумы исходной и восстановленной плотности находятся в одинаковых областях. Максимумы исходного распределения плотности $\max_z \sigma(x, y) = 0.1$. Максимумы восстановленной плотности

$\max_z \hat{\sigma}(x, y) = 0.05$. Можно говорить лишь о качественном восстановлении плотности в связи со значительным возмущением исходного гравитационного поля. Относительная погрешность вычислений составляет $\frac{\|\sigma - \hat{\sigma}\|_{R^n}}{\|\sigma\|_{R^n}} \leq 0.8$.

На многопроцессорном комплексе МВС-1000/32 была решена задача предварительной обработки гравитационных данных, измеренных на Среднем Урале, в горизонтальном слое между глубинами $H_1 = 10$ км и $H_2 = 20$ км и задача о восстановлении плотности в этом слое для области S_2 , имеющей размеры 1008×924 км².

После дискретизации исходного уравнения на сетке, где задана функция $\Delta g(x, y)$, и аппроксимации интегрального оператора по квадратурным формулам задача (1) сводится к системе линейных алгебраических уравнений с симметричной матрицей размера 14400×14400 .

На этапе решения задачи предварительной обработки гравитационных данных при решении задачи Дирихле использовался параллельный метод разделения переменных (5) – (7). Для решения интегрального уравнения использовался параллельный итеративно регуляризованный МПИ (4) с параметром регуляризации $\alpha = 0.01$. Для решения задачи о восстановлении плотности в слое использовался параллельный итеративно регуляризованный МПИ с параметром регуляризации $\alpha = 0.01$.

На рис. 6 изображено исходное гравитационное поле.

