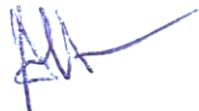


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н.Ельцина»

На правах рукописи



**Цидаев Александр Григорьевич**

**ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ  
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПЛОТНОСТНЫХ СТРУКТУР  
В ЗЕМНОЙ КОРЕ**

Специальность 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2024

Работа выполнена в лаборатории математической геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Мартышко Петр Сергеевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, член-корреспондент РАН.

Официальные оппоненты: **Глазнев Виктор Николаевич**,  
доктор физико-математических наук,  
доцент,  
ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет, профессор кафедры геофизики геологического факультета;

**Степанова Инна Эдуардовна**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН,  
ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (г. Москва),  
главный научный сотрудник лаборатории происхождения, внутреннего строения и динамики Земли и планет;

**Филимонов Михаил Юрьевич**,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
ФГБУН Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник отдела прикладных задач.

Защита состоится 18 сентября 2024 года в 13:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 1.2.05.22 по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, зал диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=6169>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-  
математических наук



Косолюбов Дмитрий Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Разработка алгоритмов для построения трехмерных моделей земной коры на основе комплексного анализа данных, полученных различными геофизическими методами (гравитационными, сейсмическими) является актуальной задачей. Несмотря на то, что неоднородное строение земной коры, характеризующееся распределением плотностных аномалий, наиболее полно отражено именно в гравитационном поле, дополнительное использование других геофизических данных позволяет снижать степень неоднозначности в задачах интерпретации и получать геологически содержательные решения.

При исследовании земных недр геофизическими методами часто возникают задачи о структурных границах, разделяющих два слоя с различным значением некоторого физического параметра. В случае гравиметрии таким параметром является плотность. Распределение параметра постоянно, т.е. плотность внутри каждого слоя считается константой.

Впервые задача о плотностном контакте исследовалась в 30-е гг. XX века Б.В. Нумеровым, в дальнейшем вклад в ее изучение в двухмерной постановке внесли С. Tsuboi, Т. Fushida, А.А. Заморев, О.А. Шванк, Е.Н. Люстих, А.К. Маловичко, Е.А. Мудрецова, А.В. Цирульский, В.Н. Страхов, Ю.В. Антонов, А.И. Кобрунов, В.Б. Гласко, В.Г. Чередниченко, В.И. Старостенко, Г.Я. Голиздра, А.Х. Остромогильский, Н.В. Федорова.

При переходе к трехмерной постановке структурной задачи гравиметрии аналитические решения затруднены, а основным подходом для трехмерной инверсии гравитационного поля является применение итерационных методов. Такие исследования были начаты А.И. Кобруновым (метод решения в линеаризованной постановке), И.Л. Пруткиным (метод локальных поправок), Т.В. Балк (монтажный метод), в дальнейшем задача и ее решение рассматривались в работах П.С. Мартышко, В.В. Васина, Е.Н. Акимовой, В.Н. Глазнева, О.М. Муравиной, И.Э. Степановой, О.И. Журавлевой, Е.Н. Мотрюк, А.В. Мужиковой, В.Е. Мисилова. Сейсмоплотностной подход комплексной интерпретации данных сейсмических и гравиметрических наблюдений в рамках единой трехмерной модели развивался Г.Я. Голиздрой, Е.Г. Булахом, В.И. Старостенко, А.И. Кобруновым, В.Н. Глазневым. В мировой практике построением границ земной коры занимались L.E. Sjöberg, M. Abrehdary, N.M. Shapiro, U. Meier, G. Laske, C. Bassin. В диссертации также исследуется взаимосвязь изостазии с гравитационным полем и тектоническими структурами, в этой области стоит отметить цикл работ под руководством М.Е. Артемьева и, для Уральского региона, работы В.С. Дружинина.

В настоящее время на рынке геофизического программного обеспечения отсутствует какой-либо признанный лидер, предлагающий решения для интерпретации гравитационных данных, поэтому разработка эффективной компьютерной технологии моделирования в этой области является актуальной и перспективной.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и программного обеспечения для методики поэтапного построения трехмерных

плотностных моделей на основе гравитационных и скоростных сейсмических данных, а также создание эффективной компьютерной технологии, использующей разработанные алгоритмы. Достижение этой цели основано на методах решения прямых и обратных задач гравиметрии в двухмерной и трехмерной постановках.

#### **Задачи исследования**

- Обобщить метод локальных поправок для решения обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей для устойчивого вычисления положения как глубокозалегающих, так и приповерхностных границ слоев в трехмерной слоистой модели.
- Разработать способ преобразования сейсмических разрезов в двухмерные плотностные разрезы земной коры и верхней мантии с неоднородным слоисто-блоковым строением.
- Разработать способ построения плотностной трехмерной модели начального приближения на основе набора двухмерных плотностных разрезов.
- Разработать алгоритм преобразования трехмерной модели градиентного распределения плотности в модель слоев с постоянной плотностью, требующую меньших вычислительных ресурсов для обработки.
- Для предложенных методов и алгоритмов создать программное обеспечение, позволяющее использовать весь разработанный комплекс методов в единой оболочке.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Обобщенный метод локальных поправок для обратной структурной задачи гравиметрии позволяет находить решение задачи как для приповерхностных, так и глубокозалегающих границ и использовать неплоскую границу начального приближения.
2. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для построения плотностных разрезов по сейсмическим данным с последующим сведением их в трехмерную модель позволяют создавать геофизически содержательные модели распределения плотности в земной коре.
3. Разработанный программный комплекс позволяет находить решения прямой и обратной задач гравиметрии как на персональных компьютерах, так и на оборудованных высокопроизводительными видеокартами вычислительных кластерах.

#### **Методология и методы исследования**

В диссертационной работе применяется математический аппарат численных методов оптимизации, аппарат теории некорректных задач и геофизического моделирования. При разработке программного обеспечения, реализующего описанные алгоритмы, использованы технологии распределенных вычислений (MPI), высокопроизводительных вычислений на графических ускорителях Nvidia CUDA и AMD ROCm, а также технологии векторизации вычислений на процессорах общего назначения (OpenMP).

#### **Научная новизна**

Разработаны вычислительные методы и алгоритмы, на базе которых создана последовательная методика построения трехмерных плотностных моделей начального приближения на основе двухмерных сейсмических данных. В отличие от принятого в практике структурно-картировочных и разведочных

работ подхода, основанного на построении разломно-блоковых моделей, предложенная в диссертации методика позволяет получать градиентные модели распределения плотности. Предложен и реализован алгоритм расчета аномалий литостатического давления, выходные данные которого могут использоваться для разделения по глубине тектонических структур в земной коре и верхней мантии. Введено понятие структурного интеграла, обобщающего существующие постановки задачи о границе раздела двух сред с различной плотностью. Предложено использовать конечно-элементный подход для решения структурных задач гравиметрии. Обобщен метод локальных поправок для обратной структурной задачи гравиметрии, в результате чего стало возможным использовать его для нахождения не только глубокозалегающих, но и приповерхностных границ, что расширяет возможности для его применения.

#### **Теоретическая и практическая значимость**

Получено обобщение метода локальных поправок для решения обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие получать устойчивые решения такой задачи. Разработана последовательная методика построения трехмерных плотностных моделей по комплексу геофизических данных (гравитационные поля и скоростные сейсмические разрезы). Предложено использовать распределение аномального литостатического давления в качестве интегральной характеристики двух и трехмерных плотностных моделей, продемонстрирована возможность определения на основе анализа этого распределения границ мантийных блоков и тектонических структур. Предложена вычислительная схема для распараллеливания решения структурной обратной задачи гравиметрии методом локальных поправок на супервычислительных кластерах. Разработано программное обеспечение, позволяющее в частично-интерактивном режиме осуществлять построение трехмерных моделей распределения плотности на основе двумерных сейсмических данных. Методы и ПО использованы для практической интерпретации геофизических данных на сетках большой размерности, построены геологически содержательные модели земной коры Урала и сопредельных регионов.

