

ТРЕХМЕРНАЯ ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ КОРЫ В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ЛОСЕВСКОГО И ВОРОНЦОВСКОГО ТЕРРЕЙНОВ (ВОРОНЕЖСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАССИВ)

© 2022 О.М. Муравина¹, В.Н. Глазнев^{1,2}, Т.А. Воронова¹, Р.А. Терентьев¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018

²Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, Россия, 184209;
e-mail: muravina@geol.vsu.ru

Поступила в редакцию 27.07.2022 г.; после доработки 22.08.2022 г.; принята к публикации 26.09.2022 г.

Рассмотрены результаты детального трехмерного плотностного моделирования верхней части земной коры для участка, расположенного в северо-восточной части Воронежского кристаллического массива в области сочленения Лосевского и Воронцовского террейнов. Модель, полученная в результате решения обратной задачи гравиметрии, характеризует распределение плотности пород кристаллического фундамента территории до глубины 16 км. Важная роль в таких построениях отводится стартовой модели изучаемой среды, которая формировалась с учетом имеющейся априорной геолого-геофизической информации для области моделирования: региональной плотностной модели литосферы Восточно-Европейской платформы и соответствующем ей гравитационном поле; данных о плотности пород осадочного чехла и кристаллического фундамента; оценок мощности «гравиактивного» слоя верхней коры; геологической карты кристаллического фундамента; цифровой модели рельефа региона. Трехмерная плотностная модель позволила уточнить геологическое строение верхней коры участка исследования и проследить глубинное продолжение поверхностных структур фундамента. Достоверность полученных результатов определяется непротиворечивостью принятым априорным данным о среде и согласованностью модельного и наблюдаемого гравитационного полей изучаемой территории.

Ключевые слова: строение верхней коры, инверсия гравитационного поля, плотностное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Построение реалистичных детальных плотностных моделей земной коры Воронежского кристаллического массива (ВКМ) стало возможным с получением новой цифровой геолого-геофизической информации для всего региона. Так ранее авторами была создана пространственная цифровая база петрофизических данных, которая послужила основой для построения сводной петроплотностной карты ВКМ (Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2014, 2016). Также была выполнена оценка мощности «гравиактивного» слоя кристаллической коры, основанная на стохастической модели источников локальных аномалий гравитационного поля (Глазнев и др., 2014) и характеризующая наиболее неоднород-

ную по латерали плотностную структуру верхней части фундамента региона. На основе совокупности этих данных, с использованием развитого алгоритма комплексной интерпретации геофизических данных (Глазнев, 2003; Glaznev et al., 2015), была рассчитана региональная трехмерная плотностная модель литосферы центральной части Восточно-Европейской платформы (Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016) и предложена ее возможная геодинамическая трактовка (Минц и др., 2017).

Значительный интерес к изучению области сочленения Лосевского и Воронцовского террейнов (рис. 1) Волго-Донского орогена обусловлен тем, что для этой территории ранее предложены обобщенные модели эволюции литосферы (Минц и др., 2010, 2014; Савко и др., 2017; Чернышов и др., 1997), различающиеся по своему

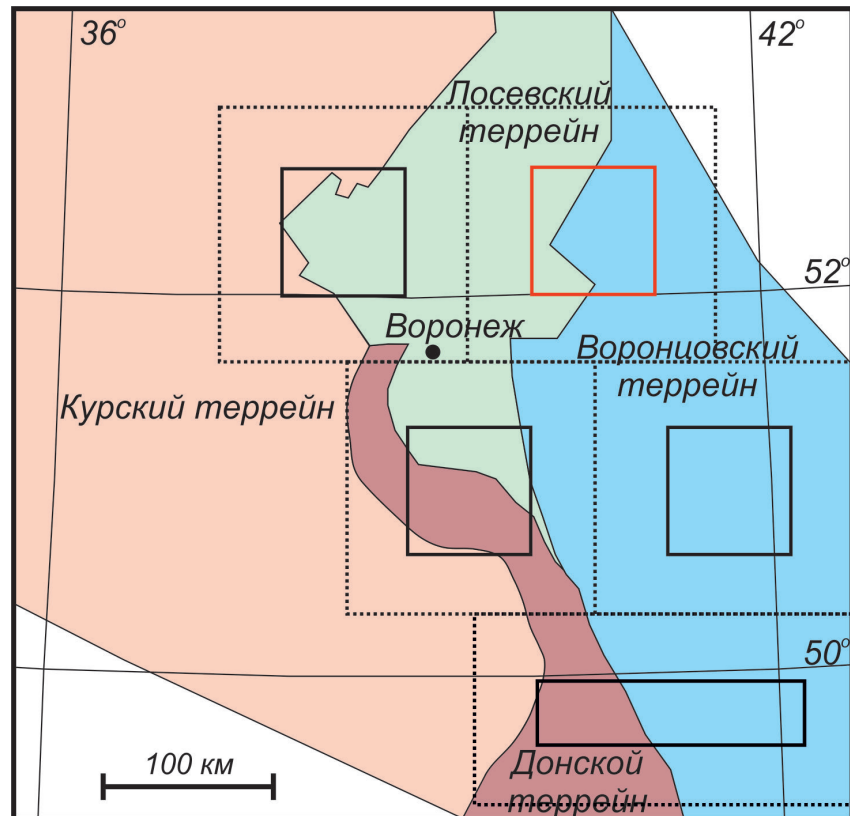


Рис. 1. Схема структурно-тектонического районирования Воронежского кристаллического массива по (Терентьев, Савко, 2017; Terentiev et al., 2016). Прямоугольниками, ограниченными черными сплошными линиями, показаны отработанные ранее участки; красной линией показан — контур участка моделирования; пунктирные линии ограничивают область покрытия исходными данными.

Fig. 1. Scheme of structural-tectonic zoning of the Voronezh crystalline massif according to (Terentiev, Savko, 2017; Terentiev et al., 2016). Rectangles bounded by black solid lines show previously mined areas; the red line shows the contour of the simulation area; dashed lines limit the coverage area with the source data.

геодинамическому наполнению. Отметим, что указанные модели, лишь частично опирающиеся на данные геофизики, по нашему мнению, являются весьма генерализованными и поэтому создание более детальных геофизических моделей земной коры позволит прояснить структурные взаимоотношения главных комплексов пород террейнов Волго-Донского орогена и предложить более адекватные геодинамические модели.

Повышение разрешимости и достоверности результатов моделирования обеспечивается совершенствованием методов интерпретации геофизических полей, использованием больших объемов априорных данных, привлечением всей имеющейся геолого-геофизической информации на стадии трактовки результатов геофизических построений. Эти позиции особенно важны в условиях сложного геологического строения кристаллического фундамента ВКМ и перекрывающего его осадочного чехла (Муравина и др., 2013). Разработанная авторами настоящей работы технология комплексного плотностного моделирования по гравиметрическим данным (Glaznev et al., 2015; Mints et al., 2020), развива-

ющая подход, предложенный ранее в работах (Арзамасцев и др., 1998; Глазнев, 2003), была использована при геофизической интерпретации в условиях платформ и щитов и показала высокую геологическую результативность таких построений (Глазнев и др., 2008, 2019; Воронова и др., 2021; Минц и др., 2018; Berezneva et al., 2021).

Пример реализации трехмерного плотностного моделирования при изучении строения верхней части земной коры в области сочленения Лосевского и Воронежского террейнов Волго-Донского орогена приведен в настоящей работе. Далее последовательно рассмотрим исходные позиции такого моделирования, методические принципы интерпретации гравитационных аномалий, результаты плотностного моделирования и их геологически содержательную трактовку.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Геологические данные. Участок исследования расположен на сочленении Лосевского и Воронежского террейнов, которые характеризуются различными структурно-вещественными ком-

плексами (рис. 1, 2а). Приведенные в настоящей работе значения плотности пород, распространенных в пределах участка моделирования, взяты по данным петроплотностной карты ВКМ (Глазнев и др., 2020).

