

Расшифровка тектонических элементов и внутренней структуры палеопротерозойского Лосевского террейна (Волго-Донской ороген) по данным плотностного моделирования

©2024 Р. А. Терентьев[✉], Т. А. Воронова, О. М. Муравина, В. Н. Глазнев

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: многие аспекты строения террейнов, из которых состоят орогены, остаются дискуссионными. В данной статье внимание уделяется наиболее широкой части Лосевского террейна палеопротерозойского Волго-Донского орогена в юго-восточной части Восточно-Европейского кратона. В этом регионе объектами дискуссий являются: тектоническая природа террейна, его соотношение с соседними структурами, кинематика и глубина заложения ограничивающих разломов, форма и глубина залегания интрузий и палеовулканов, мощности и расчленение стратифицированных образований.

Методика: трехмерная модель распределения абсолютных значений плотности земной коры до глубины 10 км была получена в результате инверсии локальных аномалий гравитационного поля.

Результаты и обсуждение: интерпретация результатов плотностного моделирования проведена по трем направлениям: (1) выявление линеаментов как отражение крупных разрывных нарушений, (2) прослеживание особенностей строения стратифицированных или приближенных к ним геологических подразделений, (3) характеристика локальных, контрастных объектов, преимущественно плутонов и палеовулканов разного состава. **Выводы:** Исследуемая площадь представляет собой крупную палеосинформу, основание которой сложено нерасчлененными гнейсами и терригенной (нижней) толщей лосевской серии. Установлена кинематика крупных разломов, ограничивающих Лосевский террейн. Выделены и прослежены на глубину зеленокаменные структуры стрелицкой и подгоренской толщ лосевской серии. Уточнены контуры воронежской свиты, мощность которой составляет около 4 км. Вертикальное падение батолитов и штоков усманского комплекса, Ольховского плутона и других интрузий свидетельствует в пользу их внедрения в постколлизийной обстановке.

Ключевые слова: палеопротерозой, зеленокаменный пояс, грабен, погребенная синформа, до- и постколлизийные интрузии, палеовулканы, плотностное моделирование

Источник финансирования: научные исследования выполнены в рамках гранта РНФ № 23-27-00251.

Для цитирования: Терентьев Р. А., Воронова Т. А., Муравина О. М., Глазнев В. Н. Расшифровка тектонических элементов и внутренней структуры палеопротерозойского Лосевского террейна (Волго-Донской ороген) по данным плотностного моделирования // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 3. С. 79–95. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/79-95>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Терентьев Роман Анатольевич, e-mail: terentiev@geol.vsu.ru

Введение

Орогены являются важными элементами строения континентальной коры, но многие вопросы их строения, особенно в раннедокембрийских аналогах, остаются дискуссионными. Террейны, из которых состоят орогены (например, [1–3]), ограничены разломами часто не установленной или спорной кинематики. Докембрийские стратифицированные осадочные и вулканические образования и плутонические комплексы представлены на современном эрозионном срезе, как правило, сильно деформированными породами, которые испытали многочисленные тектоно-магматические события, следующие за самым ранним этапом орогенеза. Наложенные процессы в значительной степени затрудняют понимание условий залегания, внутреннего строения террейнов, мощностей слагающих толщ, форм тел мантийного и корового магматизма. Поэтому важным для петрологии докембрия является изучение древних, в том числе палеопротерозойских, орогенов, прошедших не более одного орогенного цикла, породы которых могли сохранить первичные особенности внутреннего строения.

В данной статье внимание уделяется наиболее широкой части Лосевского террейна Волго-Донского орогена (ВДО), расположенному между Сарматским кратоном и Воронцовским террейном ВДО в юго-восточной части Восточно-Европейского кратона (рис. 1). Первоначально этот террейн известен как Лосевская шовная зона [4], Ливенско-Богучарская структура [5] или Липецко-Лосевский вулcano-плутонический пояс [6, 7]. Несмотря на различную палеотектоническую интерпретацию ВДО, широко признано, что формирование этого орогена укладывается в один цикл Уилсона. Последующие тектоно-магматические события связаны со спорадической внутриплитной активностью. Это обеспечило хорошую сохранность палеопротерозойских пород орогена и возможность их детального изучения различными инструментальными методами, в том числе геофизическими, а также построение геодинамических моделей по аналогии с фанерозойскими орогенами. Настоящее исследование направлено на использование данных гравиметрической съемки для характеристики глубинного строения Лосевского террейна.

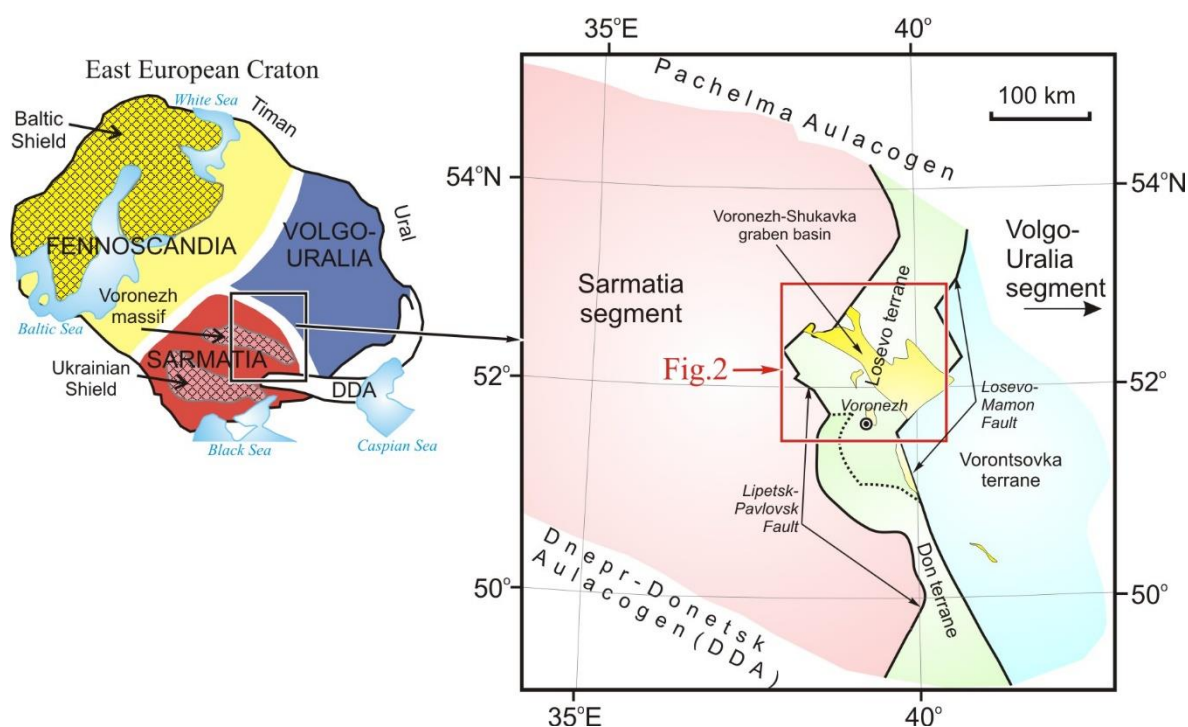


Рис. 1. Схема тектонического строения восточной части Воронежского кристаллического массива (справа) и схема Восточно-Европейского кратона (слева).

