

Модель строения земной коры и верхней мантии вдоль Средне-Уральского трансекта (по результатам трехмерного сейсмоплотностного моделирования)

П.С. Мартышко*, Д.Д. Бызов, А.Ю. Осипова

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В работе представлена геолого-геофизическая модель строения земной коры и верхней мантии вдоль Средне-Уральского трансекта (как вертикальное сечение трехмерной сейсмоплотностной модели). Описана методика построения трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии для Среднего Урала. Модель создана на основе результатов интерпретации гравитационных аномалий в редукции Буге и данных глубинных сейсмических зондирований. Создание трехмерной модели состоит из нескольких этапов. Сначала строятся градиентные скоростные разрезы в формате сеточных функций (двумерные модели распределения сейсмических скоростей) до глубины 80 км, которые по уточненным формулам преобразуются в плотностные. Далее строится трехмерная плотностная модель нулевого приближения (методами интерполяции) и находится разность между наблюдаемым гравитационным полем и полем этой модели. Для разностного поля решается обратная задача – определяются значения плотности в узлах сетки вычислений, которые нужно добавить в модель нулевого приближения, чтобы удовлетворить наблюдаемому полю. Проведен сравнительный анализ градиентного плотностного разреза, полученного при вертикальном сечении представленной трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии Среднего Урала по линии Средне-Уральского трансекта, с построенной ранее на основе двумерной интерпретации плотностной моделью по этому трансекту (по проекту EUROPROBE). Сечение трехмерной плотностной модели отражает основные особенности глубинного строения исследуемой территории и дополняет их новыми данными о распределении физических параметров в земной коре и мантии. Это является подтверждением того, что трехмерная плотностная модель, при построении которой учтены геофизические данные, заданные на всей исследуемой области, содержит больше информации о строении земной коры, чем двумерные модели.

Ключевые слова: построение плотностной модели, трехмерная линейная обратная задача гравиразведки, геолого-геофизический разрез земной коры

Для цитирования: Мартышко П.С., Бызов Д.Д., Осипова А.Ю. (2024). Модель строения земной коры и верхней мантии вдоль Средне-Уральского трансекта (по результатам трехмерного сейсмоплотностного моделирования). *Георесурсы*, 26(4), с. 144–152. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.3>

Введение

Трехмерные сейсмоплотностные модели земной коры позволяют получить новые знания о внутреннем строении Земли и существенно расширяют возможности прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых, в особенности месторождений углеводородов (Мартышко и др., 2016; Дружинин и др., 2014).

Различные способы построения региональных плотностных моделей рассмотрены в ряде работ. В статье (Нурмухамедов и др., 2020) представлена геолого-геофизическая модель строения земной коры и верхней мантии

вдоль регионального профиля пос. Апача – бух. Мутная на юге Камчатки. Двумерная модель создана на основе комплексной интерпретации материалов метода обменных волн от удаленных землетрясений, гравиразведки и магнитотеллурического зондирования. В работе (Сидоров, Нурмухамедов, 2022) описана методика создания трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии для южной части п-ва Камчатка. Модель построена в результате интерпретации аномалий Буге и глубинных зондирований методами сейсморазведки и электроразведки. В (Шаров и др., 2020) на основе анализа геолого-геофизических данных представлена модель строения кристаллической части земной коры Беломорья (использованы данные по профилям глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), выполнен анализ петрофизических, геотермических, гравиметрических данных). Построение сейсмоплотностной модели региона проводилось на базе

* Ответственный автор: Петр Сергеевич Мартышко
e-mail: pmart3@mail.ru

© 2024 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

четырёхслойной скоростной модели земной коры региона. В работе (Глазнев и др., 2016) предложена методика моделирования, основанная на решении прямых и обратных задач гравиметрии, в условиях неполного обеспечения информацией по строению литосферы. Исходными данными для моделирования служили варианты сейсмических моделей земной коры и данные о скоростном строении верхней мантии региона. Построена региональная плотностная модель центральной части Восточно-Европейской платформы, представленная на пространственной сетке с шагом, равным $15'$.

Отметим, что, в отличие от работ других исследователей, используемый нами метод построения трехмерных моделей земной коры основан на собственных алгоритмах решения прямых и обратных задач гравиметрии и реализован с использованием автоматизированной компьютерной технологии на базе графических ускорителей, что позволяет в тысячу раз сократить время вычисления значений плотности в узлах сетки. Для Уральского региона и сопредельных территорий Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты построена трехмерная модель распределения плотности (с шагом дискретизации 1000 м) в слоях земной коры и верхней мантии до глубины 80 км. Использованы спутниковые гравитационные данные (XGM2019e_2159_GA (Zingerle et al., 2020), шаг по сетке вычислений 1000 м) и данные глубинных сейсмических исследований по восьми региональным профилям ГСЗ и фрагментам двух протяженных геотраверсов (Мартышко и др., 2022; Ладовский и др., 2023).

В настоящей работе построено двумерное вертикальное сечение по линии глубинного Средне-Уральского трансекта (рис. 1), рассчитанное с шагом дискретизации 500 м по трехмерному массиву данных новой трехмерной плотностной модели (Ладовский и др., 2023). Проведено сравнение результатов построения с двумерной плотностной моделью Средне-Уральского трансекта, построенной ранее авторами работ (Рыбалка и др., 2006; Рыбалка, 2015), выполненных в рамках проекта по программе URALIDES, проанализированы сходство и отличия этих моделей.

Этапы построения трехмерной плотностной модели

Исследования проведены для территории Среднего и Северного Урала, ограниченной координатами 56° – 60° с. ш. и 54° – 66° в. д. (в границах листов О-40, О-41). Для указанных листов построена цифровая модель гравитационного поля в редукции Буге с шагом 500 м по X- и Y-координатам ОАО «Уральская геологосъемочная экспедиция» под руководством А.В. Чурсина на основе большого набора измерений разных лет с различной детальностью и масштабом. Это поле выбрано нами для интерпретации.

