

Научные статьи

УДК 550.8.05:550.831.017

DOI: 10.31431/1816-5524-2024-3-63-5-17

Памяти М.В. Минца посвящается

СТРОЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ЛОСЕВСКОГО ТЕРРЕЙНА ПО ДАННЫМ ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

©2024 О.М. Муравина¹, В.Н. Глазнев^{1,2}, Т.А. Воронова¹, Р.А. Терентьев¹¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394018;²Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, 184209

e-mail: muravina@geol.vsu.ru

Поступила в редакцию 10.06.2024; после доработки 14.07.2024; принята в печать 25.09.2024

Рассмотрены результаты детального трехмерного плотностного моделирования верхней коры центральной части Лосевского террейна, расположенной в северной части Воронежского кристаллического массива. Распределение абсолютных значений плотности коры до глубины 16 км была получено в результате инверсии локальных аномалий гравитационного поля в редукции Буге. Решение обратной задачи гравиметрии было реализовано в рамках стартовой модели, при формировании которой использовались цифровые геолого-геофизические данные территории исследований: региональная плотностная модель литосферы Восточно-Европейской платформы и соответствующее ей региональное гравитационное поле; поле локальных гравитационных аномалий, представляющее разность наблюдаемого и регионального полей модели литосферы; обобщенная информация о плотности пород осадочного чехла и кристаллического фундамента; схема мощности «гравиактивного» слоя, полученная на основе статистического анализа аномального поля; геологическая и топографическая основа. Количественная интерпретация данных гравиметрии позволила получить принципиально новую информацию о геологическом строении верхней земной коры территории исследований. Достоверность полученных результатов подтверждается непротиворечивостью априорным данным и соответствием суммарного модельного (локальное плюс региональное) и наблюдаемого гравитационного полей.

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

ВВЕДЕНИЕ

Фундамент Воронежского кристаллического массива (ВКМ) представлен разнородными геологическими образованиями (рис. 1), датированными ранним докембрием (Ненахов и др., 2007; Чернышов и др., 1997). Породы фундамента ВКМ на большей части его территории перекрыты осадочным чехлом мощностью от первых десятков метров до 500–700 м (Ненахов и др., 2007). В последние три десятилетия геологические исследования фундамента ВКМ были сосредоточены на потенциально рудоносных структурах

(Ненахов и др., 2007; Чернышов и др., 1997), в то время как для менее изученных районов, к которым относится рассматриваемая область Лосевского террейна, имеется существенный дефицит геологической информации.

Собственно, Лосевский террейн является объектом дискуссий о геодинамической природе его формирования и характере взаимоотношений с прилегающими структурами (Минц и др., 2010, 2014; Савко и др., 2017; Чернышов и др., 1997). Разными исследователями указанный террейн диагностируется как комплекс магматических, метаморфических и метаосадочных

пород от архейского до палеопротерозойского возраста (Ненахов и др., 2007; Щипанский и др., 2007). В составе террейна присутствуют значительные массы гранитных и ультрамафит-мафитовых интрузивных пород, понимание генезиса которых позволит дать разумное объяснение формированию комплекса в целом.

Настоящее исследование направлено на создание трехмерной плотностной модели земной коры изучаемого района, поскольку породы Лосевского террейна существенно дифференцированы по значениям плотности (Глазнев и др., 2020). Такая модель, опирающаяся на совокупность установленных региональных геолого-геофизических данных (Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016) и представленная абсолютными значениями плотности послужит основой для геологически содержательных выводов о строении земной коры региона. Детальный анализ плотностного строения в сопоставлении с данными сейсмических исследований методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) (Минц и др., 2010; 2018) позволит с новых позиций подойти к пониманию тектонической эволюции Лосевского террейна, как пограничного объекта на стыке крупных литосферных плит Сарматии и Волго-Уралии (Савко и др., 2017; Чернышов и др., 1997; Щипанский и др., 2007).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Площадь исследования относится к центральной, наименее изученной части Лосевского террейна Волго-Донского орогена (ВДО). На западе палеопротерозойский Лосевский террейн граничит с архейскими породами Сарматского сегмента Восточно-Европейского крата, а на востоке к нему примыкает палеопротерозойский Воронцовский террейн (рис. 1, 2). Предполагается (Чернышов и др., 1998; Mints et al., 2015), что границы между террейнами имеют тектонический характер. На территории исследований породы Лосевского и Воронцовского террейнов, частично перекрыты филлитами и терригенными образованиями воронежской свиты, заполняющими грабен-синклинальные структуры (Раскатов и др., 1976). Самая крупная из таких структур, носящая название Воронежско-Шукавской (или Ольховско-Шукавской) (Terentiev et al., 2016a) представлена типичными породами верхней молассы воронежской свиты (рис. 2).

Кратонное ядро Сарматии, расположенное в западной части района исследования, представлено породами обоянского метаморфического комплекса тоналит-трондьемит-гранодиоритов (ТТГ) с плотностью от 2630 кг/м³ до 2750 кг/м³. Породы михайловской серии, слагающие зеле-

нокаменные пояса, представлены амфиболитами и базальт-коматитовыми образованиями, а также и кислыми лавами и метаосадочными породами (Крестин, 1980; Savko et al., 2021). Плотность пород михайловской серии составляет (2630–2850) кг/м³.

Архейские образования проработаны в палеопротерозое интрузиями гранитоидов павловского комплекса, имеющими характерные значения плотности (2560–2720) кг/м³.

Палеопротерозой в пределах западной части ВДО представлен породами лосевской и воронцовской серий, частично перекрытыми воронежской свитой. Лосевская серия сложена породами ряда от дацитов до базальтов с различными долями осадочного и вулканогенно-осадочного материала (Терентьев, 2013; Terentiev et al., 2017). Плотность пород составляет (290–3180) кг/м³. Согласно последним геохронологическим исследованиям, возраст метавулканитов и метаосадков лосевской серии составляет (2120–2175) млн лет (Terentiev et al., 2017). В породы лосевской серии внедряются батолиты и штоки усманского



Рис. 1. Схема структурно-тектонического районирования Воронежского кристаллического массива по (Савко и др., 2017). Сплошной красной линией показаны границы участка моделирования; сплошной зеленой — сейсмический геотраверс 1-ЕВ. На обзорной схеме показано местоположение Воронежского кристаллического массива и границы Лосевского террейна.

Fig. 1. Scheme of structural and tectonic zoning of the Voronezh crystalline massif according to (Savko et al., 2017). A solid red line shows the boundaries of the modeling area; a solid green line shows the seismic geotraverse 1-EB. The overview diagram shows the location of the Voronezh crystalline massif and the boundaries of the Losev terrane.