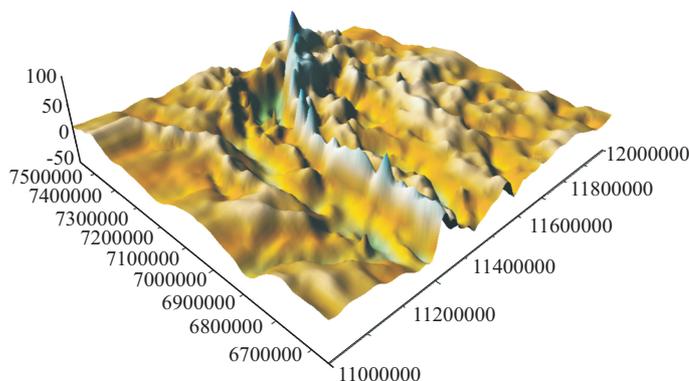


Рис. 6. Исходное гравитационное поле $g(x, y)$ для области S_2

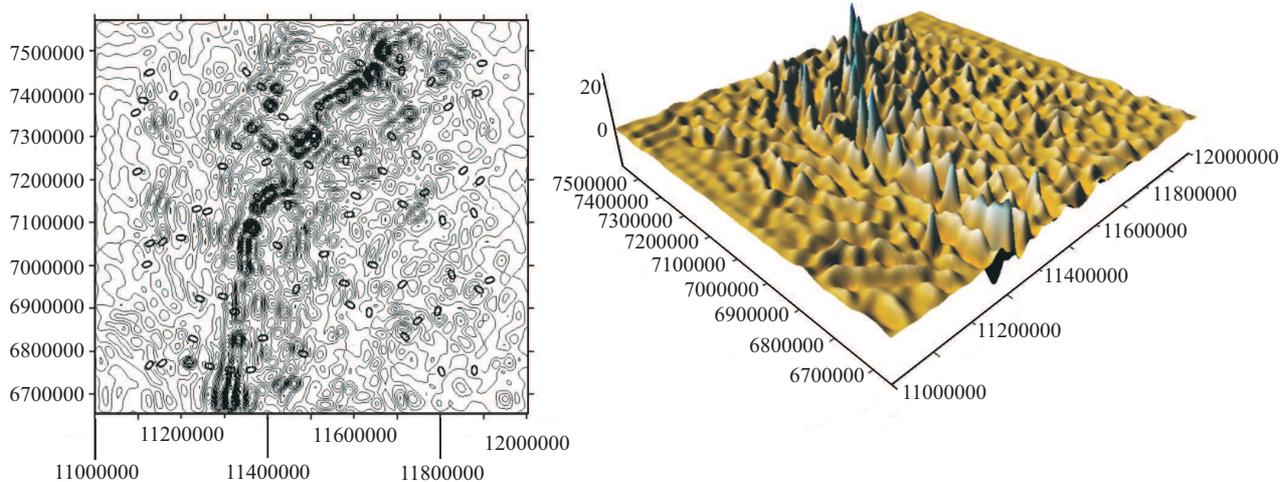


Рис. 7. Линии уровня и распределение аномального поля $\Delta g(x, y)$ для области S_2

На рис. 7 изображены линии уровня и распределение аномального поля, выделенного из исходного поля по методике предварительной обработки гравитационных данных.

На рис. 8 изображены линии уровня и распределение плотности в слое, восстановленной по выделенному аномальному полю.

Результаты переданы специалистам в Институт геофизики (ИГ) УрО РАН для геофизической интерпретации.

Для решения задачи предварительной обработки данных с использованием параллельных алгоритмов МРП и МПИ для областей S_1 и S_2 проведено сравнение коэффициентов ускорения и эффективности.

Рассмотрим коэффициенты ускорения и эффективности $S_m = \frac{T_1}{T_m}$, $E_m = \frac{S_m}{m}$, где T_m — время выполнения параллельного алгоритма на МВС-1000 с числом процессоров m ($m > 1$) и T_1 — время выполнения последовательного алгоритма на одном процессоре. Время T_m представляет собой сумму чистого времени счета и накладных расходов на межпроцессорные обмены: $T_m = T_c + T_o$. Число процессоров m соответствует упомянутому разбиению векторов на m частей и разбиению исходной области на m подобластей.

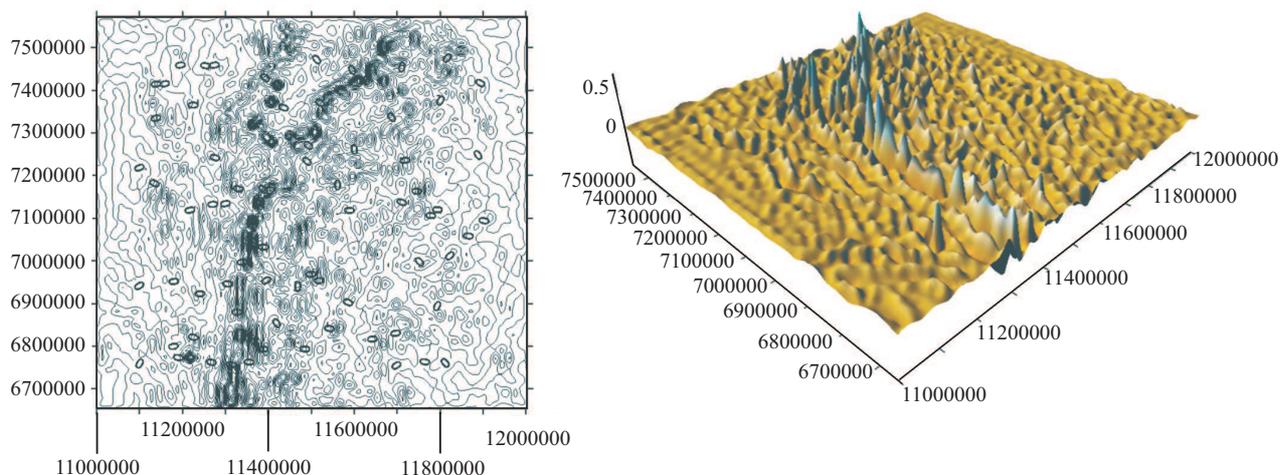


Рис. 8. Линии уровня и распределение восстановленной плотности в слое 10–20 км для области S_2

