

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

©2021 Т.А. Воронова<sup>1</sup>, О.М. Муравина<sup>1</sup>, В.Н. Глазнев<sup>1,2</sup>, С.И. Березнева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018;

<sup>2</sup>Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, 184209

e-mail: voronova@geol.vsu.ru

Представлены результаты детального трехмерного плотностного моделирования верхней коры участка, расположенного в юго-восточной части Воронежского кристаллического массива в области сочленения Лосевского, Донского террейнов и, частично, Воронцовского террейна. Полученная модель была построена на основе инверсии локальных аномалий гравитационного поля в значения аномальной плотности с учетом всей имеющейся геолого-геофизической информации. Инверсия поля была реализована в рамках стартовой модели, при формировании которой использовались региональная плотностная модель литосферы Восточно-Европейской платформы и соответствующее ей гравитационное поле; обобщенная информация о плотности пород осадочного чехла и кристаллического фундамента; оценки мощности «гравиактивного» слоя, полученные на основе статистического анализа аномального поля; геологическая и топографическая основа. В итоге получена модель распределения плотности пород кристаллического фундамента до глубины 16 км, которая дает принципиально новую информацию о геологическом строении верхней коры участка. Результаты моделирования позволили проследить особенности строения наиболее выразительных по плотности геологических объектов участка исследований на глубинных уровнях и предложить трактовку взаимоотношений Лосевского и Донского террейнов на уровне верхней-средней коры. Ссогласованность модельного и наблюдаемого гравитационного полей определяет достоверность полученных результатов.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач геофизики является изучение глубинного строения верхней коры. Ввиду того, что Воронежский кристаллический массив (ВКМ) перекрыт осадочным чехлом, мощность которого изменяется от единиц до сотен метров, а на окраинах может достигать несколько километров, изучение глубинного строения этого региона основывается на геофизических данных.

Развитие информационных технологий позволяет перейти на новый уровень интерпретации геофизических полей с использованием больших объемов информации и реализацией новых алгоритмов, основанных на комплексировании и количественных методах анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных.

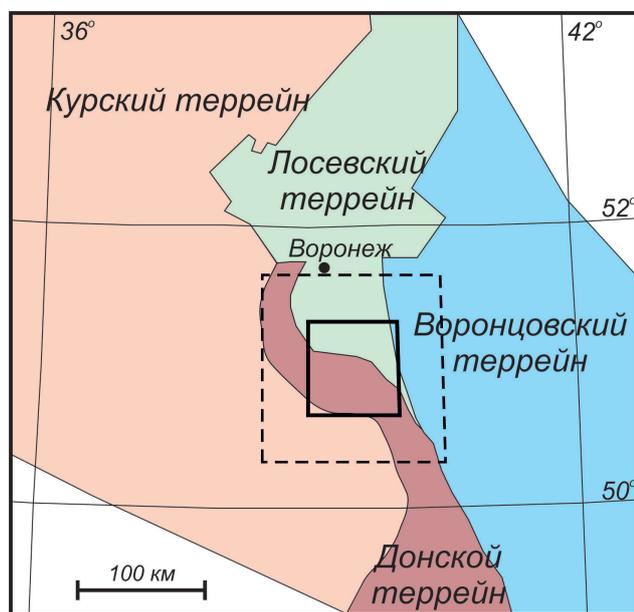
Так современные методы инверсии гравитационного поля решают задачу детального трехмерного изучения верхней части земной коры, что особенно важно с учетом сложности регионального геологического строения кристаллического фундамента ВКМ, отраженной на известных тектонических схемах территории (Минц и др., 2010, 2014; Савко и др., 2017; Чернышов и др., 1997).

Построение реалистичных трехмерных детальных плотностных моделей верхней коры ВКМ на основе инверсии гравитационного поля стало возможным только после завершения нескольких масштабных проектов, направленных на изучение геологического строения региона. В первую очередь это формирование цифровой пространственной базы петрофизических данных и создание на ее основе петроплотностной карты ВКМ (Глазнев и др., 2020;

Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2014, 2016). На следующих этапах была выполнена оценка мощности «гравиактивного» слоя (Глазнев и др., 2014), рассчитана региональная плотностная модель Восточно-Европейской платформы (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016).

Полученные новые региональные геолого-геофизические данные позволили перейти к планомерному детальному изучению строения верхней коры ВКМ посредством построения детальных плотностных моделей на основе инверсии гравитационного поля. Технология детального плотностного моделирования разработана и опробована на нескольких участках для различных условий платформ и щитов (Антонова, Глазнев, 2019; Глазнев и др., 2002, 2008; Минц и др., 2018; Berezneva et al., 2021; Glaznev et al., 2015). На данном этапе инверсия гравитационного поля последовательно реализуется на ряде участков в пределах ВКМ.

В настоящей статье представлены результаты инверсии гравитационного поля участка, расположенного в восточной части Сарматии (Gorbatshev, Bogdanova, 1993) в области сочленения Лосевского и Донского террейнов ВКМ и частично на северо-востоке захватывающего фрагмент Воронцовского террейна (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема тектонического районирования восточной Сарматии по (Терентьев, Савко, 2017; Terentiev et al., 2016). Сплошной линией показаны границы результирующего участка моделирования, пунктирной линией — область покрытия исходными данными

**Fig. 1.** Tectonic zoning of eastern Sarmatia (after Terentiev, Savko, 2017; Terentiev et al., 2016). The solid line shows the boundaries of the modeling area, and the dashed line — the area of coverage with the initial data.

В результате выполненных интерпретационных построений была создана трехмерная модель распределения значений плотности пород кристаллического фундамента до глубины 16 км, позволяющая получить новую информацию о геологическом строении верхней коры изученного участка.