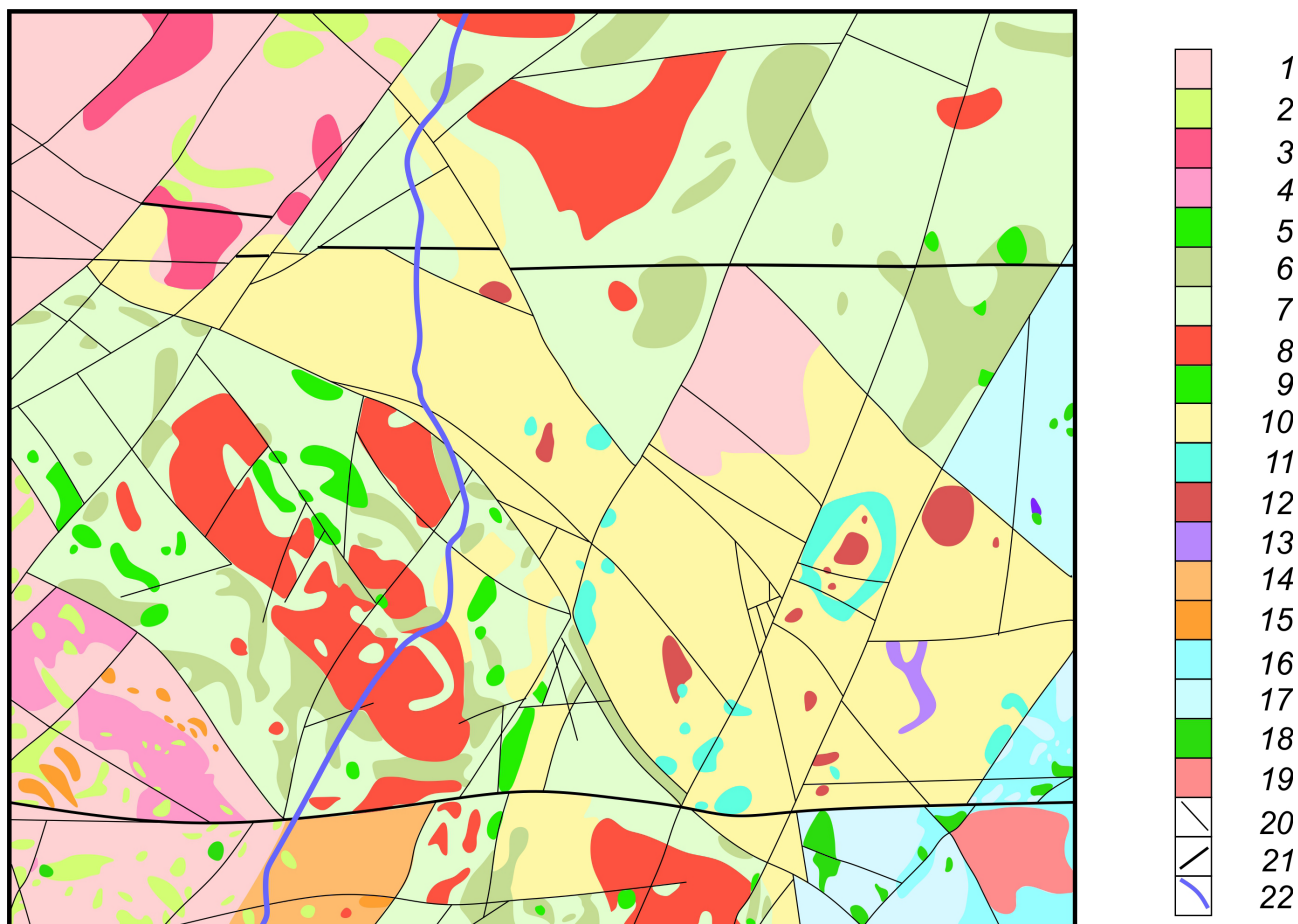


Рис. 2. Геологическое строение площади исследований (Лосицкий и др., 1999): 1 — обоянский комплекс; 2 — михайловская серия; 3 — атаманский комплекс; 4 — салтыковский комплекс; 5 — сергиевский комплекс. Лосевский террейн: 6 — лосевская серия (нижняя); 7 — лосевская серия (верхняя); 8 — усманский комплекс; 9 — рождественский комплекс; 10 — воронежская свита; 11 — ольховский комплекс (первая фаза); 12 — ольховский комплекс (вторая фаза); 13 — шукавский комплекс; 14 — павловский комплекс (первая фаза); 15 — павловский комплекс (вторая фаза). Воронцовский террейн: 16 — воронцовская серия (нижняя); 17 — воронцовская серия (верхняя); 18 — мамонский комплекс; 19 — бобровский комплекс. 20 — разломы; 21 — региональные разломы; 22 — сейсмический профиль 1ЕВ.

Fig. 2. The geological structure of the research area (Lisitsky et al., 1999): 1 — Oboyansky complex; 2 — Mikhailovskaya series; 3 — Atamansky complex; 4 — Saltykovsky complex; 5 — Sergievsky complex. Losevo terrain: 6 — Losevskaya series (lower); 7 — Losevskaya series (upper); 8 — Usmansky complex; 9 — Rozhdestvensky complex; 10 — Voronezh suite; 11 — Olkhovsky complex (first phase); 12 — Olkhovsky complex (second phase); 13 — Shukavsky complex; 14 — Pavlovsky complex (first phase); 15 — Pavlovsky complex (second phase). Vorontsov terrain: 16 — Vorontsov series (lower); 17 — Vorontsov series (upper); 18 — Mammon complex; 19 — Bobrovsky complex. 20 — faults; 21 — regional faults; 22 — seismic profile 1EB.

комплекса ТТГ (2100–2075 млн лет (Terentiev et al., 2016a)), плотность которых изменяется в пределах интервала (2640–2760) кг/м³ и калиевые известково-щелочные гранитоиды с возрастом 2081 ± 12 млн лет.

Воронцовская серия примерно на 90 % образована метатерригенными флишоидными отложениями, и лишь около 10 % ее состава приходится на эффузивно-осадочные породы (Лебедев и др., 1999). Возраст метаморфизма воронцовской серии по цирконам оценивается около 2104 млн лет (Бибикова и др., 2009), по монацитам — (2067 ± 9) млн лет (Савко и др., 2015).

