

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СРЕДНЕГО УРАЛА ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ
И МАГНИТНЫМ ДАННЫМД. Д. Бызов¹, П. С. Мартышко^{1,*}, Н. В. Федорова¹, и А. Л. Рублев¹¹Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия* **Контакт:** Петр Сергеевич Мартышко, pmart3@mail.ru

Для Среднего Урала и сопредельных территорий Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ в пределах географических координат от 56° до 60° северной широты и от 54° до 66° восточной долготы проведено изучения структурных особенностей аномального гравитационного и магнитного полей и построены карты разделенных аномалий для слоев земной коры. С использованием оригинальных параллельных алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиметрии и магнитометрии построены плотностная модель литосферы и распределение источников магнитных аномалий в земной коре. Проведено сопоставление результатов моделирования источников магнитных аномалий в земной коре с плотностной моделью с целью изучения различия глубинного строения западного и восточного секторов палеозойской Уральской складчатой системы, а также зон ее сочленения с древней Восточно-Европейской и эпигерцинской Западно-Сибирской платформами.

Ключевые слова: магнитные и гравитационные аномалии, обратные задачи грави-магнитометрии, трехмерные модели земной коры, Средний Урал.

Цитирование: Бызов, Д. Д., П. С. Мартышко, Н. В. Федорова, и А. Л. Рублев Глубинное строение Среднего Урала по гравитационным и магнитным данным // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES3006. — DOI: 10.2205/2024es000924 — EDN: DSSAOD

Введение

Развитие геофизических методов интерпретации гравитационных и магнитных полей для больших массивов данных позволяет перейти от изучения глубинного строения литосферы вдоль профилей ГСЗ к объемным моделям. На основе комплекса методов, разработанных в Институте геофизики УрО РАН, для территории более 400 000 км² построены модели источников гравитационных и магнитных аномалий в слоях земной коры Среднего Урала и сопредельных регионов. Район исследования расположен в пределах географических координат от 56° до 60° северной широты и от 54° до 66° восточной долготы и охватывает палеозойскую складчатую область Урала и прилегающие структуры Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ.

Реликты палеозойского Уральского орогена протягиваются меридионально более чем на 2500 км и вдоль простирания разделены на Южный, Средний, Северный, Приполярный и Полярный сегменты. В описательных геологических целях эпипалеозойская Уральская складчатая система разделена на шесть структурно-тектонических мегазон, протяженных с севера на юг (рис. 1). С запада на восток расположены: Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская, Центрально-Уральская, Тагило-Магнитогорская, Восточно-Уральская и Зауральская мегазоны. Разделение в значительной степени основано на различиях в возрасте и палеогеографических условия формирования доминирующих внутри них породных комплексов [Пучков, 2010]. Магнитные и гравитационные аномалии над палеозойским складчатым Уралом также как мегазоны в основном протягиваются в меридиональном направлении с севера на юг (рис. 1) [Государственная геологическая карта, 2011].

<https://elibrary.ru/dssaod>

Получено: 14 мая 2024 г.

Принято: 29 июля 2024 г.

Опубликовано: 5 августа 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

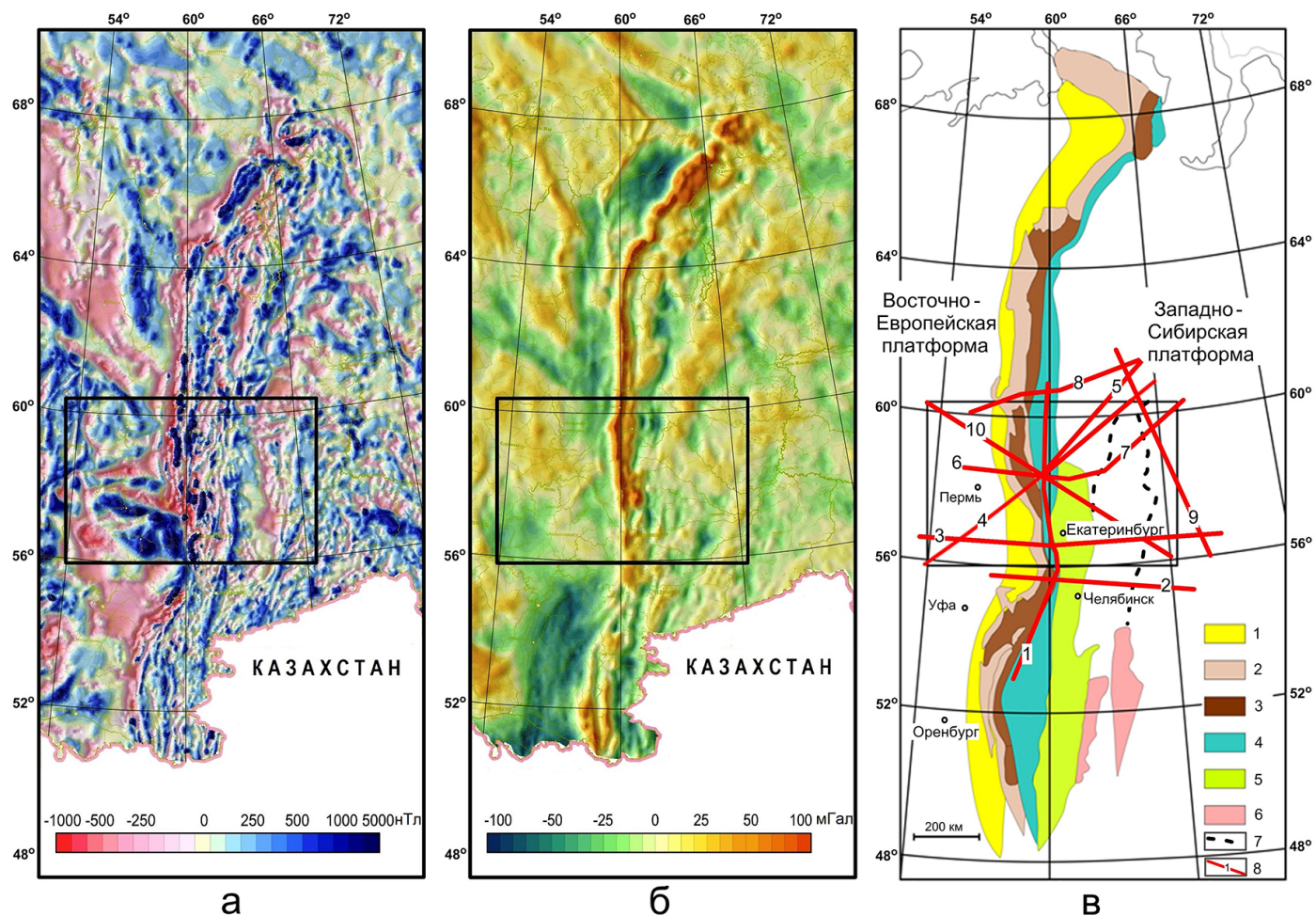


Рис. 1. Уральский регион и прилегающие территории Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ: а – карта аномального магнитного поля; б – карта гравитационного поля в редукции Буге; в – схема тектонического районирования палеозойда Урала. Мегазоны: 1 – Предуральский краевой прогиб; 2 – Западно-Уральская; 3 – Центрально-Уральская; 4 – Тагило-Магнитогорская; 5 – Восточно-Уральская; 6 – Зауральская; 7 – границы мегазон под осадочным чехлом Западной Сибири; 8 – профили ГСЗ: 1 – Вижай–Орск; 2 – Тараташский; 3 – Свердловский; 4 – Гранит; 5 – Рубин-2; 6 – Красноуральский; 7 – Ханты-Мансийский; 8 – Краснотенский; 9 – Сев. Сосьва–Ялutorовск; 10 – Рубин-1. Граница изучаемой территории обозначена прямоугольником.