Воронцовский террейн сложен воронцовской серией нижнего протерозоя, которая представляет собой мощную толщу песчаниково-сланцевых флишеидных отложений (Чернышов и др., 1997). В составе серии выделяют сланцево-метапесчаниковый, углеродисто-сланцевый и карбонатно-метаграувакковый структурно-вещественные комплексы. Породы воронцовской серии занимают большую часть территории участка моделирования и расположены в центральной, северо-восточной и юго-восточной его частях. Плотность пород изменяется от 2560 до 2890 кг/м³.

Породы воронцовской серии прорваны интрузиями бобровского и мамонского комплексов различных размеров и вещественного состава.

Интрузии бобровского комплекса (2050 ± 7 млн лет (Савко и др., 2014)) расположены в центральной и юго-восточной части участка моделирования и представлены несколькими объектами небольших размеров, площадь которых не превышает 10 км². Породы комплекса сложены биотитовыми и двуслюдяными лейкогранитами и гранодиоритами, плотность которых составляет 2610–2710 кг/м³.

Интрузивные тела мамонского комплекса (2068 ± 13 – 2073 ± 8 млн лет (Terentiev et al., 2016a)) распространены в центральной, восточной и северо-восточной частях территории исследования и представляют собой объекты от мелких до крупных размеров различной формы в плане. Образования представлены породами двух фаз внедрения. Интрузии первой фазы сложены серпентинизированными дунистами, перидотитами, пироксенитами, второй фазы — габброидами, диоритами. Плотность пород первой фазы внедрения составляет 2790–3110 кг/м³, второй — 2630–3160 кг/м³.

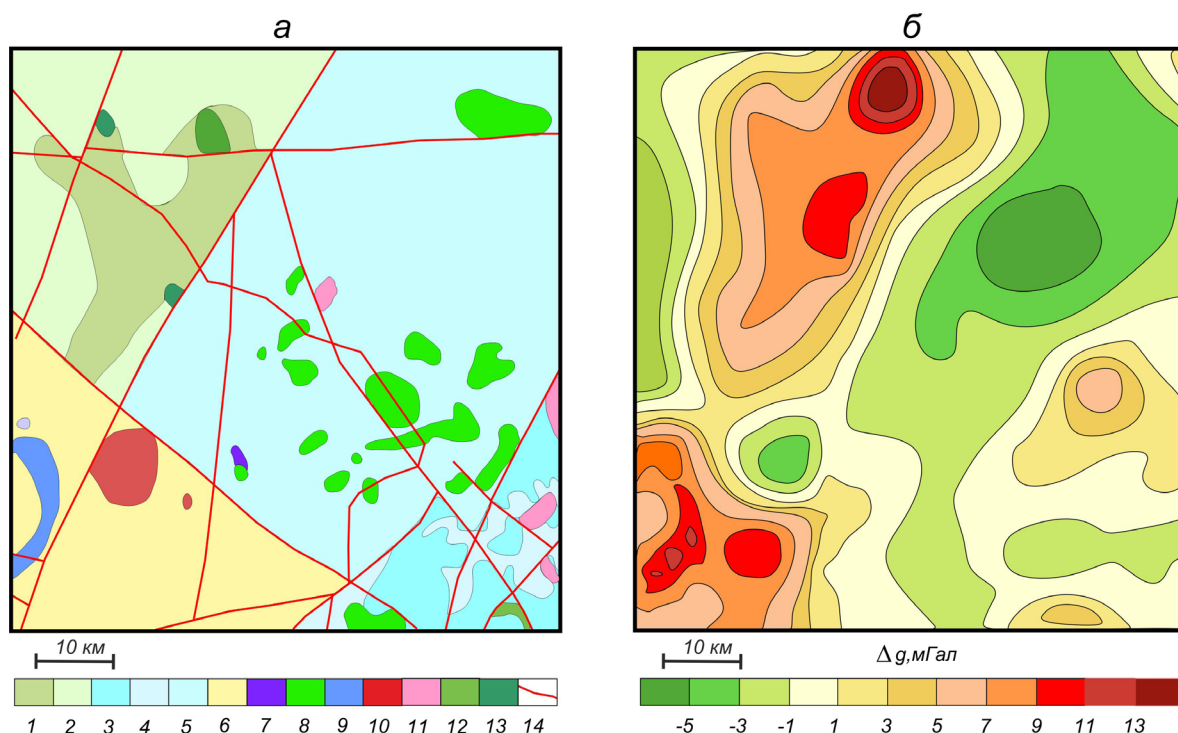


Рис. 2. Исходные данные: а — геологическая схема участка исследования; б — аномальное гравитационное поле участка исследования. 1 — лосевская серия (амфиболиты); 2 — лосевская серия (метаграувакки, метаандезиты, метариолиты); 3 — воронцовская серия (нижняя); 4 — воронцовская серия (верхняя); 5 — воронцовская серия; 6 — воронежская свита; 7 — мамонский комплекс (первая фаза); 8 — мамонский комплекс (вторая фаза); 9 — ольховский комплекс (первая фаза); 10 — ольховский комплекс (вторая фаза); 11 — бобровский комплекс; 12 — новогольский комплекс; 13 — шукавский комплекс; 14 — тектонические нарушения.

Fig. 2. Initial data: а — geological scheme of the study area; б — anomalous gravity field of the study area. 1 — losevskaya series (amphibolites); 2 — Losevskaya series (metagraywackes, metaandesites, metarhyolites); 3 — Vorontsovskaya series (lower); 4 — Vorontsovskaya series (upper); 5 — Vorontsovskaya series; 6 — Voronezhskaya suite; 7 — Mamonsky complex (first phase); 8 — Mamonsky complex (second phase); 9 — Olkhovsky complex (first phase); 10 — Olkhovsky complex (second phase); 11 — Bobrovsky complex; 12 — Novogolsky complex; 13 — Shukavsky complex; 14 — tectonic disturbances.

В юго-восточной части участка исследования фрагментарно расположены интрузии новогольского комплекса (1805 ± 14 млн лет (Чернышов и др., 1997)). Они представляют собой массивы, сложенные преимущественно габбро-долеритами и долерит-пегматитами, плотностью от 2890 до 3070 кг/м³.

Лосевский террейн на территории участка исследования сложен породами нижнего протерозоя (Чернышов и др., 1997). Стратифицированные образования представлены метаморфизованными осадочно-вулканогенными отложениями лосевской серии. Образования лосевской серии территориально приурочены к северо-западной части участка. Наиболее плотные породы представлены метабазами, амфиболитами и ортосланцами основного режа среднего состава, а менее плотные — метаандезитами, метариолитами, метатифами, метагравитками. Плотность пород весьма различна и составляет 2620–2980 кг/м³.

В юго-западной части участка расположена раннепротерозойская воронежская свита, в разрезе которой выделяют (Terentiev et al., 2016b) метаосадки: конгломераты, песчаники, алевролиты, сланцы филлитовидные углеродистые; и вулканические постройки, сложенные вулканитами от основного до кислого состава, их пирокластическими аналогами. Плотность пород изменяется от 2670 до 2970 кг/м³.

Среди пород лосевской серии распространены интрузии рождественского комплекса (2120 ± 11 млн лет (Терентьев, 2013)). Интрузивы представляют собой объекты округлой формы, сложенные габброидами, горнблендитами, пироксенитами, плотность которых изменяется в пределах от 2960 до 3180 кг/м³.