Плотность пород составляет (2590–2780) кг/м³. Породы прорваны многочисленными интрузиями постколлизии гранитоидов А-, S-типа бобровского комплекса возрастом (2050–2070) млн лет (Бибикова и др., 2009; Савко и др., 2014) с плотностью (2610–2710) кг/м³. Ультрамафит-мафиты мамонского комплекса возрастом 2072.4 ± 8 млн лет, 2073 ± 8.3 млн лет и 2068 ± 13 млн лет (Terentiev et al., 2016b) имеют плотность в диапазоне (2790–3110) кг/м³.

На юго-западе площади исследований развиты батолиты павловского комплекса (рис. 2), которые сложены кварцевыми монцонитами,

монцодиоритами и монцогранитами, сформированными во временном интервале 2060–2077 млн лет (Terentiev et al., 2020). Плотность пород первой фазы павловского комплекса составляет (2590–2810) кг/м³, второй — (2620–2710) кг/м³. Батолиты окаймляются инъекционными мигматитами и прорывают образования обоянского метаморфического комплекса с плотностью пород в диапазоне 2630 кг/м³–2750 кг/м³.

Воронежская свита, распространенная в центральной части участка (рис. 2) и представленная в основном терригенно-обломочными породами и филлитовидными сланцами, характеризуется величинами плотности в диапазоне (2670–2970) кг/м³. Среди терригенных пород встречаются вулканогенные структуры палеопротерозойского возраста, например, кольцеобразная Байгоровская вулканогенная постройка, прорванная в центре кольца штоком андезит-дацитовых порфириров (Terentiev et al., 2016b). Ольховский комплекс, прорывающий породы воронежской свиты, представлен интрузивными телами двух фаз внедрения, плотность которых составляет (2820–2970) кг/м³ и (2570–2750) кг/м³ соответственно. Ультрамафиты шукавского комплекса, также прорывающие породы воронежской свиты, характеризуются значениями плотности в широком диапазоне (2700–3120) кг/м³.

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕТАЛЬНОГО ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Построение детальной плотностной модели верхней части земной коры Лосевского террейна ВКМ опирается на совокупность региональных цифровых пространственных геолого-геофизических данных. База петрофизических данных, аккумулирующая результаты определений физических свойств для пород керна скважин, пробуренных на территории региона (Муравина и др., 2013, 2014, 2016), содержит данные измерений в координатах широта, долгота и глубина. Создание сводной базы данных в геоинформационной системе «ArcView» позволило соотнести петрофизическую информацию с геологическим строением региона и открыло возможности эффективного использования петрофизических материалов при интерпретации геофизических данных. Так сведения о мощности осадочных отложений (Муравина, Глазнев, 2014; Муравина и др., 2013) и статистические оценки плотностных характеристик пород осадочного чехла позволили выполнить геологическое редуцирование гравитационного поля, в процессе которого был вычислен гравитационный эффект осадочного чехла (Глазнев и др., 2013). Сводная петроплотностная карта кристаллических пород территории ВКМ, в которой среднее значение

плотностей и диапазоны их вариации привязаны к комплексам пород кристаллического фундамента ВКМ (Глазнев и др. 2020; Муравина и др., 2014, 2016; Муравина, Жаворонкин, 2015), использовалась для создания начального приближения плотности верхней части земной коры.

Кроме того, была выполнена оценка мощности «гравиактивного» слоя кристаллической коры, основанная на стохастической модели источников локальных аномалий гравитационного поля в редукции Буге (Глазнев и др., 2014) и характеризующая наиболее неоднородную по латерали плотностную структуру верхней части фундамента региона. На основании составленной схемы мощности «гравиактивного» слоя была выбрана нижняя граница области детального плотностного моделирования и рассчитаны параметры весовой функции для каждой точки поверхности.

На первой стадии моделирования, на основе совокупности исходных построений с применением развитого алгоритма комплексной интерпретации геофизических данных (Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2008), была рассчитана региональная трехмерная плотностная модель литосферы центральной части Восточно-Европейской платформы (Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016; Минц и др., 2017) до глубины 80 км. Решение обратной задачи для регионального гравитационного поля (с исключенным влиянием масс осадочного чехла (Глазнев и др., 2013; Муравина, Глазнев, 2014)) выполнялось в географических координатах на плановой сетке 10°×15' и шагом сетки по глубине равным 4 км. На первой стадии моделирования плотность поверхностных пород кристаллического фундамента усреднялась на плановой сетке расчетов по данным петроплотностной карты региона и его обрамления (Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016; Минц и др., 2017). Полученная результативная модель характеризует региональное распределение плотности в слоях земной коры и самой верхней части мантии. Для перехода ко второй стадии детального плотностного моделирования района исследований, было вычислено гравитационное поле, обусловленное избыточными массами региональной плотностной модели литосферы. Разность наблюдаемого гравитационного поля (с исключенным влиянием аномальных масс осадочного чехла) и рассчитанного регионального гравитационного поля от модели литосферы представляет поле локальных гравитационных аномалий для изучаемого региона. Это поле характеризует нескомпенсированную часть аномальных масс, расположенных в верхней части земной коры, преимущественно в области ее гравиактивного слоя (Глазнев и др., 2014). Построенное таким образом поле локальных

гравитационных аномалий является исходным элементом для выполнения детальной инверсии данных на второй стадии плотностного моделирования. При этом региональная плотностная модель, заданная на существенно более редкой пространственной сетке, обеспечивает переход от избыточных значений плотности, получаемых в результате решения локальной обратной задачи, к их абсолютным величинам, что является необходимым элементом геологической трактовки результатов моделирования.

Все перечисленные геолого-геофизические данные, представленные в виде ГИС-проекта системы «ArcView», были использованы для формирования совокупности начальных данных и последующего построения плотностной модели верхней коры на основе инверсии гравитационного поля. Результаты расчетов на модельных примерах (Воронова и др., 2020), накопленный опыт решения упомянутых региональных задач и детального плотностного моделирования на отдельных участках (Антонова, Глазнев, 2019; Воронова и др., 2021; Глазнев и др., 2019; Муравина и др., 2022; Bereznova et al., 2021) позволили разработать единую технологию детального трехмерного плотностного моделирования. Сформулируем её основные принципы.

– Детальная плотностная модель верхней коры территории Воронежского кристаллического массива формируется на основе последовательного объединения плотностных моделей, полученных для отдельных участков с едиными параметрами моделирования, размеров сети и шага данных.

– Задание входных региональных данных и полученных в процессе инверсии гравитационного поля результатов моделирования для всех участков осуществляется посредством обращения к единому ГИС-проекту.