В работе [Пучков, 2010] отмечено, что три западные мегазоны (Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская и Центрально-Уральская) – это палеоконтинентальная часть Урала, сформировавшаяся на окраине континента Балтика (ставшей частью композитного континента Лавруссия после коллизии Балтики с Лаврентией). Восточные мегазоны (Тагило-Магнитогорская, Восточно-Уральская и Зауральская) образуют палеоостроводужную часть Урала, представляющую собой коллаж офиолитов, островодужных и микроконтинентальных террейнов. Это разделение совпадает с традиционным обособлением мио- и эвгеосинклинальных зон Урала, границей между которыми является зона Главного Уральского разлома [Соболев, 1969]. Тагило-Магнитогорская мегазона состоит из двух террейнов: Магнитогорского в южной и Тагильского в северных частях мегазоны. В более ранних работах Восточно-Уральскую мегазону разделяли на Восточно-Уральское поднятие и Восточно-Уральский прогиб [Соболев, 1969].

Границы западных мегазон Урала прослежены на поверхности на всем протяжении пояса. В пределах Северного, Среднего и северной части Южного сегментов границы

повторяют контуры Восточно-Европейской платформы. Восточные зоны представлены преимущественно в Южном и Среднем сегментах Урала, постепенно исчезая к северу под мезозойско-кайнозойским чехлом молодой Западно-Сибирской платформы. Расположение восточной границы палеозойид Урала является предметом многолетней научной дискуссии. В нашей работе граница между структурами Палеоуральского орогена и Западно-Сибирской платформой на поверхности фундамента обозначена по Тюменско-Чудиновскому разлому.

Начиная с середины прошлого века, в СССР для изучения глубинного строения литосферы выполнен большой объем сейсмических исследований. В пределах палеозойской Уральской складчатой системы наиболее детально исследован район Среднего Урала, через который проходят 10 профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Ряд из них пересекаются в районе сверхглубокой скважины СГ-4 (рис. 1в) [Государственная геологическая карта, 2011]. Результаты исследований по этим профилям были использованы для создания плотностной модели начального приближения. Методика и результаты построения трехмерной модели распределения плотности до глубины 80 км в литосфере изучаемого региона приведены в работе [Ладовский и др., 2023] (использованы спутниковые гравитационные данные XGM2019e_2159_GA [Zingerle et al., 2020], шаг по сетке вычислений 1 км).

В настоящей статье приведены результаты моделирования источников магнитных аномалий в земной коре и их сопоставление с плотностной моделью с целью изучения различия глубинного строения западной и восточной частей Уральской складчатой системы, а также ее сочленения с Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформами.

Исходные данные

Использованная нами цифровая модель гравитационного поля в редукции Буге была построена под руководством А. В. Чурсина «Уральской геофизической экспедицией» на основе большого набора измерений разных лет с различной детальностью и масштабом (от 1:50 000 до 1:1 000 000). Считается, что масштаб модели в среднем 1:500 000. В статье слово «детальность» применительно к моделям нигде не используется, везде четко говорится – «шаг сетки». Слово «разрешение» применительно к цифровым моделям употребляется в смысле «цифровое разрешение», т.е. некоторая величина, показывающая количество сэмплов (элементов дискретизации) на единицу, в нашем случае, объема. Шаг 500 м сетки разбиения модели может служить такой величиной, так как по нему можно однозначно установить, что 1 км³ модели описывается 8 элементами дискретизации.

Изучение структурных особенностей аномального магнитного поля проведено с использованием региональной базы данных, основанной на наземных и аэромагнитных съемках масштаба 1:200 000 [Чурсин и др., 2008]. При создании цифровой карты для более точного учета вековой вариации была проведена специальная аэромагнитная съемка по протяженным профилям и в качестве поля относимости использована модель главного геомагнитного поля IGRF-2000. Матрица аэромагнитных данных оцифрована через 250 м. На Среднем Урале региональная база данных охватывает территорию на листах О-40 и О-41в масштабе карт 1:1 000 000.

Методы

Построение плотностной модели земной коры и верхней мантии

Изложим кратко методику построения региональной трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии. Для формирования начальной модели интерполированной плотности были построены плотностные разрезы до глубины 80 км по десяти сейсмическим профилям, положение которых отмечено на рис. 1. Недостающие данные по плотностям в межпрофильном пространстве заполнены интерполированными значениями плотности. Интерполяция выполнена по отдельным горизонтальным слоям, мощности которых в данном случае определены выбранным нами шагом дискретизации

500 м по вертикали и горизонтали. Трехмерная модель интерполированной плотности представляет собой параллелепипед в координатах $56\text{--}60^\circ$ с. ш., $54\text{--}66^\circ$ в. д. и мощностью 80 км с однородными элементами разбиения – кубиками с ребром 500 м. Точность интерполяции в межпрофильное пространство мы не можем оценить явным образом ввиду отсутствия фактических данных о плотности в этом пространстве. Косвенные признаки говорят о том, что она не высока: относительная невязка гравитационного поля интерполированной модели с наблюдаемым полем составляет порядка 100%. Однако, для нашей методики главное, чтобы модель начального приближения как можно лучше соответствовала априорным данным, поскольку в дальнейшем мы ищем мало отклоняющуюся от нуля корректирующую добавку к распределению плотности начальной модели, которая бы сохраняла, в основном, морфологию модели и одновременно приводила модельное поле в соответствие с наблюдаемым. Заметим, что без каких-либо априорных ограничений на трехмерное распределение плотности решение линейной обратной задачи гравиметрии не будет единственным. Поэтому подбор уточняющих поправок к избыточной плотности осуществлен в модельных классах корректности плотностных параметров. Доказано, что в горизонтальном слое латеральная плотность восстанавливается однозначно [Новоселицкий, 1965]. Единственность такого решения опирается на принцип локализации – варианте локально-одномерного проектирования на горизонтальную плоскость слоя, соотнесенного с ним внешнего аномального поля [Martyshko et al., 2017]. Поэтому разделение плотностного (сеточного) параллелепипеда начальной модели на семейство горизонтальных слоев позволяет реализовать алгоритм поиска слабееединственных решений обратной задачи гравиметрии для трехмерной избыточной плотности на множестве корректности мультипликативных добавок [Мартышко и др., 2016].