**Достоверность** результатов исследований подтверждается согласованностью результатов проведенных численных экспериментов с применением различных методов. Построенные с применением результатов исследования модели хорошо согласуются с ранее построенными моделями земной коры исследуемых регионов и уточняют ряд особенностей их строения. Разработанное в ходе исследования программное обеспечение решения прямой и обратной задачи гравиметрии, оптимизированное для использования на распределенных вычислительных системах с графическими ускорителями, опубликовано в открытом доступе в сети «Интернет». Данное программное обеспечение может быть использовано для воспроизведения результатов исследования.

**Апробация работы** проведена на следующих российских и международных конференциях (41 доклад):

1. Научные чтения памяти Ю.П. Булашевича (Екатеринбург: 2007, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.);

2. Международная научно-практическая конференция "Геофизика" (школа молодых специалистов) (Санкт-Петербург: 2007, 2015 гг.);
3. Международная конференция, посвященная 50-летию Института геофизики УрО РАН (Екатеринбург: 2008 г.);
4. Международный семинар им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей (Казань: 2009 г.; Москва: 2010, 2013, 2017, 2020 гг.; Пермь: 2011, 2019 гг.; Екатеринбург: 2014, 2023 гг.);
5. Уральская молодежная научная школа по геофизике (Екатеринбург: 2010, 2016 гг.; Пермь: 2011 г.);
6. International Conference – Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects (Киев, Украина: 2012, 2015, 2019, 2021 гг.);
7. Ural Workshop on Parallel, Distributed, and Cloud Computing for Young Scientists (Ural-PDC) (Екатеринбург: 2015, 2016, 2017 гг.);
8. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (Альбена, Болгария: 2015, 2017, 2018 гг.);
9. International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics (Родос, Греция: 2016, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 гг.);
10. International Workshop on Radio Electronics & Information Technologies (REIT) (Екатеринбург: 2017 г.);
11. Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов (Бишкек, Киргизия: 2017 г.);
12. All-Russian Conference “Actual Problems of Applied Mathematics and Mechanics” with International Participation, Dedicated to the Memory of Academician A.F. Sidorov (Абрау-Дюрсо: 2020 г.)

Компьютерная методика построения трехмерных плотностных моделей по сейсмическим разрезам и решение обратной задачи гравиметрии в классе структурных границ использовалась при работе над следующими проектами:

- проект РАН «Создание объемной геолого-геофизической модели верхней части литосферы Уральского региона» (№ ОНЗ 09-Т-5-1018, 2009-2011 гг.),
- проект РФФИ «Новый метод определения плотностных неоднородностей верхней мантии с учетом гипотезы изостатической компенсации» (№14-05-31083 мол\_а, 2014-2015 гг.),
- проект РНФ «Построение трехмерных моделей глубинного строения приарктической части Уральского региона на основе новых методов комплексной интерпретации геофизических полей и современных компьютерных технологий сеточного моделирования» (№14-27-00059, 2014-2016 гг.),
- проект РНФ «Методы построения трехмерных моделей земной коры на основе комплексной интерпретации геофизических полей с использованием параллельных алгоритмов (на примере Уральского региона)» (№ 20-17-00058, 2019-2022 гг.).

### **Публикации**

По теме диссертации в рецензируемых изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ опубликовано **23** работы (из них 11

индексируемых Web of Science, 9 индексируемых Scopus, 3 в изданиях, входящих только в список ВАК). Также опубликовано 6 прочих работ (индексируемых РИНЦ), 1 коллективная монография.

### **Личный вклад автора**

Все описанные результаты получены либо при непосредственном участии автора (получение аналитических выражений, построение ряда моделей начального приближения, интерпретация результатов моделирования), либо лично автором (разработка алгоритмов, программная реализация, построение модельных примеров, применение разработанных инструментов для практической интерпретации данных).

### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 172 страницы, 76 рисунков, 6 таблиц. Список литературы включает 158 наименований.

### **Благодарности**

Автор диссертационной работы выражает благодарность своему научному руководителю – доктору физико-математических наук, профессору, члену-корреспонденту РАН Мартышко Петру Сергеевичу за привлечение интереса к выбранной теме (как и к науке вообще) и всестороннюю поддержку в ходе проводимого исследования. Автор благодарит своих коллег по лаб. математической геофизики ИГФ УрО РАН: кандидата физико-математических наук Ладовского Игоря Викторовича за постановки ряда задач, общее наставничество и неоценимую поддержку; а также своих молодых коллег, кандидатов физико-математических наук Бызова Дениса Дмитриевича и Черноскутова Александра Игоревича за многочисленные полезные обсуждения рассматриваемых в диссертации вопросов.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В главе 1 приводится постановка задачи о структурной границе, разделяющей слои с постоянной плотностью, описывается оригинальный (И.Л. Пруткин, 1986 г.) метод локальных поправок для ее решения и выполняется его обобщение.

Суть задачи о структурной границе (контактной поверхности раздела двух сред) заключается в следующем. Пусть имеются два слоя (рисунок 1), верхний ограничен сверху плоскостью  $z = H_1$ , снизу – поверхностью  $z(x, y)$ . Нижний ограничен поверхностью  $z(x, y)$  сверху и плоскостью  $z = H_2$  снизу. Верхний слой имеет плотность  $\sigma_1$ , нижний –  $\sigma_2$ . Поверхность  $z(x, y)$  имеет горизонтальную асимптотическую плоскость  $z = H$ .

В этом случае гравитационное поле, порождаемое границей  $z(x, y)$ , задается формулой

$$\Delta g(x', y', 0) = \Delta \sigma \gamma \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2(x, y)}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + H^2}} \right) dx dy, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$  – скачок плотности на границе,  $\gamma$  – гравитационная постоянная,  $(x', y', 0)$  – точка вычисления поля, расположенная на поверхности Земли.

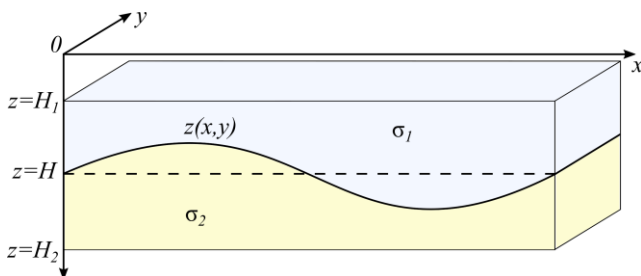


Рисунок 1. Задача о контактной поверхности в трехмерной постановке.

Структурная обратная задача гравиметрии заключается в нахождении (восстановлении) геометрии границы  $z(x, y)$  при известных  $\Delta g$ ,  $H$  и  $\Delta\sigma$ .

И.Л. Пруткиным (1986) предложено для решения структурной обратной задачи использовать метод локальных поправок. В основе метода локальных поправок лежит тот факт, что на значение поля в данной точке земной поверхности наибольшее влияние оказывает значение глубины залегания ближайшей точки контактной поверхности.