– Решение обратной задачи гравиметрии представляет собой итерационный процесс инверсии невязок поля в значения плотности эквивалентного горизонтального слоя и последующего ее перераспределения в модельные слои среды в соответствии с принятой весовой функцией. Инверсия аномалий поля в плотность осуществляется на основе алгоритма квазинормального решения трехмерной обратной задачи гравиметрии в декартовых координатах на основе аппроксимационного представления обратного оператора (Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2023; Страхов, 1990).

– В пределах локального участка инверсия гравитационного поля осуществляется в несколько этапов, на каждом из которых выполняется точечная корректировка стартовой модели в областях аномальных значений итоговой невязки на основе априорной информации.

Такой подход позволяет добиться заданной точности решения без ущерба для его геологической содержательности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Детальная плотностная модель рассчитана для всей восточной части ВКМ и охватывает Воронцовский, Лосевский и Донской террейны. В настоящей работе рассмотрен фрагмент этой территории площадью 25 000 км², в пределах которой расположена центральная часть Лосевского террейна и сопредельные части Воронцовского и Курского террейнов (рис. 1).

В результате инверсии гравитационного поля получена детальная плотностная модель строения верхней коры в виде абсолютных значений плотности, заданных в узлах трехмерной нерегулярной по вертикали сетки до глубины 16 км (рис. 3). Распределение плотности детальной модели согласовано с обобщенной региональной плотностной моделью, распространяющейся до глубины 80 км. Анализ результатов показывает непротиворечивость модели по отношению к достоверно известным данным о плотности кристаллического фундамента, диапазон изменения которой (2500–3400) кг/м³ соответствует типичным комплексам пород, представленным на площади исследования (рис. 2).

Содержательный анализ трехмерных плотностных неоднородностей верхней коры опирается на принцип трансляции на глубину известных поверхностных геологических объектов (рис. 3), которые в исходной плотностной модели кристаллического фундамента имеют определенные петроплотностные характеристики (Глазнев и др., 2020).

В плотностной модели контрастно выражены некоторые крупные тектонические нарушения. Региональный Лосевско-Мамонский разлом прослеживается до глубины более 10 км и по данным плотностного моделирования представляет собой надвиг пород воронцовской серии на породы лосевской серии. Падение этого регионального разлома имеет юго-восточное направление (рис. 3в, 3з). Грабенообразная структура, расположенная в центральной части Лосевского террейна и выполненная терригенно-вулканогенным комплексом пород воронежской свиты (рис. 2) с характерными значениями плотности (2750–2850) кг/м³, прослеживается на глубину 8–10 км (рис. 3а) в своей юго-восточной части. В северо-западной части грабена его подошва полого поднимается к поверхности, что четко проявлено в результатах плотностного моделирования (рис. 3а, 3б). Продольные борта этого грабена залегают практически субвертикально (рис. 3а–в). Ряд других крупных тектонических нарушений, представленных

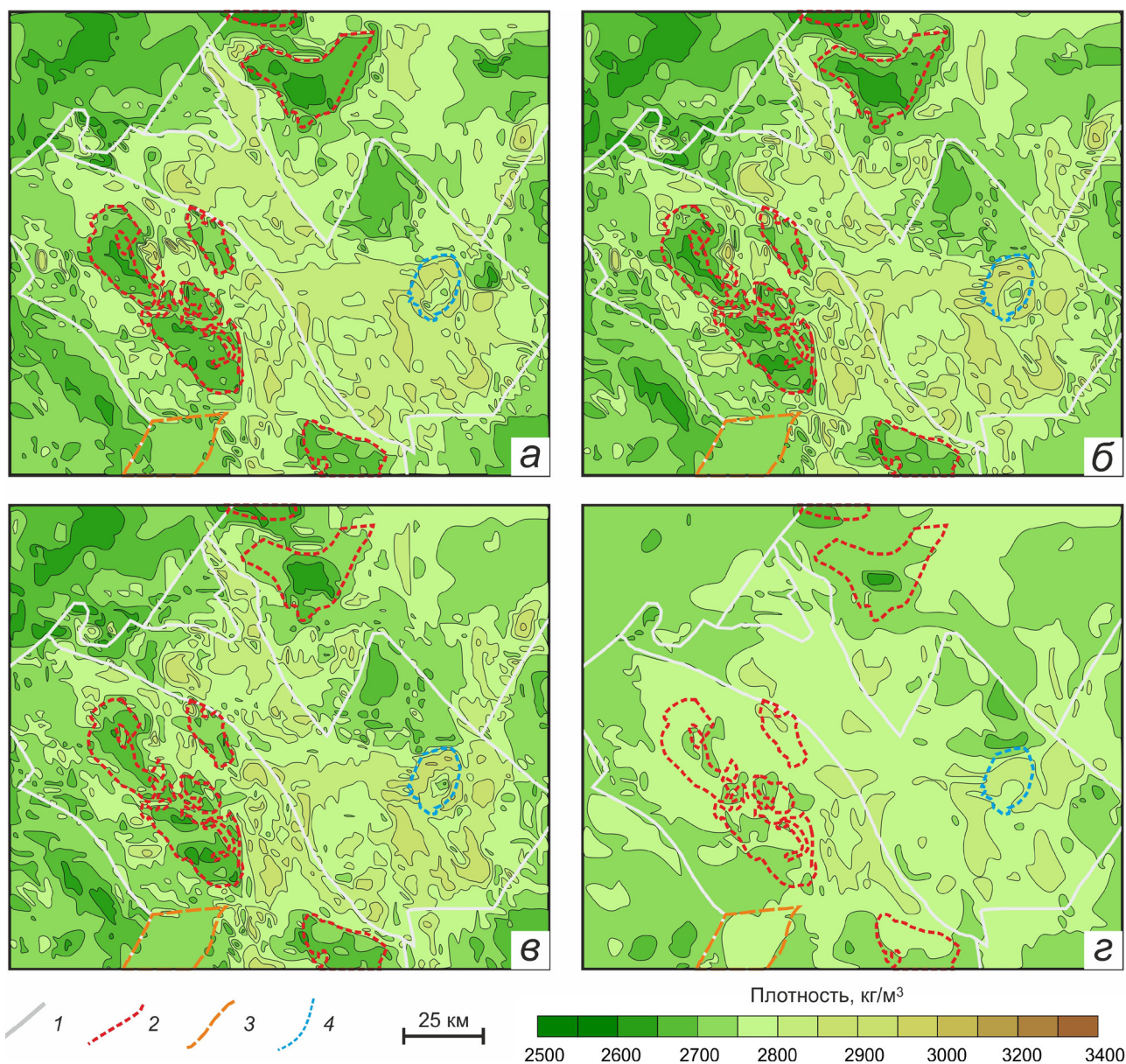


Рис. 3. Схемы распределения плотности на горизонтальных срезах верхней коры: 2 км (а), 4 км (б), 6 км (в) и 10 км (з). Положение геологических объектов на поверхности фундамента: 1 — границы крупных тектонических структур; 2 — плагиограниты усманского комплекса; 3 — гранитоиды павловского комплекса; 4 — Ольховский кольцевой плутон.