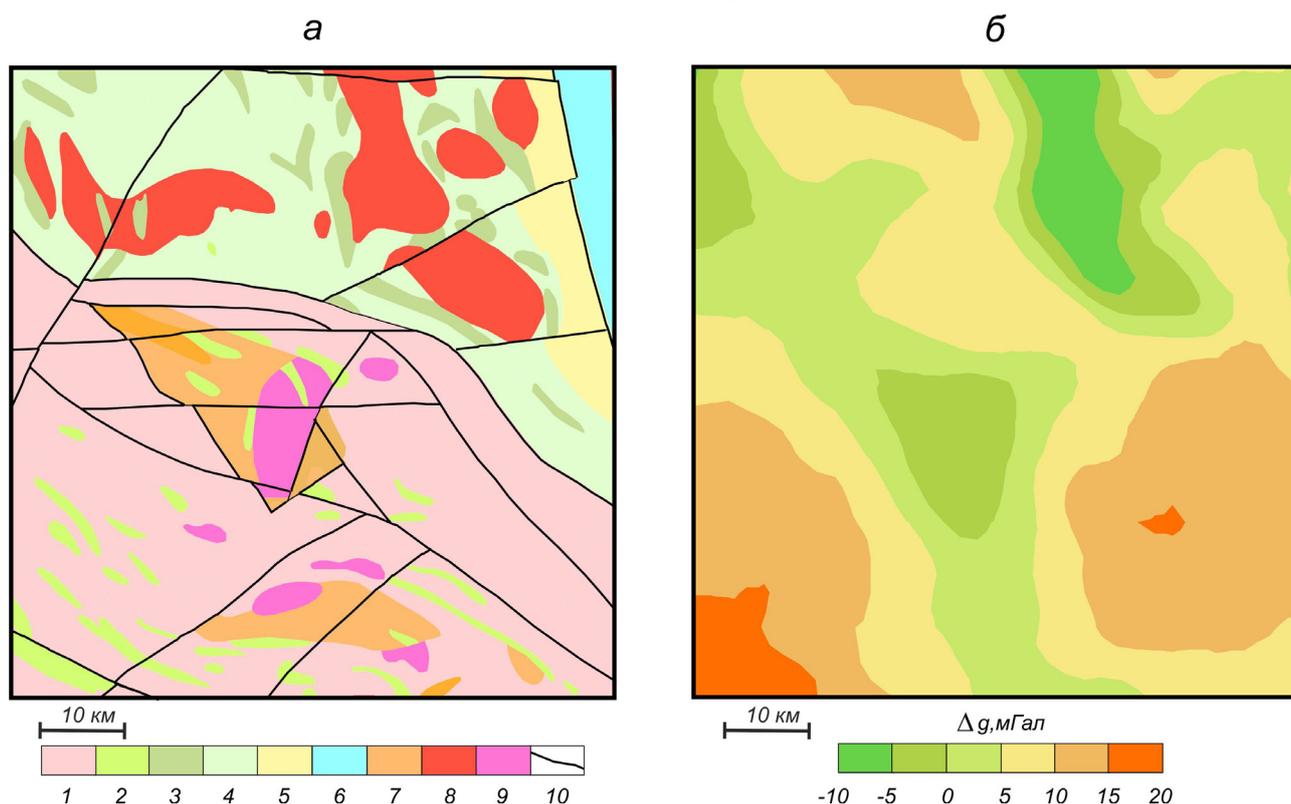
## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

**Геологические данные.** Геологическое строение кристаллического фундамента района проведенного плотностного моделирования приведено на рис. 2а. Плотностная характеристика выделенных комплексов пород дана по материалам петроплотностной карты ВКМ (Глазнев и др., 2020).

В строении Лосевского террейна принимают участие породы верхнего архея и нижнего протерозоя. Выделяют два структурных яруса: позднеархейский-раннекарельский структурный ярус, представленный структурно-вещественным комплексом (СВК) этапа формирования активной окраины, и позднекарельский структурный ярус СВК коллизионного этапа.

Позднеархейский-раннекарельский структурный ярус представлен метаморфизованными осадочно-вулканогенными отложениями лосевской серии, плутоническими образованиями рождественского комплекса и гранитоидами завершающих стадий формирования яруса усманского мигматит-плагиогранитового комплекса. Позднекарельский структурный ярус сложен образованиями мигматит-гранит-граносиенитового состава павловского комплекса, вулканогенно-осадочными породами воронежской свиты и гранит-габброноритами ольховского комплекса. Породы позднекарельского возраста воронежской свиты залегают над позднеархейскими-нижнекарельскими породами с резким структурным несогласием, что позволяет хорошо определять верхнюю границу яруса (Савко и др. 2011; Терентьев, 2016).

**Архейские и раннепротерозойские стратифицированные СВК.** Южная и центральная часть участка исследования на значительной площади сложена ниже-архейским обоянским комплексом. Вещественно он представлен биотит-амфиболовыми гранодиоритогнейсами, плагиогнейсами. Кроме того, установлены интенсивно мигматизированные амфиболиты и гранитогнейсы. Плотность пород комплекса изменяется в пределах от 2630 до 2750 кг/м<sup>3</sup>. Среди пород обоянского комплекса распространены породы михайловской серии, которые представлены кварцевыми порфирами, диабазовыми и андезитовыми порфиритами и их туфами, метапесчаниками и разнообразными сланцами.



**Рис. 2.** Геологическая схема (Молотков и др., 1999) (а) и аномальное гравитационное поле (б) участка исследования: 1 — обоянский комплекс ( $AR_{1,ob}$ ); 2 — михайловская серия ( $AR_{2,mh}$ ); 3 — лосевская серия (нижняя) ( $AR_{2,ls_1}$ ); 4 — лосевская серия (верхняя) ( $AR_{2,ls_2}$ ); 5 — воронежская свита ( $PR^1_{1,vr}$ ); 6 — воронцовская серия ( $PR^1_{1,vc}$ ); 7 — павловский комплекс ( $\gamma PR^1_{1,p}$ ); 8 — усманский комплекс ( $\pi\gamma K_{1,u}$ ); 9 — лискинский комплекс ( $\epsilon\gamma PR^1_{1,l}$ ); 10 — пазломы

**Fig. 2.** Geological map (Molotkov et al., 1999) (a) and anomalous gravitational field (б) of the study area. 1 — Oboyansky complex ( $AR_{1,ob}$ ); 2 — Mikhailovskaya series ( $AR_{2,mh}$ ); 3 — Losevskaya series (lower) ( $AR_{2,ls_1}$ ); 4 — Losevskaya series (upper) ( $AR_{2,ls_2}$ ); 5 — Voronezhskaya formation ( $PR^1_{1,vr}$ ); 6 — Vorontsovskaya series ( $PR^1_{1,vc}$ ); 7 — Pavlovsky complex ( $\gamma PR^1_{1,p}$ ); 8 — Usmansky complex ( $\pi\gamma K_{1,u}$ ); 9 — Liskinsky complex ( $\epsilon\gamma PR^1_{1,l}$ ); 10 — faults .