В юго-западной части участка единичными интрузиями небольшого размера, площадью не превышающей 1 км², расположены породы шукавского комплекса. Образования комплекса прорывают образования воронежской свиты и сложены дунитами, верлитами, габбро плотностью 2700–3120 кг/м³.

Ольховский комплекс локализован в области развития образований воронежской свиты и представлен интрузивными телами двух фаз внедрения. Диориты-гранодиориты первой фазы (2070 ± 9 млн лет (Terentiev et al., 2018)) на территории участка исследования являются частью Ольховского кольцевого массива. Лейкограниты второй фазы (2044 ± 13 млн лет (Terentiev et al., 2018)) внедрения представлены одной крупной интрузией, площадью около 65 км², и одной интрузией небольшого размера, примерно 2 км², округлой формы. Плотность пород составляет 2820–2970 кг/м³ и 2570–2750 кг/м³, соответственно.

Региональная плотностная модель. При построении детальных плотностных моделей одной из важных информационных составляющих является региональная плотностная модель, использование данных которой позволяет осуществить переход к избыточным значениям плотности. Региональная трехмерная плотностная модель литосферы была построена для центральной части Восточно-Европейской платформы (Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016; Минц и др., 2017). Эта модель содержит распределение абсолютных значений плотности до глубины 80 км на кровлях и подошвах слоев верхней, средней и нижней коры и верхней мантии.

Петроплотностная карта. Петроплотностная карта фундамента ВКМ (Глазнев и др., 2020; Муравина и др., 2014, 2016; Муравина, Жаворонкин, 2015) создана на основе цифровой петрофизической базы данных, содержащей результаты петрофизических определений образцов керна скважин, пробуренных в различные годы на территории ВКМ. Статистические характеристики плотности привязаны к соответствующим структурно-вещественным комплексам пород кристаллического фундамента.

Мощность «гравиактивного» слоя. Если положение верхней кромки участка детального плотностного моделирования задается в соответствии с глубиной залегания поверхности фундамента, то глубина нижней определяется по положению подошвы «гравиактивного» слоя. Использование такого подхода позволяет оценить глубинное положение источников полей и тем самым ограничить область искомого решения обратных задач в процессе последующего плотностного моделирования строения земной коры (Глазнев, 2003). Схема глубины залегания подошвы «гравиактивного» слоя, полученная по результатам статистического анализа локальных аномалий гравитационного поля (Глазнев и др., 2014), демонстрирует изменение глубины подошвы слоя от 6 до 12 км в пределах участка моделирования.

Аномальное гравитационное поле. При построении детальных плотностных моделей верхней коры, включающей область «гравиактивного» слоя, исходным является поле локальных гравитационных аномалий, представляющее собой разность наблюденного и регионального полей (рис. 2б). Региональное поле было рассчитано от ранее построенной трехмерной плотностной модели литосферы ВКМ (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016) в узлах регулярной плановой сети точек 2×2 км на реальном рельефе участка моделирования, при этом учитывался гравитационный эффект масс стратифицированного осадочного чехла (Муравина и др., 2013). То есть источники разностного

поля локальных аномалий располагаются ниже подошвы осадочного чехла, глубина которого относительно плавно изменяется на участке моделирования, и могут несколько превышать максимальную глубину подошвы «гравиактивного» слоя. Отметим, что при таком определении аномального гравитационного поля избыточные плотности в пределах слоя моделирования будут отсчитываться от абсолютных значений плотности региональной плотностной модели литосферы ВКМ.

МЕТОДИКА ДЕТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

При построении детальной плотностной модели участка исследования применялась единая технология моделирования, опробованная на нескольких участках, расположенных в пределах территории ВКМ (Глазнев и др., 2019; Воронова и др., 2021; Berezneva et al., 2021) (рис. 1). Все исходные данные по региону ВКМ, необходимые для решения обратных задач гравиметрии, были сведены в единый геоинформационный проект (ГИС ArcView), что позволяет весьма просто готовить исходные цифровые материалы для моделирования на конкретном участке и, впоследствии, увязать полученные результаты интерпретации для разных участков.

Согласно предложенной технологии, решение обратной задачи на участке исследования проводилось по плановой сети 2×2 км для точек локальных аномалий поля, заданного на реальном рельефе. С целью некоторого исключения краевых эффектов при решении обратной задачи, все использованные входные массивы расширялись в плане на 10 точек (20 км) во все стороны за пределы области достоверного моделирования (рис. 1). Дискретизация модели среды по вертикали задавалась совокупностью горизонтальных слоев, мощность которых изменялась с глубиной, увеличиваясь от 0.05 до 4 км. Суммарная мощность модельного слоя составляла 16 км, что соответствовало 17 слоям. Значения плотности в стартовой модели среды задавались в соответствии с петроплотностной картой кристаллического фундамента (Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2016) для слоев модели расположенных в пределах «гравиактивного» слоя. Для области ниже подошвы «гравиактивного» слоя, значения плотности соответствовали значениям интерполированной в плане плотности региональной модели литосферы ВКМ (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016).

Расчет детальной плотностной модели по участку исследования выполнялся с помощью программы, реализующей решение линейной

обратной задачи гравиметрии (Глазнев, 2003; Страхов, 1990) с использованием аппроксимационного представления спектральной формы оператора обратной задачи для горизонтального слоя. Решение обратной задачи представляет итерационный процесс инверсии локальных невязок поля в значения плотности тонкого эквивалентного горизонтального слоя, и последующее перераспределение полученных значений аномальной плотности в нижележащие слои модели с заданной весовой функцией. Весовая функция перераспределения плотности формировалась с учетом априорной геологической модели среды, достоверность которой несколько уменьшается с глубиной. Ниже подошвы «гравиактивного» слоя весовая функция становится еще меньше, что обеспечивает относительно малый вклад аномальных масс в этой части области моделирования. Естественно, что для точек слоев среды, расположенных выше кровли кристаллического фундамента, весовая функция принимается равной нулю, что соответствует отсутствию аномальных масс в осадочном чехле.

При решении обратной задачи также учитывались значения минимаксных ограничений плотности, пределы которых задавались в каждой точке моделирования в соответствии с петроплотностными данными (Муравина, Жаворонкин, 2015). Строгость минимаксных пределов определялась «жесткостью» амплитудных ограничений в решении на каждой итерации. Этот параметр может принимать значения от 0 (без ограничений) до 1 (строгое соответствие заданным ограничениям).

Результаты решения обратной задачи в данной постановке будут зависеть от количества и качества априорной информации, а полученная плотностная модель должна соответствовать заданным критериям всех исходных геологических данных. Необходимое качество моделирования повышается за счет реализованного в технологии приема многоэтапной инверсии поля, с точечной коррекцией стартовой модели на каждом этапе в заданных пределах изменения априорных параметров с учетом геологической целесообразности.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Построение детальной плотностной модели участка исследования выполнялось с использованием итерационного процесса, на каждом этапе которого требовалась точечная коррекция плотностной модели. Невязка поля, полученная на первом этапе при решении прямой задачи для начального приближения плотностной модели среды, соответствующей исходным геолого-геофизическим и петрофизическим данным,

характеризуется сложностью пространственного строения (рис. 3а), а величина стандартного отклонения невязки составила 10.71 мГал (рис. 4). Пространственное распределение начальной невязки поля практически не наследует элементы поверхностного геологического строения (рис. 2а) и в целом не совпадает со схемой аномалий гравитационного поля (рис. 2б).

В процессе моделирования было выполнено 9 этапов итераций решения обратной задачи гравиметрии при различных степенях «жесткости» минимаксных ограничений. На 8 этапе (коэффициент «жесткости» 0.5) была получена модель, характеризующаяся величиной стандартного отклонения невязки равной 0.47 мГал, что меньше требуемой точности решения обратной задачи, соответствующей значению 0.5 мГал. На 9 этапе, при значении коэффициента «жесткости» равного 1, величина стандартного отклонения невязки составила 0.46 мГал (рис. 4). Пространственное распределение итоговой невязки изменяется в диапазоне ± 0.5 мГал, за исключением отдельных локальных зон (рис. 3б).