Fig. 3. Schemes of density distribution on horizontal sections of the upper crust: 2 km (a), 4 km (б), 6 km (в) and 10 km (з). Position of geological objects on the basement surface: 1 — boundaries of large tectonic structures; 2 — plagiogranites of the Usman complex; 3 — granitoids of the Pavlovsky complex; 4 — Olkhovsky ring pluton.

на участке исследований (рис. 2), в трехмерной плотностной модели достоверно прослеживается до глубины 6–8 км и имеют в основном субвертикальные падения (рис. 3з, 3д).

Пространственное положение ряда крупных структурно-тектонических комплексов региона достаточно хорошо устанавливается по результатам плотностного моделирования. Так архейский обоянский комплекс Курского террейна (рис. 2), с характерной плотностью (2700–2750) кг/м³, уверенно транслируется до глубины 12–14 км. Тоналиты, трондьемиты и гранодиориты салты-

ковского комплекса (рис. 2) прослеживаются до глубины 8 км и на уровне 10 км они редуцированы до мелких штоков (рис. 3з). Субшелочные граниты атаманского комплекса (рис. 2), имеющие характерную плотность 2550–2650 кг/м³, прослеживаются до глубины 6–8 км. Отметим, что по мере возрастания глубины залегания крупные гранитоидные тела смещается к западу и юго-западу от их положения на поверхности фундамента (рис. 3а–в).

По данным плотностного моделирования достоверно выделяются гранитоиды усманского

комплекса (рис. 2), имеющие характерные значения плотности (2650–2720) кг/м³. Крупные гранитоидные тела, расположенные в центральной и в южной частях области моделирования, прослеживаются до глубины 6 км, причем конфигурация тел вблизи поверхности (рис. 3а, 3б) изменяется незначительно, на нижнем уровне корневые части тел фрагментированы (рис. 3в). Два тела гранитоидов усманского комплекса, находящихся в северной части области исследований, прослеживаются в корневой части до глубины 10 км (рис. 3г) со значительным уменьшением плановых размеров.

Крупное тело павловских субщелочных гранитоидов (рис. 2), расположенное на южной границе площади исследования и характеризующееся значением плотности в диапазоне (2620–2720) кг/м³, прослеживается до глубины 6–8 км (рис. 3в). Подошва гранитоидов полого погружается к центру и размеры тела существенно уменьшаются с глубиной. Корневая часть этого гранитного батолита располагается примерно на глубине 8 км с некоторым смещением на юг от положения центра тела на поверхности.

Байгоровская вулканогенная структура, Ольховский плутон, имеющие на поверхности фундамента кольцевую форму (рис. 2), прослеживаются в плотностной модели до глубины 6 км. На нижних уровнях ядро Байгоровской структуры, представленное штоком дацитов, прослеживается почти субвертикально до глубины 6–8 км с некоторым смещением в юго-восточном направлении (рис. 3в). На глубине 4–6 км единое кольцевое тело ольховских плотных диоритов разделяется на два фрагмента: больший по размерам северо-западный и несколько меньший юго-восточный (рис. 3б, 3в). Отметим, что при нашей плановой сетке расчетов плотностной модели детально выявить положение малых по размерам габброидных объектов на таких глубинах весьма проблематично и поэтому дать точные суждения о корневых частях ольховского кольцевого плутона представляется затруднительным.

Еще одним интересным объектом, выявленным в результативной плотностной модели, служит некий аналог кольцевой вулканогенной(?) структуры, расположенный в юго-восточном окончании Байгоровского палеовулкана Лосевского террейна (рис. 2). Размеры этого объекта, расположенного к юго-западу от Ольховского кольцевого плутона, достаточно велики и составляют примерно 50–60 км в диаметре (рис. 3б–г). Причем собственно кольцевой объект повышенной плотности (до (2800–2900) кг/м³) прослеживается как единое тело до глубины 4 км (рис. 3в), а далее, на глубинах 10–12 км, он представляет фрагментированные части кольцевой структуры (рис. 3г). По близости расположения и морфоло-

гии структуры можно высказать предположение о генетическом единстве данного объекта с Ольховским кольцевым плутоном.

Помимо указанных крупных геологических объектов, в результативной плотностной модели проявлено большинство известных на поверхности фундамента интрузивных массивов основного и ультраосновного состава (рис. 2), распространенных в пределах площади моделирования. Размеры этих объектов относительно малы, но они вполне достоверно выявляются в плотностной модели, преимущественно на верхних ее уровнях (рис. 3а, 3б), как тела с повышенной плотностью (до (2850–2950) кг/м³). Отметим, что часть из таких объектов не отражена на исходной геологической карте и в начальной плотностной модели. Анализ данных по пространственному положению известных и предполагаемых интрузивных объектов базитового состава заслуживает отдельного исследования, что и предполагается сделать в дальнейшем.

Представленные новые результаты трехмерного плотностного моделирования верхней коры и интерпретационные материалы комплексной плотностной модели литосферы (Глазнев и др., 2016; Муравина и др., 2014; Муравина, 2016) были сопоставлены с данными МОВ-ОГТ вдоль профиля 1 ЕВ (Минц и др., 2010; 2018). С этой целью детальные и региональные модельные данные были синтезированы в единую систему точек, располагающихся на линии профиля глубинных сейсмических исследований МОВ-ОГТ (Минц и др., 2010; Mints et al., 2015) с шагом 2 км. Как уже отмечалось, «сшивку» моделей на глубине 16 км была гарантирована условиями решения обратной задачи для верхней части земной коры. Именно материалы такой трехмерной синтетической плотностной модели можно сопоставить с независимыми данными МОВ-ОГТ по геотраверсу 1-ЕВ (Минц и др., 2010; Mints et al., 2015), который пересекает область моделирования с севера на юг (рис. 2). Особо отметим, что результативные сейсмические материалы по геотраверсу не входили в исходную модель изучаемой среды при создании региональной плотностной модели литосферы (Глазнев и др., 2016; Муравина и др., 2014; Муравина, 2016) и, следовательно, являются независимыми.