Подробно методика построения региональных трехмерных плотностных моделей изложена в наших статьях (Мартышко и др., 2022; Ладовский и др., 2023). Здесь только кратко опишем ее этапы. Построение трехмерной плотностной модели по одному только гравитационному полю, заданному на поверхности Земли, возможно, при этом существует достаточно широкий, но геологически адекватный диапазон вариаций распределения

плотности, в пределах которого модель будет удовлетворять наблюдаемому полю с заданной погрешностью. Для уменьшения диапазона вариаций при построении «плотностной модели нулевого приближения» необходимо использовать априорную информацию. В качестве таковой мы использовали данные по десяти опорным сейсмическим геотраверсам ГСЗ метода обменных волн землетрясений (МОВЗ), проходящим по территории Южного, Среднего и Северного Урала. Это профили Баженовской геофизической экспедиции ПГО «Уралгеология» при частичном участии Института геофизики (ИГФ) УрО РАН: Вижай – Орск, Тараташский, Свердловский, Гранит, Красноуральский, Ханты-Мансийский, Красноленинский, Северная Сосьва – Ялуторовск; геотраверсы Центра региональных геофизических и геоэкологических исследований имени В.В. Федынского (Центра «ГЕОН»): Рубин-2, Рубин-1 (рис. 1). Сейсмический материал был переобработан с помощью метода двумерной сейсмической томографии и построены градиентные скоростные разрезы земной коры в формате сеточных функций (двумерные модели распределения сейсмических скоростей) до глубины 80 км с однородной мантией. Затем для коэффициентов имеющейся обобщенной для Уральского региона эмпирической зависимости «скорость – плотность» определялись небольшие поправки, учет которых для профиля при пересчете скоростной модели в плотностную минимизировал бы невязку наблюдаемого гравитационного поля и поля модели. Наконец, однородная мантия в двумерной плотностной модели разбивалась вертикальными границами на блоки, латеральные координаты границ и плотности получившихся блоков подобраны с таким расчетом, чтобы выполнялось условие изостатической компенсации на глубине 80 км.

Получившиеся вдоль профилей двумерные плотностные модели собирались в единое трехмерное пространство следующим образом: каждая точка двумерной модели имеет координату – глубину, которая равна глубине этой точки в трехмерной пространстве относительно референц-поверхности, и координату – расстояние вдоль профиля, по которому, зная «траекторию» прохождения профиля по латерали в градусных координатах, можно однозначно установить широту и долготу ортогональной проекции точки на референц-поверхность. С использованием проекции Гаусса – Крюгера все множество точек двумерных плотностных моделей преобразовано в единые трехмерные декартовы координаты. Трехмерная плотностная модель исследуемой территории построена в единых координатах Гаусса – Крюгера на равномерной сетке с шагом дискретизации, равным 500 м, по всем координатам. Для каждой дискретной отсечки разбиения модели по глубине из всего множества точек двумерных плотностных моделей выбирались точки, лежащие на соответствующей горизонтальной секущей плоскости. Между этими точками в плоскости выполнена интерполяция и, если нужно, экстраполяция на XY-сетку разбиения модели по следующей схеме. Проведена триангуляция с линейной интерполяцией на сетку с шагом $2,5 \text{ км} \times 2,5 \text{ км}$. Полученное множество точек добавлялось к исходным точкам профилей, и по ним проводилась сглаживающая интерполяция с помощью локальной полиномиальной регрессии на целевую сетку $0,5 \text{ км} \times 0,5 \text{ км}$. Такой способ

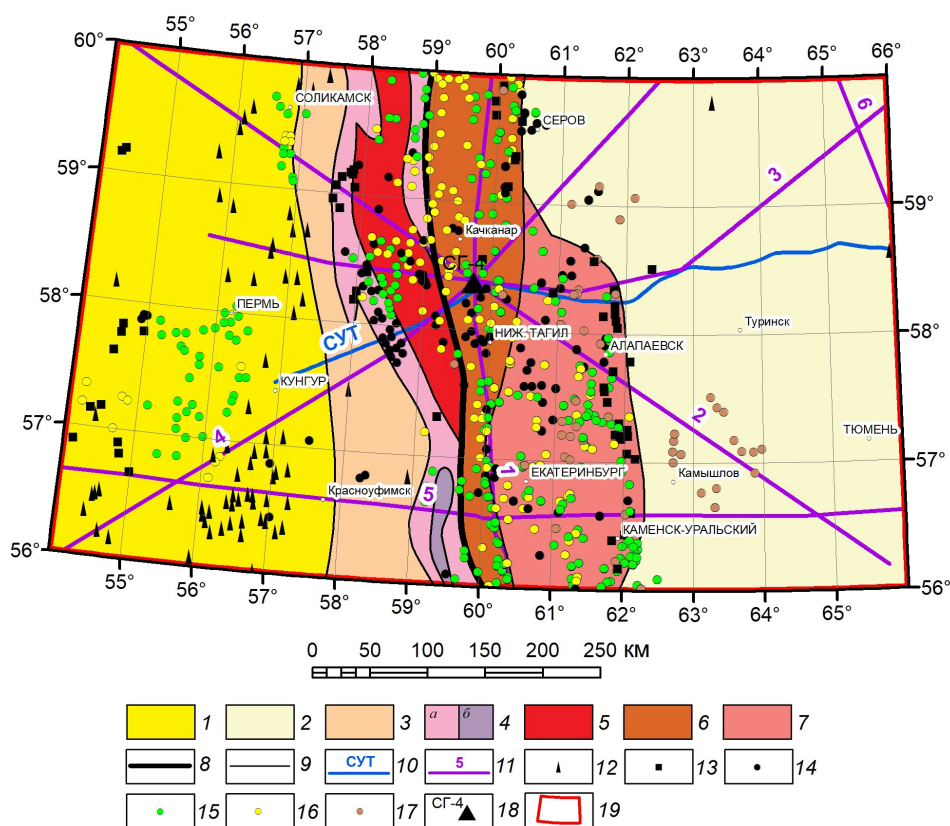


Рис. 1. Положение Средне-Уральского трансекта, профилей ГСЗ и основных месторождений полезных ископаемых на схеме тектонического районирования Урала (Пучков, 2010). Условные обозначения: 1 – чехол Русской платформы; 2 – чехол Западно-Сибирской плиты; 3 – Предуральский краевой прогиб; 4 – Западно-Уральская мегазона: а – Бельско-Елецкая зона, б – Зилаирско-Лемвинская зона; 5 – Центрально-Уральская мегазона; 6 – Тагильско-Магнитогорская мегазона; 7 – Восточно-Уральская мегазона; 8 – Главный Уральский разлом; 9 – границы мегазон и разломы; 10 – линия Средне-Уральского трансекта; 11 – геотранверсы и профили ГСЗ: 1 – Вижай – Орск, 2 – Рубин-1, 3 – Красноуральский – Ханты-Мансийский, 4 – Гранит (Рубин-2), 5 – Свердловский, 6 – Сев. Сосьва – Ялutorовск; 12–17 – месторождения: 12 – углеводородов; 13 – углей; 14 – черных металлов; 15 – цветных металлов; 16 – благородных металлов; 17 – радиоактивных элементов; 18 – Уральская сверхглубокая скважина СГ-4; 19 – контур территории исследований

позволяет избежать скачков плотности при переходе через границы профилей и ложных экстремумов, свойственных локальным полиномам. За пределами выпуклой оболочки множества точек профилей такой способ не подходит, в этом случае лучше использовать метод обратных расстояний (из пакета Golden Software Surfer). Построенная таким способом трехмерная модель интерполированной плотности использована нами в качестве модели начального приближения при решении линейной обратной задачи.