Основная формула метода:

$$z_{ij}^{n+1} = \frac{z_{ij}^n}{1 + \alpha \text{Sign}(\Delta\sigma) \cdot z_{ij}^n (U_{ij} - U_{ij}^n)}, \quad (2)$$

здесь  $z_{ij}^n = z(x_i, y_i)$  – поверхность раздела (заданная на равномерной сетке  $(x, y) = \{x_i, y_j\}$ ), полученная на  $n$ -ой итерации метода;  $U_{i,j} = \Delta g(x_i, y_j, 0)$  – наблюдаемое поле (заданное на той же равномерной сетке),  $U_{ij}^n$  – поле границы  $z_{ij}^n$ ;  $\alpha$  – регуляризирующий множитель. Величину  $\alpha$  необходимо задавать достаточно малой, чтобы инициировать процесс подбора в нужном направлении. В качестве границы начального приближения  $z_{ij}^0$  выбирается плоская граница  $z(x, y) = H$ .

В.Н. Страховым (1978) было показано, что гравитационный эффект слоя с неплоскими границами равен (с точностью до константы) гравитационному эффекту поверхностей, ограничивающих слой сверху и снизу. Пользуясь этой идеей, введем понятие структурного интеграла  $S(z_2, z_1)$ , обобщающего постановку задачи для границы раздела двух сред постоянной плотности. Обозначим через  $S(z_2, z_1)$  аномальное поле от имеющего неплоские границы пласта с плотностью  $\sigma$ , отсчитываемой от некоторой средней плотности  $\sigma_F$  модели:



$$\begin{aligned}
S(z_2, z_1) &= -\gamma \cdot (\sigma - \sigma_F) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dxdy}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} \Big|_{z_1(x',y')}^{z_2(x',y')} \\
&= -\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z_2^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z_1^2}} \right) dxdy. \quad (3)
\end{aligned}$$

Поле от пласта, ограниченного сверху земной поверхностью  $z_2 = 0$ , а снизу поверхностью  $z_1 = z(x', y')$  (рисунок 2а) будет вычисляться по формуле:

$$S(z, 0) = -\gamma \Delta \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \right) dxdy. \quad (4)$$

Как первообразная функция по  $z$ , структурный интеграл (3) обладает очевидными свойствами по пределам интегрирования  $z_1$  и  $z_2$ :

$$\begin{aligned}
S(z_2, z_1) &= -S(z_1, z_2), \\
S(z_2, z_1) &= S(z_2, 0) - S(z_1, 0). \quad (5)
\end{aligned}$$

Отсюда вытекают два важных следствия:

*Следствие 1.* Пусть  $z_1 = z(x, y)$  – граница раздела;  $z_2 = h$  – асимптотическая плоскость этой границы (рисунок 2б). Тогда

$$\begin{aligned}
S(h, z) &= \\
&= -\gamma \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2(x, y)}} \right) dxdy. \quad (6)
\end{aligned}$$

представляет собой гравитационное поле избыточных масс единичной плотности, заключенных между поверхностью раздела сред и её асимптотической плоскостью. Причем, над плоскостью массы положительны, а под плоскостью – отрицательны (рисунок 2б). Такое представление  $S(h, z)$  аномального поля называется гравитационным эффектом плотностной границы.

*Следствие 2.* Пусть  $z_2 = z_0(x, y)$  – положение плотностной границы, принятое как начальное;  $z_1 = z_0 + \Delta z$  – уточненное положение границы (рисунок 2в).

$$\begin{aligned}
S(z_0, z_0 + \Delta z) &= \\
&= -\gamma \Delta \sigma \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z_0 + \Delta z)^2}} \right) dxdy. \quad (7)
\end{aligned}$$

Интеграл (7) представляет собой поле масс единичной плотности, заключенных между начальной (нулевой) и уточненной поверхностью. Знак избыточной плотности определяется знаком приращения  $\Delta z$ : над границей нулевого приближения плотность положительна, а под ней отрицательна. Такое представление аномального поля по аналогии с (6) будем называть

гравитационным эффектом плотностной границы  $z = z_0 + \Delta z(x', y')$  относительно асимптоты  $z_0 = z_0(x', y')$ .

Использование представления (7) при решении прямой задачи гравиметрии для структурной границы позволяет ввести в алгоритм метода локальных поправок априорную информацию о геометрии восстанавливаемого плотностного контакта, благодаря чему процесс подбора запускается сразу в требуемом направлении.

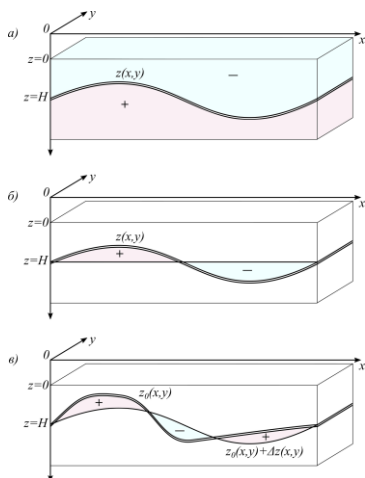


Рисунок 2. Модели пласта, соответствующие различным представлениям структурного интеграла  $S(z_2, z_1)$

В реальных задачах положение внутренних структурных границ литосферы меняется в широких пределах: от сотен метров для осадочного чехла до нескольких десятков километров для подошвы земной коры. И в обратной задаче гравиметрии (6) искомая граница  $z(x, y)$  уточненной модели может быть как приповерхностной, так и глубокозалегающей. Однако, если какая-либо из границ выходит на земную поверхность  $z = 0$ , то алгоритм локальных поправок в форме (2) утрачивает свое математическое и физическое содержание, поскольку структурный интеграл  $S(z_2, z_1)$  в (3) имеет слабую особенность в точке  $(x = x', y = y', z_1 \cup z_2 = 0)$ .

Для построения обобщенного вычислительного алгоритма, пригодного для глубокозалегающих, приповерхностных и выходящих на поверхность границ, предложена иная аппроксимирующая конструкция уравнения (3) с привлечением схемы конечных элементов. Зададим разбиение переменных интегрирования  $(x, y)$  на прямоугольной сетке  $x_i = \xi_i, y_i = \eta_i$ , и на ячейках сетки  $(i, j)$ , как основаниях, построим элементарные параллелепипеды с единичной плотностью и высотой  $\Delta z = (z_2 - z_1)$ . Поле пласта, ограниченное поверхностями  $z_1$  и  $z_2$ , равно сумме полей от всех элементов разбиения:

$$S(z_2, z_1) = \Delta\sigma\gamma \sum_{ij} S_{ij}(z_2, z_1). \quad (8)$$

Для параллелепипеда первообразная  $S_{ij}$  вычисляется в явном виде и, с точностью до гравитационной постоянной  $\gamma$ , равна (см., к примеру, Е.А. Мудрецова, К.Е. Веселов, 1990)

$$S_{ij}(z_2, z_1) = -(\eta - y') \cdot \ln(|\xi - x'| + R) - (\xi - x') \cdot \ln(|\eta - y'| + R) + \zeta \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{(\xi - x') \cdot (\eta - y')}{\zeta \cdot R} \right) \Bigg|_{\xi_i}^{\xi_{i+1}} \Bigg|_{\eta_i}^{\eta_{i+1}} \Bigg|_{z_1}^{z_2}, \quad (9)$$