На синтетическом плотностном разрезе по геотраверсу 1-ЕВ (рис. 4) представлены результативные данные о плотностном строении литосферы, наложенные на картину отражающих площадок («сейсмический образ» литосферы по терминологии, приведенной в работе (Минц и др., 2010)). Помимо положения отражающих площадок, на разрез вынесены предполагаемые структурные элементы, являющиеся границами «сейсмических доменов» (по терминологии

(Минц и др., 2010)), которые соответствуют границам смены стиля расположения сейсмических площадок. В нашем случае на разрезе (рис. 4) показан авторский вариант «сейсмических доменов», который несколько отличается от приведенного в работе (Минц и др., 2010), поскольку при их выделении использовались не только данные отражающих площадок МОВ-ОГТ, но и результаты трехмерного плотностного моделирования.

По характеру смены ориентировки отражающих площадок и резкому градиенту плотности на разрезе уверенно выделяется граница между земной корой и верхней мантией, расположенная на глубине 52–53 км (рис. 4). Граница Мохоровичича на разрезе располагается практически горизонтально, но при этом плотность пород верхней мантии на северной части профиля (примерно до пикета 2700 км) несколько повышена по сравнению с южным фрагментом профиля. В области нижней коры, граница которой в плотностной модели проявляется по резкому возрастанию вертикального градиента плотности примерно на глубине 31–34 км, специфика пространственной ориентировки сейсмических отражающих площадок позволяет разделить изучаемый разрез на две части. Северная часть, примерно до пикетов 2720–2740 км, имеет относительно равномерное положение отражающих площадок и параллельный характер границ «сейсмических доменов». В южной же части геотраверса нижняя кора существенно дифференцирована по ориентировкам отражающих площадок, а границы «сейсмических доменов» имеют даже встречное падение (рис. 4). Отметим, что смена характера сейсмических отражений в нижней коре приходится примерно на область южного борта Байгоровского грабена (рис. 2). Выявленные различия в строении нижней коры по фрагменту геотраверса позволяют предполагать, что северная и южная области опосредованно отражают специфику геологической эволюции литосферных блоков региона.

На уровне средней коры, в интервале глубин примерно от 30 до 15 км, указанные различия в структуре северного и южного фрагментов разреза просматриваются еще более выразительно. Здесь в северном блоке средняя кора имеет три слоя с различной плотностью и примерно одинаковой мощностью 5–8 км, а для южного блока установлено только два слоя, причем нижний (с повышенной плотностью) имеет мощность около 15 км. Для «сейсмического образа» коры северный блок менее выражен в структуре отражающих площадок, а южный имеет очень четкие границы между доменами коры, ориентировка которых выделяется и в плотностной модели (рис. 4).

Для верхней коры региона рассчитанная плотностная модель отличается большей детальностью, что позволило уверенно транслировать поверхностные плотностные неоднородности на глубину до 10–16 км. Наиболее выразительными объектами в верхней коре являются крупные тела гранитоидов усманского комплекса подсеченные на разрезе по геотраверсу 1-ЕВ (рис. 4), которые имеют форму батолитов и характеризуются значениями плотности в (2650–2700) кг/м³. Отметим, что практически все такие тела на профиле, за исключением самого северного объекта, приурочены к зонам неоднородности «сейсмических доменов» коры, с преимущественно субвертикальной ориентировкой. Контакты выявленных тел частично подтверждаются и в сейсмических отражениях. В южной части профиля, в пределах Донского террейна, на разрезе локализовано крупное тело низкоплотных субщелочных гранитов павловского комплекса, имеющее достаточно сложную форму подошвы. Как и для усманских гранитоидов, этот объект приурочен к субвертикальным контактам «сейсмических доменов» и частично выделяется и в ориентировках площадок сейсмических отражений. Отметим, что приуроченность выявленных в модели низкоплотных тел к субвертикальным элементам «сейсмического образа» может свидетельствовать о возможном источнике поступления гранитоидов с уровня средне-нижней коры (рис. 4).

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 части земной коры области исследований. Анализ пространственной дифференциации детальной плотностной модели позволяет уточнить поверхностное геологическое строение области исследований и проследить расположение известных крупных геологических объектов на глубину.

В региональном плане, полученные результаты хорошо согласуются с палеогеодинамической моделью развития западной части Волго-Донского орогена, где метаосадки воронцовской серии надвинуты на образования лосевской серии (Terentiev et al., 2017). Спецификой постколлизийной эволюции коры является также развитие несимметричной грабенообразной структуры, выполненной образованиями молассы (Terentiev et al., 2016b), которые имеют повышенную, по сравнению с подстилающими породами, плотность.