При разделении внешнего (разностного) поля на составляющие от горизонтальных слоев внутренних источников использован алгоритм пересчета (трансформации) поля «вверх-вниз» на несколько уровней [Martyshko et al., 2021c]. Инструментом фильтрации является метод сглаживания полей при их пересчете на различные высоты по формуле Пуассона [Тихонов и Самарский, 1966] и последующим аналитическим продолжением на глубину. Спектральные и амплитудные характеристики разноглубинных составляющих разделенных полей зависят от величины параметра регуляризации. Этот параметр подбирается для модели каждого горизонтального слоя с тем, чтобы реализовать допустимое сглаживание «повысотных» трансформант [Мартышко и др., 2021]. При этом устойчивое решение обратной задачи гравиметрии по отдельным плотностным слоям однозначно соотносится с пространственными аномалиями разделенных полей, пересчитанных на уровень земной поверхности. В настоящей работе шаг интервальной дискретизации пересчетов и мощности Δz_k горизонтальных слоев источников составляет 500 м.

Построение магнитной модели земной коры

Методика построения магнитной модели основана на изучении структурных особенностей аномального поля, выделения аномалии от различных слоев земной коры и построения трехмерных поверхностей слоев с разными значениями намагниченности.

Для применения процедуры разделения магнитного поля от слоев земной коры необходимо, чтобы информация о поле была представлена гармонической функцией (модуль поля не гармоническая функция). Поэтому наблюдаемые аномалии модуля магнитного поля, заданные на сетке 3000×2000 точек с шагом 250×250 м, подбирались суммой полей множества из 163840 однородно намагниченных отрезков. Неизвестными являются трехмерные координаты концов отрезков и модуль намагниченности (со знаком), т.е. по 7 параметров на отрезок. Направление намагниченности отрезков выбиралось по нормальному полю. Подбор осуществлялся при помощи параллельной программной реализации для графических ускорителей модификации метода минимизации Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно с ограниченным использованием памяти в многомерном кубе (L-BFGS-B). Вычисления проводились с использованием

4 графических ускорителей NVidia Tesla K80. Расчет был остановлен после 2000 итераций при достижении относительной точности подбора поля около 5%. После определения параметров отрезков вычислялись компоненты магнитного поля, послойное разделение выполнялось для вертикальной компоненты.

Аномальное магнитное поле имеет интегральный характер и содержит составляющие от всех источников, расположенных в литосфере. Для выделения аномалий от источников в различных слоях земной коры была использована методика, основанная на повысотных пересчетах [Martyshko et al., 2014] (аналогичная описанной выше для гравитационного поля). Задача выделения эффекта от локальных источников, расположенных в горизонтальном слое от земной поверхности до некоторой глубины H , решалась в несколько этапов. На первом этапе вертикальная составляющая магнитного поля с помощью численного метода пересчитывалась вверх на высоту H . Для того чтобы окончательно избавиться от влияния источников в верхнем слое, пересчитанное вверх поле аналитически продолжалось вниз на глубину H . Поскольку задача пересчета поля вниз относится к классу некорректно поставленных задач, то при вычислениях использовался метод с применением регуляризации. На следующем этапе поле вновь пересчитывалось вверх на уровень дневной поверхности $H = 0$. Полученное трансформированное поле можно рассматривать как поле от источников, расположенных ниже границы H . После вычисления разности наблюдаемого и трансформированного полей получаем аномалии от локальных источников, расположенных в верхнем слое.

Таким способом для разных значений параметра H можно получить аномалии от источников, расположенных в различных горизонтальных слоях. Разделенные аномалии позволяют анализировать распределение источников по глубине, следовательно, появляется возможность установить связь между источниками магнитных аномалий на разных глубинах.

При построении региональных моделей возникает потребность интерпретировать большие массивы данных, что приводит к значительным затратам времени при вычислениях на однопроцессорных компьютерах. Использование параллельных алгоритмов для многопроцессорных вычислительных систем значительно сокращает время расчетов. Создана новая компьютерная технология, основанная на параллельных вычислениях. Описание математического аппарата и алгоритмов параллельных вычислений на суперкомпьютере Уран приведено в монографии [Martyshko et al., 2016]. В настоящей работе использован алгоритм, реализованный на персональных компьютерах с графическими процессорами NVidia и AMD [Martyshko et al., 2021a].

При сейсмических исследованиях традиционно земную кору разделяют на 3 слоя: осадочный, гранитный и базитовый. В пределах изучаемого региона мощность осадочного слоя Восточно-Европейской платформы составляет более 4 км и увеличивается в Предуральском прогибе до 5–6 км, а средняя глубина до базитового слоя около 20 км [Геотраверс «ГРАНИТ», 2002; Дружинин и др., 2003; 1981]. Для построения магнитной модели мы разделили аномалии по 3 слоям: приповерхностный от земной поверхности до глубины 5 км, верхний или гранитный от 5 до 20 км и нижний или базитовый от 20 до 50 км. Выполнены расчеты трансформированных полей (пересчитанных вверх и вниз) для уровней 5, 20, 50 км и рассчитаны магнитные аномалии от источников в 3 слоях земной коры. При расчетах мы использовали данные региональной базы, основанной на наземных и аэромагнитных съемках [Чурсин и др., 2008]. Для сопоставления с плотностными неоднородностями для этих слоев рассчитаны гравитационные аномалии. Карты магнитных и гравитационных аномалий всего Уральского региона приведены на рис. 1, а разделенных по слоям для территории Среднего Урала на рис. 2.

На полученных картах отчетливо видно различие в распределении аномалий в западной и восточной частях Урала. В осадочном и гранитном слоях в пределах Западной и Центральной Уральских мегазон присутствуют только небольшое количество слабых магнитных и гравитационных аномалий. К востоку от Главного Уральского разлома в Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах наблюдается обилие высокоинтенсивных как магнитных, так и гравитационных аномалий, созданных массивами и протяжен-