Полученная итоговая точность решения обратной задачи ± 0.46 мГал, соответствует погрешности оценки плотности в результативной модели порядка ± 15 кг/м³, для верхних слоев модели и, около, ± 25 кг/м³ для нижних слоев. Для перехода к абсолютным значениям плотности, рассчитанные аномальные величины плотности среды суммировались с данными региональной

плотностной модели литосферы ВКМ (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016), интерполированными на области (участке) моделирования. Таким образом, результативная детальная плотностная модель среды была представлена в виде абсолютных значений плотности, заданных в узлах регулярной пространственной сетки модели.

Схемы плотности для некоторых глубинных уровней модели показаны на рис. 5. Диапазон изменения плотности в модели среды колеблется от 2610 кг/м³ до 3058 кг/м³, что соответствует типичным кристаллическим породам, распространенным в пределах участка исследований (Молотков и др., 1999) и не противоречит достоверно известным петрофизическим данным о плотности кристаллических пород фундамента региона (Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2014, 2016).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов плотностного моделирования позволяет выявить особенности тектонического строения и поведения ряда геологических объектов, наиболее контрастных по плотности, на различных глубинах (рис. 6).

На юго-западе участка исследования хорошо выражен Лосевско-Мамонский разлом, перекрытый воронежской свитой (рис. 6б, объект 1). Разлом отчетливо прослеживается в плотностных

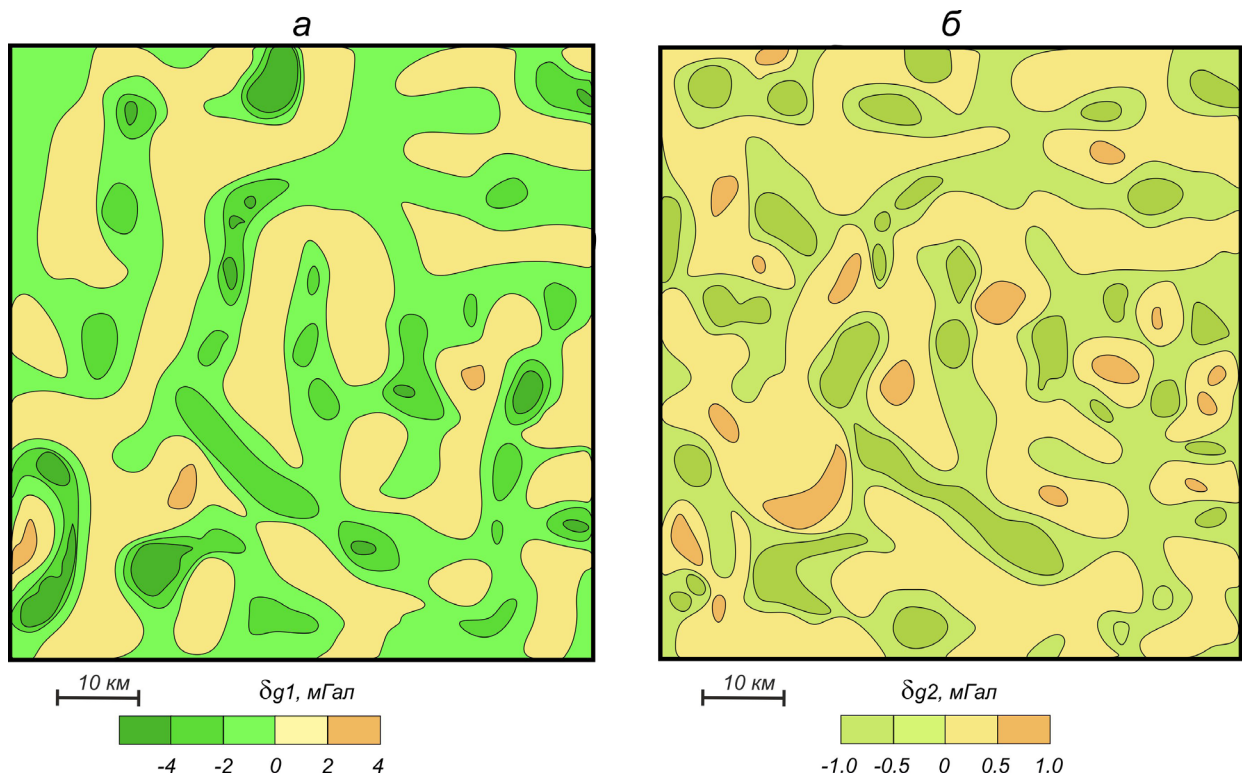


Рис. 3. Невязка начального приближения (а) и итоговая (б) невязка гравитационного поля.

Fig. 3. Residual of the initial approximation (а) and the final residual (б) of the gravitational field.

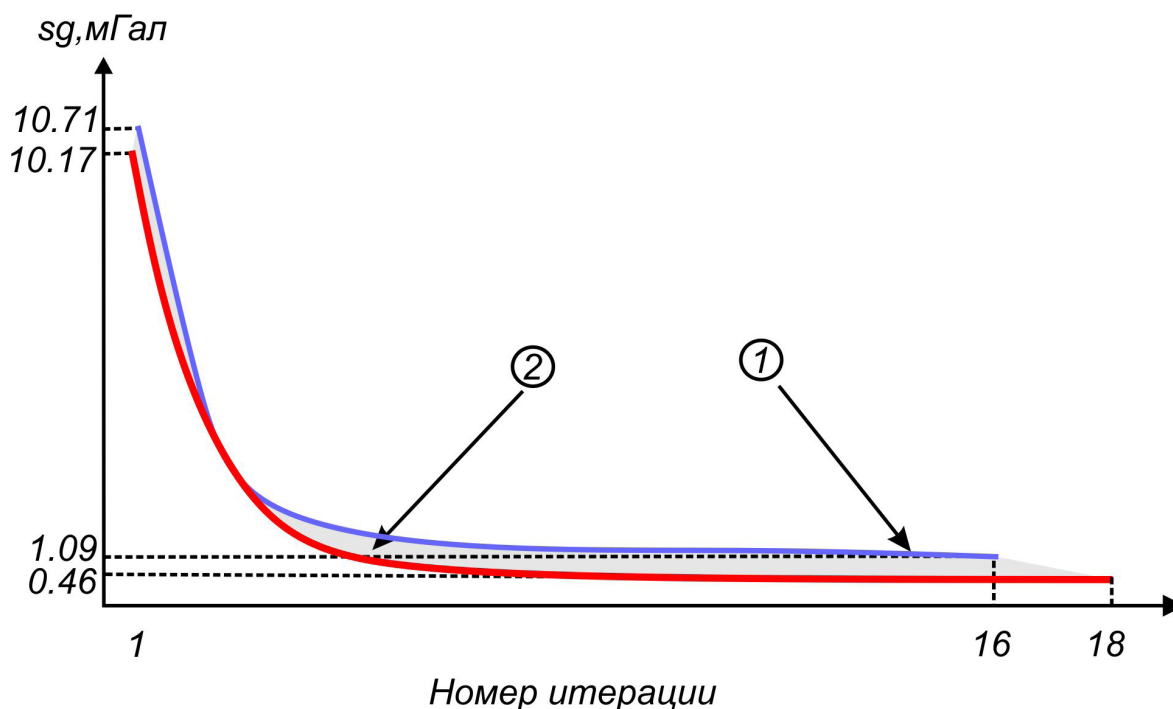


Рис. 4. Характер изменения среднеквадратической невязки sg итераций. 1 — график итерационного процесса первого этапа; 2 — график итерационного процесса заключительного этапа.