где  $R = \sqrt{(\xi - x')^2 + (\eta - y')^2 + \zeta^2}$ . Дискретизация (9) с учетом разбиения (8) дает

$$\Delta\sigma\gamma \sum_{ij} S_{ij}(z_{ij}^0, z_{ij}^T) = U_{ij}. \quad (10)$$

Здесь  $z_{ij}^0$  – начальное положение границы раздела,  $z_{ij}^T$  – её уточненное положение. Идея метода локальных поправок приводит к необходимости вычисления поля в эпицентре кубатурных элементов  $\{i, j, \Delta z_{ij}\}$ . Полагая в (9)

$$x' = \frac{\xi_i + \xi_{i+1}}{2}, \quad y' = \frac{\eta_j + \eta_{j+1}}{2} \quad (11)$$

и учитывая, что само выражение (9) – это вертикальная производная гравитационного потенциала, которая для параллелепипеда явно выражается через вторые производные  $V_z = -[(\eta - y') \cdot V_{zx} + (\xi - x') \cdot V_{zy} + \zeta \cdot V_{zz}]$  (и, очевидно, над осью симметрии тела  $V_{zx} = V_{zy} = 0$ ), получаем формулу для ядра итерационной схемы локальных поправок:

$$S_{ij}(z_{ij}^0, z_{ij}^T) = K_{ij}(\Delta z_{ij}) = 4\zeta \cdot \operatorname{arctg} \frac{dx \, dy}{4\zeta R} \Bigg|_{z_{ij}^0}^{z_{ij}^T}; \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{dx^2 + dy^2 + 4\zeta^2}.$$

Модифицированный итерационный алгоритм метода локальных поправок строится следующим образом. Пусть  $\{z_{ij}^n\}$  – значения искомой функции, уточняющей положение границы нулевого приближения  $z_{ij}^0$  на  $n$ -ом шаге. Сеточное поле  $n$ -ого приближения  $U_{ij}^n$  считается по точной формуле (8):

$$U_{ij}^n = \gamma\Delta\sigma \sum_{i,j} S_{ij}(\Delta z_{ij}^n). \quad (13)$$

Следующее,  $n + 1$  значение приращения аппликат сеточной функции  $z_{ij}^{n+1}$  определяется лишь по эпицентральному приращением сеточного поля ( $i_0 = i, j_0 = j$ ):

$$\Delta\sigma[K_{ij}(\Delta z_{ij}^{n+1}) - K_{ij}(\Delta z_{ij}^n)] = U_{ij} - U_{ij}^n. \quad (14)$$

Учитывая явный вид ядра (12), получаем **обобщенную формулу для итерационного процесса метода локальных поправок**

$$4\gamma\Delta\sigma\left[z_{ij}^{n+1} \operatorname{arctg} \frac{c}{4(zR)_{ij}^{n+1}} - z_{ij}^n \operatorname{arctg} \frac{c}{4(zR)_{ij}^n}\right] = U_{ij} - U_{ij}^n. \quad (15)$$

Площадь элементарной ячейки сеточного разбиения  $c = dx \cdot dy$  – это полный аналог коэффициента кубатурной формулы (E116). Устойчивость вычислительной схемы (15) зависит от величины этого коэффициента: чем глубже искомая граница  $z_{ij}$ , тем реже требуется сетка задания поля  $U_{ij}$  и тем больше величина коэффициента  $c$ .

Теперь полагая в (15)  $c/2z \ll 1$ , получаем первоначальный вариант метода локальных поправок для глубокозалегающих границ:

$$\gamma c \Delta\sigma \left[ \frac{1}{z_{ij}^{n+1}} - \frac{1}{z_{ij}^n} \right] = U_{ij} - U_{ij}^n. \quad (16)$$

Для приповерхностных границ (для которых  $c/2z \gg 1$ ) имеем альтернативную формулу в варианте одномерной модели горизонтально-слоистых сред:

$$2\pi\gamma\Delta\sigma[z_{ij}^{n+1} - z_{ij}^n] = U_{ij} - U_{ij}^n. \quad (17)$$

Для вычислений по формуле (17) регуляризация не требуется. С уменьшением глубины  $z_{ij}$  сходимость итерационного алгоритма резко возрастает, а при  $z_{ij}^{n+1} = 0$  итерационный цикл сводится к тривиальному тождеству ( $0=0$ ). Для больших глубин итерационная схема (16) нуждается в регуляризации (2). Ясен и смысл такого параметра регуляризации, зависящего от шага сетки поля:

$$\alpha \leq \alpha_0 = 1/\gamma c. \quad (18)$$

Отсюда можно получить и оценку кубатурного коэффициента сеточного разбиения:

$$c \geq \frac{1}{\alpha_0 \gamma}. \quad (19)$$

Обобщенный описанным образом метод локальных поправок одинаково хорошо работает как в случае больших, так и малых глубин  $z$ . Устойчивость итерационной схемы (15) и (16) контролируется величиной параметра регуляризации  $\alpha$ . Его выбор задает адаптивную сетку поля (19), построенную на элементах разбиения  $c = dx \cdot dy$ . Это дает возможность разделить

гравитационные эффекты по глубине и построить целевую функцию уточняющего подбора для разноглубинных плотностных контактов.

Резюмируя сказанное, отметим, что обобщенный метод локальных поправок имеет следующие отличия от метода в первоначальной формулировке:

1. используется граница нулевого приближения (построенная по априорным данным) вместо плоской асимптоты, что позволяет инициировать процесс подбора в требуемом направлении, благодаря чему повышается скорость сходимости;
2. используется схема конечных элементов для этапа расчета прямой задачи, что позволяет использовать метод для выходящих на поверхность границ;
3. для приповерхностных границ используется особая формула, не требующая регуляризации.

Проиллюстрируем эти отличия модельными примерами.



Рисунок 3. Граница, выходящая на поверхность.

На рисунке 3 снизу приведен вертикальный срез трехмерной поверхности раздела двух однородных сред, выходящей на поверхность Земли. Параметры модели: разрешение  $50 \times 50$  точек, шаг по сетке 1 км по обоим направлениям, расчетное гравитационное поле приведено на рисунке 3 сверху. Скачок плотности  $\Delta\sigma = 0,1 \text{ г/см}^3$ . Из-за того, что граница выходит на поверхность, метод локальных поправок в классическом варианте не применим. Восстановление обобщенным методом проводилось с плоской границы начального приближения с глубиной, равной средней глубине залегания модельной границы. Процесс решения сошелся после первого шага с невязкой (среднеквадратическое отклонение восстановленной границы от модельной)  $6 \cdot 10^{-6}$ .

Следующий модельный пример демонстрирует влияние выбора начального приближения границы на скорость и точность сходимости метода. Рассмотрим «квази-реальную» модель границы (рисунок 4а).

По рассчитанному полю проведем последовательно несколько экспериментов по восстановлению положения границы. Параметры восстановления не меняются между экспериментами: глубина «асимптоты»  $H = -18,13 \text{ км}$ ,  $\alpha = 0,2\alpha_0$ ,  $\Delta\sigma = 0,1 \text{ г/см}^3$ , число итераций – 50.

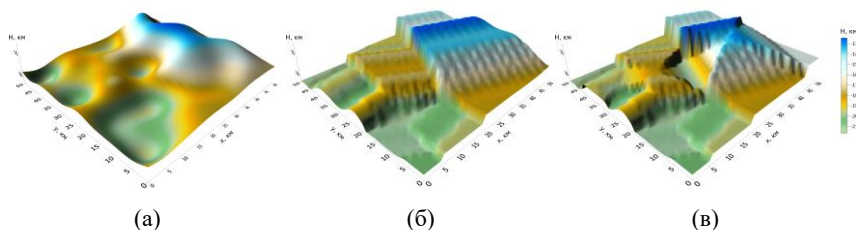


Рисунок 4. Граница, имеющая морфологию, подобную реальным границам земной коры, и её начальные приближения.