[Fig. 1. Structural-tectonic scheme of the eastern part of the Voronezh Crystalline Massif (on the right) and scheme of the East European Craton (on the left).]

Этот регион является объектом дискуссий геологов в течение последних десятилетий из-за трудностей с объяснением тектонической природы террейна и соотношения его с соседними структурами. Тектонические ограничения Лосевского террейна названы Лосевско-Мамонским, на востоке, и Рязанско-Кантемировским (Липецко-Павловским), на западе, глубинными разломами. Кинематика Лосевско-Мамонского разлома

большинством исследователей признается надвиговой, глубинность заложения - мантийная [например, 7, 8]. Остальные крупные разломы не имеют надежной кинематической характеристики.

С позиции учения о геосинклиналях, формации Лосевского террейна рассматривались как образования эвгеосинклинали [9–11] или эпикратонного прогиба [12]. С позиции концепции Тектоники плит, предло-

жено три варианта происхождения Лосевского террейна: (1) палеорифт на начальных этапах развития [13], который не превратился в зрелый океан [5]; (2) крупный зеленокаменный пояс [14] и (3) фрагмент глобальной палеопротерозойской системы островная дуга - задуговой бассейн [15, 16]. Не смотря на ювенильный состав палеопротерозойских вулканитов и осадков террейна [16], предполагалось наличие архейской михайловской серии по сейсмическим данным под лосевской и воронцовской сериями [9, 10]. То есть, считалось, что лосевская серия образовалась за счёт активизации застывших структур на архейской михайловской серии [9].

Дискуссионными остаются вопросы тектонической позиции интрузий и палеовулканов, мощности и расчленения стратифицированных образований. Геодинамика интерпретация гранитных и ультрамафит-мафитовых интрузий и крупных палеовулканов в районе исследований интерпретируется как до-, син-, постколлизийная [5, 13, 16–20]. Лосевская серия, слагающая одноименный террейн, имеет, согласно данным предшествующих исследований, основанных на разных признаках, одно- [14, 21], дву- [4, 10 и многие другие] и трехчленное [16] строение. Максимальные мощности лосевской серии и перекрывающей ее воронезской свиты, как правило, оцениваются в пределах до 3.5 км и до 1 км, соответственно [10] или не установлены [22, 23]. Поэтому исследование также направлено на воссоздание тектоностратиграфической эволюции Лосевского террейна путем выяснения взаимосвязи между геологическими подразделениями и их аномальными эффектами в гравитационном поле.

Наша работа предлагает геологическую трактовку трехмерной плотностной модели верхней части земной коры Лосевского террейна, которая была получена в результате 3D инверсии остаточных аномалий гравитационного поля в редукции Буте, с исключенным влиянием гравитационных эффектов осадочного чехла и региональной модели центральной части Восточно-Европейской платформы [24, 25]. На основе построения разноглубинных срезов распределения абсолютных значений плотности осуществлена попытка решить ряд задач применительно к Лосевскому террейну: определить кинематику крупных разломов, расшифровать внутреннее строение террейна, определить глубину залегания и форму крупных интрузий и палеовулканов, проследить зеленокаменные структуры разных толщ лосевской серии на глубину, оценить мощность лосевской серии и перекрывающих ее груботерригенных пород воронезской свиты.

Геологическая позиция

Площадь исследования относится к широкой, наименее изученной, части Лосевского террейна ВДО. Докембрийские породы вскрыты редкими скважинами и перекрыты чехлом фанерозойских осадков мощностью от 100 до 500 м (рис. 2).

Лосевский террейн структурно ограничен на западе и востоке Сарматским кратоном и Воронцовским

террейном в составе западной части ВДО, соответственно. Он отделен от соседних террейнов разломами, один из которых, восточный Лосевско-Мамонский разлом был реактивирован во время фанерозоя. Сарматский кратон в районе исследований состоит из архейских тоналит-грандьеит-гранодиоритовых ортогнейсов (ТТГ-гнейсы) и второстепенных супракrustальных пород [26], прорванных архейскими и палеопротерозойскими гранитоидами. Воронцовский террейн сложен метатерригенными флишеидными отложениями [27] палеопротерозойского возраста [15, 17, 19], которые прорваны многочисленными интрузиями постколлизийных гранитоидов бобровского комплекса 2050–2070 млн лет [17, 19], ультрамафит-мафитов мамонского комплекса 2072±8, 2073±8 и 2068±13 млн лет, высокомагнезиальных гранитоидов [28]. Самые крупные массивы плутонических пород на участке исследований в Воронцовском террейне, вскрытые скважинами - гранитоидный Панинский бобровского комплекса (234 км²) и габброидный Рябиновский мамонского комплекса (42 км²).

Лосевский террейн сложен бимодальными метавулканогенными породами с толеитами, комагматичными габброидами рождественского комплекса и базальт-андезит-дацитовыми сериями с различными долями осадочного и вулканогенно-осадочного материала [16]. Породы серии повсеместно, но в разной степени, подвержены региональному анатексису и/или инъектированию мигматитами/гранитами. Согласно последним геохронологическим исследованиям, возраст метавулканитов и метасадков лосевской серии составляет 2120–2175 млн лет [16]. Среди лосевской серии внедряются батолиты и штоки (20–540 км²) тоналит-грандьеит-гранодиоритового (ТТГ) усманского комплекса (2100–2075 млн лет [29]) и калиевые известково-щелочные гранитоиды (девицкий тип – аналог павловского комплекса) 2081±12 млн лет назад. Кроме того, в районе исследований из состава рождественского комплекса выделены тела габбро-диоритового состава - макарьевские интрузии [30].