Модель начального приближения строилась так, чтобы наиболее полно учесть априорную информацию, при этом невязка наблюдаемого и модельного полей была достаточно большой. Для сохранения содержательной морфологии модели в дальнейшем мы подбирали слабо отклоняющуюся от нуля добавку к распределению плотности начальной модели, которая уменьшала относительную невязку полей до заданной величины, равной 0,5%. В нашей методике основу решения указанной задачи гравитационного моделирования составляет процесс разделения по глубине остаточных аномалий (разности наблюдаемого поля и поля модели начального приближения). Классический способ разделения полей включает спектральную фильтрацию с последующим аналитическим продолжением разделенных аномалий (Сербуленко, 1966). Мы использовали собственный способ (Martyshko et al., 2021), краткое

описание которого дано ниже. Считаем, что исходное разделяемое поле $g(x, y, 0)$ задано на плоскости $z = 0$. Общая схема метода выделения эффекта источников в слое от земной поверхности до некоторой глубины $z = -H$ состоит из трех этапов.

1. По формуле Пуассона поле аналитически продолжаем вверх на уровень $z = H$:

$$g(x, y, 0) \xrightarrow{\text{up}(H)} g(x, y, H) = \frac{H}{2\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\xi, \eta, 0) d\xi d\eta}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + H^2)^{3/2}}$$

при этом предполагаем, что влияние локальных приповерхностных источников (до глубины $z = -H$) если и не устраняется совсем, то значительно ослабевает.

2. Для того чтобы «избавиться» от влияния локальных источников, находящихся в горизонтальном слое от дневной поверхности $z = 0$ до глубины $z = -H$, пересчитанное вверх поле $g(x, y, H)$ затем аналитически продолжаем вниз на глубину $z = -H$: $g(x, y, H) \xrightarrow{\text{down}(2H, k)} u(x, y, -H | (-\infty, -H])$, решая двумерное интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода:

$$\frac{H}{\pi} \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(\xi, \eta, -H) d\xi d\eta}{((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + 4H^2)^{3/2}} = g(x, y, H)$$

При этом, поскольку задача относится к классу некорректно поставленных, необходимо использовать методы с применением регуляризации, k в формуле $\text{down}(2H, k)$

есть параметр регуляризации. Полученное поле можно рассматривать как поле от источников, расположенных ниже границы $z = -H$, заданное на плоскости $z = -H$.

3. На последнем шаге пересчитываем поле $u(x, y, -H)$ ($-\infty, -H$) вновь вверх на уровень дневной поверхности $z = 0$: $u(x, y, -H) \xrightarrow{\text{up}(H)} u(x, y, 0) | (-\infty, -H)$. Полученное поле можно рассматривать как поле от источников, расположенных ниже границы $z = -H$, заданное на плоскости $z = 0$. Далее вычитаем это поле из исходного и получаем поле от слоя $z \in (-H, 0]$: $u(x, y, 0) | (-H, 0] = g(x, y, 0) - u(x, y, 0) | (-\infty, -H)$.

Рассмотрим предложенный способ выделения из общего наблюдаемого поля $g(x, y, 0)$ гравитационного эффекта $u(x, y, 0) | (-\infty, -H)$ источников в пространстве ниже некоторой глубины $z = -H < 0$: $g(x, y, 0) \xrightarrow{\text{up}(H)} g(x, y, H) \xrightarrow{\text{down}(2H, k)} u(x, y, -H) | (-\infty, -H) \xrightarrow{\text{up}(H)} u(x, y, 0) | (-\infty, -H)$. Считаем, что $g(x, y, 0)$ является кусочно-постоянной функцией. Если бы операции $\text{up}(H)$ и $\text{down}(H, 0)$ производились аналитически точно, то в результате мы имели бы $u(x, y, 0) | (-\infty, -H) \equiv g(x, y, 0)$. Если стремиться к наибольшей точности при реализации схемы пересчетов с использованием аналитического продолжения гармонических функций, то не удастся получить никакого разделения полей. Собственно, для целей разделения в операцию $\text{down}(H, k)$ и была введена формальная регуляризация.

Результат $u(x, y, 0) | (-\infty, -H)$ трехэтапной схемы пересчетов непрерывно зависит от параметра регуляризации k , кроме того, чем больше k , тем он более сглаженный (а в пределе – константа). Пусть мы разделяем наблюдаемое поле $g(x, y, 0)$ по L горизонтальным слоям с интервалами глубин $((-H_{i+1}, -H_i))_{i=0}^{L-1}$ и принимаем $u(x, y, 0) | (-H_{i+1}, -H_i) = u(x, y, 0) | (-\infty, -H_{i+1})$ в качестве поля этого слоя, при этом поля $u(x, y, 0) | (-\infty, -H_i)$ получены с использованием регуляризаторов k_i , за исключением $u(x, y, 0) | (-\infty, -H_0) \equiv g(x, y, 0)$, $H_0 = 0$, $k_0 = 0$. Если мы считаем, что все наблюдаемое поле обеспечивается массами в слое $(-H_L, 0]$, то нужно обеспечить $u(x, y, 0) | (-\infty, -H_L) \approx u_a = \text{const}$, выбирая k_L достаточно большим. Следовательно, для выполнения условия «непрерывной» стыковки разделенных полей $u(x, y, 0) | (-H_{i+1}, -H_i)$ соседних слоев требуется выбирать k_i между $k_0 = 0$ и k_L без скачков от k_{i-1} к k_i . Возрастание с глубиной k_i приводит к последовательности разделенных полей в соответствие с физическим смыслом: чем больше глубина залегания слоя, тем более «сглажено» поле от него на дневной поверхности. Конечно, существует бесконечно много вариантов «непрерывных» последовательностей k_i , причем эти варианты могут давать принципиально разные результаты пересчетов и, соответственно, плотностные модели, но именно в этом и проявляется неединственность решения линейной обратной задачи гравиметрии. Выбор одного из вариантов определяется исследователем-интерпретатором, как правило, такой выбор носит субъективный характер. Преимущество же состоит в том, что малые изменения последовательности k_i вызывают малые изменения разделенных полей и результирующей плотностной модели. Таким образом, параметр k используется в пересчетах не только для регуляризации, но и как непрерывный сглаживающий фактор.