Fig. 4. Change in the root-mean-square discrepancy sg of iterations. 1 — graph of the iteration process of the first step, 2 — graph of the iteration process of the final step.

разрезах по профилю 1 (пикет 28 км) и профилю 2 (пикет 15 км), где он уверенно устанавливается по горизонтальному градиенту плотности в области контакта этих структур (рис. 6в). Кроме того, на разрезе 1 (рис. 6в) зона разлома представляет собой некоторую сдвоенную систему нарушений одинаковой ориентировки. Выявленные на разрезе тектонические контакты лосевской и воронцовской серий достоверно падают на юго-восток под углом $45\text{--}75^\circ$, что можно трактовать как надвиг пород воронцовского террейна на породы лосевской серии. Глубинность разлома — более 16 км.

Показанное на плотностных разрезах 1 и 2 предполагаемое положение подошвы воронцовской серии, демонстрирует существенное возрастание мощности пород, до 11–12 км, на удалении 15–25 км от современного положения Лосевско-Мамонского разлома на поверхности кристаллического фундамента (рис. 6в). Именно в области максимальной мощности пород воронцовской серии на плотностном разрезе 1 (пикет 40–54 км) установлен значительный по размерам объект пониженной плотности, располагающийся от поверхности фундамента до глубины примерно 8 км и не выявленный на исходной геологической карте региона (рис. 6б, объект 2; рис. 6в). По величинам плотности пород, можно предполагать, что данный массив представлен гранитоидами бобровского комплекса (шток лей-

когранитов). Северо-западный фрагмент этого нового выявленного гранитоидного тела представлен и на разрезе 3 (рис. 6в, пикеты 51–62 км) двумя связанными телами, залегающими на глубине до 6–7 км. Выявленное локализованное возрастание мощности пород воронцовской серии можно трактовать как следы крупной синформы.

Между воронежской свитой, лосевской и воронцовской сериями отчетливо прослеживается умеренно глубинный Добринско-Грязинский разлом (ДГР) СЗ простирания (рис. 6б, объект 3). Зона тектонического контакта между комплексами отражается на плотностных разрезах 3 (рис. 6в, пикеты 17–22 км) и 4 (рис. 6в, пикеты 23–27 км) как область пониженной плотности субвертикального падения. Его ширина на геологической карте сильно преуменьшена. По данным плотностного моделирования можно предположить, что это достаточно широкая (более 5 км) зона разломов субвертикального падения. Тектонический контакт между комплексами достаточно уверенно просматривается до глубины 8–10 км. Собственно породы воронежской свиты на разрезе 3 (рис. 6в, пикеты 0–25 км) и 4 (рис. 6в, пикеты 0–22 км), вероятно, распространены до глубины примерно 16 км, затем глубина, предположительно, уменьшается до 5–6 км в восточном окончании свиты, как это показано на разрезе 5 (рис. 6в, пикеты 0–11 км).

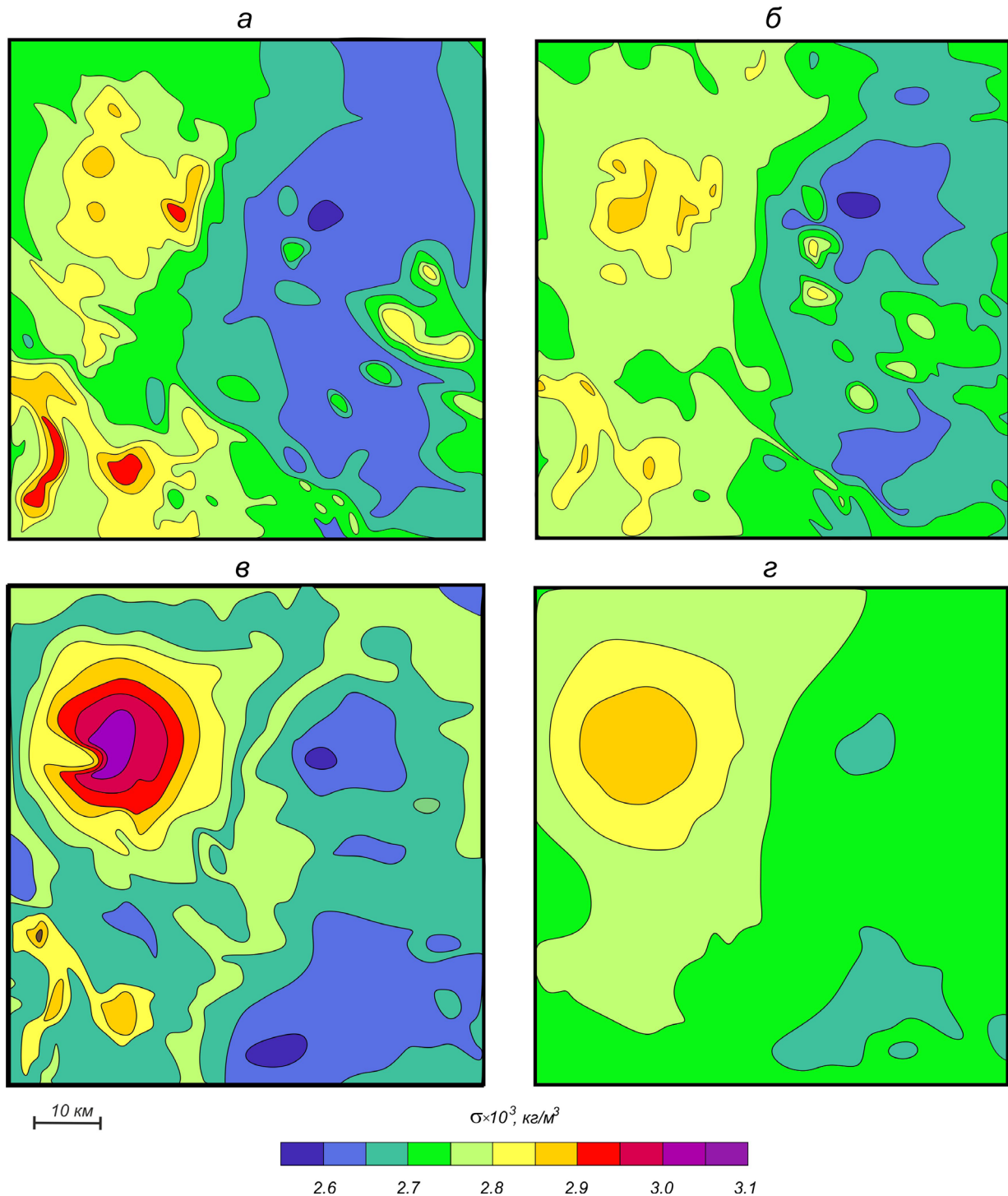


Рис. 5. Схемы распределения плотности на горизонтальных срезах глубин: 0.7 км (а), 4 км (б), 8 км (в), 16 км (з).

Fig. 5. Density distribution patterns at horizontal depth sections: 0.7 km (a), 4 km (b), 8 km (v), 16 km (z).

По плотностному разрезу модели в этой части под породами воронежской свиты, вероятно, залегают породы воронцовской серии, причем на глубинах 7–9 км на профиле 5 (рис. 6в, пикеты 3–8 км) выявлен локальный массив низкоплотных гранитоидов.