В данной работе принято трехчленное строение лосевской серии [16]. Ранняя *терригенная толща* установлена как пояс север-северо-западного простирания в западной части Лосевского террейна. Она состоит из метаморфизованных псаммитов и пелитов, переслаивающихся с подчиненным количеством метаморфизованных базальтоидов (амфиболитов) различного химизма. Средняя *стрелицкая толща* является преобладающей стратиграфической единицей и занимает преимущественно центральную часть террейна. Она представлена бимодальной ассоциацией метаморфизованных толеитов и риолитов. Метабазиты слагают нижнюю часть формации, в верхней половине наблюдается переслаивание метабазитов и метариолитов. Поздняя *подгоренская толща* обнаружена в виде узких прерывистых зон вдоль восточной границы и в центральной части террейна. Нижняя часть толщи сложена чередованием метаморфизованных плагиобазальтов, андезибазальтов, андезитов, ту-

фов, вулканогенно-осадочных пород и палеопотоков ферробазальтов-андезибазальтов и их туфов. Верхняя часть разреза – это существенно метавулканогенно-осадочная толща с мощными прослоями плагиобазальтов, андезибазальтов и их туфов. Геохронологические и геохимические данные свидетельствуют о том, что вулканические породы ЛТ были сформированы на ранней стадии (терригенная толща) на внут-

риконтинентальной дуге с континентальным основанием, тогда как бимодальные вулканические породы стреличкой толщи были сформированы на средней стадии задугового спрединга. Подгоренские бимодальные вулканические породы плюс непрерывная базальт-андезит-дацитовая формация были сформированы на более поздней стадии на внутриокеанической островной дуге.

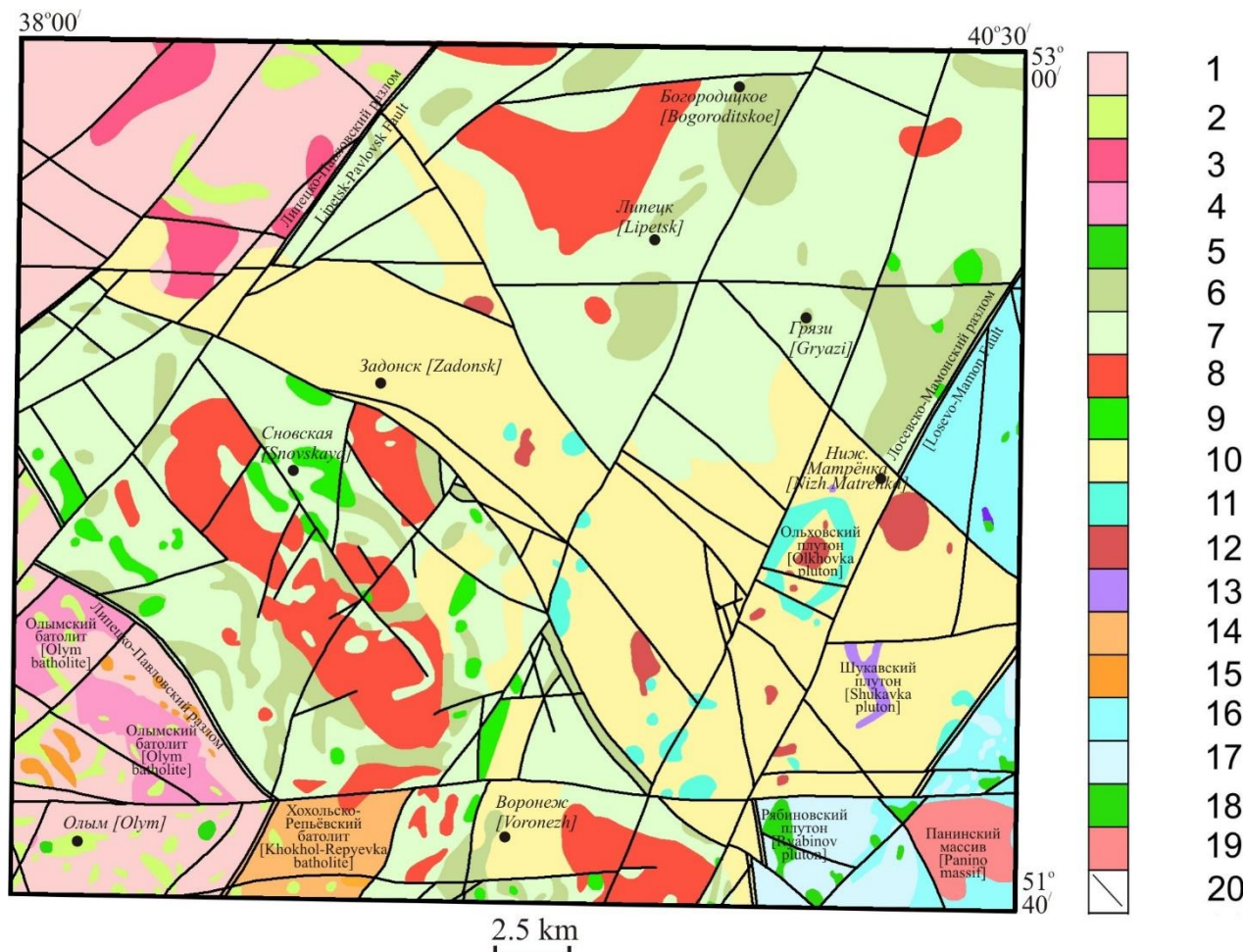


Рис. 2. Геологическая карта докембрийского фундамента центральной части Лосевского террейна (неопубликованные картографические данные масштаба 1:500 000 Лосицкого и др., 1999): Условные обозначения. Сарматский кратон: 1 – обоянский комплекс, 2 – михайловская серия, 3 – атаманский комплекс, 4 – салтыковский 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.

[Fig. 2. Geological map of the Precambrian basement of the Losevo terrane central part (unpublished cartographic data at a scale of 1:500,000 by Lositsky et al., 1999): Legend. Sarmatian Craton: (1) – Oboyan complex, (2) – Mikhailovo Series, (3) – Atamansky complex, (4) – Saltyki complex, (5) – Sergievka complex. Losevo terrane: (6) – Losevo Series (lower), (7) – Losevo Series (upper), (8) – Usman complex, (9) – Rozhdestvenskoe complex, (10) – Voronezh Suite, (11) – Olkhovka complex (first phase), (12) – Olkhovka complex (second phase). (13) – Shukavka complex, (14) – Pavlovsk complex (first phase), (15) – Pavlovsk complex (second phase). Vorontsovka terrane: (16) – Vorontsovka Series (lower), (17) – Vorontsovka Series (upper), (18) – Mamon complex, (19) – Bobrov complex; (20) – faults.]