Плотность пород михайловской серии изменяется в диапазоне 2630–2850 кг/м<sup>3</sup>.

В северной и северо-восточной части участка основной объем стратифицированных образований Лосевского террейна представлен метавулканидами и ассоциирующими с ними верхнеархейскими сланцами лосевской серии. В ее разрезе выделяется две толщи. Нижняя толща — преимущественно вулканогенная, сложена метабазами, метаандезитами, метадацитами, амфиболитами и ортосланцами основного, реже среднего состава. Верхняя толща — вулканогенно-осадочного формирования, представлена метадацитами, метариолитами, метаандезитами и метабазами, метатуфами, метатуфопесчаниками, сланцами и метапесчаниками. Плотность пород лосевской серии составляет 2680–2960 кг/м<sup>3</sup>.

Раннепротерозойская воронежская свита расположена в северо-восточной части участка и представляет собой узкую вытянутую зону. В разрезе установлены метаэффузивы основного и среднего состава, метабазалты, метаандези-

тобазалты, метаандезиты, метариодациты, их пирокластические аналоги; метатуфобрекчии, метатуфоконгломераты, метатуфогравелиты, метатуфопесчаники, метаалевролиты и углеродистые сланцы. Плотность пород меняется в интервале от 2670 до 2970 кг/м<sup>3</sup>. В северо-восточной части участка распространены породы воронцовской серии, представленные песчанико-сланцевым комплексом. Плотность пород составляет 2590–2780 кг/м<sup>3</sup>.

**Архейские и раннепротерозойские интрузивные СВК.** Наиболее древними из них в пределах территории исследования являются верхнеархейские магматиты белогорьевского комплекса. Они имеют незначительный ареал распространения в центральной части участка. В рамках комплекса установлены габброамфиболиты и горнблендиты. Плотность пород составляет 2960–3440 кг/м<sup>3</sup>.

Раннепротерозойский усманский тоналит-плагиогранитный комплекс (2065±14 млн лет (Терентьев, 2013)) локализован преимущественно в области развития образований лосевской

серии. Интрузивные массивы характеризуются большими размерами и разнообразной формой. Сложены они плагиогранитами, плотность которых изменяется в пределах 2640–2760 кг/м<sup>3</sup>.

Раннепротерозойский павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс (2076±3 млн лет (Терентьев, 2013)) распространен в южной и центральной частях участка исследований. Гранитоиды секут и мигматизируют породы обоянского комплекса и залегают в виде крупных и мелких интрузий. Образования комплекса представлены породами двух фаз внедрения. Породы первой фазы слагают жилы и линзообразные неправильной формы тела гранитов и граносиенитов. Вторая фаза представлена преимущественно биотитовыми, амфибол-биотитовыми гранитами, образующими тела неправильной формы и мелкие массивы, а также дайками аплитовидных гранитов и пегматитов. Плотность пород первой фазы внедрения составляет 2590–2810 кг/м<sup>3</sup>, второй — 2620–2710 кг/м<sup>3</sup>.

Раннепротерозойский лискинский гранитный комплекс (2064±14 млн лет (Терентьев, 2013)) встречается в пределах центральной и южной части участка. Комплекс представлен преимущественно субщелочными биотитовыми гранитами с подчиненными дайками гранит-аплитов и пегматитов. Плотность пород изменяется от 2630 до 2710 кг/м<sup>3</sup>.

**Региональная плотностная модель.** Региональная трехмерная плотностная модель центральной части Восточно-Европейской платформы (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016) задает распределение плотности на кровлях и подошвах слоев верхней, средней и нижней коры и верхней мантии до глубины 80 км. Решение прямой задачи гравиметрии для разработанной модели позволяет с необходимой точностью оценить региональную составляющую поля для любой территории в пределах региона. Региональная плотностная модель играет важную роль при построении детальных плотностных моделей, так как обеспечивает переход к избыточным значениям плотности путем вычитания значений плотности региональной модели.

**Петроплотностная модель.** По результатам измерений плотности пород керна скважин, вскрывших фундамент, была построена петроплотностная карта ВКМ (Глазнев и др., 2020; Муравина и др., 2014, 2016; Муравина, Жаворонкин, 2015). Среднее значение и диапазон вариации плотности привязаны к соответствующим комплексам пород кристаллического фундамента и могут несколько отличаться для конкретных однотипных геологических объектов на территории исследований. Данные петроплотностной карты, экстраполированные

на «гравиактивный» слой, формируют плотностную модель.

**Мощность «гравиактивного» слоя.** При создании детальных трехмерных моделей также необходимо учитывать положение подошвы «гравиактивного» слоя, значения глубины залегания которого были получены по результатам статистического анализа аномального гравитационного поля (Глазнев и др., 2014). Положение этой условной границы характеризует область наиболее вероятного сосредоточения плотностных неоднородностей в верхней части земной коры (Глазнев, 2003). В пределах участка исследований глубина залегания подошвы «гравиактивного» слоя изменяется от 6 до 12 км (Глазнев и др., 2014).