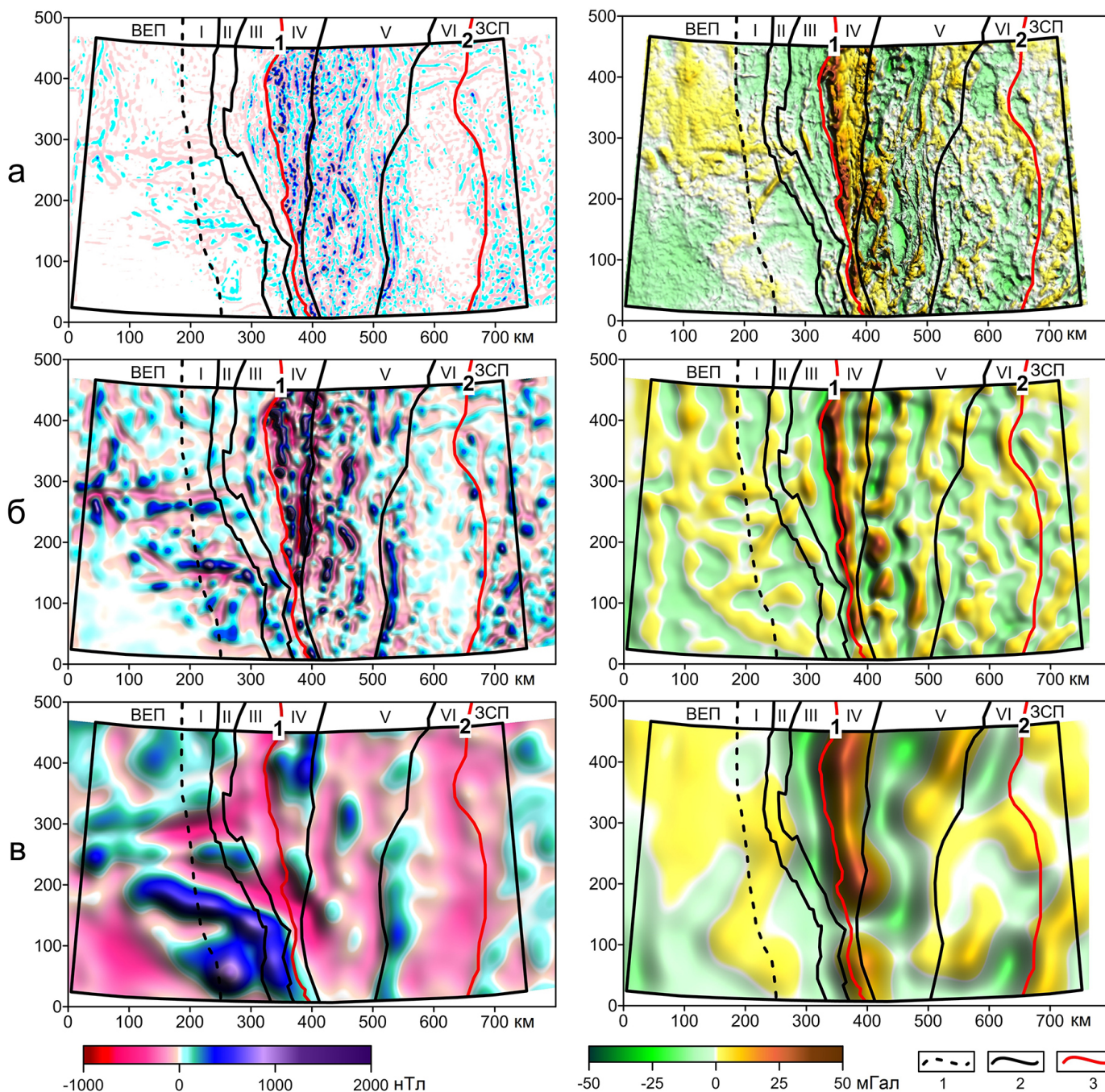


Рис. 2. Разделение магнитных (слева) и гравитационных (справа) аномалий по слоям: а – приповерхностный (0–5 км); б – гранитный (5–20 км); в – базитовый (20–50 км). Обозначения: 1 – западная граница Предуральского краевого прогиба; 2 – границы мегазон. Мегазоны: I – Предуральский краевой прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Тагильская; V – Восточно-Уральская; VII – Зауральская; 3 – глубинные разломы: 1 – Главный Уральский; 2 – Тюменско-Чудиновский.

ными поясами и состоящими из базит-ультрабазитовых пород (дуниты, гарцбургиты, лерцолиты различной степени серпентинизации, габбро, базальты, амфиболиты, а также диориты).

В базитовом слое под Уралом фиксируется значительное понижение уровня магнитных аномалий и пояса протяженных отрицательных аномалий меридионального простирания. Крупные положительные магнитные аномалии расположены в основ-

ном в пределах Восточно-Европейской платформы и протягиваются под Уральские структуры вплоть до Главного Уральского разлома. Гравитационные интенсивные положительные аномалии присутствуют только в Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах.

Модель распределения намагниченности в земной коре

Для вычисления поверхности источников магнитных аномалий мы применили модифицированный метод локальных поправок решения структурной обратной задачи магнитометрии [Мартышко и др., 2016]. Этот метод позволяет определить геометрию поверхности раздела между двумя слоями при заданных значениях однородной намагниченности в слоях и средней глубине до второго слоя. Разработан итерационный способ нахождения границы, базирующийся на предположении о том, что наибольшее влияние на изменение значения поля в некоторой точке оказывает изменение ближайшей к данной точке части поверхности. На каждом шаге итерации уменьшается разность между заданными и приближенными значениями поля только за счет изменения значения искомой функции в этой точке. Предложенный метод не использует нелинейную минимизацию, что позволяет быстро решать структурные обратные задачи [Рублев, 2021; Martyshko et al., 2021b].

При задании намагниченности источников магнитных аномалий были использованы результаты петромагнитных исследований пород уральских вещественных комплексов, литературные данные по оценкам намагниченности слоев коры, а также результаты двумерного моделирования по многочисленным профилям, пересекающим Урал [Федорова, 2001; Fedorova and Rublev, 2019].

В приповерхностном слое от 0 до 5 км на платформах модель намагниченных источников позволила под слоем осадочного чехла локализовать массивы, как правило, состоящие из базитов и ультрабазитов, намагниченность которых составляет 1–3 А/м, а положение верхних кромок источников дает возможность уточнить глубину до кристаллического фундамента (рис. 3а). В пределах Палеоуральской складчатой системы наблюдается резкий контраст в распределении магнитных массивов между палеоконтинентальной и палеоостроводужной частями. В Западной и Центральной Уральских зонах присутствуют лишь немногочисленные источники, а к востоку от Главного Уральского разлома в Тагильско-Магнитогорской и Восточно-Уральской мегазонах наблюдается большое количество намагниченных массивов, часть из которых маркируют многочисленные разломы. Намагниченные источники присутствуют не только в пределах Уральских гор, но и под осадками чехла Западно-Сибирской платформы. В восточной части Урала плотность намагниченных источников значительно снижается в районах крупных гранитных массивов, на рис. 3а эти области выделяются светлыми пятнами.

На рис. 3б приведена поверхность кровли намагниченных источников в верхнем или гранитном слое от 5 до 20 км. Расчеты проведены для намагниченности 2 А/м и асимптоты 15 км. Источники в основном образуют линейные пояса, как в пределах Урала, так и на платформах. Можно отметить их практически равномерное распределение по всей территории за исключением юго-западного участка Восточно-Европейской платформы, где протяженность поясов небольшая от 20 до 100 км, а направления их простирания варьируют от меридионального до широтного. По-видимому, они являются аналогами архейских зеленокаменных поясов.