Таблица 1
Задача предварительной
обработки данных для
области S_1

m	T_m , мин	S_m	E_m
1	65.3	—	—
2	36.5	1.78	0.89
4	19.6	3.38	0.85
5	16.2	4.03	0.81
8	11.2	5.83	0.73
10	10.2	6.40	0.64

Таблица 2
Задача предварительной
обработки данных для
области S_2

m	T_m , мин	S_m	E_m
1	231.5	—	—
2	128.6	1.80	0.90
3	88.38	2.62	0.87
4	67.29	3.44	0.86
8	36.85	6.28	0.79
10	30.69	7.54	0.75
15	22.46	10.3	0.69
20	18.50	12.5	0.63

В табл. 1 приведены время счета и коэффициенты ускорения и эффективности решения задачи предварительной обработки гравитационных данных для области S_1 с использованием параллельных алгоритмов МРП и МПИ (число итераций равно 100) на МВС–1000/32 для 100×100 точек сетки (матрица размера $10^4 \times 10^4$).

В табл. 2 приведены время счета и коэффициенты ускорения и эффективности решения задачи предварительной обработки гравитационных данных для области S_2 с использованием параллельных алгоритмов МРП и МПИ (число итераций равно 50) на МВС–1000/32 для 120×120 точек сетки (матрица размера 14400×14400).

Время счета и коэффициенты ускорения и эффективности решения задачи о восстановлении плотности в слое с различными гравитационными данными с использованием параллельных итерационных методов приводятся в работах [5, 7].

В табл. 3 приведены время счета и коэффициенты ускорения и эффективности решения задачи о восстановлении плотности в слое для области S_2 с использованием параллельного метода МПИ (число итераций равно 100) на МВС–1000/32 для 120×120 точек сетки. Заметим, что здесь матрица СЛАУ формируется и хранится в памяти каждого процессора по частям, что влияет на эффективность алгоритма.

Результаты вычислений показывают, что решение задачи предварительной обработки гравитационных данных и задачи о нахождении плотности в слое с использованием параллельных алгоритмов существенно уменьшает время счета. Параллельные итерационные алгоритмы имеют достаточно высокую эффективность распараллеливания.

5. Архитектура Web-сервера. Комплекс параллельных алгоритмов для решения обратной задачи

Таблица 3
Задача о нахождении
плотности в слое для
области S_2

m	T_m , мин	S_m	E_m
1	138.0	—	—
2	98.49	1.40	0.70
4	43.15	3.20	0.80
8	19.22	7.18	0.90
10	14.38	9.60	0.96
12	11.09	12.4	1.04
15	7.53	18.3	1.22

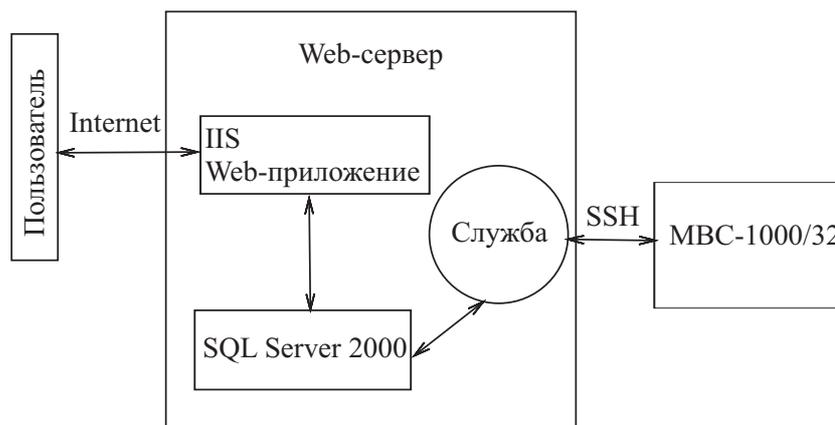


Рис. 9. Архитектура Web-сервера

гравиметрии о нахождении переменной плотности в слое и задачи предварительной обработки гравитационных данных размещен на специализированном Web-сервере, установленном в Институте математики и механики УрО РАН.