**Аномальное гравитационное поле.** При построении детальной плотностной модели участка исследования исходным являлось поле локальных гравитационных аномалий, которое представляет собой разность наблюдаемого и регионального полей (рис. 2б). При этом региональное поле, полученное в результате решения прямой задачи от ранее построенной плотностной модели литосферы (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016), вычислялось в узлах регулярной плановой сети точек 2×2 км на реальном рельефе участка моделирования. В пределах участка абсолютные отметки рельефа колеблются от 76 м до 241 м. Отметим, что при расчете региональной плотностной модели предварительно была выполнена геологическая редукция наблюдаемого поля, учитывающая гравитационный эффект масс стратифицированного осадочного чехла ВКМ (Муравина и др., 2013). То есть источники разностного поля локальных аномалий располагаются ниже подошвы осадочного чехла, глубина которого относительно плавно изменяется на участке моделирования.

Все вышеупомянутые региональные исходные данные сведены в единый геоинформационный проект (ГИС ArcView 3), что позволяет для любого участка моделирования в пределах ВКМ выполнять их единообразную подготовку для решения обратной задачи, а также редактировать пространственные результаты решения. Такой формат организации информации позволит увязать полученные для разных участков результаты интерпретации и обеспечит планомерное изучение строения верхней коры территории ВКМ.

## МЕТОДИКА ДЕТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с разработанной технологией детального плотностного моделирования (Глазнев и др., 2019; Berezneva et al., 2021) принята единая сетка и структура стартовой модели.

Построение детальной трехмерной плотностной модели на участке исследований проводится по плановой сети 2×2 км для точек локальных аномалий поля, заданного на реальном рельефе. Для учета краевых эффектов при решении прямой задачи область формирования модели источников расширялась во все стороны на половину линейного размера результирующей области моделирования (рис. 1).

Структура модели плотности определяется положением поверхности кристаллического фундамента и мощностью «гравиактивного» слоя. Модель среды аппроксимируется набором горизонтальных слоев различной мощности, которая увеличивалась с глубиной от 0.1 до 4 км. Для участка исследований было использовано 17 слоев от поверхности кристаллического фундамента до глубины 16 км. Значения плотности в стартовой (исходной модели среды) задаются в соответствии с петроплотностной картой кристаллического фундамента (Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2016) и распространяются до глубины, соответствующей мощности «гравиактивного» слоя верхней коры в данной плановой точке на участке исследований (Глазнев и др., 2014). Ниже этой отметки исходная плотность принимается равной значениям интерполированной плотности региональной модели среды (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016).

Построение детальной плотностной модели участка исследования выполнялось с помощью программы, реализующей решение линейной обратной задачи гравиметрии (Глазнев, 2003; Страхов, 1990) в постановке:

$$\| \Delta g_L(x, y, h) - A_H \{ \Delta \sigma_L(x, y, z) \} \| < \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\Delta g_L$  — поле локальных гравитационных аномалий;  $A_H$  — оператор прямой задачи;  $H$  — глубина залегания нижней границы слоя;  $\Delta \sigma_L(x, y, z)$  — локальная плотность;  $\varepsilon$  — требуемая точность решения. При этом должно соблюдаться условие минимизации функционала качества решения:

$$\| W(x, y, z) \times \Delta \sigma_L(x, y, z) \| = \min, \quad (2)$$

где  $W(x, y, z)$  — весовая функция перераспределения плотности. Весовая функция формируется с учетом того, что аномалеобразующие объекты расположены в слое, верхняя граница которого совпадает с поверхностью кристаллического фундамента, а нижняя соответствует положению подошвы «гравиактивного» слоя (Глазнев и др., 2014). Интенсивные аномалии больших размеров в плане связаны с объектами, расположенными в верхней части слоя, а ниже

границы «гравиактивного» слоя количество объектов, влияющих на поле локальных гравитационных аномалий, значительно снижается. Следовательно, весовая функция  $W(x, y, z)$  будет максимальна на поверхности кристаллического фундамента, когда плотностные неоднородности присутствуют в верхней части слоя, и далее резко уменьшается с глубиной, либо она равномерно возрастает до глубины залегания подошвы «гравиактивного» слоя.

Геологическая содержательность результатов обеспечивается учетом минимаксных ограничений на плотность. Пределы изменения плотности в каждой точке области моделирования задаются на основе обобщенных петроплотностных данных (Муравина, Жаворонкин, 2015). Строгость минимаксных пределов регулируется таким параметром, как «жесткость амплитудных ограничений», который может принимать значения от 0 (без ограничений) до 1 (строгое соответствие). Конкретное значение этого параметра оптимизируются в процессе вычислительного эксперимента и зависит от степени неопределенности априорных геологических и петрофизических данных.

Решение обратной задачи гравиметрии представляет собой итерационный процесс инверсии невязок поля в каждой точке поверхности в значения плотности эквивалентного горизонтального слоя заданной плотности, и перераспределение полученных значений плотности в нижние слои среды в соответствии с весовой функцией. Результаты решения обратной задачи не только минимизируют невязку между модельным и наблюдаемым полем, но и должны соответствовать заданным критериям всей исходной геологической информации. Очевидно, что при таком подходе успех моделирования на основе инверсии поля силы тяжести зависит от количества и качества априорных данных, которые, как правило, носят вероятностный характер с различной степенью неопределенности. Поэтому в условиях сложного геологического строения повысить качество моделирования можно за счет многоэтапной инверсии поля, с выполнением на каждом этапе точечной коррекции стартовой модели в заданных пределах изменения априорных параметров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