На Урале и в Западной Сибири пояса имеют протяженность от 50 до 300 км и более. На западе Урала пояса уральского направления (север-юг) появляются к востоку от центральной части Центрально-Уральской мегазоны на глубине 10–12 км. На западе в Предуральском краевом прогибе и Западно-Уральской мегазоне направление простирания ряда поясов резко меняется на субширотное, что свидетельствует о принадлежности этих источников фундаменту Восточно-Европейской платформы. В пределах Предуральского краевого прогиба глубина до верхних кромок источников составляет 5–8 км, а в Западно-Уральской и восточной части Центрально-Уральской

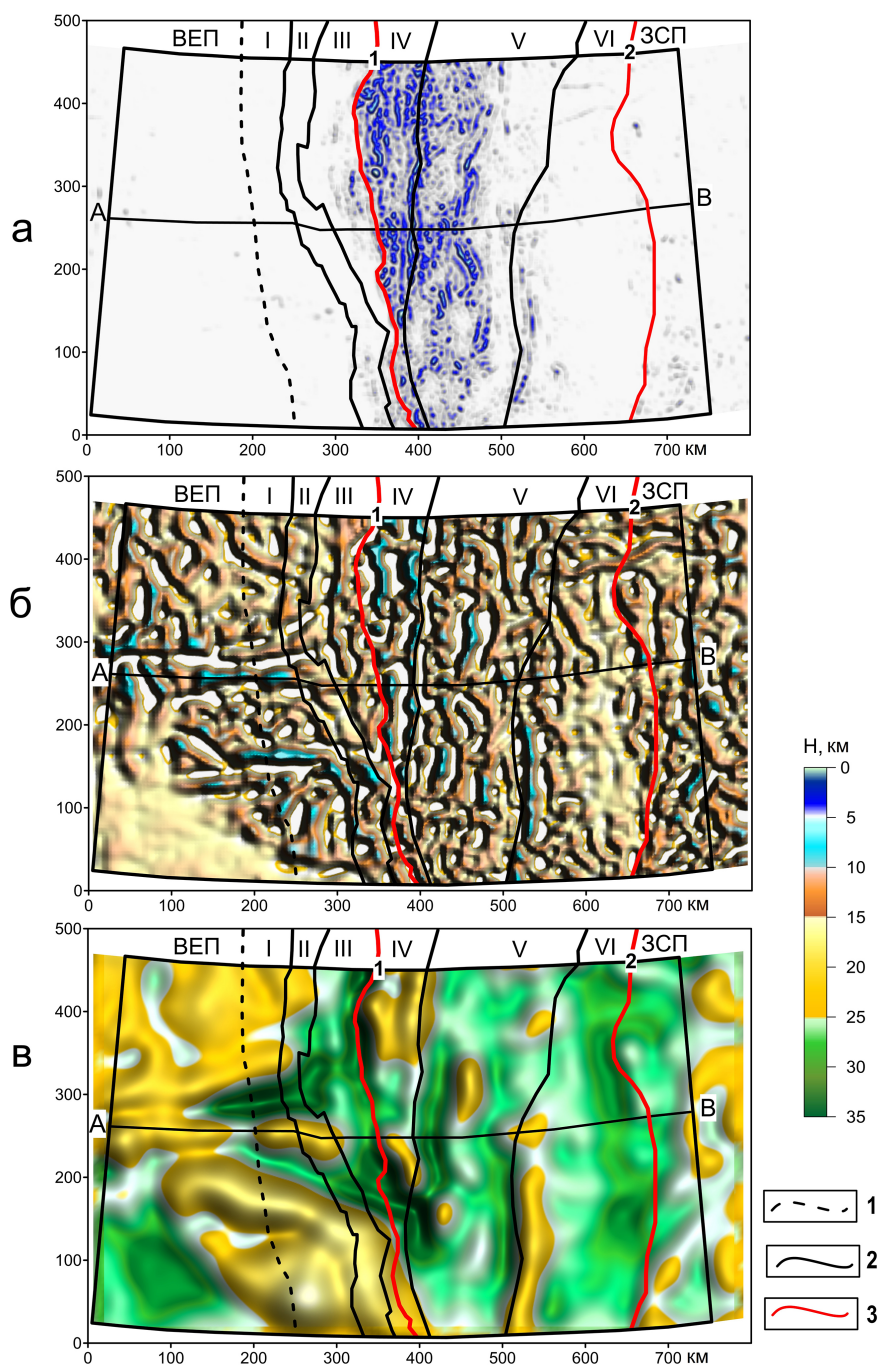


Рис. 3. Результаты объемного моделирования источников магнитных аномалий: а – приповерхностный слой; б – гранитный слой; в – базитовый слой. Обозначения: 1 – западная граница Предуральского краевого прогиба; 2 – границы мегазон. Мегазоны: I – Предуральский краевой прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Тагильская; V – Восточно-Уральская; VI – Зауральская; 3 – основные разломы: 1 – Главный Уральский; 2 – Тюменско-Чудиновский.

мегазоны происходит погружение до 12–14 км. Расположение этих источников позволяет надежно определить под уралами глубину до фундамента древней платформы. В Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах верхние кромки поясов расположены значительно выше и в ряде мест достигают верхней отметки этого слоя – 5 км.

Расчеты поверхности, разделяющей гранитный и базитовый слой, проведены для нескольких вариантов намагниченности 2, 4 и 6 А/м и положений асимптоты 20 и 25 км.

При намагниченности 2 А/м вариации поверхности получились слишком большие, их верхние кромки превышали глубину 10 км, что вряд ли соответствует реальному положению вещей. Поверхность для намагниченности 6 А/м и глубине до асимптоты 25 км приведена на рис. 3в. В пределах Восточно-Европейской платформы и западной части Урала региональным аномалиям соответствуют подъемы кровли нижнего намагниченного слоя коры до 15 км. Резкое погружение поверхности до 30–35 км происходит в зоне Главного Уральского разлома, и это позволяет уверенно определить восточную границу Восточно-Европейской платформы на уровне нижней коры. Восточнее наблюдается еще несколько узких зон погружения, протягивающихся в меридиональном направлении. Возможно, они маркируют глубинные границы различных террейнов, образующих структуру восточной части Урала. Наиболее обширное по площади погружение кровли нижнего слоя происходит к западу от Тюменско-Чудиновского разлома и, вероятно, является глубинным разделом между Уральской складчатой системой и Западно-Сибирской платформой.

Глубинные структуры сочленения палеозоид Урала с Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформами (обсуждение результатов)

Построенные объемные модели распределения плотности и намагниченности для изучаемой территории сконвертированы в формате числового параллелепипеда. Из трехмерных массивов возможно извлечение любых массивов меньшей размерности для трассировки вертикальных сечений или построения карт горизонтальных срезов. Для изучения отличия глубинных структур земной коры западной и восточной частей Уральской складчатой системы, а также зон ее сочленения с Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформами построены разрезы по широтному профилю АВ в центральной части изучаемой территории. Профиль проходит вдоль линейных магнитных источников, простирающихся в широтном направлении с Восточно-Европейской платформы под уралиды (рис. 3).

На рис. 4 приведена северная часть объемной магнитной модели источников второго слоя (5–20 км) и разрез вдоль профиля АВ, на котором показаны границы второго и третьего слоев. Для нижнего (третьего) слоя приведены два альтернативных, эквивалентных варианта для разных асимптот и значений намагниченности 4 и 6 А/м.