Наконец, последний этап методики гравитационного моделирования состоит в решении линейной обратной задачи гравиметрии независимо для каждой пары: горизонтальный слой модели в границах $(-H_{i+1}, -H_i)$ – разделенное разностное поле $u(x, y, 0) | (-H_{i+1}, -H_i)$, соответствующее этому слою; при условии, что искомая добавка $\rho(x, y) | (-H_{i+1}, -H_i)$ к распределению плотности начальной модели в слое не зависит от глубины z . Задача сводится к решению двумерного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\gamma \int_{S_{xy}} \rho(x, y) | (-H_{i+1}, -H_i) K(x, y, \xi, \eta, 0) | (-H_{i+1}, -H_i) dx dy = u(\xi, \eta, 0) | (-H_{i+1}, -H_i),$$

$$K(x, y, \xi, \eta, \zeta) | (-H_{i+1}, -H_i) = \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (H_i + \zeta)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (H_{i+1} + \zeta)^2}}$$

где γ – гравитационная постоянная, S_{xy} – проекция моделируемой области на координатную плоскость Oxy . В такой постановке задача считается корректно поставленной (Новоселицкий, 1965): ее решение единственно и устойчиво зависит от входных данных. Подробное описание итерационной схемы решения уравнения дано в работе (Martyshko et al., 2018). Так как в настоящей работе шаг дискретизации модели по глубине выбран равным 0,5 км, отсчеты для разделения поля по глубине устанавливали по формуле $H_i = 0,5i$ км.

Для исключения краевых эффектов, возникающих при работе фильтра разделения источников и при решении линейной обратной задачи гравиметрии, мы проводили всю процедуру построения плотностной модели, представленную в (Martyshko et al., 2018), в латеральных границах, отстоящих от целевых координатных границ 56–60° с. ш., 54–66° в. д. на 100 ячеек сетки (на 50 км) во все стороны. За пределами контура мы «аналитически» продолжали (т.е. учитывали в формулах как еще одно фиксированное слагаемое) пространство модели массами с плотностью, зависящей только от глубины. На каждой глубине плотность бралась равной средней плотности по соответствующему сечению модели начального приближения горизонтальной плоскостью: $\sigma(z) = \frac{1}{\|S_{xy}\|} \int_{S_{xy}} \rho_0(x, y, z) dx dy$, где $\rho_0(x, y, z)$ – распределение плотности в модели начального приближения. Таким образом, выборка профилей, интерполяция, фильтр пересчетов поля, решение линейной обратной задачи – все эти этапы проведены в более широких границах, чем описано в (Martyshko et al., 2018), и только в самом конце результаты «обрезались» по целевым границам. Ближе к «расширенным» границам модели, разумеется, наблюдались явные краевые эффекты.

Интерпретация гравитационных данных выполнена с использованием собственных параллельных алгоритмов решения прямой и обратной задач гравиметрии. Эти алгоритмы позволяют в тысячи раз сократить время вычислений на сетках больших размерностей (10^9 точек вычисления).

Метод разделения гравитационного поля от источников на разных глубинах, описанный выше, уже использовался ранее нами для выделения зон разуплотнения в слоях (применительно к нефтегазовой тематике).

Сечение трехмерной плотностной модели по линии Средне-Уральского трансекта

В пределах изучаемой площади были выполнены масштабные комплексные работы на Средне-Уральском трансекте (международное название ESRU – Europrobe Seismic Reflection profiling in the Urals), который представляет собой композитный опорный геолого-геофизический профиль. Географически трансект начинается на западе у г. Кунгур Пермской обл., проходит рядом с г. Кушва и г. Красноуральск в Свердловской обл. и заканчивается на востоке у пос. Куминский в Тюменской обл. (Рыбалка и др., 2006; Рыбалка, 2015).

Одной из задач исследований на Средне-Уральском трансекте являлось построение геолого-геофизического разреза земной коры (до глубин 70–100 км), базой для составления которого, наряду с глубинным сейсмическим разрезом и геологическим разрезом, послужила двумерная плотностная модель. Поэтому линия Средне-Уральского трансекта выбрана нами в качестве опорной для вертикального сечения трехмерной сейсмоплотностной модели, построенной для Средне-Уральского региона. На рис. 2 представлены вертикальное сечение

трехмерной плотностной модели по линии Средне-Уральского трансекта и двумерная плотностная модель по Средне-Уральскому трансекту, построенная в рамках проекта по программе URALIDES.

Линия сечения модели проходит с юго-запада на северо-восток в центральной части исследуемой территории от 57° до 60° в.д. и в субширотном направлении через ее восточную часть от 60° до 66° в.д. и пересекает все главные структуры Уральской складчатой системы. Она начинается на западе в пределах Восточно-Европейской платформы, проходит через Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральскую, Центрально-Уральскую, Тагильско-Магнитогорскую, Восточно-Уральскую и Зауральскую мегазоны. Заметим, что для Уральского региона существует несколько схем тектонического районирования, имеющих различия в названиях, а также порой в границах тектонических структур. Наиболее широко известна схема тектонического районирования под редакцией И.Д. Соболева (Соболев и др., 1986).

На ней, в отличие от перечисленных выше структур, в области Восточно-Уральской мегазоны выделены структуры первого порядка: Восточно-Уральские поднятие и прогиб, Зауральское поднятие, а в пределах Зауральской мегазоны – Тюменско-Кустанайский прогиб. Эти структуры существенно отличаются друг от друга типом и глубинным строением земной коры, историей формирования и развития и, как следствие, разным минерагеническим потенциалом. Основными полезными ископаемыми,