Положение и характерная кольцевая форма высокоплотных интрузивных пород ольховского комплекса первой фазы внедрения достоверно

просматриваются до глубины 8–9 км (рис. 6б, объект 4) и соответствуют положению этого объекта на поверхности кристаллического фундамента (рис. 6а–в). Результаты плотностного моделирования позволяют проследить строение Ольховского плутона на глубину: внешнее кольцо от 0.7 до глубины 8–9 км является цилиндрическим телом почти без изменения диаметра и мощности: разрезы 3 (рис. 6в, пикеты 9–14 км)

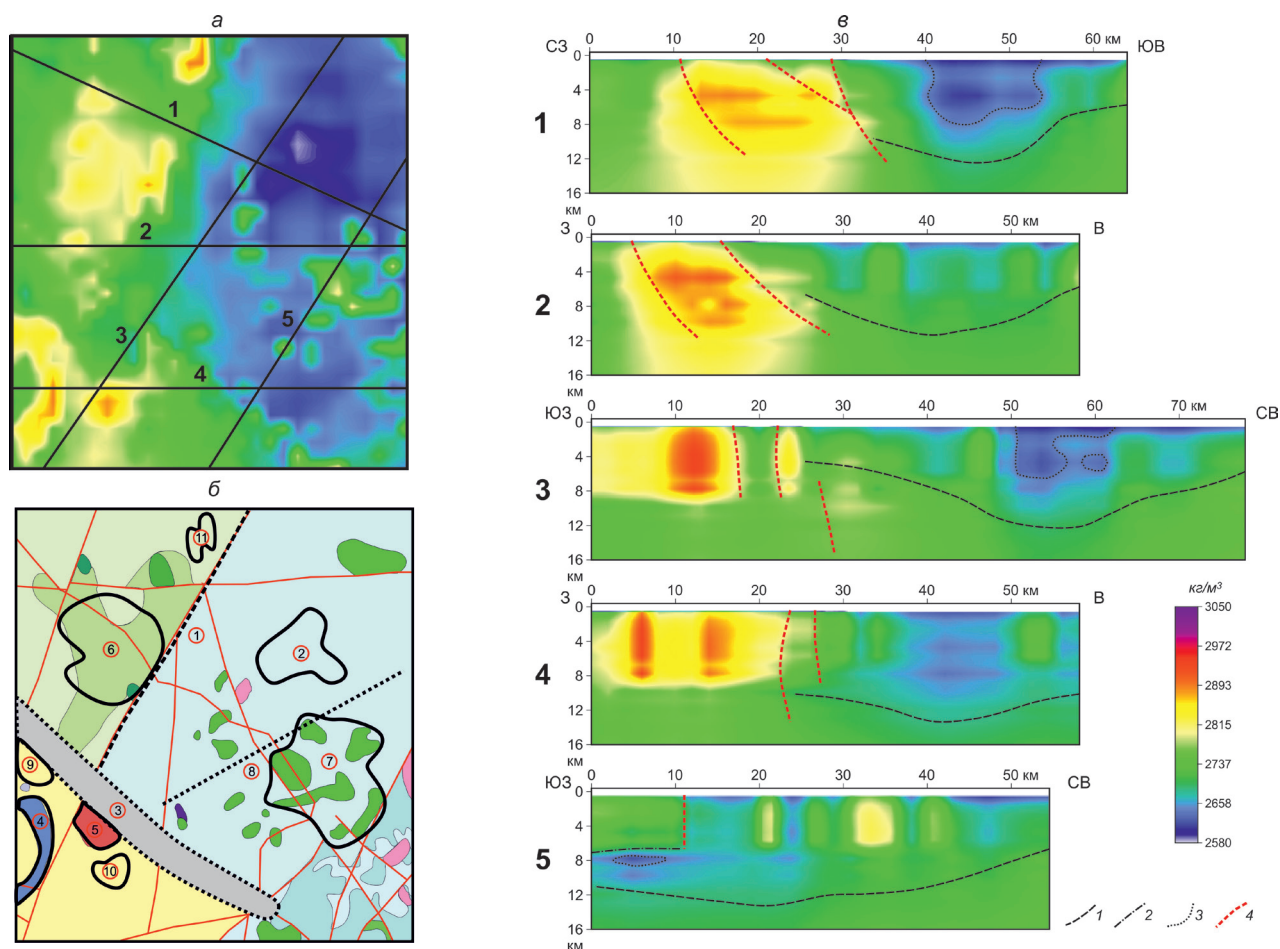


Рис. 6. Результаты плотностного моделирования. Распределение плотности на поверхности фундамента (а): линиями показано положение плотностных разрезов. Геологическая схема участка исследования с элементами интерпретации (б). Условные обозначения представлены на рис. 2. Цифрами в кружках обозначены геологические объекты, установленные по результатам интерпретации, описанные в тексте: черным контуром обозначены интрузивные массивы, пунктирными линиями — зоны разломов. Плотностные разрезы (в): 1 — подошва распространения пород воронцовской серии; 2 — граница распространения пород воронежской свиты; 3 — контуры интрузий; 4 — тектонические нарушения.

Fig. 6. Results of density modeling. . Density distribution on the surface of the basement (a): lines show the position of the density sections. Geological scheme of the study area with the elements of interpretation (b). The symbols are shown in Fig. 2. Numbers in circles designate geological objects established based by the results of interpretation, described in the text: the black outline indicates intrusive massifs, fault zones are marked with dotted lines. Density sections (в): 1 — base of the distribution of rocks of the Vorontsovskaya series; 2 — boundary of the distribution of rocks of the Voronezhskaya series; 3 — contours of intrusions; 4 — faults.

и 4 (рис. 6в, пикеты 4–7 и 13–16 км) в пределах воронежской свиты. Подводящий канал расположен на СВ от внешнего кольца и представляет собой шток на глубинах более 10 км.

Восточнее Ольховского плутона располагается гранитный массив, относимый ко второй фазе ольховского комплекса (рис. 6б, объект 5). Он погружается на СВ в виде штока, его корни уходят к центру ДГР. Глубина залегания подошвы штока по результатам моделирования составляет примерно 10 км.

В СЗ части участка наблюдается аномалия повышенной плотности, которая контрастно проявлена с глубины 1,5 км и прослеживается до 16 км и, вероятно, более (рис. 6б, объект 6).

Можно предположить несколько вариантов объяснения этой плотностной аномалии. Возможно, что это крупный (диаметр около 20 км, площадь 300 км²) расслоенный плутон ультрамафит-мафитов, аналогов которому нет в регионе. Самый крупный плутон на ВКМ — Елань-Коленовский имеет 12 км в поперечнике и площадь 109 км² (Terentiev et al., 2016a). Другой вариант — это корни вулканического аппарата базальтового состава, аналогом которого может служить Байгоровский палеовулкан (Terentiev et al., 2016b). И, наконец, возможно мы имеем дело со сгущением более высокоплотных актинолититов, относительно других лейократовых пород лосевской серии и окружающих гранито-гнейсов.

В центральной части участка исследования по результатам моделирования располагается «куст» интрузий, плотность которых соответствует породам мамонского комплекса, однако их конфигурация и форма отличается от данных геологической карты (рис. 6б, объект 7). Вероятнее всего, это серия интрузий и штоков-саттелитов, которые имеют один магматический очаг (ныне это глубинный плутон диаметром более 10 км). Корни этого плутона и штоков-саттелитов исчезают на глубинах более 6 км. На разрезе 5 (рис. 6в, пикеты 20–42 км) интрузивные породы мамонского комплекса представлены рядом тел и достигают глубины 5–6 км. Подводящий канал этих интрузий предположительно просматривается на разрезе 5 (рис. 6в, пикеты 35–36 км) в области наиболее крупной интрузии и уходит вертикально вниз на большую глубину.

Результаты инверсии гравитационного поля позволили выявить несколько тектонических нарушений и плотностных объектов, которые не отражены на геологической карте.