Web-сервер предназначен для запуска программ на многопроцессорном вычислительном комплексе MBC-1000/32 через Web-интерфейс. Сервер предоставляет возможность пользователю через Web-интерфейс выбрать определенный тип задачи и метод ее решения, загружать входные данные, указывать число процессоров, на которых будет решаться задача, и получать выходные данные после ее решения. Для каждой задачи считается время ее решения, что позволяет пользователю в дальнейшем оценивать ожидаемое время получения результата и планировать свою работу.

Функции сервера определяют его внутреннюю структуру. Web-сервер состоит из трех основных частей (рис. 9): Web-сервер IIS (Internet Information Services — информационные службы Интернета), на котором установлено Web-приложение; база данных SQL Server 2000, в которой хранятся все задачи пользователей с входными и выходными данными; служба, выполняющая загрузку данных, запуск задач на MBC-1000/32, просмотр состояния задачи и загрузку результатов завершившихся задач на Web-сервер.

6. Web-приложение. В качестве Web-сервера использовался сервер IIS 5.1, который полностью интегрирован в операционную систему Windows и совместим с приложениями Microsoft.NET. Web-приложение разработано на ASP.NET на языке C# в среде разработки Visual Studio.NET 2003. Задача для решения на MBC-1000/32 определяется следующими характеристиками: название задачи и краткое ее описание, метод решения задачи, список входных и выходных параметров, список входных и выходных файлов, статус задачи, точность решения.

Для создания и запуска задачи для решения на MBC-1000/32 пользователь должен быть зарегистрирован в системе, т.е. иметь свой логин и пароль. При входе на Web-сервер пользователь вводит логин и пароль, который проверяется на MBC-1000/32, и получает доступ к серверу. В будущем для безопасного обмена данными между пользователем и Web-сервером через Интернет будет использован SSL-протокол.

Информация о задаче хранится в базе данных. Главной целью создания базы данных является хранение входных и выходных данных запускаемых пользователем задач. В качестве базы данных использовался SQL Server 2000 Developer Edition. Этот вариант SQL Server позволяет создавать разработчикам приложения любых типов, функционирующие совместно с SQL Server, который используется в качестве хранилища данных.

Для запуска задачи на MBC-1000/32 пользователю необходимо выбрать задачу из списка предложенных задач и создать ее. Часть задаваемых параметров для задачи определяется спецификой задачи (размер сетки, точность решения, граничные условия), а часть параметров — особенностями системы запуска задач на MBC-1000/32 (число процессоров, время счета). Для каждой задачи пользователь должен указать в соответствующем поле число процессоров, на которых будет решаться задача (от 1 до 31), максимальное время работы программы в минутах (от 1 до 255), входные параметры и входные данные в виде файлов. Пользователь также может отслеживать задачу с момента ее создания до решения на MBC-1000/32. Задача считается выполненной после того, как она решилась без ошибок и все выходные файлы закачаны на Web-сервер.

Для каждой задачи вводится *статус задачи*. Статусов задачи семь:

- 1) задача решена;
- 2) задача в процессе решения;
- 3) задача в очереди на МВС;
- 4) данные записываются на МВС;
- 5) данные задачи добавлены в базу;
- 6) загрузка данных на сервер;
- 7) ошибка.

В задаче фигурирует только один пользователь, дата создания, время решения задачи, статус, максимальное время решения задачи, число процессоров, название задачи, входные параметры, входные данные в виде файлов, выходные числовые данные и выходные данные в виде файлов. Заданием всех вышеперечисленных параметров и определяется структура базы данных.

Статус 6 присваивается вновь поступившей задаче. Статус 5 присваивается задаче после загрузки входных файлов на сервер либо в случае отсутствия входных файлов для данного типа задачи. Статус 7 присваивается задаче в следующих случаях: загрузка входных данных прервалась, произошла ошибка при решении задачи на МВС-1000/32, истекло указанное время для решения задачи (времени для решения задачи требуется больше, чем задано пользователем).