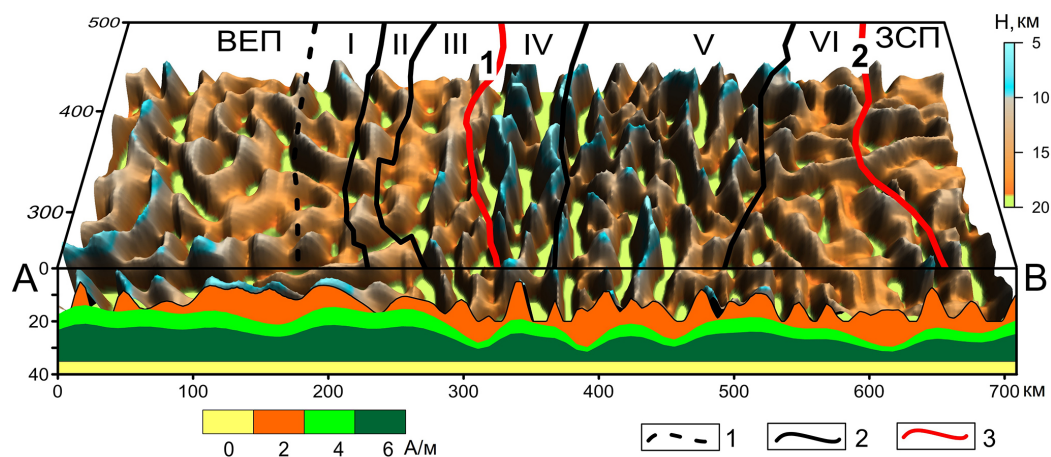


Рис. 4. Объемная магнитная модель источников второго слоя (5–20 км) и разрез вдоль профиля АВ, на котором показаны рельеф кровли второго слоя и две альтернативные, эквивалентные модели нижнего слоя для разных асимптот и значений намагниченности. Обозначения: 1 – западная граница Предуральского краевого прогиба; 2 – границы мегазон. Мегазоны: I – Предуральский крайовой прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Тагильская; V – Восточно-Уральская; VII – Зауральская; 3 – глубинные разломы: 1 – Главный Уральский; 2 – Тюменско-Чудиновский.

Разрез, дополненный магнитными источниками в приповерхностном слое и границами структурно-тектонических зон, приведен на рис. 5а. Нижняя граница модели ограничена глубиной 35 км, что соответствует минимальной отметке подошвы земной коры. Сечение плотностной модели по этому профилю показано на рис. 5б. На разрезе нанесены границы, разделяющие осадочный чехол и кристаллический фундамент платформ.

На разрезах отчетливо видно различие западных и восточных мегазон. В Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах высокоплотностные и намагниченные объекты присутствуют не только в приповерхностном слое, но и до глубины 20–25 км. А в Западной и Центрально-Уральской мегазонах происходит погружение слоев пониженной плотности 2,7–2,8 г/см³ до глубины 12–15 км, а с плотностью 2,85 г/см³ до 17–18 км (рис. 5б). Магнитные источники практически отсутствуют до глубины 12–15 км, за исключением небольших блоков в приповерхностном слое вблизи Главного Уральского глубинного разлома (рис. 5а). Скорее всего, это свидетельствует о том, что в зоне надвига уралид на край Восточно-Европейской платформы до глубины 12–15 км преобладают осадочные породы, аналогичные залегающим на поверхности терригенно-карбонатным породам.

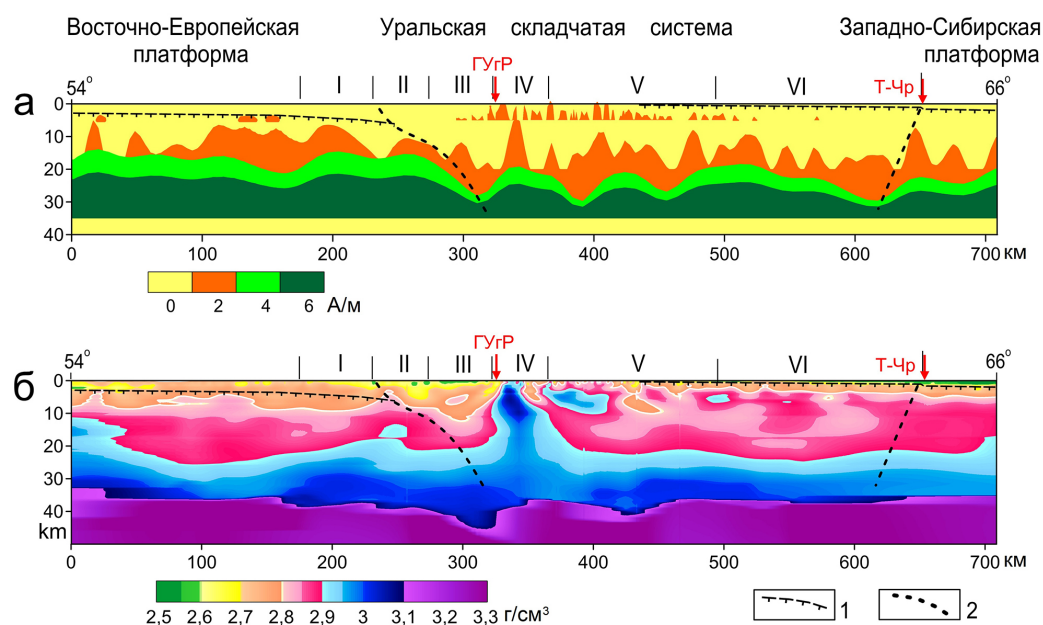


Рис. 5. Модели распределения намагниченности (а) и плотности (б) вдоль профиля АВ. Обозначения: 1 – подошва осадочного чехла; 2 – границы платформ. Мегазоны: I – Предуральский краевой прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Тагильская; V – Восточно-Уральская; VII – Зауральская; ГУР – Главный Уральский разлом; Т-Чр – Тюменско-Чудиновский разлом.

В пределах Восточно-Европейской платформы в верхнем слое магнитные источники расположены на глубине 4–5 км, что хорошо соответствует положению кровли кристаллического фундамента. Верхние кромки базит-ультрабазитовых поясов широтного простирания, через которые проходит профиль, расположены на западе на глубине 5–6 км, затем погружаются в восточном направлении до 7–8 км в Предуральском краевом прогибе и до 12–14 км в Западной и Центрально-Уральской мегазонах. Профиль пересекает базит-ультрабазитовый пояс (ГУР) уральского меридионального простирания в районе пикетов 290–300 км (рис. 4 и 5а). Геометрия магнитных источников в гранитном слое, прогиб нижнего намагниченного слоя вблизи Главного Уральского разлома, а также контуры депрессии на плотностном разрезе позволили нам уверенно построить восточную границу кристаллической коры Восточно-Европейской платформы (рис. 5).