Первый эксперимент – восстановление с плоской «асимптоты». На рисунке 5а приводится трехмерное изображение полученной границы. Среднеквадратическое отклонение восстановленной границы от исходной составило 1,13. На трехмерной модели восстановленной границы визуально заметно, что восстановились только крупномасштабные аномалии.

Для второго эксперимента построим поверхность начального приближения, тем самым промоделировав использование в процессе восстановления априорных данных о геометрии поверхности. Пусть имеются три профиля (рисунок 6а, синим), вдоль которых собрана информация о глубине залегания границы (в этом качестве используются точные значения глубины реальной границы). Проинтерполируем эти значения на всю исследуемую площадь методом ближайшего соседа (результат интерполяции представлен на рисунке 4б) и используем интерполированную границу в качестве начального приближения в методе локальных поправок. На рисунке 5б представлен результат, полученный после 50 итераций. Рисунок 6б демонстрирует срез (плоскость  $y=25$ ) реального положения границы (черным) и восстановленной границы (синим). Среднеквадратическое отклонение восстановленной границы от исходной снизилось до 0,61 (уменьшилось на 46% по сравнению с первым экспериментом).

Для следующего эксперимента добавим в модель четвертый профиль, расположенный так, чтобы захватывать недостаточно точно восстановившееся погружение в центре планшета (рисунок 6а, красным), и повторим процедуру интерполяции (рисунок 4в).

Используем новое положение начальной границы в процедуре восстановления методом локальных поправок. Спустя 50 итераций среднеквадратическое отклонение восстановленной границы от исходной составило 0,48 (рисунок 4в). Таким образом, по сравнению с предыдущим экспериментом невязка уменьшилась на 21%. На рисунке 6в представлен срез реального положения границы (черным) и восстановленной границы (синим).

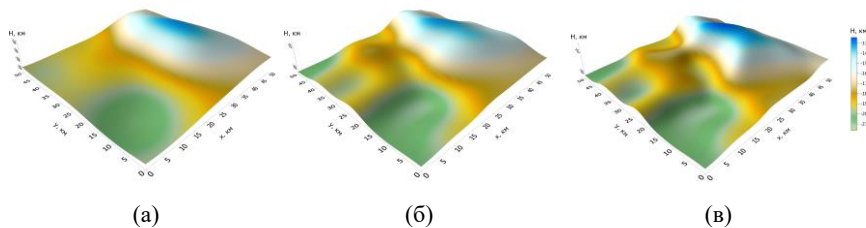


Рисунок 5. Результаты восстановления границы с различных начальных приближений.

Всего в диссертации приведено 7 модельных примеров. Завершает главу 1 описание алгоритма построения упрощенной слоистой модели на основе имеющегося распределения плотности в объеме. В его основе лежит последовательное сканирование распределения плотности по глубине для всех элементов горизонтальной сетки разбиения с последующим построением изоповерхности выбранного значения плотности. Далее производится усреднение плотности в слоях, ограниченных построенными изоповерхностями, и определения скачка плотности на каждой границе.

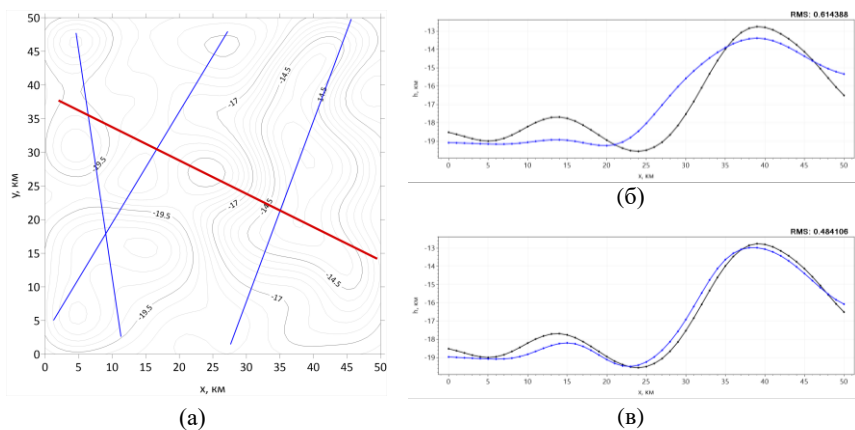


Рисунок 6. Положение профилей на карте рельефа поверхности и результат восстановления.

В главе 2 описывается методика комплексной интерпретации гравиметрических данных, скоростных сейсмометрических данных и распределения литостатического давления. Исходными данными моделирования являются двумерные скоростные массивы в координатах «Расстояние вдоль профиля»–«Глубина». Для дальнейшей работы необходимо установить корреляцию между скоростями и соответствующим им плотностями пород. Для каждого региона такая зависимость своя, но обычно имеет кусочно-линейный характер вида

$$\begin{aligned}
\sigma_1 &= A_1 \cdot V + B_1, \quad \text{при } V \in [V_1, V_2) \\
\sigma_2 &= A_2 \cdot V + B_2, \quad \text{при } V \in [V_2, V_3) \\
&\dots \\
\sigma_n &= A_n \cdot V + B_n, \quad \text{при } V \in [V_{n-1}, V_n],
\end{aligned}
\tag{20}$$

где  $A_k$  и  $B_k$  - коэффициенты преобразования для данного региона,  $V_1 < V_2 < \dots < V_n$  - значения скоростей, при переходе через которые зависимость меняет свой характер.

Поскольку реальная зависимость может меняться от профиля к профилю даже в пределах одного региона, возможен этап её уточнения по наблюдаемому гравитационному полю в процессе решения линейной обратной задачи. После преобразования все имеющиеся профили сводятся в единую трехмерную модель. Далее выполняется интерполяция распределения плотности в межпрофильном пространстве для построения нулевого приближения трехмерной модели. Для упрощения алгоритмов и увеличения скорости выполнения автором предложено выполнять послойную интерполяцию, т.е. такую, при которой осуществляется проход по всем глубинам  $z$  и интерполяция слоя  $z = const$ . Подобный подход позволяет сохранить в трехмерной модели значения плотности вдоль исходных профилей, а также ограничивает возможность алгоритма создать в межпрофильном пространстве аномалии, противоречащие базовым геологическим представлениям.

Уменьшить невязку полей вдоль профиля возможно еще на этапе построения плотностного разреза по скоростному. В диссертации рассматривается подход, при котором в мантии выделяются блоки с вертикальными границами, заполненные веществом с однородной плотностью. Предлагается выделять такие границы на основе анализа распределения аномального литостатического давления. Литостатическое давление в точке разреза рассчитывается по массе пород, расположенных непосредственно над точкой счёта:

$$P(x, h) = g_a \int_h^0 \sigma(x, z) dz. \tag{21}$$

Аномальное литостатическое давление – это отклонение литостатического давления  $P(x, h)$  от его среднего (гидростатического) значения  $\bar{P}(h)$  на том же уровне:

$$\Delta P(x, h) = P(x, h) - \bar{P}(h) = g_a \int_h^0 \Delta \sigma(x, z) dz, \tag{22}$$

$$\bar{P}(h) = \frac{1}{L} \int_0^L P(x, h) dx = \frac{g_a}{L} \int_h^0 \int_0^L \sigma(x, z) dx dz = g_a \int_h^0 \bar{\sigma}(z) dz, \tag{23}$$

В формулах (21)–(23) приняты следующие обозначения:  $g_a = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – среднее значение ускорения свободного падения;  $\sigma(x, z)$  – значение плотности в соответствующей точке профиля;  $L$  – длина профиля,  $\bar{\sigma}(z)$  – среднее значение



плотности модели на соответствующей глубине;  $\Delta\sigma(x, y)$  – отклонение плотности от ее среднего значения на глубине.