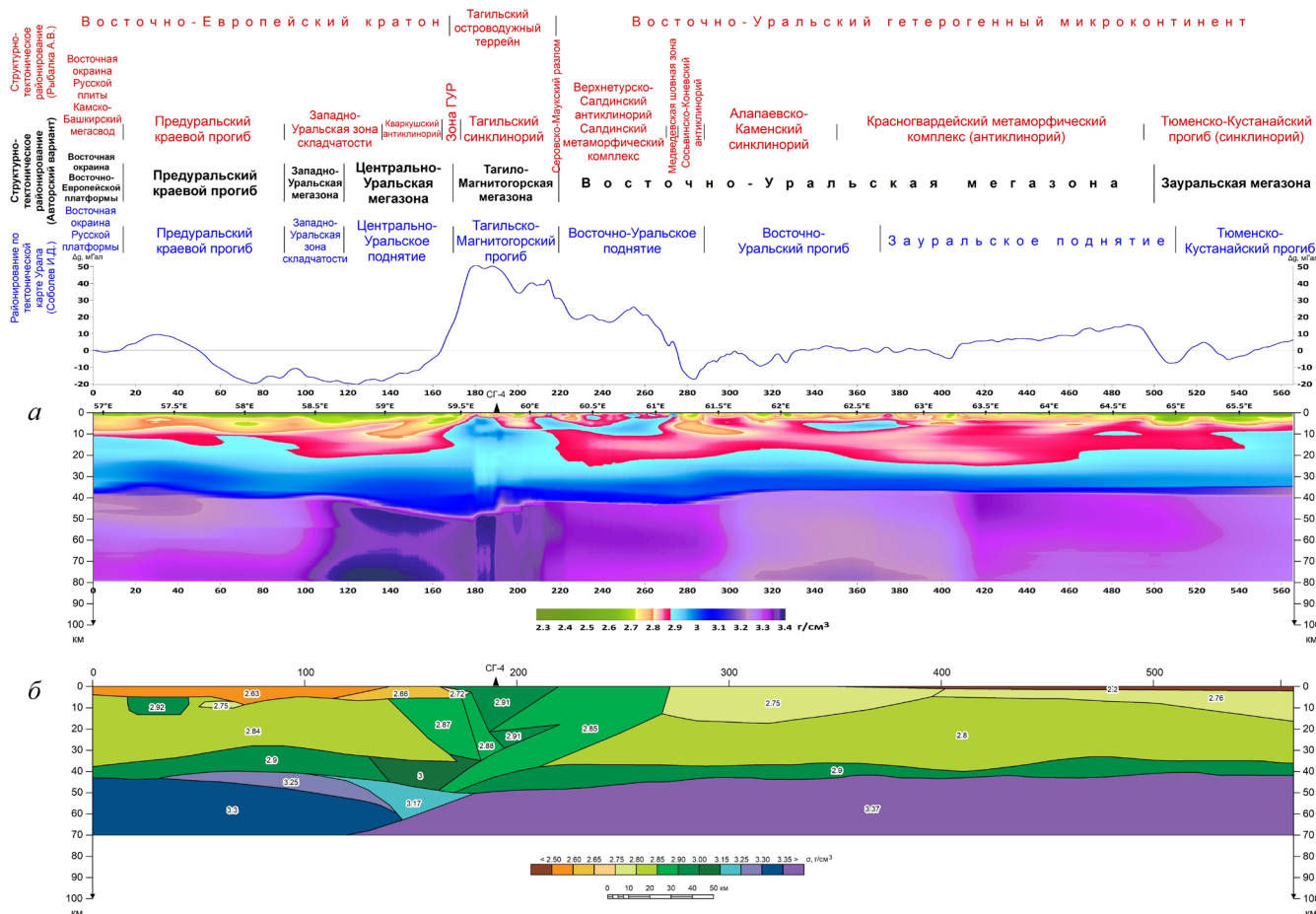


Рис. 2. Плотностные разрезы по Средне-Уральскому трансекту: а – вертикальное сечение трехмерной плотностной модели; б – обобщенная двумерная плотностная модель, построенная в рамках проекта по программе URALIDES (Рыбалка и др., 2006; Рыбалка, 2015)

приуроченными к породам осадочного чехла, в пределах восточной периферии Восточно-Европейской платформы являются нефть и газ. В Предуральском краевом прогибе в пределах исследуемой площади находится уникальное Верхнекамское месторождение натриевых, магниевых и калийных солей, а также месторождения углеводородов. В пределах мегазон Уральской складчатой системы расположены месторождения черных, цветных, редких, благородных металлов и алмазов, неметаллических полезных ископаемых, пресных и минеральных подземных вод. Часть Восточно-Уральской мегазоны и Зауральская мегазона перекрыты мезозойско-кайнозойским чехлом Западно-Сибирской плиты, вмещающим месторождения углеводородного сырья. В исследуемом районе расположены два месторождения нефти и газа: Ерёминское и Карабашское (рис. 1) (Геология и полезные ископаемые России, 2011; Водолазская и др., 2015; Петров и др., 2011).

В Уральской складчатой системе отчетливо выделяется основная структура – Тагило-Магнитогорская мегазона, представляющая собой тектонически переработанный фрагмент сложнопостроенного палеоостроводужного сооружения. В ее основании предполагается наличие реликтов сильнометаморфизованных раннепалеозойских офиолитов океанического типа, которые перекрыты позднеордовикскими офиолитами островодужного типа и вулканогенно-осадочными сериями силурийского и раннедевонского возраста. Не исключено, что в фундаменте палеоостроводужного разреза присутствуют блоки допалеозойской коры (Рыбалка и др., 2006; Пучков, 2010).

На представленном вертикальном сечении трехмерной плотностной модели, как и в разрезе по Средне-Уральскому трансекту, Тагило-Магнитогорская мегазона характеризуется следующими чертами глубинного строения: в пределах соответствующего ей блока наблюдается значительное повышение основности коры и сокращение мощности ее верхнего слоя, особенно в западной части зоны. Увеличение мощности всей коры и ее нижнего слоя выявлено, в отличие от сейсмогеологических разрезов, по Средне-Уральскому трансекту, по Граниту, по Красноуральскому и другим уральским профилям ГСЗ только в пределах «корней гор», т.е. в Центрально-Уральской мегазоне и в западной части Тагило-Магнитогорской мегазоны, где мощность коры увеличивается до 50 км. В ее центральной части, в районе скважины СГ-4, согласно нашей модели, происходит резкий подъем границы Мохо и мощность коры уменьшается до 40 км, соответственно, уменьшается и мощность нижнекорового слоя. Коромантийный слой в сейсмотомографических скоростных разрезах, на базе которых построена трехмерная плотностная модель, не выделяется, а граница Мохо соответствует по глубине границе коромантийного слоя на трансекте в этой части разреза. Значения плотности пород коры в Тагило-Магнитогорской мегазоне варьируют в диапазоне от 2,80 до 3,05 г/см³. Тектонические структуры, ограничивающие мегазону: Главный Уральский глубинный разлом с запада и Серовско-Маукский разлом с востока – в сечении трехмерной плотностной модели проявлены в виде межблоковых зон с контрастным изменением плотностей. Особое место в западной части мегазоны, вблизи Главного Уральского разлома, занимает Платиноносный

пояс, состоящий из вытянутых асимметричных массивов, сложенных дунитами, расслоенным габбро-гипербазитовым комплексом, полосчатыми габброидами, а также габбро-норитами и плагиигранитами, с которым связаны месторождения полезных ископаемых, в частности железа, ванадия, меди, платиноидов (Геология и полезные ископаемые России, 2011). В обеих плотностных моделях Платиноносный пояс представлен в виде объектов повышенной плотности (до 2,95 г/см³ и больше) в верхней части разрезов до глубины 15–20 км. В физических полях Тагило-Магнитогорской мегазоны соответствуют субмеридиональные линейные гравитационные максимумы. Вдоль западной ее границы отмечены самая контрастная по скорости и плотности межблоковая зона и самая напряженная часть поля силы тяжести – Уральский супермаксимум.