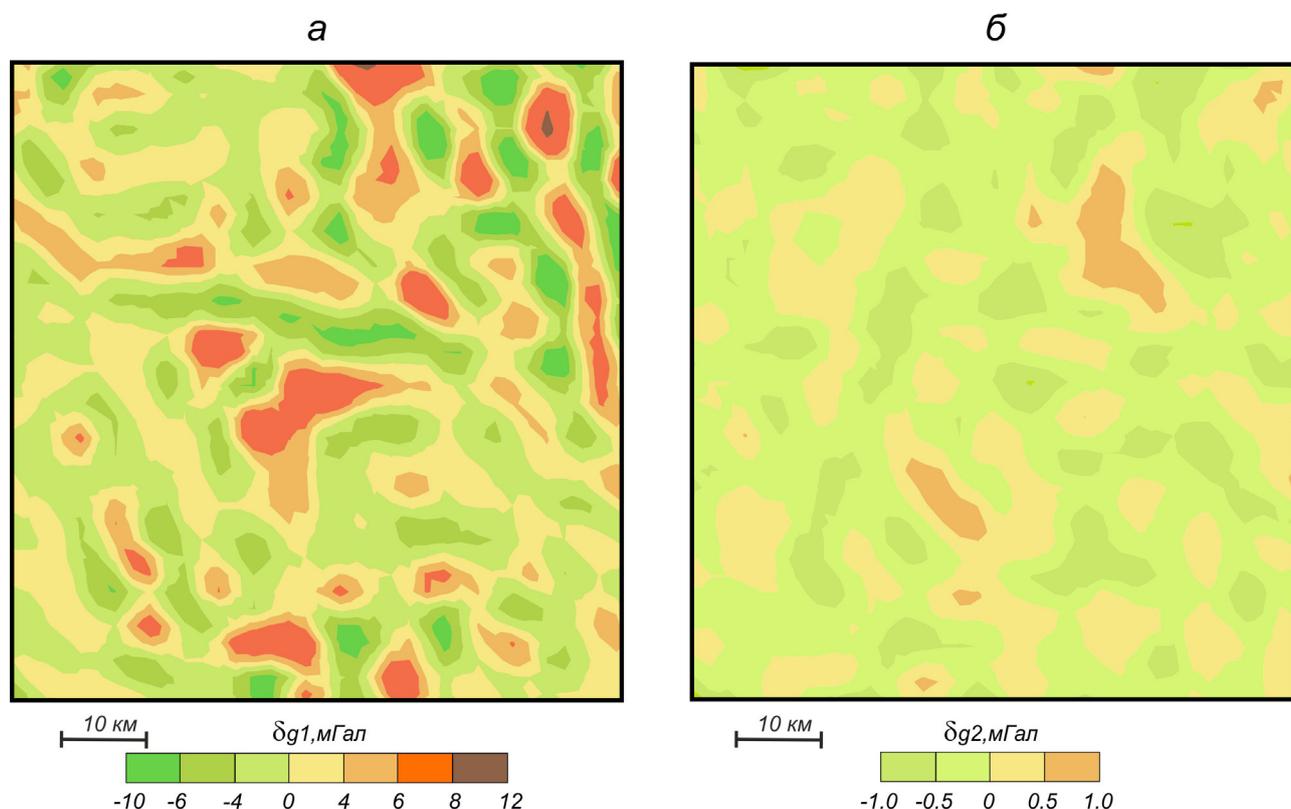
Инверсия локального гравитационного поля рассматриваемого участка выполнялась в итерационном процессе, на каждом этапе которого требовалось точечная коррекция плотностной модели. Начальное приближение плотностной модели среды, отвечающее описанным выше исходным геолого-геофизическим и петро-

физическим данным, порождает достаточно сложный пространственный характер распределения невязки поля (рис. 3а), с величиной стандартного отклонения невязки равной 13.42 мГал. Причем пространственное распределение начальной невязки поля почти не наследует элементы поверхностного геологического строения (рис. 2а) и в целом не совпадает со схемой аномалий гравитационного поля (рис. 2б), что свидетельствует о сложном строении исследуемого участка на более глубоких уровнях верхней коры.

В процедуре итерационного моделирования было выполнено 22 этапа итераций решения обратной задачи гравиметрии. Оптимальная модель была получена на 18 этапе и характеризуется величиной стандартного отклонения невязки равной 0.49 мГал, отвечающей условию (1) по требуемой точности решения обратной задачи (рис. 4). Сходимость решения обратной задачи по норме невязки носит гиперболический характер на первых пяти итерациях, а на последующих итерациях сменяется на низко-градиентный, линейный. Отметим, что пространственное распределение итоговой невязки колеблется в диапазоне  $\pm 0.5$  мГал, за исключением отдельных локальных зон вблизи интенсивных градиентных аномалий поля (рис. 3б).

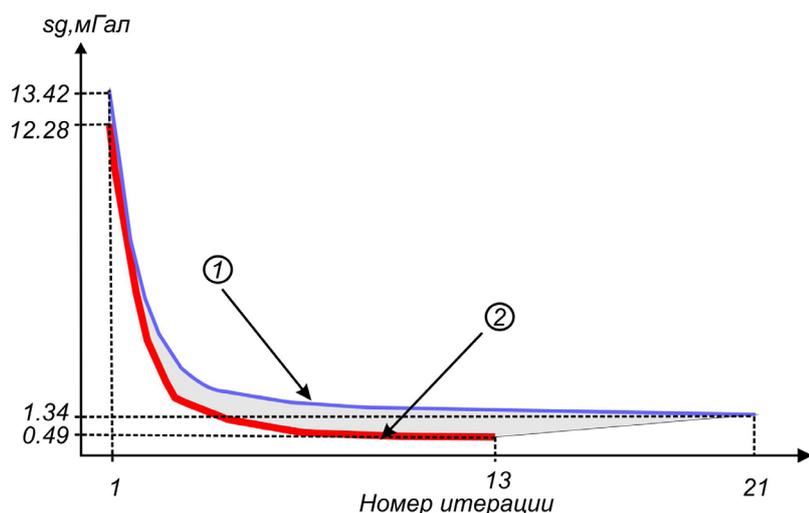
Таким образом, точечная коррекция стартовой модели позволила преодолеть заданный порог среднеквадратичной погрешности (0.5 мГал) и получить точность решения обратной задачи  $\pm 0.49$  мГал. С учетом вышесказанного, погрешность оценки плотности в результирующей модели имеет порядок  $\pm 15$  кг/м<sup>3</sup>, для верхних слоев модели и, примерно,  $\pm 25$  кг/м<sup>3</sup> для нижних слоев. Для перехода от избыточных величин аномальной плотности к их абсолютным значениям были использованы интерполированные в детальную пространственную сеть итоговой модели данные региональной плотностной модели (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Муравина, 2016). В результате выполненной инверсии гравитационного поля была построена плотностная модель строения среды в виде абсолютных значений плотности, заданных в узлах регулярной пространственной сетки модели. Полученные результирующие данные о плотностном строении района исследований показаны на рис. 4, в виде схем плотности для некоторых глубинных уровней модели.