Так в центральной части участка выделяется линеамент, проявляющийся на глубине 8 км и более, который отсутствует на геологической карте. Этот объект можно трактовать либо как разлом, либо, что более вероятно, как зону, разделяющую две крупные складки в воронцовской серии СВ-ЮЗ простирания (рис. 6б, объект 8).

Севернее Ольховского плутона располагается небольшой шток, плотность которого соответствует лейкогранитам (рис. 6б, объект 9). Диаметр тела увеличивается от 3 до 10 км на глубинах более 10 км. Южнее (рис. 6б, тело 10) расположен объект повышенной плотности, который прослеживается до глубин более 8 км. Форма (три чаши на глубинах 6, 4 и 1.5 км) и плотность объекта позволяют предположить, что это расслоенный многофазный плутон (лополит) ультрамафит-мафитового состава.

В северной части участка исследования по результатам моделирования фиксируется тело повышенной плотности зигзагообразной формы (рис. 6б, объект 11). Значение плотности соответствует ультрамафит-мафитам. Форма тела позволяет предположить, что оно было подвергнуто складчатости и метаморфизму и комагматично базальтам рождественского комплекса лосевской серии. Объект прослеживается до глубины 8 км, при этом его форма не изменяется.

ВЫВОДЫ

В результате решения обратной задачи гравиметрии для участка исследования была получена трехмерная плотностная модель верхней коры ВКМ в области сочленения Лосевского и Воронцовского террейнов до глубины 16 км. Полу-

ченная плотностная модель позволяет уточнить тектоническое и геологическое строение участка исследования, а также проследить положение основных аномалеобразующих объектов. Результаты инверсии гравитационного поля позволили выявить несколько тектонических нарушений и плотностные объекты, которые не отражены на геологической карте. Достоверность полученных результатов определяется соответствием априорным данным, а также согласованностью наблюдаемого и рассчитанного гравитационных полей.

Полученные результаты хорошо согласуются с палеогеодинамической моделью развития западной части Волго-Донского орогена. Близкоодновременные, но более молодые (около 2100 млн лет) метаосадки воронцовской серии надвинуты на более древние (2170–2120 млн лет) образования лосевской серии (Terentiev et al., 2017). Наряду с тем, что осадки этих стратонов образовались из разных ювенильных источников сноса, подтверждается аккреционная природа орогена. В свою очередь, слабо метаморфизованные груботерригенные породы воронежской свиты ограничены от подстилающих пород субвертикальным разломом, что свидетельствует в пользу залегания молассы в грабенообразной структуре. Седиментация этих пород происходила после 2100 млн лет, вслед за коллизией (Terentiev et al., 2016b). Изометричная форма в плане и крутое падение в разрезе ранее картируемых и новых интрузивных тел мафит-ультрамафитов и гранитоидов мамонского, бобровского и ольховского комплексов подтверждает их постколлизийную природу (Савко и др., 2014; Terentiev et al., 2016a, 2018). Коррективы в картировании интрузивных тел, особенно прогнозирование крупных расслоенных мафит-ультрамафитовых плутонов существенно усиливают перспективы региона на обнаружение сульфидных медно-никелевых и платинометалльных рудных объектов.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 20-05-00190.

Список литературы [References]

- Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б. Глубинное строение и состав нижних горизонтов Хибинского и Ловозерского комплексов, Кольский полуостров, Россия: петролого-геофизическая модель // Петрология. 1998. Т. 6. № 5. С. 478–496 [Arzamastsev A.A., Arzamastseva L.V., Glaznev V.N., Raevskii A.B. Petrologic-geophysical model for the structure and composition of deep levels of the Khibina and Lovozero complexes, Kola Peninsula // Petrology. 1998. V. 6. № 5. P. 434–450].
- Воронова Т.А., Муравина О.М., Глазнев В.Н., Березнева С.И. Трехмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Донского террейнов (Воронежский кристаллический

- массив) // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. № 1(49). С. 24–35. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-24-35> [Voronova T.A., Muravina O.M., Glaznev V.N., Berezneva S.I. Three-dimensional density model of the upper crust at the junction of the Losevsky and Donskoy terranes (Voronezh crystalline massif) // Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle. 2021. № 1(49). P. 24–35 (in Russian)].
- Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Изд-во «КаэМ», 2003. 252 с [Glaznev V.N. Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia. Apatity: Ed. «KaeM», 2003. 252 p. (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И., Муравина О.М. и др. Строение верхней коры Елецкого участка Лосевского террейна (Воронежский кристаллический массив) по данным плотностного моделирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2019. № 3. С. 74–83 [Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Muravina O.M. et al. The structure of the upper crust of the Eletsy area of the Losevsky terrane (Voronezh crystalline massif) according to the data of density modeling // Vestnik of the Voronezh State University. Ser. Geology. 2019. № 3. P. 74–83 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Жирова А.М., Раевский А.Б. Новые данные о глубинном строении Хибинского и Ловозерского массивов, Кольский полуостров // ДАН. 2008. Т. 422. № 3. С. 391–393 [Glaznev V.N., Zhirova A.M., Raevsky A.B. New data on the deep structure of the Khibiny and Lovozero massifs, Kola Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 422. № 1. P. 1150–1152]. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08070349>
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. № 1(29). С. 53–63 [Glaznev V.N., Minc M.V., Muravina O.M. Plotnostnoe modelirovanie central'noj chasti Vostochno-Evropeskoj platformy // Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Муравина О.М., Воронова Т.А., Холин В.М. Оценка мощности гравитационного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского Государственного университета. Сер. Геология. 2014. № 4. С. 78–84 [Glaznev V.N., Muravina O.M., Voronova T.A., Kholin V.M. Estimation of the thickness of the gravity layer of the earth's crust of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh state University. Ser. Geology. 2014. № 4. P. 78–84 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж: «Научная книга», 2020. 101 с. [Glaznev V.N., Muravina O.M., Zhavoronkin et al. Petro-density map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif. Voronezh: Nauchnaya kniga. 2020. 101 p. (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Балаганский В.В., Маннинен Т. Трехмерная модель верхней коры района Киттила-Соданкюля, Финская Лапландия (север Балтийского щита) // Сборник материалов, посвященный 40-летию юбилею кафедры геофизики ВГУ. Воронеж: ВГУ, 2002. С. 11–20 [Glaznev V.N., Raevsky A.B., Balagansky V.V., Manninen T. Three-dimensional model of the upper crust of the Kittila-Sodankyla region, Finnish Lapland (north of the Baltic shield) // Collection of materials dedicated to the 40th anniversary of the Department of Geophysics of Voronezh State University. Voronezh: Voronezh State University, 2002. P. 11–20 (in Russian)].
- Минц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2017. № 4. С. 2–23 [Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M. Deep structure of the crust in the southeast of the Voronezh crystalline massif according to geophysical data: geodynamic evolution in the Paleoproterozoic and the current state of the crust // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2017. № 4. P. 2–23 (in Russian)].
- Минц М.В., Соколова Е.Ю., Варданыц И.Л. и др. Объемная модель глубинного строения Свеккофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 2. С. 34–61. <http://dx.doi.org/10.17076/geo656> [Mints M.V., Sokolova E.Yu., Vardanyants I.L. 3D model of the deep structure of the Svecofennian accretionary orogen based on data from CDP seismic reflection method, MT sounding and density modeling // Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. № 2. P. 34–61 (in Russian)].
- Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС. М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с. [Mints M.V., Suleimanov A.K., Babayants P.S. et al. Deep structure, evolution and minerals of the Early Precambrian basement of the East European platform: Interpretation of materials on the reference profile 1-EB, profiles 4B and TATSEIS. // M.: GEOKART; GEOS. 2010. V. 1. 408 p.; V. 2. 400 p. (in Russian)].
- Минц М.В., Буш В.А., Агеев С.Н. Строение и эволюция средне-палеопротерозойского Брянск-Курск-Воронежского внутриконтинентального коллизийного орогена (Восточно-Европейский кратон) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 717–742 [Mints M.V., Bush V.A., Ageev S.N. Structure and evolution of the Middle Paleoproterozoic Bryansk-Kursk-Voronezh intracontinental collisional orogen (East European Craton) // Geodynamics and Tectonophysics. 2014. T. 5. № 3. P. 717–742 (in Russian)].
- Молотков С.П., Костюков В.И., Лосицкий В.И. и др. Геологическая карта Воронежского кристаллического массива масштаба 1 : 500 000 // Министерство природных ресурсов РФ, ГПП «Воронежгеология», ОАО «Белгородгеология»,