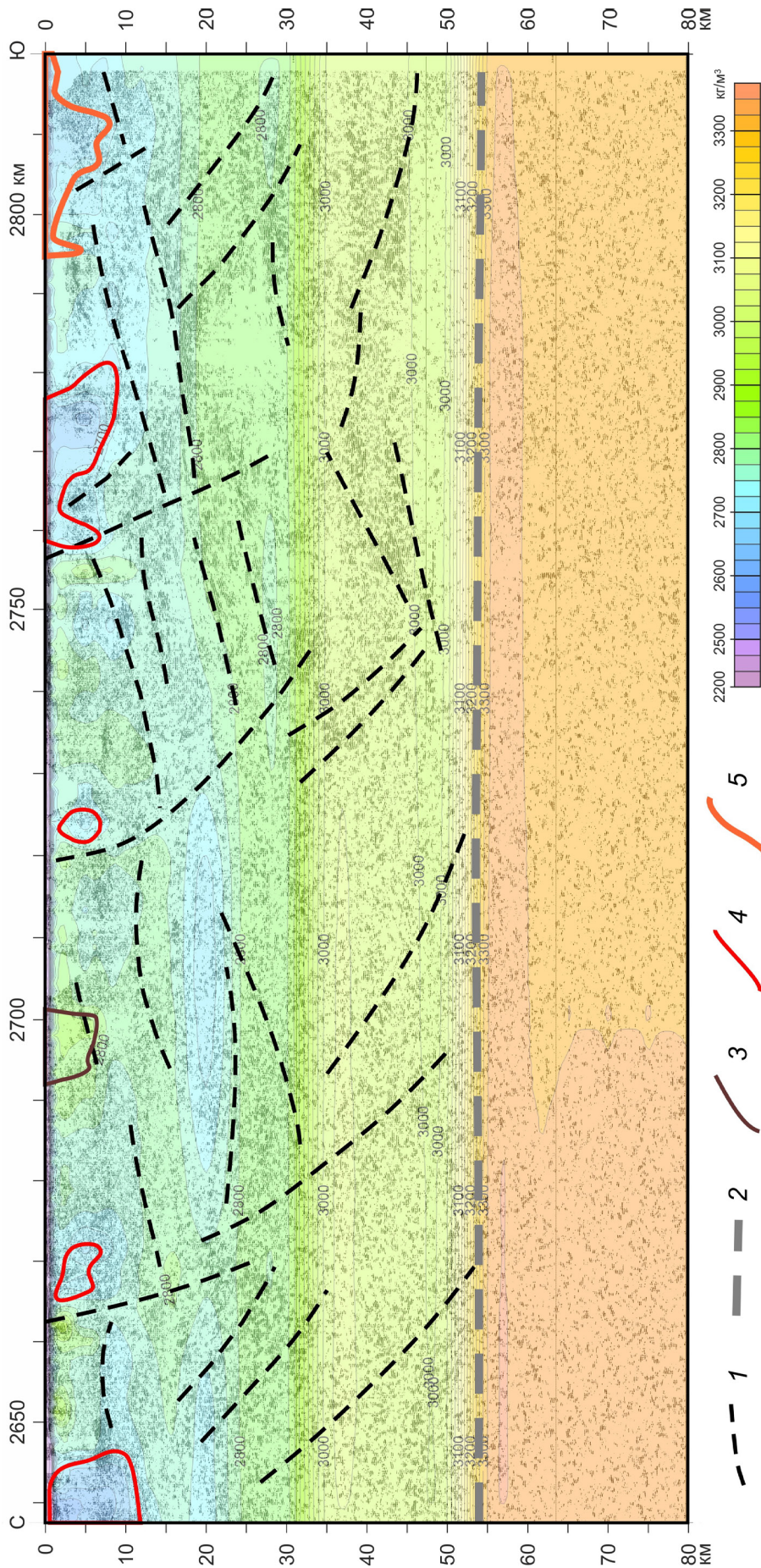


Рис. 4. Сейсмо-плотностной разрез по профилю MOV-ОГТ 1-ЕВ (координатная привязка по горизонтали соответствует системе координат, использованной в монографии (Минц и др. 2010)): 1 — границы «сейсмических доменов» коры; 2 — современное положение границы Мохоровичича; 3 — контуры грабена, выполненного высокоплотными породами; 4 — контуры крупных тел усманских плагиогранитов; 5 — контуры крупного тела субщелочных гранитоидов павловского комплекса.

Fig. 4. Seismic-density section along the profile of MOV-OF 1-EB (horizontal coordinate reference corresponds to the coordinate system used in the monograph (Mints et al. 2010)): 1 — boundaries of «seismic domains» of the crust; 2 — the current position of the Mohorovich boundary; 3 — contours of the graben made of high-density rocks; 4 — contours of large bodies of Usman plagiogranites; 5 — contours of a large body of subalkaline granitoids of the Pavlovsky complex.

Сопоставление согласованной трехмерной синтетической плотностной модели литосферы с независимыми данными глубинных сейсмических исследований МОВ-ОГТ по фрагменту геотраверса I-ЕВ (Минц и др., 2010) свидетельствует о достоверности полученных результатов интерпретации гравитационного поля в области сочленения Курского, Лосевского и Воронцовского террейнов. В комплексной сейсмоплотностной модели литосферы по фрагменту геотраверса устанавливается связь проявлений гранитоидного магматизма с тектоническими структурами земной коры региона.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 23-27-00251.