Анализ полученных результатов плотностного моделирования показывает общую непротиворечивость модели по отношению к достоверно известным петрофизическим данным о плотности поверхностных кристаллических



**Рис. 3.** Схема распределения невязки начального приближения (а) и итоговой невязки (б) гравитационного поля.

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



**Рис. 4.** Характер изменения средне-квадратической невязки итераций. Цифрами в кружках обозначен графики для итерационного процесса первого (1) и заключительного (2) этапов.

**Fig. 4.** Nature of the change in the mean square residual of iterations. Numbers in circles indicate the graphs for the iteration process of the first (1) and final (2) stages.

пород фундамента региона (Глазнев и др., 2020; Муравина, Жаворонкин, 2015; Муравина и др., 2014, 2016). В целом, диапазон изменения плотности в модели среды колеблется от 2560 кг/м<sup>3</sup> до 3000 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует типичным кристаллическим породам, распространенным в пределах участка исследований (Молотков и др., 1999).

### ОБСУЖДЕНИЕ

Результативная трехмерная модель плотностного строения позволяет обратиться к выявлению особенностей поведения на глубине ряда наиболее контрастных по плотности геологических объектов, устанавливаемых на поверхности кристаллического фундамента согласно данным совокупности геологических, буровых и геофизических материалов (Молотков и др., 1999).

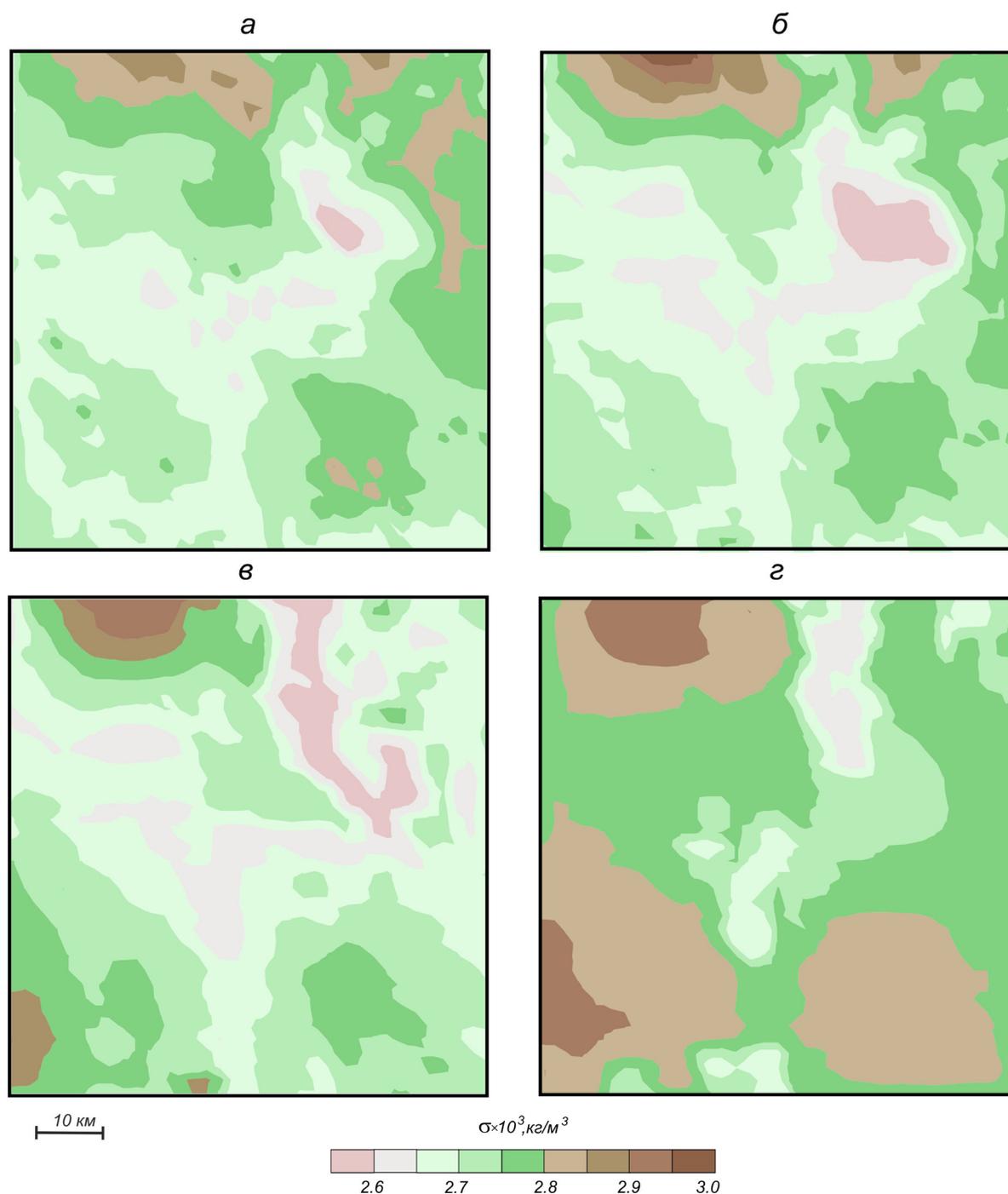
**Лосевский террейн.** В пределах рассмотренной части Лосевского террейна наиболее выразительными объектами являются гранитные массивы усманского комплекса (рис. 2а).