Западная часть линии сечения пересекает фрагмент Восточно-Европейской платформы, в строении которого участвуют кристаллический фундамент (архейско-нижнепротерозойские метаморфические комплексы с предполагаемыми интрузиями рифейских габбро и гранитов), авлакогены, выполненные предположительно ниже- и среднерифейскими терригенными и карбонатными осадками, а также осадочный чехол вендско-пермского возраста. Далее линия сечения проходит через следующие структуры: Предуральский краевой прогиб, возникший в пермское время и заполненный флишем; Западно-Уральскую мегазону, где на поверхности проявляются шельфовые и батинальные палеозойские комплексы, смятые в позднепалеозойское время; Центрально-Уральскую мегазону, где на поверхности преобладают докембрийские комплексы. Эти зоны подстилаются комплексами докембрийского кристаллического основания и в палеозойском структурном плане соответствуют палеоконтинентальному сектору Урала. По глубинному строению и формированию литосферы они имеют больше общих черт с Восточно-Европейской платформой, чем с остальными уральскими мегазонами (Пучков, 2010). В пределах тектонических структур западной части исследуемой территории в вертикальном сечении трехмерной плотностной модели происходит изменение мощностей осадочного чехла (от 2 до 6 км), верхнекоровых (от 8 до 20 км), среднекоровых (от 8 до 16 км) и нижнекоровых (от 10 до 20 км в области орогена) пород в направлении с запада на восток. Мощность осадочного слоя имеет наибольшие значения в пределах Западно-Уральской мегазоны. Наблюдается резкое увеличение мощности верхней коры в пределах Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазон. На представленной двумерной плотностной модели по Средне-Уральскому трансекту верхняя и средняя кора объединены в один слой, мощность которого меняется вдоль профиля, а среднее значение плотности остается постоянным. Выделяется только нижнекоровый слой повышенной плотности, положение и мощность которого в основном соответствуют параметрам подобного слоя в трехмерной модели. Граница Мохо в сечении трехмерной плотностной модели постепенно погружается с глубины 40 км в Западно-Уральской мегазоне до глубины 50 км в Тагило-Магнитогорской. На разрезе по Средне-Уральскому трансекту ей полностью соответствует по глубинам граница коромантийного слоя,

наибольшее погружение которой наблюдается под зоной Главного Уральского разлома (рис. 2).

Линия сечения трехмерной плотностной модели пересекает восточную окраину Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, проходит в стороне от разрабатываемых месторождений нефти и газа, «задевая» только в районе восточного склона Предуральского прогиба локальные структуры, перспективные на поиски месторождений углеводородов (Водолазская и др., 2015). В сечении трехмерной плотностной модели в земной коре и верхней мантии в пределах этих участков (85–100 км) наблюдается контакт блоков, имеющих разные сейсмоденситивные характеристики.

В восточной части исследуемой площади линия вертикального сечения трехмерной плотностной модели пересекает Восточно-Уральскую и Зауральскую мегазоны. Обе зоны развиты на архейско-протерозойской континентальной коре, регенерированной и переработанной в палеозое. Их кора отличается от континентальной коры мегазон западной части Урала прежде всего контрастным дифференцированным строением, что связано с разной направленностью и интенсивностью переработки вещества коры в разных зонах. В Восточно-Уральской мегазоне чередуются зоны антиклинорного и синклинорного строения, разделенные разломами. В блоках антиклинорного строения, в наиболее приподнятых их частях, обнажены образования раннего протерозоя и рифея, представленные гнейсами, кристаллическими сланцами, амфиболитами, кварцитами. В синклинорных зонах развиты вулканогенные и терригенно-карбонатные толщи среднего девона – карбона, по формационной принадлежности аналогичные породам Тагило-Магнитогорской мегазоны. В поднятых блоках размещены наиболее крупные на Урале плутоны гранитов, гранодиоритов, монцодиоритов, гранито-гнейсов среднего карбона – перми (главная гранитная ось Урала), а вдоль границ блоков или в аллохтоне на них залегают тела серпентинитов (Геология и полезные ископаемые России, 2011). Большая часть мегазоны в исследуемом районе перекрыта мезозойско-кайнозойскими толщами чехла Западно-Сибирской плиты, содержащими месторождения и проявления углеводородного сырья. На сечении трехмерной плотностной модели осадочный чехол проявляется восточнее 62° в.д. Его мощность увеличивается до первых километров в восточной части территории. Мощность пород всех подразделений консолидированной коры относительно выдержана в пределах всей мегазоны и составляет порядка 15–25 км для пород верхней коры, 5–15 км для пород средней коры и 7–12 км для пород нижней коры. Граница Мохо проходит на глубине 35–40 км, что несколько выше, чем на разрезе по Средне-Уральскому трансекту. В пределах блока, соответствующего Зауральской мегазоне, наблюдается резкое уменьшение мощности верхней коры до 5–7 км.

Общей характерной особенностью анализируемых моделей является уникальный тяжелый блок земной коры, соответствующий Тагило-Магнитогорской мегазоне и разделяющий обе модели на западную и восточную части, которые отличаются одна от другой и по плотности, и по структурным особенностям.

Другая общая особенность двух плотностных моделей – это наличие «корней гор», т.е. утолщение земной коры

и прогиб границы Мохо в области орогена от 40 до 50 км в сечении трехмерной модели, что соответствует такому же прогибу (от 40 до 50 км) поверхности коромантийного слоя в модели по Средне-Уральскому трансекту. Граница Мохо в этой модели опускается от 40 до 60 км с резким подъемом до 50 км и одновременным выклиниванием коромантийного слоя в области Главного Уральского разлома. Далее на восток граница Мохо в модели по трансекту постепенно поднимается от 50 до 45 км в районе Медведевской шовной зоны (отметка 280 км). В сечении трехмерной модели наблюдается резкий подъем границы Мохо от 48–50 до 40 км в районе СГ-4 (отметка 190 км), т.е. на 90 км западнее. В этом заключается отличие двух моделей. Такой же подъем границы Мохо в районе СГ-4 выявлен на сейсмотомографических скоростных разрезах по профилям Гранит, Красноуральский, Рубин 1 и Рубин 2, которые пересекаются в одной точке, соответствующей местоположению сверхглубокой скважины.