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. Вып. 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)].
- Бибикова Е.В., Богданова С. В., Постников А.В. и др.* Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // Стратиграфия и геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16 [*Bibikova E.V., Bogdanova S. V., Postnikov A.V. et al.* The junction zone of Sarmatia and Volga-Uralia: isotope-geochronological characteristics of supracrustal rocks and granitoids // Stratigraphy and geological correlation. 2009. V. 17. № 6. P. 3–16 (in Russian)].
- 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. Науки о Земле. 2021. № 1. Вып. 49. С. 24–35 [*Voronova T.A., Muravina O.M., Glaznev V.N., Berezneva S.I.* Three-dimensional density model of the upper crust in the area of articulation of the Losevsky and Donskoy terranes (Voronezh crystal massif) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021. № 1(49). P. 24–35 (in Russian)]. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-1-49-24-35>
- Воронова Т.А., Глазнев В.Н., Муравина О.М.* Результаты численного моделирования с целью оптимизации работы алгоритма инверсии гравитационного поля // Материалы 47-й сессии международного научного семинара им. Д.Г.Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж: «Научная книга». 2020. С. 76–79 [*Voronova T.A., Glaznev V.N., Muravina O.M.* Results of numerical modeling to optimize the operation of the gravitational field inversion algorithm // Materials of the 47th session of the international scientific seminar named after D.G. Uspensky – V.N. Strakhova «Questions of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields». Voronezh: «Nauchnaya kniga». 2020. P. 76–79 (in Russian)].
- Глазнев В.Н.* Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии // Апатиты: Изд. «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., Минц М.В. и др.* Петроплотностная модель и гравитационный эффект осадочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления // Материалы 40-ой сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». М.: ИФЗ РАН. 2013. С. 107–112 [*Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Mints M.V. et al.* Petrodensity model and gravitational effect of the sedimentary cover of the Voronezh crystalline massif and its framing // Materials of the 40th session of the international seminar D.G. Uspensky «Questions of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields». Moscow: IPE RAN. 2013. P. 107–112 (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 Lovozersky massifs, Kola Peninsula // Doklady RAS. 2008. V. 422. № 3. P. 391–393 (in Russian)].
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М.* Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [*Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M.* Plotnostnoe modelirovanie central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy // Vestnik KRAUNTs. 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., Муравина О.М., Раевский А.Б.* Аппроксимационный оператор обратной задачи гравиметрии для горизонтального слоя // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2023. № 1. С. 97–105 [*Glaznev V.N., Muravina O.M., Rayevsky A.B.* Approximation operator of the inverse gravimetry problem for a horizontal layer // *Vestnik Voronezh state University. Ser. Geology*. 2023. № 1. P. 97–105 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/97-105>.
- Крестин Е.М.* Докембрий КМА и основные закономерности его развития // *Изв. ВУЗов. Геология и разведка*. 1980. № 3. С. 3–18 [*Krestin Ye.M.* Dokembriy KMA i osnovnyye zakonovernosti yego razvitiya // *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka*. 1980. № 3. P. 3–18 (in Russian)].
- Лебедев И.П., Молотков С.П., Кривоцов И.И., Лосицкий В.И.* Структурно-геологические особенности воронцовской серии Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 1999. № 7. С. 25–30 [*Lebedev I.P., Molotkov S.P., Krivosov I.I., Lositskiy V.I.* Strukturno-geologicheskiye osobennosti vorontsovskoy serii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva (VKM) // *Vestnik Voronezh state University. Ser. Geology*. 1999. P. 25–30 (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., Вardanянц И.Л. и др.* Объемная модель глубинного строения Svecofennian accretionary orogen по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2018. № 2. С. 34–61 [*Mints MV, Sokolova E.Yu., Vardanyants I.L. et al.* 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)]. <https://doi.org/10.17076/geo656>.
- 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 // Moscow: GEOKART - GEOS, 2010. V. 1. 408 p.; V. 2. 400 p. (in Russian)].
- Милиц М.В., Буш В.А., Агеев С.Н.* Строение и эволюция средне-палеопротерозойского Брянск-Курск-Воронежского внутриматерикового 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 intracratonic collisional orogen (East European Craton) // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2014. V. 5. №. 3. P. 717–742 (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., Глазнев В.Н.* Структурно-параметрические модели петрофизических параметров осадочного чехла Воронежской антеклизы // *Известия СО РАН*. 2014. Т. 44. № 1. С. 81–87 [*Muravina O. M., Glaznev V. N.* Structural-parametric models of petrophysical parameters of the sedimentary cover of the Voronezh antecline // *Izvestiya SO RAEN*. 2014. V. 44. № 1. P. 81–87 (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.* Петроплотностная карта Воронежского кристаллического массива // *Материалы 43-й сессии международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей»*. Воронеж: «Научная книга». 2016. С. 133–136 [*Muravina O.M., Zhavoronkin V.I., Glaznev V.N.* Petro-density map of the Voronezh crystalline massif // *Materials of the 43th session of the international seminar D.G. Uspensky «Questions of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields»*. Voronezh: «Nauchnaya kniga». 2016. P. 133–136 (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 anteclise // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2013. № 1. P. 189–196 (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 15-th international conference «Physicochemical and petrophysical research in the Earth sciences». Moscow: IPE RAS, 2014. P. 171–173 (in Russian)].
- Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Трегуб А.И. и др.* Минерогенные исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива) // М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2007. 284 с. [Nenakhov V.M., Strik Yu.N., Tregub A.I. et al. Mineragenic studies of territories with a two-tiered structure (on the example of the Voronezh crystalline massif) // Moscow: GEOKART-GEOS, 2007. 284 p. (in Russian)].
- Раскатов Г.И., Лукьянов В.Ф., Старухин А.А. и др.* Тектоника восточной части Воронежского кристаллического массива и его осадочного чехла // Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1976. 120 с. [Raskatov G.I., Luk'yanov V.F., Starukhin A.A. et al. Tektonika vostochnoy chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva i yego osadochnogo chekhla // Voronezh: Izd-vo Voronezh. un-ta, 1976. 120 p. (in Russian)].
- Савко К.А., Базиков Н.С., Артеменко Г.В.* Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 5. С. 3–21 [Savko K.A., Bazikov N.S., Artemenko G.V. Geochemical evolution of the banded iron formations of the Voronezh crystalline massif in the early precambrian: sources of matter and geochronological constraints // Stratigraphy and Geological Correlation. 2015. V. 23. № 5. P. 451–467].
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. и др.* Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенез и тектоническая обстановка формирования // Петрология. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264 [Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N. et al. 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., Samsonov A.V., Kholin V.M., Bazikov N.S. Megablock Sarmatia as a fragment of the Vaalbar supercraton: correlation of geological events at the Archean – Paleoproterozoic boundary // Stratigraphy. Geological correlation. 2017. V. 25. № 2. P. 3–26 (in Russian)].
- Страхов В.Н.* Теория линейных обратных гравиметрических задач // ДАН СССР. 1990. Т. 311. № 5. С. 1093–1096 [Strakhov V.N. The theory of linear inverse gravimetric problems // Doklady Academy of Sciences of the USSR. 1990. V. 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. [Terentiev R.A. Geology, material composition and paleogeodynamic conditions of the formation of Losevo series (Voronezh crystalline massif) // Series Geology of the Precambrian VKM. Iss. 1. Voronezh, 2013. 222 p.].
- 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)].
- Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О.* Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70 [Shchipansky A.A., Samsonov A.V., Petrova A.Yu., Larionova Yu.O. Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic // Geotektonika. 2007. № 1. P. 43–70 (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., Dokukina K.A., Konilov A.N. et al.* East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure // Geological Society of America. Special Paper. 2015. V. 510. 433 p.
- 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. P. 1–24. <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*. 2016a. V. 246–247. P. 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., 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*. 2016b. V. 273. P. 165–184. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.009>.
Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N. et al. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application // *Precambrian Research*. 2021. 353. 106021. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106021>.

To the memory of M.V. Mints is dedicated

THE STRUCTURE OF THE CENTRAL PART OF THE PALEOPROTEROZOIC LOSEV TERRANE ACCORDING TO DENSITY MODELING DATA

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 June 10, 2024; revised Yule 14, 2024; accepted September 25, 2024

The results of detailed three-dimensional density modeling of the upper crust of the central part of the Losevsky terrane located in the northern part of the Voronezh crystal massif are considered. The distribution of absolute crustal density values of to a depth of 16 km was obtained as a result of the inversion of local anomalies of the gravitational field in the Bouguer reduction. The solution of the inverse problem of gravimetry was implemented within the framework of the initial model, which was formed using digital geological and geophysical data from the study area: the regional density model of the East European Platform lithosphere and its corresponding regional gravity field; the field of local gravity anomalies, representing the difference between the observed and regional fields of the lithosphere model; generalized information on the density of sedimentary cover rocks and the crystal basement; the thickness scheme of the «gravity-active» layer, obtained on the basis of statistical analysis of the anomalous field; geological and topographic information. Quantitative interpretation of the gravimetry data allowed us to obtain fundamentally new information about the geological structure of the upper crust of the study area. The reliability of the obtained results is confirmed by the consistency of a priori data and the correspondence of the total model (local plus regional) and observed gravitational fields.

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