- ВГУ, НКПР «Хорс». Воронеж, 1999 [Molotov S.P., Kostyukov V.I., Lositsky V.I. et al. Geological map of the Voronezh crystalline massif at a scale of 1: 500,000 // Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, GPP «Voronezhgeologiya», ОАО «Belgorodgeologiya», VGU, NKPR «Khors». Voronezh, 1999 (in Russian)].
- Муравина О.М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 1. С. 108–114 [Muravina O.M. Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2016. № 1. P. 108–114 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И. Статистический анализ цифровой основы петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2015. № 2. С. 94–99 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. Statistical analysis of the digital basis of the petro-density map of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh State University. Ser. Geology. 2015. № 2. P. 94–99 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Петрофизическая характеристика осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2013. № 1. С. 189–196 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I., Glaznev V.N. Petrophysical characteristics of the sedimentary cover of the Voronezh anticline // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2013. № 1. P. 189–196 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Петроплотностная карта Воронежского кристаллического массива // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. Воронеж: «Научная книга». 2016. С. 133–136 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I., Glaznev V.N. Petro-density map of the Voronezh crystalline massif // Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh polej. Materialy 43-j sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. D.G. Uspenskogo. Voronezh: Nauchnaya kniga. 2016. P. 133–136 (in Russian)].
- Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива // Материалы 15-ой международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», М.: ИФЗ РАН, 2014. С.171–173 [Muravina O.M., Zhavoronkin V.I., Glaznev V.N. Spatial analysis of the density distribution of the Precambrian formations of the Voronezh crystalline massif // Proceedings of the 15th international conference «Physicochemical and petrophysical research in the Earth sciences», Moscow: IPE RAS, 2014. P. 171–173. (in Russian)].
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н., Ларионова Ю.О., Базиков Н.С. Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // Петрология. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264. [Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Larionova Yu.O., Bazikov N.S. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin // Petrology. 2014. V. 22. № 3. P. 205–233].
- Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2017. Т. 25. № 2. С. 3–26 [Savko K.A., Kholin V.M., Bazikov N.S., Samsonov A.V. The Sarmatia Megablock as a fragment of the Vaalbara supercontinent: correlation of geological events at the Archean-Paleoproterozoic transition // Stratigraphy and Geological Correlation. 2017. T. 25. № 2. C. 123–145]. <https://doi.org/10.1134/S0869593817020058>
- Страхов В.Н. Теория линейных обратных гравиметрических задач // ДАН. 1990. Т. 311. № 5. С. 1093–1096 [Strakhov V.N. The theory of linear inverse gravimetric problems // Doklady Earth Sciences of the USSR. 1990. T. 311. № 5. P. 1093–1096 (in Russian)].
- Терентьев Р.А. Геология, вещественный состав и палеогеодинамические условия формирования Лосевской серии (Воронежский кристаллический массив) // Серия геология докембрия ВКМ. Вып. 1. Воронеж. 2013. 222 с. [Terentyev R.A. Geology, material composition and paleogeodynamic conditions of the formation of the Losevo Series (Voronezh crystalline massif) / Series: Precambrian Geology of VKM. Issue 1. Voronezh. 2013. 222 p. (in Russian)].
- Терентьев Р.А., Савко К.А. Минеральная термобарометрия и геохимия палеопротерозойских магнезиально-калиевых гранитоидов павловского плутона, Восточно-Европейский кратон // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2017. № 3. С. 34–45 [Terentyev R.A., Savko K.A. Mineral thermobarometry and geochemistry of the Paleoproterozoic magnesian-potassium granitoids of the Pavlovsk pluton, East European Craton // Vestnik VSU. Ser. Geology. 2017. № 3. P. 34–45 (in Russian)].
- Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Лебедев И.П. Модель геодинамического формирования Воронежского кристаллического массива // Геотектоника. 1997. № 3. С. 21–30 [Chernyshov N.M., Nenakhov V.M., Strik Yu.N., Lebedev I.P. Geodynamic model of the formation of the Voronezh crystalline massif // Geotectonics. 1997. № 3. P. 21–31 (in Russian)].
- Berezneva S.I., Muravina O.M., Voronova T.A. Technology for studying the structure of the upper crust of the Voronezh Crystalline Massif by detailed density modeling data // Eleventh symposium on structure, composition and evolution of the lithosphere. Institute of seismology university of Helsinki, report s-71. 2021. P. 9–12.
- Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. et al. Complex geological-geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust-mantle boundary // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. № 2. P. 133–170. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176>

- Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers* 11 (3). 2020. P. 999–1023. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>
- Terentiev R.A., Savko K.A., Petrakova M.E. et al. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Research*. 2020. V. 346. № 105790. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
- Terentiev R.A., Skryabin V.Yu., Santosh M. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: tectonic implications on Columbia supercontinent // *Precambrian Research*. 2016a. V. 273. P. 165–184. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.009>
- Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M. Paleoproterozoic crustal evolution in the East Sarmatian Orogen: Petrology, geochemistry, Sr-Nd isotopes and zircon U-Pb geochronology of andesites from the Voronezh massif, Western Russia // *Lithos*. 2016b. T. 246–247. C. 61–80. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.12.025>
- Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arc-back-arc system in the east Sarmatian Orogen (East European Craton): Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo volcanic suite // *American Journal of Science*. 2017. V. 317. № 6. P. 707–753. <https://doi.org/10.2475/06.2017.03>
- Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M. Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovsky ring complex // *Journal of the Geological Society*. 2018. V. 175. P. 86–99. <https://doi.org/10.1144/jgs2017-017>

THREE-DIMENSIONAL DENSITY MODEL OF THE UPPER CRUST AT THE JUNCTION OF THE LOSEVSKY AND VORONTSOVSKY TERRANES (VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF)

O.M. Muravina¹, V.N. Glaznev^{1,2}, T.A. Voronova¹, R.A. Terentiev¹

¹*Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018*

²*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, 184209*

Received July 27, 2022; revised August 22, 2022; accepted September 26, 2022

The results of detailed three-dimensional density modeling of the upper part of the Earth's crust for the area located in the northeastern part of the Voronezh crystalline massif in the area of the junction of the Losevsky and Vorontsovsky terranes are considered. The model obtained by solving the inverse gravimetry problem characterizes the density distribution of the rocks of the crystalline basement of the territory to a depth of 16 km. An important role in such constructions is given to the starting model of the studied environment, which was formed taking into account the available a priori geological and geophysical information: the regional density model of the East European Platform lithosphere and the gravity field, the data on the density of rocks of the sedimentary cover and the crystalline basement, estimates of the “gravity” layer thickness, the geological map of the crystalline basement, and the digital elevation models of the region. The three-dimensional density model allowed specifying the geological structure of the upper crust of the study area and tracing the deep continuation of the surface structures of the basement. The reliability of the obtained results is determined by the consistency of the accepted a priori data on the environment and the consistency of the model and observed gravity fields of the study area.

Keywords: upper crust structure, gravity field inversion, density modeling.