Существенное отличие моделей заключается и в том, что в модели по трансекту плотность земной коры в области Западно-Уральской зоны сопоставима с плотностью коры в Предуральском прогибе, а в зоне Центрально-Уральской мегазоны даже повышена, в трехмерной модели же, наоборот: земная кора в области Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазон – самая низкоплотностная, чем резко отличается от коры и Предуральского, и Тагильского прогибов. Границами между этими структурами являются контактные зоны блоков, имеющих разные сейсмоденситивные характеристики, информация о которых важна для сейсмического и минерагенического прогнозирования.

Отличие моделей выявлено также в оценке значений плотностных параметров верхней мантии. В модели по трансекту мантия в западной части профиля, включающей Предуральский прогиб, Западно-Уральскую и Центрально-Уральскую мегазоны, характеризуется меньшей плотностью (3,30 г/см³) по сравнению с плотностью восточной части разреза, где, начиная с Тагило-Магнитогорской зоны, она равна 3,37 г/см³. В сечении трехмерной модели самый тяжелый блок в верхней мантии (3,35–3,40 г/см³) соответствует Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазонам, а в восточной части модели плотность верхней мантии не больше 3,30 г/см³.

Заключение

Проведено сопоставление градиентного плотностного разреза, полученного при вертикальном сечении построенной нами трехмерной плотностной модели земной коры и верхней мантии Среднего Урала по линии Средне-Уральского трансекта, с двухмерной плотностной моделью по этому же трансекту, описанной в работах (Рыбалка и др., 2006; Рыбалка, 2015).

В градиентной плотностной модели (рис. 2а) видно хорошее соответствие плотности с разными типами месторождений: нефтегазовые месторождения и месторождения металлов приурочены соответственно к регионам с низкой и высокой плотностями верхней коры.

В целом следует отметить, что сечение трехмерной плотностной модели отражает основные особенности глубинного строения исследуемой территории, представленные в работе (Рыбалка и др., 2006), и дополняет

их новыми данными о распределении физических параметров в земной коре и мантии. Таким образом, можно заключить, что трехмерная плотностная модель, при построении которой учтены геофизические данные, заданные на всей исследуемой области, несет больше информации о строении земной коры, чем двумерные модели.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 20-17-00058).

Литература

Водолазская В.П., Тетерин И.П., Кириллов В.А., Лукьянова Л.И. и др. (2015). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:100 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-40 – Пермь. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 497 с.

Геология и полезные ископаемые России: в 6 т. Т. 1: Запад России и Урал. Кн. 2: Урал. (2011). Ред. О.А. Кондаин СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 584 с.

Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. (2016). Плотностное моделирование земной коры Центральной части Восточно-Европейской платформы. *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*, 29(1), с. 52–63.

Дружинин В.С., Мартышко П.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. (2014). Строение верхней части литосферы и нефтегазоносность недр Уральского региона. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 226 с.

Ладовский И.В., Мартышко П.С., Цидаяев А.Г., Колмогорова В.В., Бызов Д.Д. (2023). Плотностная модель литосферы среднеуральского сегмента. *Физика Земли*, (2), с. 62–77. <https://doi.org/10.31857/S0002333723020084>

Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В., Бызов Д.Д., Цидаяев А.Г. (2016). Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург: УрО РАН, 94 с.

Мартышко П.С., Цидаяев А.Г., Колмогорова В.В., Ладовский И.В., Бызов Д.Д. (2022). Скоростные и плотностные разрезы верхней части литосферы Североуральского сегмента. *Физика Земли*, (3), с. 12–25. <https://doi.org/10.1134/S1069351322030041>

Новоселицкий В.М. (1965). К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести. *Известия АН СССР. Физика Земли*, (5), с. 25–32.

Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Мороз Ю.Ф. (2020). Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка). *Георесурсы*, 22(1), с. 63–72. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>

Петров Г.А., Жиганов А.А., Стефановский В.В., Шалагинов В.В., Петрова Т.А., Овчинников Р.А., Гертман Т.А. (2011). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:100 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 492 с.

Пучков В.Н. (2010). Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.

Рыбалка А.В., Петров Г.А., Кашубин С.Н., Юхлин К. (2006). Среднеуральский трансект ESRU. *Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE*. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, с. 390–401.

Рыбалка А.В. (2015). Сейсмогеологическая модель земной коры Среднего Урала (по материалам Средне-Уральского трансекта): Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 137 с.

Сербуленко М.Г. (1966). Линейные методы разделения потенциальных полей. *Дополнительные главы курса гравиразведки и магниторазведки: лекции, прочитанные студентам-геофизикам НГУ. Под ред. Э.Э. Фотиади*. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, с. 389–457.

Сидоров М.Д., Нурмухамедов А.Г. (2022). Объемное изображение плотностной модели земной коры на примере южной камчатки. *Геология и геофизика*, 63(10), с. 1433–1452. <https://doi.org/10.15372/GiG2021155>

Соболев И.Д., Автонеев С.В., Белковская Р.П., Петрова Т.Ю., Сюткина Р.А. (1986). Тектоническая карта Урала масштаба 1:1000 000 (объяснительная записка). Свердловск: Уралгеология, 168 с.

Шаров Н.В., Бакунович Л.И., Белашев Б.З., Журавлев В.А., Нилов М.Ю. (2020). Геолого-геофизические модели земной коры Беломорья. *Геодинамика и тектонофизика*, 11(3), с. 566–582. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0491>

Martyshko P.S., Ladovskii I.V., Byzov D.D., Tsidaev A.G. (2018). Gravity Data Inversion with Method of Local Corrections for Finite Elements Models. *Geosciences*, 8(10), 373. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100373>

Martyshko P., Ladovskii I., Byzov D. (2021). Parallel algorithms for solving inverse gravimetry problems: Application for Earth's crust density models creation. *Mathematics*, 9(22), 2966. <https://doi.org/10.3390/math9222966>

Сведения об авторах

Петр Сергеевич Мартышко – член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100 e-mail: pmart3@mail.ru

Денис Дмитриевич Бызов – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100 e-mail: ivanov389@gmail.com

Анастасия Юрьевна Осипова – кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100 e-mail: seismolab@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2024;
Принята к публикации 02.08.2024; Опубликована 20.12.2024

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Model of the Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle Along the Middle Ural Transect (Based on the Results of Volumetric Seismic Density Modeling)

P.S. Martyshko*, D.D. Byzov, A.Yu. Osipova

¹Bulashevich Institute of Geophysics of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