Глубинный восточный раздел между Уральской складчатой системой и Западно-Сибирской платформой мы провели по линии, соединяющей резкое увеличение мощности осадочного чехла (от 500 м до 1000 м) вблизи Тюменско-Чудиновского разлома с прогибом нижнего намагниченного слоя (рис. 5а). Граница имеет западное падение. Кроме впадины в кровле нижнего слоя можно отметить, что в восточном борту Зауральской мегазоны магнитные источники в гранитном слое залегают на большой глубине, более 15 км, а на Западно-Сибирской платформе глубина до верхних кромок линейных поясов намного меньше и составляет 7–10 км. По результатам гравитационного моделирования гранитный слой земной коры платформы имеет повышенную плотность в сравнении с уральскими структурами (рис. 5б).

Заключение

В результате проведенных исследований построены карты магнитных и гравитационных аномалий от источников, разделенных по слоям земной коры. Эти результаты дают возможность анализировать распределение источников, как по глубине, так и в разных тектонических зонах. На картах наглядно продемонстрировано различие в распределениях аномалий в западной и восточной частях Урала.

В пределах Западной и Центральной Уральских мегазон присутствует небольшое количество слабых магнитных и гравитационных аномалий (от источников в приповерхностном и гранитном слоях), а к востоку от Главного Уральского разлома в Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах наблюдается обилие высокоинтенсивных как магнитных, так и гравитационных аномалий.

В региональном магнитном поле Урала происходит значительное понижение уровня аномалий. На этом фоне выделены линейные протяженные отрицательные аномалии субмеридионального простирания, которые, вероятно, маркируют границы различных террейнов в нижнем слое земной коры, образующих западную часть Палеоуральской складчатой системы. Крупные положительные магнитные аномалии расположены в основном в пределах Восточно-Европейской платформы и прослежены под западные уральские структуры вплоть до Главного Уральского разлома. А интенсивные положительные гравитационные аномалии от источников в нижней коре присутствуют только в Тагильской и Восточно-Уральской мегазонах.

Результаты послойного разделения магнитного поля использованы для построения поверхностей, разделяющих слои с разными физическими свойствами. Вместе с тем их также можно использовать для любых других способов моделирования, например, в классе ограниченных по простиранию источников.

Построенные в формате числового параллелепипеда объемные модели распределения плотности и намагниченности дают возможность извлекать любые массивы меньшей размерности для построения карт горизонтальных срезов или трассировки вертикальных сечений. Для центральной части изучаемой территории на построенных по этим моделям разрезах продемонстрированы отличия глубинного строения земной коры западной и восточной частей палеозойской Уральской складчатой системы. Геометрия магнитных источников, а также контуры депрессии на плотностном разрезе позволили уверенно построить западную границу между уралидами и Восточно-Европейской платформой.

Выделенная авторами линейная отрицательная аномалия меридионального простирания на западе от Тюменско-Чудиновского разлома и соответствующее ей погружение кровли нижнего слоя на магнитной модели, возможно, являются проявлением глубинного восточного раздела между складчатым Уралом и Западно-Сибирской платформой.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ №20-17-00058).

Список литературы

- Геотраверс «ГРАНИТ» : Восточно-Европейская платформа Урал Западная Сибирь (Строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / под ред. С. Н. Кашубина. — Екатеринбург : Баженовская геофизическая экспедиция, 2002. — 312 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третье поколение) О-41. — С-Петербург : ВСЕГЕИ, 2011.
- Дружинин В. С., Каретин Ю. С., Дьяконова А. Г. *и др.* Комплексные геофизические исследования литосферы Среднего Урала по Артинскому профилю // Отечественная геология. — 2003.
- Дружинин В. С., Каретин Ю. С., Рыбалка В. М. *и др.* Новые данные о глубинном строении Урала (по результатам исследований на Красноуральском профиле ГСЗ) // Доклады Академии наук СССР. — 1981. — Т. 258, № 1. — С. 173–176.
- Ладовский И. В., Мартышко П. С., Цидаев А. Г. *и др.* Плотностная модель литосферы Среднеуральского сегмента // Физика земли. — 2023. — № 2. — С. 62–77. — DOI: [10.31857/S0002333723020084](https://doi.org/10.31857/S0002333723020084).
- Мартышко П. С., Ладовский И. В., Гемайдинов Д. В. О выборе параметра регуляризации в задаче аналитического продолжения гравитационных полей (разделение аномалий от разноглубинных источников) // Геология и геофизика. — 2021. — Т. 64, № 1. — С. 112–122. — DOI: [10.15372/gig2021185](https://doi.org/10.15372/gig2021185).
- Мартышко П. С., Ладовский И. В., Федорова Н. В. *и др.* Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. — Екатеринбург : УрО РАН, 2016. — 94 с.
- Новоселицкий В. М. К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. — 1965. — № 5. — С. 25–32.
- Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья. Актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении. — Уфа : ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.
- Рублев А. Л. О выборе параметра регуляризации при решении обратной задачи магнитометрии // Уральский геофизический вестник. — 2021. — 3(45). — С. 19–25. — DOI: [10.25698/UGV.2021.3.3.19](https://doi.org/10.25698/UGV.2021.3.3.19).
- Соболев И. Д. Тектоническая схема Северного, Среднего и северо-восточной части Южного Урала М 1:2 500 000 // Геология СССР. Т. XII. Кн. 2. Ч. 1. — Москва : Недра, 1969.
- Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — Москва : Наука, 1966. — 724 с.
- Федорова Н. В. Модели намагниченности земной коры по геотраверсу Гранит // Уральский геофизический вестник. — 2001. — № 2. — С. 88–94.
- Чурсин А. В., Прутьян А. М., Федорова Н. В. Цифровая карта аномального магнитного поля Северного, Среднего и Южного Урала и прилегающих территорий Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ // Литосфера. — 2008. — № 6. — С. 63–72.
- Fedorova N. V., Rublev A. L. Numerical Modeling of the Sources of Magnetic Anomalies in the South Urals Earth's Crust // Russian Geology and Geophysics. — 2019. — Vol. 60, no. 11. — P. 1310–1318. — DOI: [10.15372/RGG2019106](https://doi.org/10.15372/RGG2019106).
- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Akimova E. N., *et al.* Studying the structural features of the lithospheric magnetic and gravity fields with the use of parallel algorithms // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2014. — Vol. 50, no. 4. — P. 508–513. — DOI: [10.1134/S1069351314040090](https://doi.org/10.1134/S1069351314040090).
- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Byzov D. D. Computer technology for separating lithospheric magnetic anomalies // Geoinformatics. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021a. — DOI: [10.3997/2214-4609.20215521087](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521087).
- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Rublev A. L. Numerical algorithms for structural magnetometry inverse problem solving // Russian Journal of Earth Sciences. — 2021b. — Vol. 21, no. 3. — ES3002. — DOI: [10.2205/2021ES000766](https://doi.org/10.2205/2021ES000766).
- Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D. Parallel Algorithms for Solving Inverse Gravimetry Problems: Application for Earth's Crust Density Models Creation // Mathematics. — 2021c. — Vol. 9, no. 22. — P. 2966. — DOI: [10.3390/math9222966](https://doi.org/10.3390/math9222966).
- Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., *et al.* On stable solution of 3D gravity inverse problem // AIP Conference Proceedings. — 2017. — DOI: [10.1063/1.4992204](https://doi.org/10.1063/1.4992204).
- Zingerle P., Pail R., Gruber T., *et al.* The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. — 2020. — Vol. 94, no. 7. — DOI: [10.1007/s00190-020-01398-0](https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0).