С размытием и структурным несогласием Лосевский и, предположительно, Воронцовский террейны [31], перекрывают слабо метаморфизованные груботерригенные породы и филлиты воронежской свиты, заполняющие грабен-синклиналильные структуры [32], самая крупная из которых носит название Воронежско-

Шукавской. Воронежская свита, в основном состоящая из терригенных обломочных пород (метаконогломераты, метапесчаники, метаалевролиты) и филлитовидных сланцев, распространена в центральной части участка и протягивается с юго-востока на северо-запад (рис. 2). В обломках конгломератов воронежской

свиты содержится галька гранитоидов и вулканитов Лосевского террейна [31]. Среди терригенных пород встречаются вулканогенные постройки палеопротерозойского возраста (например, Байгоровский ареал), которые выделяются по повышенным значениям гравитационного и магнитного полей и группируются в серию вытянутых в север-северо-западном направлении тел или образуют высокомагнитную кольцеобразную Байгоровскую вулканогенную постройку размером около 8х12 км, прорванную в центре кольца штоком андезит-дацитовых порфириров [20]. Свита прорвана интрузиями диорит-гранитного состава ольховского комплекса и ультрамафитами шукавского комплекса (до 37 км²). Самый крупный, диаметром около 20 км, плутон относится к Ольховскому двухфазному массиву. Он выделяется по высоким значениям гравитационных и магнитных аномалий, формирует изометричную кольцевую постройку, осложненную в центре отрицательными значениями поля силы тяжести, соответствующие лейкогранитоидам центрального штока.

На юго-западе площади исследований развиты батолиты павловского комплекса, которые состоят из кварцевых монцонитов и кварцевых монцодиоритов дифференцированных до гранодиоритов и монцогранитов порфириовидных в центре и равномернозернистых в краевой зоне батолита. Они формировались в узком временном интервале – 2060–2077 млн лет [33]. Эти батолиты окаймляются инъекционными мигматитами, прорывают образования донской серии (за пределами площади) и переработанные в протерозое образования обоянского метаморфического комплекса.

Методика исследования

Детальная трехмерная плотностная модель области исследования является частью плотностной модели верхней коры восточной части ВКМ, охватывающей зоны сочленения Лосевского, Воронцовского, Донского террейнов Волго-Донского орогена и Сарматского кратона. Модель сформирована на основе последовательного объединения плотностных моделей, полученных на отдельных участках подобных друг другу по таким параметрам, как размер сети и структура стартовой модели, которые затем были сведены в единую согласованную плотностную модель.

Детальная инверсия гравитационного поля столь большой территории стала возможной благодаря выполнению предварительных региональных исследований, таких как вычисление гравитационного эффекта осадочного чехла, создание региональной плотностной модели [24, 25, 34], обобщение большого объема петрофизических данных и формирование петроплотностной карты [35, 36], оценка мощности гравиактивного слоя [37].

Плотностное моделирование выполнялось по технологии, основные принципы которой подробно изложены в работах [38–41]. Данные по региону Воронежского кристаллического массива (ВКМ), необходимые для инверсии гравитационного поля, и результаты моделирования объединены в единый геоинформацион-

ный проект (ГИС ArcView). В качестве исходного поля были использованы локальные аномалии гравитационного поля, заданные в узлах 2 километровой регулярной сетки в XY прямоугольных координатах Гаусса-Крюгера на поверхности рельефа (по данным наземной съемки масштаба 1:50 000 и 1:200 000). Поле локальных (остаточных) гравитационных аномалий является разностью наблюдаемого и регионального полей с исключенным влиянием гравитационного эффекта осадочного чехла [24].

Массивы минимаксных ограничений на плотность, значений весовой функции, плотности региональной модели, стартовые значения плотности были заданы в точках модели. Структура стартовой модели была сформирована на основе представлений о мощности «гравиактивного слоя» региона [37] и представлена совокупностью горизонтальных слоев, мощность которых увеличивалась с глубиной (от 0.05 до 4 км). Суммарная мощность модельного слоя составляла 16 км, что соответствовало 17 горизонтальным слоям, мощность которых последовательно увеличивается с глубиной от 50 метров до 4 километров. Значения плотности в стартовой модели среды, а также минимаксные ограничения на плотность задавались в соответствии с петроплотностной картой кристаллического фундамента [35, 36] для слоев модели, расположенных в пределах «гравиактивного» слоя. Для области ниже подошвы «гравиактивного слоя», значения плотности соответствовали значениям интерполированной в плане плотности региональной модели литосферы ВКМ [24, 25, 34].

Расчет детальной плотностной модели по каждому участку исследования выполнялся с помощью программы, реализующей решение линейной обратной задачи гравиметрии с использованием аппроксимационного представления спектральной формы оператора обратной задачи для горизонтального слоя [42, 43]. В каждой точке решением обратной задачи по невязке поля находится невязка плотности, которая затем перераспределяется в слои модели в соответствии с заданной весовой функцией. Весовая функция сформирована таким образом, что максимум невязки распределяется в слой на глубину, которая соответствует половине мощности «гравиактивного слоя», значение перераспределяемой невязки постепенно уменьшается так, что верхний и нижний слои модели практически не изменяются. Это связано с тем, что плотность верхнего слоя задана по данным бурения, а нижнего – соответствует рассчитанной ранее плотности региональной модели.

Таким образом, характер итогового распределения плотности является одним из возможных вариантов строения среды в рамках принятой интерпретационной модели в целом [42–44].

В пределах отдельного участка инверсия гравитационного поля осуществляется в несколько этапов, на каждом из которых выполняется точечная корректировка плотностей стартовой модели в областях аномальных значений итоговой невязки на основе

априорной информации. Такая процедура позволила снизить невязку модельного и наблюдаемого полей от (25–30) мГал в стартовой модели, до (2.5–3.5) мГал в итоговой модели [39].

Результаты исследования и обсуждение результатов

Анализ результатов плотностного моделирования проведен по трем направлениям:

- 1) выявление линеаментов как отражение крупных разрывных нарушений,
- 2) прослеживание особенностей строения стратифицированных или приближенных к ним геологических подразделений (метаморфических, метаморфизованных комплексов),
- 3) характеристика локальных, контрастных объектов,

преимущественно плутонов и палеовулканов разного состава.

Интерпретация полученных данных проведена с учетом геологического строения, состава и возраста типовых объектов, вскрытых скважинами на площади исследования или за ее пределами. Обобщение этой информации представляет выводы о строении Лосевского террейна и его вероятной палеогеодинамике.

Линеаменты

Контрастно, особенно на глубинах 2–6 км, иногда 8 км, выражены крупные разломы, в том числе Лосево-Мамонский разлом (рис. 3), который считается глубинным [7, 8]. Поверхность сместителя Лосево-Мамонского разлома постепенно смещается на запад.