Служба запуска задач предназначена для запуска и мониторинга задач на МВС-1000/32. В качестве службы выполняется скрипт, написанный на языке Perl (на сервере установлен дистрибутив ActivePerl 5.8.8 Build 817).

Алгоритм данной программы состоит в выполнении следующих шагов:

- 1) просмотр в базе данных созданных новых задач со статусом 5 (если таковых нет, то переход к шагу 5);
- 2) чтение входных параметров задачи;
- 3) закачка на МВС-1000/32 входных файлов;
- 4) запуск задачи;
- 5) просмотр состояния всех запущенных задач;
- 6) в случае решения какой либо задачи выполняется скачивание выходных данных задачи на сервер (в противном случае — переход к шагу 1);
- 7) пометка в базе данных этой задачи как решенной и сохранение всех выходных данных в базе данных;
- 8) создание изображения решения с помощью графического пакета Surfer.

Удаленный доступ и обмен данными между МВС-1000/32 и сервером обеспечивается пакетом программ Putty, представляющим собой несколько отдельных программ, предназначенных для работы с Unix-сервером по протоколам SSH1 и SSH2, которые позволяют пользователям общаться с удаленной системой в режиме эмуляции терминала, при котором все передаваемые и принимаемые пользователем данные передаются в зашифрованном виде. Программа работает на Win32 для Intelx86 и Alpha, а также на Unix.

В нашем случае для обмена файлами между МВС-1000/32 и сервером использовалась утилита из пакета Putty — программа PSCP (Putty Secure Copy Client). Программа PSCP предназначена для безопасного обмена данными (директориями и файлами) между компьютерами с использованием SSH-соединения. При этом может производиться преобразование текстовых файлов из формата ОС Windows в формат ОС Unix и обратно.

Для выполнения команд MPI на МВС-1000/32 использовалась программа WinSCP. Одной из возможностей WinSCP является автоматизация командной строки при помощи скриптов и интерфейса, которую мы используем в службе.

Для создания изображений с помощью графического пакета Surfer используется скрипт, выполняющийся программой GS Scripter (интерпретатор языка типа Basic), включенной в пакет Surfer. После копирования выходных данных на Web-сервер запускается скрипт, в котором указывается путь к данным.

7. Пример использования Web-сервера. В качестве примера использования Web-сервера рассмотрим решение задачи одного из этапов задачи предварительной обработки гравитационных данных — решение задачи Дирихле для уравнения Пуассона (может рассматриваться как самостоятельная задача) в единичном квадрате $D = \{(x, y) \in D : 0 \leq x, y \leq 1\}$. Здесь $u(x, y) = (x^2 - x + 1)(y^2 - y + 1)$ — точное решение, $\varphi(x, y) = 4 + 2x^2 - 2x + 2y^2 - 2y$ — правая часть, $\begin{cases} u(x, y)|_{\partial D} = y^2 - y, & x = 0, \quad x = 1; \\ u(x, y)|_{\partial D} = x^2 - x, & y = 0, \quad y = 1 \end{cases}$ —

граничные условия.

Задачу будем решать параллельным итерационным методом Гаусса–Зейделя с начальным приближением $u_0 = 0$.

После соединения с Web-сервером через Интернет пользователь выбирает задачу и метод ее решения из предложенного в таблице списка доступных для решения задач (рис. 10).

ID типа задачи	Название	Краткое описание	Описание	Выбрать
1	Метод Гаусса-Зейделя	Метод Гаусса-Зейделя для решения задачи Дирихле	Просмотр	Выбор
2	Метод разделения переменных (1)	Метод разделения переменных для решения задачи Дирихле (горизонтальный способ распределения данных)	Просмотр	Выбор
3	Метод разделения переменных (2)	Метод разделения переменных для решения задачи Дирихле (вертикальный способ распределения данных)	Просмотр	Выбор
4	Метод наискорейшего спуска	Метод наискорейшего спуска для решения обратной задачи гравиметрии	Просмотр	Выбор
5	Метод минимальной ошибки	Метод минимальной ошибки для решения обратной задачи гравиметрии	Просмотр	Выбор
6	Метод минимальных невязок	Метод минимальных невязок для решения обратной задачи гравиметрии	Просмотр	Выбор
7	Метод простой итерации	Метод простой итерации для решения обратной задачи гравиметрии	Просмотр	Выбор
8	Предварительная обработка гравитационных данных	Предварительная обработка гравитационных данных	Просмотр	Выбор