Строится график функции распределения аномального литостатического давления на нижнем горизонте разреза  $h_i$ . Каждый протяженный участок, на котором сохраняется знак этой функции, предлагается отождествлять с одним мантийным блоком. Таким образом, вертикальные границы блоков оказываются в точках, где значение аномального литостатического давления равно нулю. Сверху блоки ограничены границей М (Мохоровичича). Далее выполняется подбор плотности в выделенных блоках. В зависимости от задачи, можно как выбирать такие значения плотности, чтобы получить изостатически скомпенсированную модель (т.е.  $\Delta P(x, h_i) = 0$ ), так и добиваться минимальной невязки между наблюдаемым и модельным полем вдоль профиля.

Подбор выполняется в рамках решения линейной обратной задачи гравиметрии в двухмерном случае. Автором предложено совместить этап уточнения корреляционной зависимости «скорость-плотность» с этапом подбора плотностей в выделенных мантийных блоках.

Оптимизируемый функционал имеет следующий вид:

$$\|F(x, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N, \sigma_{B_1}, \sigma_{B_2}, \dots, \sigma_{B_K}) - g(x)\| \rightarrow \min \quad (24)$$

Здесь  $F(x, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N, \sigma_{B_1}, \sigma_{B_2}, \dots, \sigma_{B_K})$  - рассчитанное поле модели в точке  $x$ . Вместо коэффициентов линейной регрессии  $A_n$  и  $B_n$  (20) подбираются граничные значения плотности  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ , соответствующие фиксированным значениям скорости  $V_1, \dots, V_N$ . Они связаны с коэффициентами  $A_n$  и  $B_n$  посредством следующей системы уравнений:

$$\sigma(V) = \begin{cases} A_1V + B_1; & V_1 \leq V < V_2 \\ A_2V + B_2; & V_2 \leq V < V_3. \\ \dots & \dots \\ A_{N-1}V + B_{N-1}; & V_{N-1} \leq V < V_N \end{cases} \quad (25)$$

Такой подход позволяет уменьшить количество переменных, однако накладывает на зависимость требование непрерывности. Проиллюстрируем методику на примере скоростного профиля «Ханты-Мансийский» длиной 490 км (рисунок 7, преобразование исходной сейсмической информации в распределение скоростей выполнено В.В. Колмогоровой).

Используя известную зависимость для коры (Дружинин и др. 1982) и мантии (Семенов, 1993) региона построим плотностной разрез (рисунок 8б). На рисунке 8а приведено наблюдаемое гравитационное поле вдоль разреза (фиолетовым, источник – модель WGM2012), сопоставленное с модельным рассчитанным полем (красным). Невязка (среднеквадратическое отклонение) составляет 36,74.

Рассчитаем для разреза аномальное литостатическое давление (рисунок 9а) и построим график функции его распределения на уровне 80 км (рисунок 9б). По нулям функции наметим контуры будущих мантийных блоков (рисунок 9а, пунктир). Верхней границей блоков является граница М (показана на том же рисунке бордовым). На рисунке 10б представлен уточненный в процессе

минимизации (24) плотностной разрез вдоль профиля. Невязка полей (рисунок 10а) уменьшилась до 17,85.

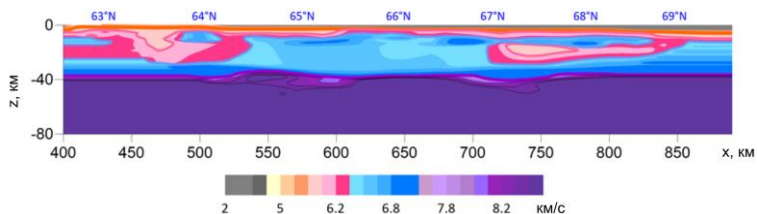


Рисунок 7. Скоростной разрез по Ханты-Мансийскому профилю.

Далее в той же главе приводится методика анализа распределения аномального литостатического давления в трехмерном случае. Формулы расчета аналогичны (21)–(23). Для трехмерных моделей из направлений такого анализа рассматривается не только подход с определением границ мантийных блоков – по аналогии с двухмерным случаем это осуществляется по нулям (изолиниям нуля) функции распределения аномального литостатического давления на нижнем уровне модели, – но и предложен способ разделения тектонических структур по глубине.

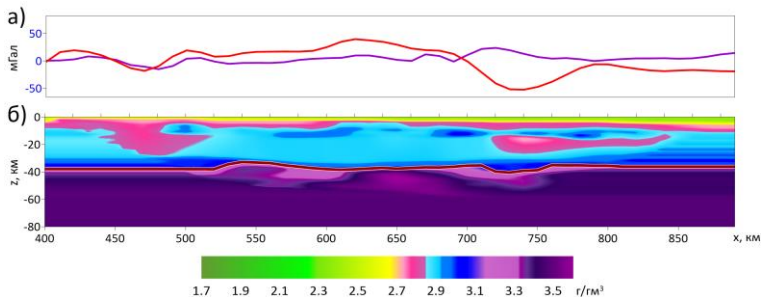


Рисунок 8. Исходный плотностной разрез по Ханты-Мансийскому профилю.

Аномалии гравитационного поля содержат суммарную информацию о плотностных неоднородностях сразу по всей толще нижележащих слоев литосферы, поэтому попытка установить соответствие между схемами структурного районирования по потенциальным полям и распределением плотности на некотором глубинном горизонте чаще всего оканчиваются неудачей. Тектонические схемы не просматриваются и в послынной модели распределения плотности.

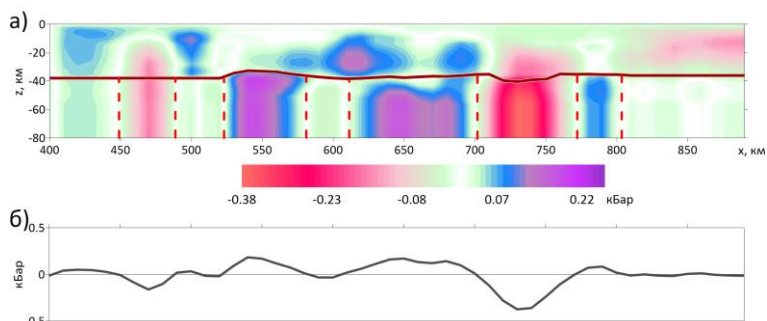


Рисунок 9. Распределение литостатического давления.

При непосредственном участии автора было предложено сопоставлять с тектонической схемой разноглубинные карты распределения литостатических нагрузок на горизонтальных срезах. На рисунке 11 представлено такое сопоставление для двух глубин (а – 5 км, б – 40 км) для территории Тимано-Печорской плиты. Видно, что на разных глубинных срезах распределения литостатических аномалий прослеживаются границы разных тектонических структур (обозначены пунктиром).

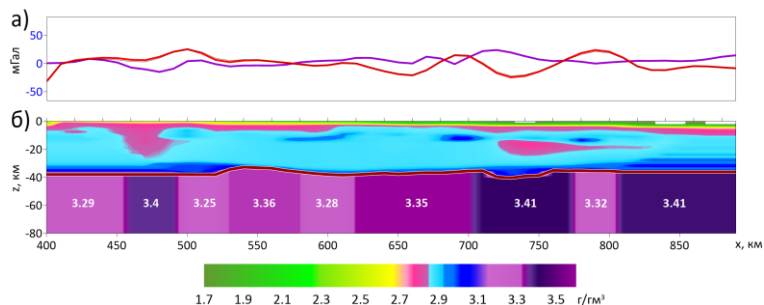


Рисунок 10. Уточненный плотностной разрез по Ханты-Мансийскому профилю.