Северо-западная группа этих гранитных массивов, ориентированная в меридиональном направлении и широко представленная на поверхности фундамента, не столь однозначно просматривается на плотностной схеме самого верхнего уровня (рис. 5а). Здесь южный массив указанной группы полностью соответствует положению массива на поверхности фундамента, вместе с частью самого крупного северного массива, но на поверхности эти массивы по нашим данным не разделяются. На глубине 3 км указанный массив значительно увеличивается в размерах, вытягиваясь преимущественно в западном направлении. На этой же глубине отмечается некоторое смещение значений пониженной плотности в меридиональном направлении. Такая тенденция прослеживается и на глубине 10 км, где меридиональная ориентировка области

пониженной плотности становится преобладающей с шириной зоны примерно 5–10 км, а южная часть единого массива существенно уменьшается в размерах. На уровне подошвы области моделирования (глубина 16 км) корневая часть западного усманского гранитного массива просматривается в виде несколько вытянутой в меридиональном направлении области пониженных значений плотности. Вероятно, эта глубина является нижним ограничением достоверного отождествления комплекса усманских гранитов. Отметим, что восточный массив этого типа, вытянутый в широтном направлении (рис. 2а), проявляется в плотностной модели только на глубинах 3–10 км, без заметного смещения его положения в плане (рис. 5б, 5в). Размеры этого массива усманских гранитов, на поверхности несколько меньше, чем предполагается по геологическим данным, и в целом уменьшаются по мере его углубления, формируя некоторую частично эродированную диапироподобную структуру.

Нижняя лосевская толща, представленная преимущественно вулканогенными породами повышенной плотности, выразительно проявлена в нашей результативной модели (рис. 5). Ядро данной структуры, находящейся в северо-восточной части области моделирования и ориентированной в широтном направлении, однозначно отождествляется с плотными породами на верхних уровнях модели (рис. 5а, 5б). По мере углубления центр структуры смещается на север, и данный аномальный объекта приобретает изометричную форму, демонстрируя наличие пород повышенной плотности на глубине.

**Донской террейн.** В пределах рассмотренной части Донского террейна наиболее выразительными объектами являются гранитоидные массивы павловского и лискинского комплексов (рис. 2а). Павловский комплекс, сложенный гранитами и граносиенитами, представлен двумя массивами, наиболее крупный из которых



**Рис. 5.** Схемы распределения плотности на глубинах: 0.2 км (*a*), 3 км (*б*), 10 км (*в*), 16 км (*г*).

**Fig. 5.** Density distribution at depths: 0.2 km (*a*), 3 km (*б*), 10 km (*в*), 16 km (*г*).

располагается в центральной части участка исследований, а второй, меньший по размеру, расположен в южной части участка. Центральный массив уверенно просматривается в аномалиях плотности до глубины 10 км (рис. 5*a–в*), причем его плановые размеры несколько возрастают с глубиной, а простираение массива изменяется на северо-западное. Южный массив павловских гранитов незначительно проявлен в аномалиях плотности только на верхних уровнях модели до глубины 3 км (рис. 5*a*, 5*б*). Отметим,

что оба указанных массива приурочены к зоне пониженной плотности, пересекающей участок исследования с севера на юг с некоторым сдвигом в его центральной части. Массив лискинских субшелочных гранитов, обладающих достаточно низкой плотностью, уверенно просматривается от поверхности фундамента до нижней границы модельного слоя (рис. 5). По мере углубления массив несколько смещается в южном направлении, сохраняя в общих чертах свое субмеридиональное простираение. Максимальный плановый

размер массив достигает на глубинах от 3 до 10 км, хотя и здесь он относительно не велик по площади.

Матрица Донского террейна представлена биотит-амфиболовыми гранодиорито-гнейсами и плагиогнейсами ниже-архейского обоянского комплекса, имеющими относительно невысокие плотности в диапазоне от 2630 до 2750 кг/м<sup>3</sup>. На срезах модели (рис. 5) породы этого комплекса просматриваются до глубины примерно 10 км, а далее по разрезу их сменяют более высокоплотные разности, возможно соответствующие амфиболитовым гнейсам более высокой степени метаморфизации.

В самой юго-восточной части района моделирования на глубинах 10–16 км отмечается аномалия повышенной плотности, предположительно связанная с глубинными породами Курского террейна. Вопрос о пространственном соотношении этих крупных верхне-коровых структур литосферы ВКМ можно будет рассматривать только при наличии новых результатов плотностного моделирования для смежных участков территории.

**Тектоническое строение.** В пределах участка трехмерного плотностного моделирования на уровне кристаллического фундамента предполагаются три системы тектонических нарушений (рис. 2а) северо-восточной, юго-западной и субширотной ориентировки. Отметим, что эти тектонические элементы, выявленные по данным анализа гравитационного и магнитного полей территории ВКМ, частично находят свое отражение в плотностной модели участка исследований. Вместе с тем, некоторые крупные элементы, например региональный разлом в северо-западной части участка моделирования (рис. 2а), практически не проявлен в плотностной модели. Аналогично не выявляются некоторые нарушения и второго порядка в центральной части участка. Причины таких несоответствий могут быть различными, в частности они могут быть обусловлены уменьшением степени плотностной дифференциации отдельных комплексов пород по мере их заглупления, и требуют более детальное построение на сопредельных участках территории.

Тектонические взаимоотношения Лосевского и Донского террейнов приближенно могут быть выявлены по результатам трехмерного плотностного моделирования, на основе сопоставления общей инфраструктуры аномалий плотности (рис. 5). Предложенные современные модели эволюции этих террейнов (Terentiev et al., 2017, 2020), опирающиеся на данные по геохимии редкоземельных и рассеянных элементов, предполагают наличие сложной двухступенчатой субдукции океанической коры (вероятно,

не очень большого масштаба по площади), существовавшей на юго-восточной границе Сарматии в палеопротерозое. Закрывание предполагаемых океанических структур в интервале 2170–2100 млн лет привело к образованию надвиговых структур Донского и Лосевского террейнов в их современной форме с проявлением типичного пост-коллизийного гранитоидного магматизма А-типа на рубеже 2080–2050 млн лет (Terentiev et al., 2017, 2020). Обе указанные тенденции, надвиговая структура террейнов с их восточным падением и пост-коллизийный гранитный магматизм, в разной мере отражаются в плотностной модели среды (рис. 5). Граница между террейнами заметно смещается в северо-восточном направлении по мере приближения к подошве нашей плотностной модели. Детали такого смещения, являющиеся отражением общей надвиговой структуры взаимоотношений Донского и Лосевского террейнов, следует изучать в более крупном масштабе, по мере получения новых данных о плотностном строении на сопредельных участках.