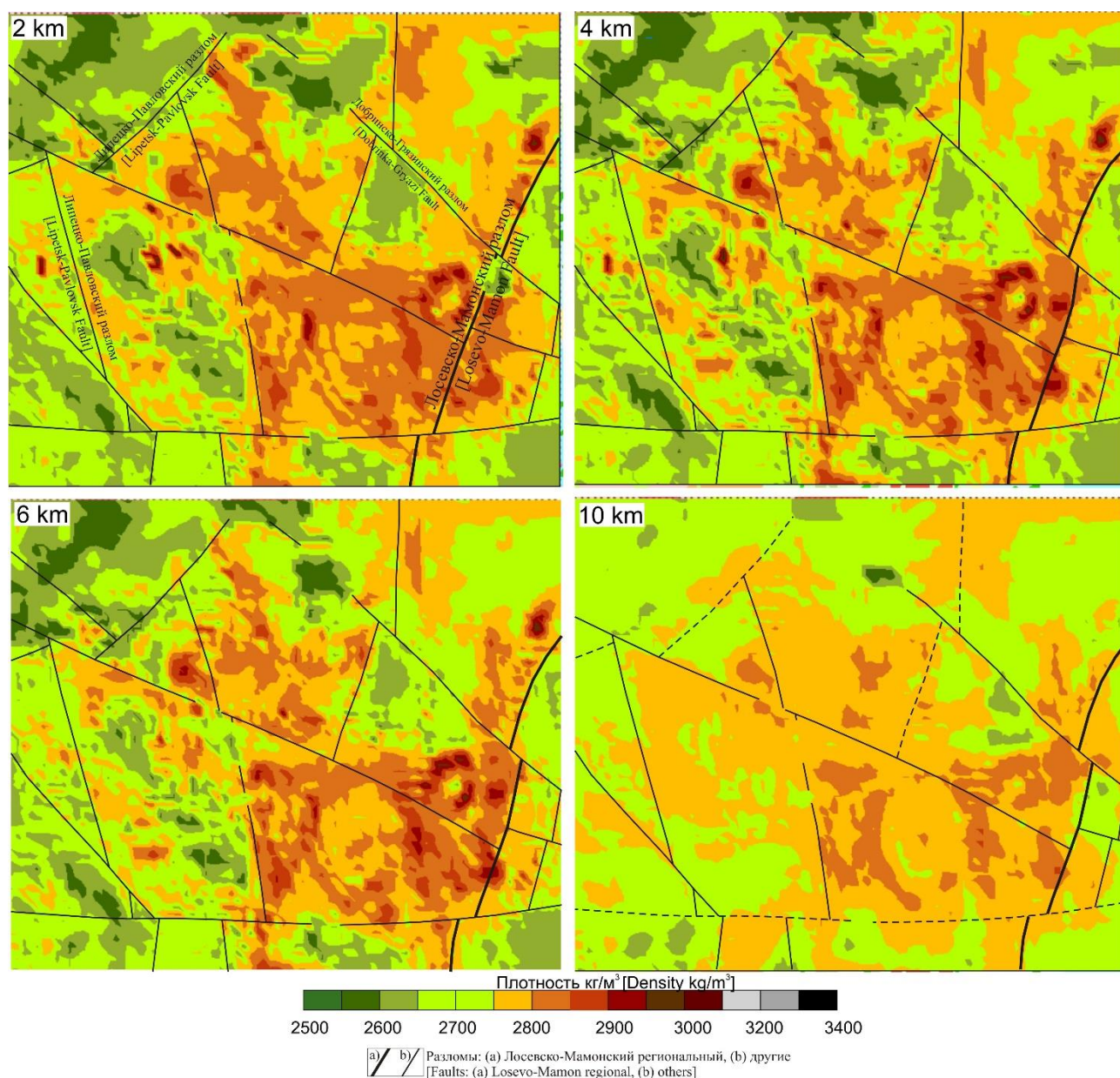


Рис. 3. Линеаменты на схеме распределения плотности на горизонтальных срезах верхней коры.
[Fig. 3. Lineaments are in the scheme of density distribution diagram on horizontal depth sections of the upper crust.]

Это смещение увеличивается от северо-восточной части разлома к юго-западной от 2.5 до 15 км. Угол падения, соответственно, изменяется от 76 до 33.5°. Границу между надвигом и обычным взбросом, и в русскоязычной [45], и в иностранной [46] литературе, проводят по величине угла 45° (реже 60° [45], часто меньше 30° [46]). Таким образом, в самом строгом смысле, в данном регионе Лосевско-Мамонский разлом предстает собой взброс с падением на ЮВ, а черты надвига он приобретает лишь в юго-западной части. В этом случае, по этому разлому воронцовская серия надвинута на лосевскую серию. Глубинность разлома более 10 км. Остальные разломы, как первого (разделяющие террейны), в первую очередь, Липецко-Павловский, так и второго порядка (внутри террейна), в том числе Добринско-Грязинский (разделяет лосевскую серию и воронежскую свиту на севере изученной площади), имеют субвертикальное падение, так как они без смещения прослеживаются на разных глубинных срезах (рис. 3). Разломы второго порядка на 10 километровом срезе "теряются" в

гравитационном поле, по-видимому, исчезают, что позволяет их относить к малоглубинным.

Стратоны и аналоги

Значительная часть исследуемой территории сложена породами лосевской серии. Серия расчленена на три толщи. Самая нижняя из которых имеет существенно терригенный состав с прослоями метавулкаников. До недавнего времени считалось, что лосевскую серию слагают преимущественно метавулканогенные породы [14, 47 и др.], несмотря на то, что Ю.С. Зайцев с соавторами [9], впервые выделившие серию, описывали мощные толщи метаосадков в ее составе. Данные о метаосадочных и метавулканогенно-осадочных образованиях, которые занимают обширную площадь докембрийской поверхности Лосевского террейна, как правило, не учитывались. Тем не менее, по петрофизическим параметрам терригенные и вулканогенные (зеленокаменные породы, амфиболиты) лосевской серии различаются (рис. 4).