В главе 3 приводятся результаты двумерного и трехмерного моделирования для реальных регионов. Описываются исследования Тимано-Печорского региона, территории Среднего Урала, территории Северного и Приполярного Урала, северо-западной части Урала и Западной Сибири с использованием описанных в предыдущих главах методов. Для первых трех регионов на основе двумерных скоростных разрезов построена трехмерная модель распределения плотности в земной коре. Для северо-западной части Урала и Западной Сибири, а также для территории Тимано-Печорской плиты и территории Северного и Приполярного Урала уточнено положение структурных границ земной коры.

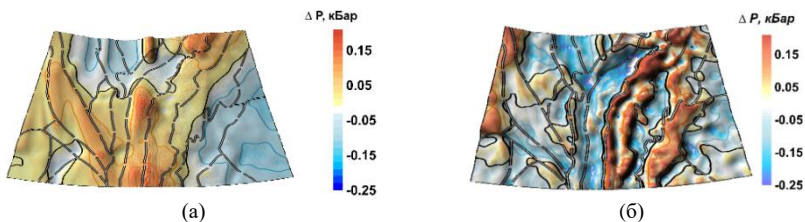


Рисунок 11. Карты распределения литостатических аномалий с нанесенными границами тектонических структур.

В главе 4 описывается программный комплекс, включающий в себя все разработанные алгоритмы, позволяющий применять их в рамках единой оболочки, позволяющей частично-интерактивную работу. Часть алгоритмов реализована на языке C# под платформу .NET, часть – на языке Python, требующие особого быстродействия части реализованы на C++ с использованием распараллеливания на графических сопроцессорах (технологии Nvidia CUDA и AMD ROCm). Основным принципом построения комплекса широкое использование стандартизированных форматов данных. Выбраны форматы программы Surfer производства Golden Software из-за их распространенности и удобства дальнейшей визуализации результатов средствами самого Surfer.

Структурно комплекс состоит из следующих частей:

- библиотека NGeoLib (.NET, содержит поддержку основных типов данных – грид (.grd), ломаная линия, полигон (.bln), форматов раскраски (.clr, .lvl));
- набор программ GeoTools (.NET, основан на NGeoLib), включающий в себя программу для построения плотностного разреза по скоростному (“V-sigma-corr”), программу для решения прямой двухмерной задачи гравиметрии (“V-sigma-calc”), программу для расчета аномального литостатического давления (“Litos”), программу для интерполяции плотности в пространстве между профилями (“Interpolate2d3d”), программу для решения прямой и обратной структурной трехмерной задачи гравиметрии (“UltimateGeoTool”), программу для трехмерной визуализации выбранного участка интерполированных данных, программу для выделения трехмерных изоплотностных границ по интерполированному массиву;
- программа "cugracid", позволяющая решать прямую и обратную задачу гравиметрии в классе структурных границ на суперкомпьютерах (C++, CUDA/ROCm, MPI, опубликована на <https://github.com/atsidaev/cugracid>);
- программа "Linkate", позволяющая конструировать вычислительный граф на основе функций библиотеки NGeoLib, программ GeoTools и запускаемой удаленно через SSH (Secure Shell) программы cugracid;
- программа "minreges" (Python) для уточнения зависимости скорость-плотность с одновременным расчетом плотностей мантийных блоков.

Программы, выполняющие вычисления, имеют собственный пользовательский интерфейс (программы из набора "GeoTools" – графический), однако посредством программы "Linkate" вычислительные блоки разработанного

программного обеспечения также связаны в рамках единой оболочки в единый комплекс. Принцип работы с "Linkate" заключается в конструировании вычислительного графа, определяющего этапы исполнения алгоритма и их последовательность (рисунок 12). Блоки в редакторе "Linkate" имеют слева набор коннекторов для связи с входными данными, справа – набор коннекторов, из которых можно получить результат. «Входные» коннекторы одних блоков соединяются с «выходными» коннекторами других. После запуска процесса вычисления начинается цикл, в котором определяются блоки, либо не имеющие входных данных, либо для которых все входные данные уже доступны (рассчитаны ранее задействованными блоками). Далее запускаются связанные с этими блоками процессы вычисления, после окончания которых происходит возврат на начало цикла. Процесс оканчивается, когда не остается блоков, для которых можно начать вычисления.

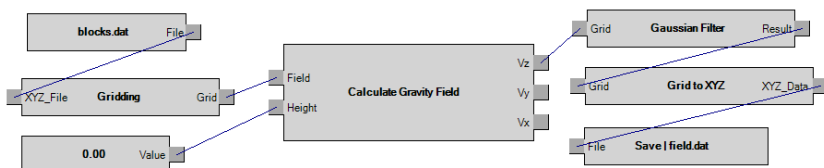


Рисунок 12. Вычислительный граф в программе Linkate.

Помимо использования выполняемых на пользовательском компьютере вычислительных блоков, предусмотрена возможность запускать программы удаленно через Secure Shell (SSH). Это позволяет достаточно легко интегрировать разработанные для суперкомпьютеров программы в оболочку "Linkate". Для этого с использованием предоставляемых программой интерфейсов требуется реализовать модуль на языке С#, копирующий файлы входных данных для программы на удаленный вычислитель и запускающий в потоке командной строки SSH требуемую программу (либо помещающий ее в очередь заданий). После окончания вычислений требуется скопировать файлы результата на компьютер пользователя. Такой модуль был реализован для программы решения прямой задачи гравиметрии для структурной границы ("cugracid"). Использование распараллеливания на суперкомпьютере позволило добиться уменьшения времени счета для сетки 256x256 элементов с 3968,16 секунд (для одного ядра Intel Xeon E5520) до 5,27 секунд (8 видеокарт Nvidia Tesla M2050). Схема распараллеливания и более подробные тесты производительности приводятся в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- Проведено обобщение метода локальных поправок для решения структурной обратной задачи гравиметрии. Обобщенный метод имеет в ряде случаев большую устойчивость по сравнению с оригинальной версией алгоритма. В частности, обосновано использование новой формулы метода для приповерхностных границ, позволяющее получить решение без

использования регуляризации. Также показано, что выбор в качестве нулевого приближения поверхности с ненулевой кривизной вместо плоской асимптоты позволяет инициировать процесс подбора в требуемом (обусловленном априорной информацией) направлении. Метод был протестирован на модельных примерах, использовался и для интерпретации реальных данных.