*Corresponding author: Petr S. Martyshko, e-mail: pmart3@mail.ru

Abstract. A geological and geophysical model of the structure of the earth's crust and upper mantle along the Middle Ural transect is presented (as a vertical section of a three-dimensional seismic density model). The methodology

for constructing a 3D density model of the earth's crust and upper mantle for the Middle Urals is outlined. The model was created based on the results of interpretation of gravity anomalies in the Bouguer reduction and deep seismic sounding

data. Creating a volumetric one consists of several stages. At the first stage, gradient velocity sections were constructed in the format of grid functions (2D models of seismic velocity distribution) to a depth of 80 km, which were converted into density ones using refined formulas. Next, a three-dimensional zero-approximation density model is constructed (using interpolation methods) and the difference between the observed gravitational field and the field of this model is calculated. For the difference field, the inverse problem is solved - the density values at the nodes of the computational grid are determined, which need to be added to the zero-approximation model in order to satisfy the observed field. A comparison is made of the gradient density section obtained by a vertical section of the author's volumetric density model of the earth's crust and upper mantle of the Middle Urals along the line of the Middle Ural transect, with a density model created on the basis of a two-dimensional interpretation along this transect (according to the EUROPROBE program). The cross-section of the volumetric density model reflects the main features of the deep structure of the study area, presented in the two-dimensional model, and supplements them with new data on the distribution of physical parameters in the earth's crust and mantle. This illustrates the fact that a three-dimensional density model, the construction of which takes into account geophysical data specified over the entire study area, carries more information about the structure of the earth's crust than two-dimensional models.

Keywords: construction of a density model, geological and geophysical section of the Earth's crust

Recommended citation: Martyshko P.S., Byzov D.D., Osipova A.Yu. (2024). Model of the Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle Along the Middle Ural Transect (Based on the Results of Volumetric Seismic Density Modeling). *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp. 144–152. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.3>

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 20-17-00058).

References

- Druzhinin V.S., Martyshko P.S., Nachapkin N.I., Osipov V.Yu. (2014). The structure of the upper part of the lithosphere and the oil and gas content of the subsoil of the Ural region. Yekaterinburg: IGF UrO RAN, 226 p. (In Russ.)
- Geology and minerals of Russia (2011). V. 1: West of Russia and the Urals. Book 2: Ural. Ed. O.A. Kondiayn. St. Petersburg: VSEGEI Publ., 553 p. (In Russ.)
- Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. (2016). Density modeling of the Earth's crust of the Central part of the East European Platform. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o zemle*, 29(1), pp. 52–63. (In Russ.)
- Ladovskii I.V., Martyshko P.S., Tsidaev A.G., Kolmogorova V.V., Byzov D.D. (2023). Lithosphere Density Model of the Middle Urals Segment. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 59(2), pp. 160–174. <https://doi.org/10.1134/S1069351323020088>
- Martyshko P.S., Ladovskii I.V., Fedorova N.V., Byzov D.D., Tsidaev A.G. (2016). Theory and methods of integrated interpretation of geophysical data. Yekaterinburg: IGF UrO RAN, 94 p. (In Russ.)
- Martyshko P.S., Ladovskii I.V., Byzov D.D., Tsidaev A.G. (2018). Gravity Data Inversion with Method of Local Corrections for Finite Elements Models. *Geosciences*, 8(10), 373. <https://doi.org/10.3390/geosciences8100373>
- Martyshko P., Ladovskii I., Byzov D. (2021). Parallel algorithms for solving inverse gravimetry problems: Application for Earth's crust density models creation. *Mathematics*, 9(22), 2966. <https://doi.org/10.3390/math9222966>
- Martyshko P.S., Tsidaev A.G., Kolmogorova V.V., Ladovskii I.V., Byzov D.D. (2022). Velocity and density cross sections of the upper part of the

lithosphere within the north Urals segment. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 58(3), pp. 306–317. <https://doi.org/10.1134/S1069351322030041>

Novoselitskiy V.M. (1965). On the theory of determining changes in density in a horizontal reservoir using gravity anomalies. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli*, 5, pp. 25–32. (In Russ.)

Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D., Moroz Yu.F. (2020). Model of the deep structure of the earth's crust and upper mantle in the area of the Karymshinsky gold ore cluster based on geophysical data (Southern Kamchatka). *Georesursy = Georesources*, 22(1), pp. 63–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>

Petrov G.A., Zhiganov A.A., Stefanovskiy V.V., Shalaginov V.V., Petrova T.A., Ovchinnikov R.A., Gertman T.A. (2011). State geological map of the Russian Federation. Scale 1:100000 (third generation). Ural series. Sheet O-41 – Yekaterinburg. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 492 p. (In Russ.)

Puchkov V.N. (2010). Geology of the Urals and the PreUrals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa, 279 p. (In Russ.)

Rybalka A.V., Petrov G.A., Kashubin S.N., Yukhlin K. (2006). Middle Ural transect ESRU. Structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe. Results of research under the EUROPROBE program. Moscow: GEOKART: GEOS, pp. 390–401. (In Russ.)

Rybalka A.V. (2015). Seismogeological model of the earth's crust of the Middle Urals (based on materials from the Middle Ural transect). Cand. geol. and min. sci. diss. Yekaterinburg: USGU, 137 p. (In Russ.)

Serbulenko M.G. (1966). Linear methods for separating potential fields. Gravity and magnetic prospecting course (special chapters). Ed. E.E. Fotiadi. Novosibirsk, pp. 389–457. (In Russ.)

Sharov N.V., Bakunovich L.I., Belashev B.Z., Zhuravlev V.A., Nilov M.Yu. (2020). Geological-geophysical models of the crust for the White Sea region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(3), pp. 566–582. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0491>

Sidorov M.D., Nurmukhamedov A.G. (2022). Three-dimensional image of crustal density model: a case study in South Kamchatka. *Russian geology and geophysics*, 63(10), pp. 1189–1206. <https://doi.org/10.2113/rgg20204328>

Sobolev I.D., Avtoneev S.V., Belkovskaya R.P., Petrova T.Yu., Syutkina R.A. (1986). Tectonic map of the Urals, scale 1:1000000 (explanatory note). Sverdlovsk: Uralgeology, 168 p. (In Russ.)

Vodolazskaya V.P., Teterin I.P., Kirillov V.A., Luk'yanova L.I. et al. (2015). State geological map of the Russian Federation. Scale 1:100000 (third generation). Ural series. Sheet O-40 – Perm. Explanatory letter. SPb.: VSEGEI Cartographic Factory, 497 p. (In Russ.)

About the Authors

Petr S. Martyshko – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen st., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

e-mail: pmart3@mail.ru

Denis D. Byzov – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen St., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

e-mail: ivanov389@gmail.com

Anastasiya Yu. Osipova – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

100 Amundsen St., Yekaterinburg, 620016, Russian Federation

e-mail: seismolab@mail.ru

Manuscript received 22 May 2024;

Accepted 2 August 2024; Published 20 December 2024

© 2024 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)