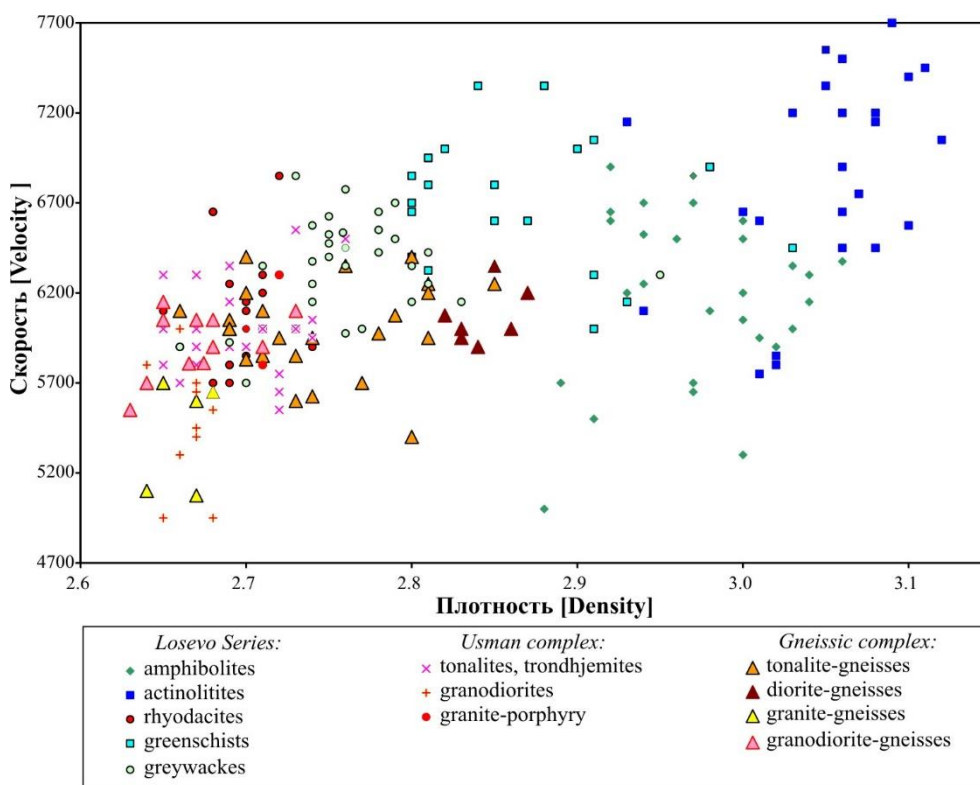


Рис. 4. Закономерности распределения плотности (σ г/см³) и скорости распространения продольных волн (V_p , м/с) в докембрийских породах Лосевского террейна.

[Fig. 4. Distribution of density (σ g/cm³) versus compressional velocity (V_p , m/s) in the Losevo terrane Precambrian rocks.]

Это различие побудило нас попытаться выявить зеленокаменные структуры (сложенные преимущественно плотными породами) существенно вулканогенных толщ лосевской серии. Две верхние толщи лосевской серии хорошо прослеживаются на разных уровнях плотностной модели (рис. 5). Например, подгоренская (верхняя) толща имеет субмеридианальное простирание, которое отличается от простирания зеленокамен-

ных структур (ЗКС) стрелицкой (средней) толщи с северо-западным простиранием. Стратотипическая ЗКС подгоренской толщи прослеживается до глубин 10 км. Вторая, Матрёнкинская ЗКС, восточнее Ольховского плутона, прогнозируется в данной работе впервые, она подтверждена лишь одной глубокой скважиной Б-1. Вероятно, эта структура вмещает ультрамафитовые плутоны, относимые к шукавскому комплексу. Она имеет

протяженность почти 100 км. ЗКС стрелицкой толщи разделены на 4-е структуры, которые ограничены разломами. Стратотипическая ЗКС на площади исследований представлена лишь самым северным фрагментом. Грязинская ЗКС (№ 4), в центре площади, формирует самую крупную положительную аномалию плотности, которая выглядит как гигантская, диаметром 80 км, кольцевая

структура. Сновская ЗКС (№ 5) разбита на фрагменты плутонами усманских гранитов. Задонская ЗКС № 6, возможно, является продолжением Грязинской ЗКС на севере, но эти структуры различаются уровнями эрозионного среза. Богородицкая ЗКС (№ 7) – это глубоко эродированный фрагмент, который на глубине 10 км практически исчезает.

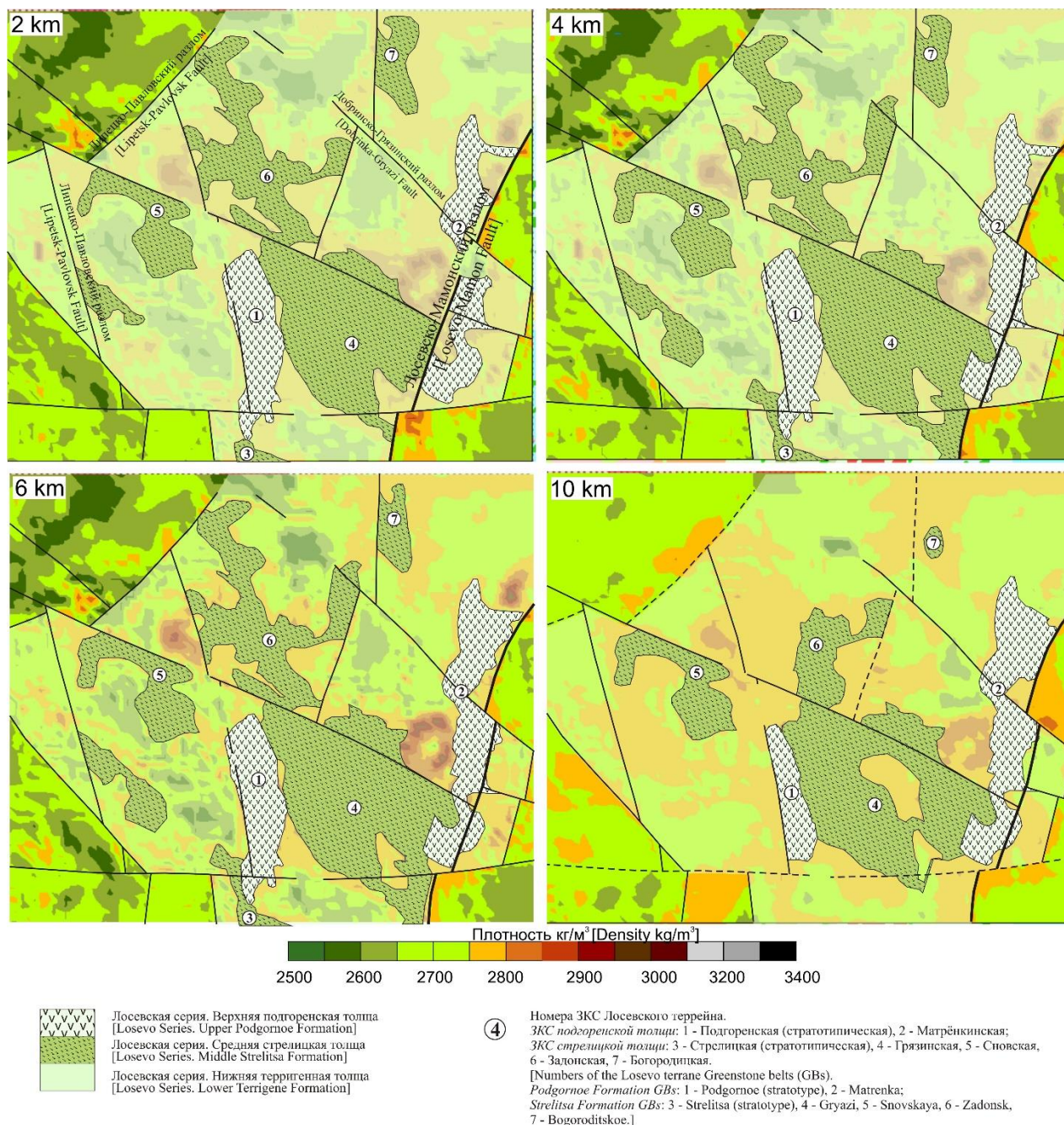


Рис. 5. Зеленокаменные структуры (ЗКС) Лосевского террейна на схеме распределения плотности на горизонтальных срезах верхней коры.