Рис. 10. Список задач, доступных для решения

Пользователь имеет возможность посмотреть подробное описание задачи с заданием входных и выходных параметров через ссылку “Просмотр” в соответствующей строке.

Выбрав задачу для решения на МВС–1000/32, пользователь переходит на соответствующую задаче форму загрузки данных на Web-сервер (рис. 11), вводит входные параметры и загружает входные файлы данных для задачи, подготовленные заранее в специальном формате. Здесь же имеется возможность определить число свободных процессоров на МВС–1000/32 и указать время предполагаемого счета в минутах.

Пользователю предоставляется возможность следить за ходом выполнения своей задачи и всех задач, загруженных на Web-сервер, с помощью таблицы задач пользователя (рис. 12), куда он попадает по ссылке “Статус задачи” из формы загрузки данных на Web-сервер.

В таблице задач пользователя с помощью ссылки “Выбрать” пользователь может выделить соответствующую строку и просматривать статус задачи до получения выходных данных. Ниже таблицы задач пользователя выдается подробное состояние выбранной задачи.

На рис. 13 изображено состояние 364-й задачи. Здесь приводятся время выполнения программы, выходные параметры и ссылки на выходные файлы. Когда статус задачи становится равным единице, то задача решена и внизу страницы появляется изображение решения. Для рисования использован гра-

Метод Гаусса-Зейделя для решения задачи Дирихле

Число свободных процессоров на МВС-1000/32:

Ввод входных параметров для задачи:

Число процессоров:

Мак. время работы программы, мин

№	Описание	Значение
1	N - размер сетки	<input type="text" value="50"/>
2	E - точность решения	<input type="text" value="0.0001"/>

Ввод входных параметров для задачи: [Помощь](#)

№	Описание	Загрузка файла
1	XUF	<input type="text"/> <input type="button" value="Browse..."/>
2	U	<input type="text"/> <input type="button" value="Browse..."/>

Статус задачи

Данные загружены, задача № 568 встала в очередь, перейдите к просмотру ее выполнения с помощью ссылки “Статус задачи”

Рис. 11. Форма загрузки данных на Web-сервер

Статус задач:

Тип задач:

ID задачи	ID типа задачи	# процессоров	Макс. время, мин	Дата создания	Статус	Выбор
363	1	5	2	02.06.2006 1:31:00	5	<input type="button" value="Выбрать"/>
364	1	5	2	02.06.2006 1:32:00	1	<input type="button" value="Выбрать"/>
1						
Число строк в таблице:		<input type="text" value="10"/>	<input type="button" value="Изменить"/>			

Рис. 12. Таблица задач пользователя

фический пакет Surfer. У пользователя имеется возможность редактирования решенной задачи с целью частичного изменения параметров с последующим запуском.

Web-сервер установлен в Институте математики и механики УрО РАН и будет расширен добавлением новых типов задач и алгоритмов путем описания их в специально разработанной базе данных и использован для решения этих задач на МВС-1000/32.