DEEP STRUCTURE OF THE MIDDLE URALS ACCORDING TO MAGNETIC AND GRAVITATIONAL DATA

D. D. Byzov¹, P. S. Martyshko^{1, **}, N. V. Fedorova¹, and A. L. Rublev¹

¹Bulashevich Institute of Geophysics, UB RAS, Ekaterinburg, Russia

**Correspondence to: Petr Martyshko, pmart3@mail.ru.

For the Middle Urals and adjacent territories of the East European and West Siberian platforms within geographic coordinates from 56° to 60° northern latitude and from 54° to 66° east longitude, the structural features of the anomalous magnetic and gravitational fields were studied and maps of separated anomalies were constructed for three layers of the Earth's crust. Using original parallel algorithms for solving forward and inverse problems of gravimetry and magnetometry, a density model of the lithosphere and sources of magnetic anomalies in the Earth's crust were constructed. The results of modeling the sources of magnetic anomalies in the Earth's crust are compared with the density model in order to study the differences in the deep structure of the western and eastern sectors of the Ural fold system, as well as the zones of junction of the Paleozoic Uralian orogen with the ancient East European and Epi-Gercinian West Siberian platforms.

Keywords: magnetic and gravitational anomalies, inverse problems of gravimetry and magnetometry, Earth's crust 3D models, Middle Urals.

Received: 14 May 2024

Accepted: 29 July 2024

Published: 5 August 2024



© 2024. The Authors.

Citation: Byzov, D. D., P. S. Martyshko, N. V. Fedorova, and A. L. Rublev (2024), Deep Structure of the Middle Urals According to Magnetic and Gravitational Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES3006, <https://doi.org/10.2205/2024ES000924> EDN: DSSAOD

References

- Chursin A. V., Prutyay A. M., Fedorova N. V. Digital anomalous magnetic field map of the Northern, Middle, Southern Urals and adjacent territories of the East-European and West-Siberian platforms // *LITHOSPHERE* (Russia). — 2008. — No. 6. — P. 63–72.
- Druzhinin V. S., Karetin Y. S., Dyakonova A. G., *et al.* Complex geophysical studies of the lithosphere of the Middle Urals along the Artinsky profile // *Otechestvennaya Geologiya*. — 2003.
- Druzhinin V. S., Karetin Y. S., Rybalka V. M., *et al.* New data on the deep structure of the Urals (based on the results of research on the Krasnouralsk DSS profile) // *Doklady of the USSR Academy of Sciences*. — 1981. — Vol. 258, no. 1. — P. 173–176.
- Fedorova N. V. Models of the Earth's crust magnetization along the geotraverse Granite // *Ural Geophysical Bulletin*. — 2001. — No. 2. — P. 88–94.
- Fedorova N. V., Rublev A. L. Numerical Modeling of the Sources of Magnetic Anomalies in the South Urals Earth's Crust // *Russian Geology and Geophysics*. — 2019. — Vol. 60, no. 11. — P. 1310–1318. — DOI: [10.15372/RGG2019106](https://doi.org/10.15372/RGG2019106).
- Geotraverse «GRANIT»: East European Platform Ural Western Siberia (Structure of the Earth's crust based on the results of complex geological and geophysical studies) / ed. by S. N. Kashubin. — Ekaterinburg : Bazhenov Geophysical Expedition, 2002. — P. 312.
- Ladovskii I. V., Martyshko P. S., Tsidaev A. G., *et al.* Lithosphere Density Model of the Middle Urals Segment // *Fizika Zemli*. — 2023. — No. 2. — P. 62–77. — DOI: [10.31857/S0002333723020084](https://doi.org/10.31857/S0002333723020084).
- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Akimova E. N., *et al.* Studying the structural features of the lithospheric magnetic and gravity fields with the use of parallel algorithms // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. — 2014. — Vol. 50, no. 4. — P. 508–513. — DOI: [10.1134/S1069351314040090](https://doi.org/10.1134/S1069351314040090).

- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Byzov D. D. Computer technology for separating lithospheric magnetic anomalies // Geoinformatics. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2021a. — DOI: [10.3997/2214-4609.20215521087](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521087).
- Martyshko P. S., Fedorova N. V., Rublev A. L. Numerical algorithms for structural magnetometry inverse problem solving // Russian Journal of Earth Sciences. — 2021b. — Vol. 21, no. 3. — ES3002. — DOI: [10.2205/2021ES000766](https://doi.org/10.2205/2021ES000766).
- Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D. Parallel Algorithms for Solving Inverse Gravimetry Problems: Application for Earth's Crust Density Models Creation // Mathematics. — 2021c. — Vol. 9, no. 22. — P. 2966. — DOI: [10.3390/math9222966](https://doi.org/10.3390/math9222966).
- Martyshko P. S., Ladovskii I. V., Byzov D. D., *et al.* On stable solution of 3D gravity inverse problem // AIP Conference Proceedings. — 2017. — DOI: [10.1063/1.4992204](https://doi.org/10.1063/1.4992204).
- Martyshko P. S., Ladovsky I. V., Fedorova N. V., *et al.* Theory and methods of complex interpretation of geophysical data. — Ekaterinburg : IGF UB RAS, 2016. — P. 94.
- Martyshko P. S., Ladovsky I. V., Gemaydinov D. V. Choosing a regularization parameter in the problem of analytical continuation of gravitational fields (separation of anomalies generated by shallow and deep sources) // GEOLOGIYA I GEOFIZIKA. — 2021d. — Vol. 64, no. 1. — P. 112–122. — DOI: [10.15372/gig2021185](https://doi.org/10.15372/gig2021185).
- Novoselitsky V. M. On the theory of determining changes of density in a horizontal layer by gravity anomalies // Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Series Physics of the Earth. — 1965. — No. 5. — P. 25–32.
- Puchkov V. N. Geology of the Urals and the Urals. Current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny. — Ufa : DesignPoligraphService, 2010. — P. 280.
- Rublev A. L. On the choice of the regularization parameter when solving the inverse magnetometry problem // Ural Geophysical Bulletin. — 2021. — 3(45). — P. 19–25. — DOI: [10.25698/UGV.2021.3.3.19](https://doi.org/10.25698/UGV.2021.3.3.19).
- Sobolev I. D. Tectonic scheme of the Northern, Middle and north-eastern parts of the Southern Urals M 1:2500000. Geology of the USSR. Vol. XII. Part 1. Book 2. — Moscow : Nedra, 1969. — P. 304.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1000000 (third generation) O-41. — St. Petersburg : VSEGEI, 2011.
- Tikhonov A. N., Samarsky A. A. Equations of mathematical physics. — Moscow : Nauka, 1966. — P. 724.
- Zingerle P., Pail R., Gruber T., *et al.* The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. — 2020. — Vol. 94, no. 7. — DOI: [10.1007/s00190-020-01398-0](https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0).