[Fig. 5. Greenstone belts (GB) of the Losevo terrane are in the scheme of density distribution diagram on horizontal depth sections of the upper crust.]

ЗКС подгоренской толщи выклиниваются на глубинах 10 км, в отличие от ЗКС стрелицкой толщи, которые расширяются с глубиной. Видимые мощности

всех трех толщ лосевской серии оцениваются по керну скважин как превышающие 1 км [16]. Учитывая, что эти толщи сильно дислоцированы и смяты в складки,

наша оценка мощностей средней и верхней толщ лосевской серии проведена как 1/3 часть средней ширины выхода и составляет менее 3.3 км для подгоренской толщи и более 5 км для стрелицкой толщи.

Гнейсы Лосевского террейна. Ранее эти породы отдельно не картировались. Типовой разрез вскрыт скважинами 7729, 7731, где он предшественниками показан как архейское "окно" среди лосевской серии. Однако, возраст этих гнейсов оказался протерозойским (наши неопубликованные данные). Эти гнейсы вскрыты скважинами и в других частях террейна, они характеризуются петрофизическими параметрами близкими к

гранитоидам усманского комплекса, однако "рисунок" распределения плотности на срезах модели у гнейсов сильно дифференцированный, заливообразный, что свидетельствует об участии их в складчатости и о до-усманском возрасте. Эти гнейсы, судя по характерному "рисунку" распределения плотности на срезах, развиты в краевых зонах Лосевского террейна. Они прослеживаются на значительной глубине, вплоть до 10 км (рис. 6). Площадь их развития расширяется с глубиной. Данные гравитационного моделирования свидетельствуют в пользу того, что эти гнейсы служили своеобразным основанием для лосевских зеленокаменных структур.

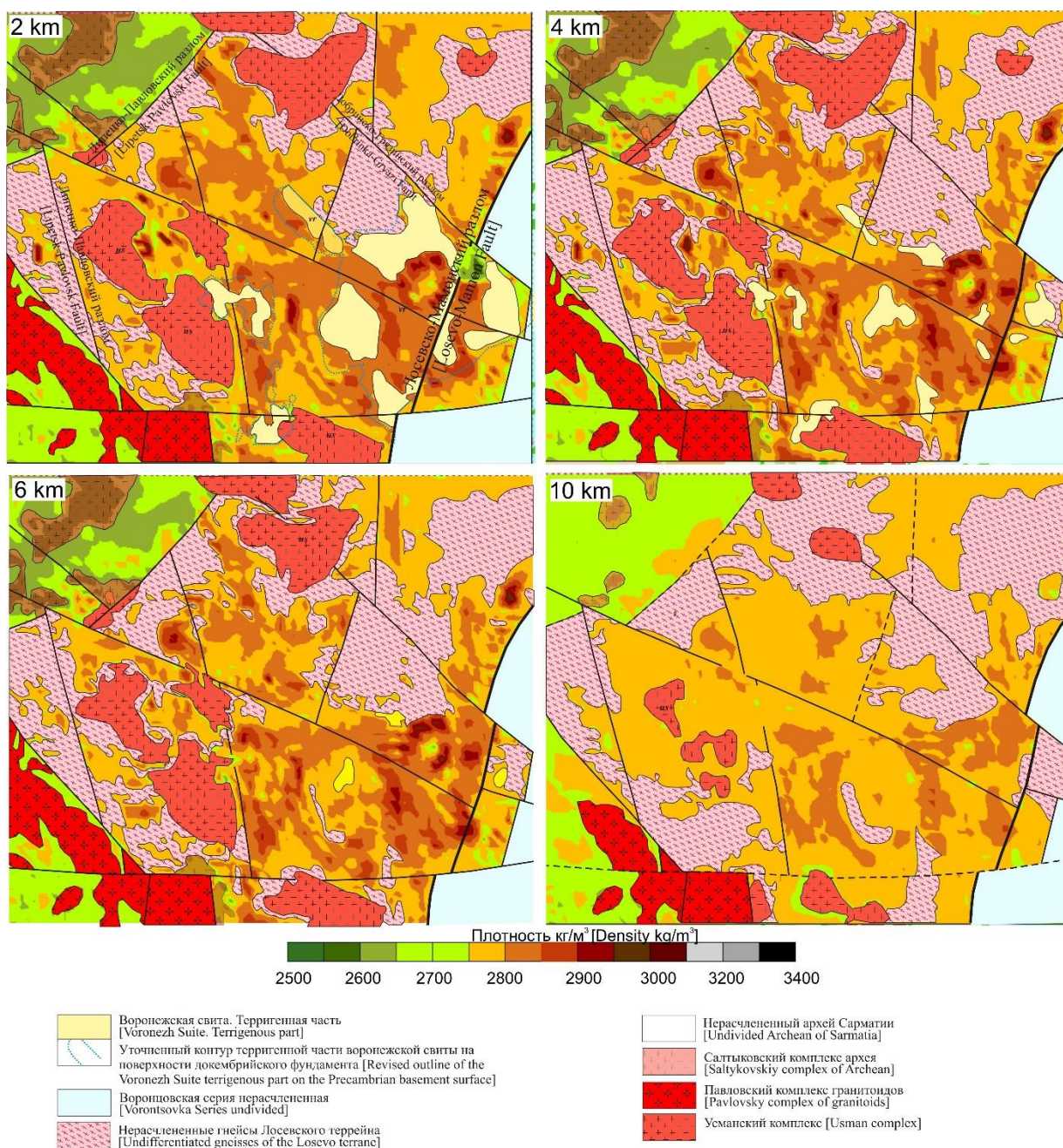


Рис. 6. Гнейсовый комплекс, воронежская свита, усманский и павловский комплексы Лосевского террейна на схеме распределения плотности на горизонтальных срезах верхней коры.

[Fig. 6. Gneiss complex, Voronezh Suite, Usman and Pavlovsk complexes of the Losevo terrane are in the scheme of density distribution diagram on horizontal depth sections of the upper crust.]