- Разработаны вычислительные методы и алгоритмы, на основе которых создана последовательная методика построения трехмерных плотностных моделей. В качестве исходных данных выступают двухмерные сейсмические разрезы вдоль профилей, которые преобразуются в соответствующие плотностные разрезы. Для заполнения межпрофильного пространства к полученному набору географически привязанных плотностных разрезов применяется процедура интерполяции, результатом которой является трехмерная плотностная модель. В отличие от принятого в практике структурно-картировочных и разведочных работ подхода, основанного на построении разломно-блоковых моделей, предложенная в диссертации методика позволяет получать градиентные модели распределения плотности.
- Разработан метод выделения блоков в верхней мантии на основании анализа распределения литостатического давления, для этих блоков производится подбор значений плотности. При необходимости (для лучшего соответствия наблюдаемому полю) этот подбор можно совместить с уточнением зависимости «скорость-плотность» для коры региона. Также предложена методика использования аномалий литостатического давления для глубинного картирования тектонических структур.
- Разработаны компьютерные программы для решения различных задач в области гравиметрии и вспомогательные утилиты. Всё созданное программное обеспечение сведено в единый программный комплекс, использующий общие форматы файлов и подходы к построению интерфейса. Частью комплекса является ПО Linkate, позволяющее в частично-интерактивном режиме выполнять цепочки действий, включающие как вычислительные этапы, так и этапы преобразования данных.
- Часть разработанных программ портирована на многопроцессорные архитектуры (многопроцессорные системы, связанные посредством технологии MPI; видеокарты, поддерживающие технологии Nvidia CUDA и AMD ROCm). Оценено ускорение решения прямой задачи гравиметрии для различных графических карт при использовании одинарной и двойной точности чисел с плавающей запятой. Разработана библиотека для упрощения интеграции программ, предназначенных для суперкомпьютерных систем, в оболочку Linkate.
- Проведена интерпретация реальных геофизических данных для Урала и сопредельных территорий на планшетах различного размера и масштаба. Построены начальные трехмерные модели распределения плотности в земной коре и верхней мантии до глубины 80 км. С использованием гипотезы об изостазии на этой глубине проведено выделение однородных блоков в верхней мантии. Проведено сопоставление распределения аномального литостатического давления на различных глубинах финальной модели с картами тектонического районирования. Показано, что

тектонические структуры могут не просматриваться на срезах плотностной модели, однако параметры их глубины все-таки можно оценить по литостатическим аномалиям.

Среди дальнейших направлений развития описанных в диссертации идей можно выделить совершенствование методики подбора зависимости «скорость-плотность» для решения задачи не только в классе кусочно-линейных зависимостей, но и других. Актуальным видится исследование возможности применения формулы метода локальных поправок в варианте (17) не только для приповерхностных границ, но и для более глубоких. Также требует дальнейшего исследования задача восстановления геометрии нескольких границ раздела.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Ladovskii I.V., Martyshko P.S., **Tsidaev A.G.**, Kolmogorova V.V., Byzov D.D. Lithosphere Density Model of the Middle Urals Segment // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. Vol.59, Issue 2. pp. 160-174. 0.94 п.л. / 0.19 п.л. (WoS)
2. Martyshko P.S., **Tsidaev A.G.**, Kolmogorova V.V., Ladovskii I.V., Byzov D.D. Velocity and Density Cross Sections of the Upper Part of the Lithosphere within the North Urals Segment // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Vol. 58, Issue 3. pp. 306-317. 0.75 п.л. / 0.15 п.л. (WoS)
3. Tsidaev A. Workflow for Transformation of Deep Seismic Sounding Cuts into Density Model // *AIP Conference Proceedings*. 2022, Vol. 2425, 130019. 0.25 п.л. (Scopus)
4. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** On a solution of forward and inverse problems of potential geophysical fields // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2312, 040002. 0.25 п.л. / 0.0625 п.л. (WoS)
5. Tsidaev A. G. GPU optimized software for forward and inverse gravity problems solution for contact boundary between two layers // *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2293, 140018. 0.25 п.л. (WoS)
6. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** On solutions of forward and inverse problem for potential geophysical fields: Gravity inversion for Urals region // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2164, No. 1, 120010. 0.5 п.л. / 0.125 п.л. (WoS)
7. Tsidaev A. Controlling the execution steps of data processing algorithm with visual workflow // *AIP Conference Proceedings*. 2019, Vol. 2116, No. 1, 390018. 0.19 п.л. (WoS)
8. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** Gravity Data Inversion with Method of Local Corrections for Finite Elements Models // *Geosciences*. 2018. Vol. 8, No. 10, 373. 1 п.л. / 0.25 п.л. (WoS)
9. Martyshko P., Ladovskii I., Byzov D., **Tsidaev A.** Density Earth's crust models creation using gravity and seismic data // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2018, Vol. 18, Issue 1.1. pp. 749–754. 0.375 п.л. / 0.094 п.л. (Scopus)
10. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** On stable solution of 3D gravity inverse problem // *AIP Conference Proceedings* // *AIP Conference*

- Proceedings. 2017. Vol. 1863, 050007. 0.25 п.л. / 0.0625 п.л. (WoS)
11. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** Forward gravity problem solution optimization for the finite elements approach // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1863, 050008. 0.25 п.л. / 0.0625 п.л. (WoS)
  12. Martyshko P., Ladovskii I., Byzov D., **Tsidaev A.** Density block models creation based on isostasy usage // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017, Vol. 17(14). pp. 85–92. 0.5 п.л. / 0.125 п.л. (Scopus)
  13. Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., **Tsidaev A. G.** 2D and 3D Density Block Models Creation Based on Isostasy Usage // CEUR Workshop Proceedings. 2017, Vol. 1814. pp. 1–9. 0.56 п.л. / 0.14 п.л. (Scopus)
  14. Tsidaev A. .NET library for seamless remote execution of supercomputing software // CEUR Workshop Proceedings. 2017, Vol. 1990. pp. 79–83. 0.31 п.л. (Scopus)
  15. Tsidaev A. Parallel Algorithm for Natural Neighbor Interpolation // CEUR Workshop Proceedings. 2016, Vol. 1729. pp. 78–83. 0.375 п.л. (Scopus)
  16. Martyshko P., Byzov D., Ladovskiy I., **Tsidaev A.** 3D density models construction method for layered media // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2015. 2015. Vol. 1. pp. 425–432. 0.5 п.л. / 0.125 п.л. (WoS)
  17. Tsidaev A. G. The parallel algorithm for the gravity structural direct problem solution on the GPU // XIVth International Conference - Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. 2015. 33714. 0.25 п.л. (Scopus)
  18. Martyshko P. S., Ladovsky I. V., **Tsidaev A. G.**, Byzov D. D. 3D Density Model Construction For Timan-Pechora Region // XIVth International Conference - Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. 2015. 33007. 0.25 п.л. / 0.0625 п.л. (Scopus)
  19. Tsidaev A. CUDA Parallel Algorithms for Forward and Inverse Structural Gravity Problems // CEUR Workshop Proceedings. 2015, Vol. 1513. pp. 50–56. 0.44 п.л. (Scopus)
  20. Мартышко П.С., Ладовский И.В., Осипов В.Ю., Бызов Д.Д., **Цидаев А.Г.** Методика и новые сеточные алгоритмы построения 3d-плотностных моделей // Геофизика. 2013. № 1. С. 41-47. 0.44 п.л. / 0.088 п.л.
  21. Федорова Н. В., Колмогорова В. В., Рублев А. Л., **Цидаев А. Г.** Магнитная модель северо-восточной части Европы // Геофизические исследования. 2013, Т. 14. С. 25–37. 0.81 п.л. / 0.2 п.л.
  22. Мартышко П.С., Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Ладовский И.В., Бызов Д.Д., Осипов В.Ю., **Цидаев А.Г.** Схематическое тектоническое районирование Уральского региона на основе разработанных алгоритмов и методики создания объемной геофизической модели верхней части литосферы // Литосфера. 2012, №4. С. 208–218. 0.69 п.л. / 0.098 п.л.
  23. Martyshko P.S. Ladovskii I.V., **Tsidaev A.G.** Construction of Regional Geophysical Models Based on the Joint Interpretation of Gravimetry and Seismic Data // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2010. Vol. 46, Issue 11. pp. 931-942. 0.75 п.л. / 0.25 п.л. (WoS)