## ВЫВОДЫ

В результате инверсии гравитационного поля получена трехмерная модель распределения плотности пород кристаллического фундамента до глубины 16 км, которая дает принципиально новую информацию о геологическом строении верхней коры участка исследований. Непротиворечивость априорным данным и согласованность модельного и наблюдаемого гравитационного полей определяет достоверность полученных результатов.

Анализ пространственной дифференциации плотности позволяет не только уточнить поверхностное геологическое строение участка моделирования, но и проследить распространение наиболее выразительных геологических объектов до глубин 10–16 км.

Полученные результаты трехмерного плотностного моделирования подтверждают возможное пространственное взаимоотношение Донского и Лосевского террейнов, как области надвиговых структур земной коры на юго-востоке Сарматии.

Научные исследования выполнены в рамках грантов РФФИ № 20-05-00190 и № 19-05-00336.

## Список литературы [References]

Антонова И.Ю., Глазнев В.Н. Модель строения верхней части коры Елецкого участка по комплексу геолого-геофизических данных // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов. Выпуск 1(46).

- Пермь: ГИ УрО РАН, ПГНИУ. 2019. С. 36–39 [Antonova I.Yu., Glaznev V.N. Model of the structure of the upper crust of the Eletsy area based on a complex of geological and geophysical data // Questions of theory and practice of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields: Collection of scientific papers. Iss. 1(46). Perm: GI UrO RAN, PGNIU. 2019. P. 36–39 (in Russian)].
- Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Изд-во «КазМ». 2003. 252 с [Glaznev V.N. Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia. Apatity: Ed. «KazM». 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., Zhironova A.M., Raevsky A.B. New data on the deep structure of the Khibiny and Lovozero massifs, Kola Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2008. T. 422. № 1. С. 1150–1152]. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08070349>.
- Глазнев В.Н., Милиц 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., Mints M.V., Muravina O.M. Plotnostnoe modelirovanie central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj 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)].
- Милиц 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)].
- Милиц М.В., Соколова Е.Ю., рабочая группа ЛАДОГА. 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 [Mints M.V., Sokolova E.Yu., LADOGA working group. A volumetric model of the deep structure of the Svecofennian accretionary orogen based on MOV-OGT, MTZ and density modeling // Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. No. 2. P. 34–61 (in Russian)].
- Милиц 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. T. 1. 408 p.; T. 2. 400 p. (in Russian)].
- Милиц 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 [Molotkov 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 Воронеж. 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 interpretacii 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 Воронежской 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., Базиков Н.С. и др.* Гранитоиды востока Воронежского кристаллического массива: геохимия, Th-U-Pb возраст и петрогенезис // Вестник ВГУ. Сер.: Геология. 2011. № 2. С. 98–115 [Savko K.A., Samsonov A.V., Bazikov N.S. et al. Granitoids of the eastern Voronezh crystalline massif: geochemistry, Th-U-Pb age and petrogenesis // Vestnik Voronezh State University. Ser.: Geology. 2011. No. 2. P. 98–115 (in Russian)].
- 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. С. 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. No. 5. S. 1093–1096 (in Russian)].
- Терентьев Р.А.* Проявление син- и постколлизии гранитов Лосевской шовной зоны (Воронежский Кристаллический массив) // Вестник ВГУ. Сер.: Геология. 2013. № 2. С. 70–85 [Terentyev R.A. The Occurrence of syn and post-collisional granites of Losevo suture zone (Voronezh Crystal Massif) // Vestnik VSU. Ser.: Geology. 2013. № 2. P. 70–85 (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.* Геохимия и палеогеодинамические реконструкции вулканогенных пород лосевской серии Воронежского кристаллического массива: значение для литолого-стратиграфического расчленения // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2016. № 4. С. 31–43 [Terentiev R.A. Geochemistry and paleogeodynamic reconstructions of volcanogenic rocks of the Losevskaya series of the Voronezh crystalline massif: significance for lithological and stratigraphic dissection // Vestnik VSU. Ser. Geology. 2016. № 4. P. 31–43 (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>.
- Gorbatshev R., Bogdanova S.V.* Frontiers in the Baltic Shield // *Precambrian Research*. 1993. V. 64. P. 3–22.
- 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., 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*. 2016. 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>.

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

T.A. Voronova<sup>1</sup>, O.M. Muravina<sup>1</sup>, V.N. Glaznev<sup>1,2</sup>, S.I. Berezneva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394018;*

<sup>2</sup>*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Russia, 184209; e-mail: voronova@geol.vsu.ru*

The results of detailed three-dimensional density modeling of the upper crust of the area located in the southeastern part of the Voronezh crystalline massif at the junction of the Losevsky and Donskoy terranes and, partially, the Vorontsovsky terrane are presented. The resulting model was built based on the inversion of local anomalies of the gravity field into anomalous density values, taking into account all available geological and geophysical information. The field inversion was implemented within the framework of the starting model developed on the basis of the regional density model and corresponding gravitational field of the East European platform lithosphere, generalized information on the density of rocks of the sedimentary cover and crystalline basement, the thickness of the «gravitational» layer obtained by statistical analysis of the anomalous field, and geological data and topography. The resulting model shows density distribution of the crystalline basement rocks to a depth of 16 km, and provides thus fundamentally new information about the geological structure of the upper crust of the area. The model makes it possible to trace geological objects, which are most expressive in terms of density, at deep levels, and allows interpreting the relationship between the Losevsky and Donskoy terranes in the upper-middle crust. The consistency of the model and observed gravitational fields indicates the reliability of the obtained results.

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

Поступила в редакцию 25.01.2020 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята в печать 28.03.2021 г.