8. Заключение. Разработан специализированный Web-сервер, предназначенный для запуска программ, реализующих параллельные алгоритмы решения обратной задачи гравиметрии — задачи выделения аномального гравитационного поля в горизонтальном или криволинейном слое и определения переменной плотности в слое на МВС-1000/32 через Web-интерфейс. Спроектирована база данных, в которой хранятся задачи пользователей с входными и выходными данными, создана служба запуска задач и пе-

Задача	364. Метод Гаусса–Зейделя
Метод	Метод Гаусса–Зейделя для решения задачи Дирихле
Число процессоров	5
Макс. время выполнения, мин	2
Дата создания	02.06.2006 1:32:00
Статус	Задача решена

Время выполнения задачи, сек. : 0,34

Выходные файлы:

№	Описание	Файлы
1	хуи	364_outdat

[Редактировать задачу](#)

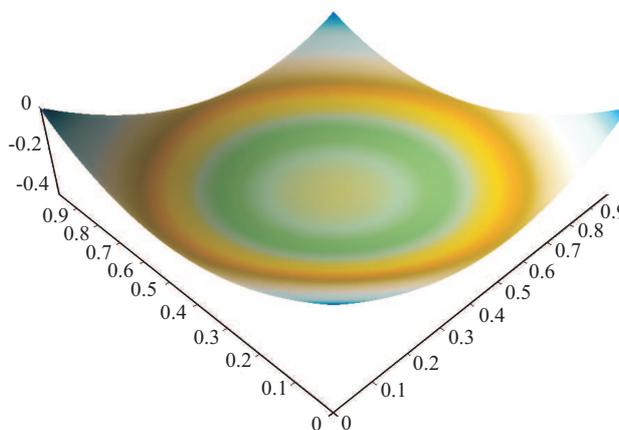


Рис. 13. Просмотр выбранной задачи

редачи данных между сервером и МВС–1000/32.

Комплекс параллельных алгоритмов решения обратной задачи гравиметрии размещен на специализированном Web-сервере. Параллельные алгоритмы протестированы при решении модельной задачи для синтетического гравитационного поля. Решена задача предварительной обработки гравитационных данных и задача о восстановлении плотности в слое. Проведен анализ эффективности и ускорения параллельных алгоритмов.

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией региональной геофизики ИГ УрО РАН Н. И. Начашкину за предоставленные гравитационные данные.

Авторы выражают признательность за поддержку и внимание к работе член-корреспонденту РАН П. С. Мартышко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартышко П.С., Пруткин И.Л. Технология разделения источников гравитационного поля по глубине // Геофизический журнал. 2003. **25**, № 3. 159–168.
2. Martyshko P.S., Koksharov D.E. On the construction of the density sections using gravity data // Extended Abstracts of 66th EAGE Conference and Exhibition. Paris, 2004.
3. Васин В.В., Агеев А.Л. Некорректные задачи с априорной информацией. Екатеринбург: Наука, 1993.
4. Акимова Е.Н., Гемайдинов Д.В. Параллельные алгоритмы решения задачи гравиметрии о восстановлении плотности в слое // Труды Института математики и механики. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. **13**, № 3. 3–21.
5. Akimova E.N., Vasin V.V. Parallel iterative algorithms for solving the inverse gravity problems // Proc. of the XXXIIth International Summer School on Advanced Problems in Mechanics (APM'2004). St. Petersburg, 2004. 1–8.
6. Акимова Е.Н., Гемайдинов Д.В., Клименков А.В. Параллельные алгоритмы решения обратной задачи гравиметрии // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений. Екатеринбург: ИММ УрО РАН,

2006. Вып. 9. 3–16.
7. *Акимова Е.Н., Васин В.В., Пересторонина Г.Я., Тимерханова Л.Ю., Мартышко П.С., Кокшаров Д.Е.* О регулярных методах решения обратных задач гравиметрии на многопроцессорном вычислительном комплексе // *Вычислительные методы и программирование*. 2007. **8**, № 1. 107–116.
 8. *Baranov A.V., Latsis A.O., Sazhin C.V., Khramtsov M.Yu.* The MVS-1000 System User's Guide. <http://parallel.ru/mvs/user.html>
 9. *Самарский А.А., Николаев Е.С.* Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978.
 10. *Яценко Н.Н., Коновалов А.Н., Бугров А.Н., Шустов С.В.* Об организации параллельных вычислений и “распараллеливании прогонки” // *Численные методы механики сплошной среды*. 1978. **9**, № 7. 139–146.

Поступила в редакцию
30.03.2008