Терригенная часть воронежской свиты отвечают низким и умеренным плотностям, характер распределения плотности на срезах модели, как правило, "спокойный", не дифференцированный и не контрастный. На глубинных срезах терригенные породы свиты (преобладают метапесчаники с метагравелитами и метаконгломератами в основании) быстро "исчезают" на глубинах 4 км (рис. 6). Это хорошо демонстрирует наложенный грабен-синклиальный характер палеобассейнов терригенной части свиты, а максимальная мощность терригенных пород, в депрессиях, оценивается не более 6 км.

Плутоны и палеовулканы

Гранитоиды (батолиты и штоки) усманского комплекса хорошо подтверждаются данными моделирования и характеризуются значениями низкой плотности. Батолиты (рис. 6) прослеживаются до глубин 6 км, на глубине 8–10 км – трансформируются в штоки (вероятно, подводящие каналы). По мере увеличения глубины конфигурация батолитов слабо изменяется,

появляются новые апофизы или исчезают апофизы, которые диагностируются на малых глубинах. Мелкие тела – штоки, как правило, уменьшаются в площади на глубине 4 км, а на глубине 6 км исчезают почти полностью.

Гранитоиды салтыковского комплекса архея по составу аналогичны усманскому комплексу. Это типичные ТТГ-гранитоиды (тоналиты, троньмиты, гранодиориты). Массивы салтыковского комплекса, как и усманские батолиты, прослеживаются до глубины 8 км, на 10 километровом срезе они редуцированы до мелких штоков. Сильно извилистая форма массивов свидетельствует об участии их в складчатости.

Внешнее кольцо Ольховского плутона в виде цилиндра продолжается на глубину до 10 км, почти без изменений мощности и диаметра (рис. 7). Лишь на глубине 10 км южная часть кольца обрывается, исчезает. Вертикальное продолжение Ольховского плутона на глубину также свидетельство его внедрения после основной фазы складчатости и, соответственно, постколлизивной природы.

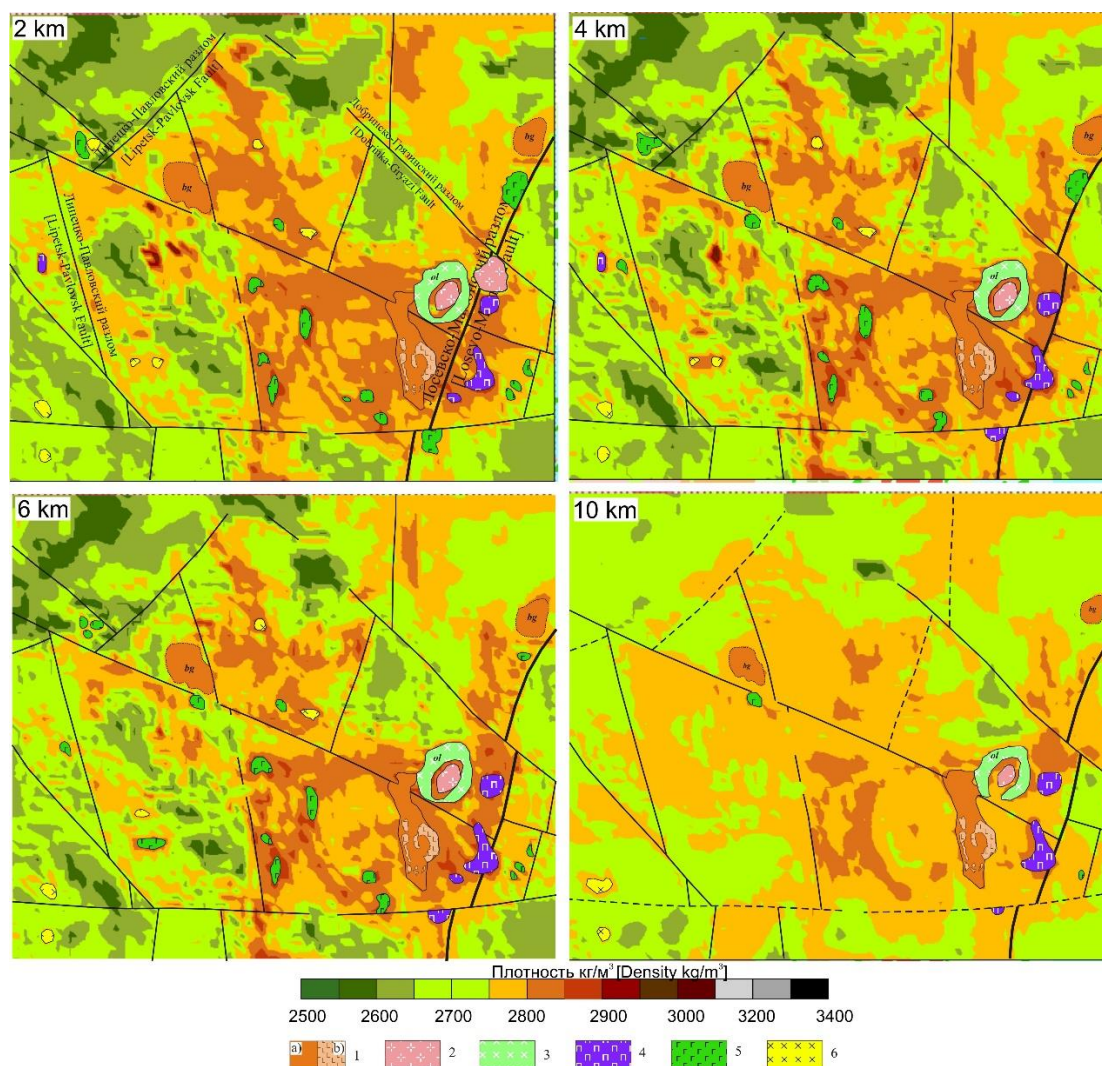


Рис. 7. Интрузии и палеовулканы Лосевского террейна на схеме распределения плотности на горизонтальных срезах верхней коры. Условные обозначения: 1 – воронежская свита, вулканогенная часть: (а) на срезах, (б) проекция на поверхности; 2 – ольховский комплекс, фаза-2; 3 – ольховский комплекс, фаза-1; 4 – ультрамафиты; 5 – габброиды; 6 – диориты.

[Fig. 7. Plutons and paleovolcanoes of the Losevo terrane are in the scheme of density distribution diagram on horizontal depth sections of the upper crust. Legend: (1) – Voronezh Suite. Volcanogenic part: (a) on sections, (b) projection on the surface; (2) – Olkhovka complex (second phase); (3) – Olkhovka complex (first phase); (4) – ultramafic rocks; (5) – gabbroids; (6) – diorites.]

Вулканогенная часть воронежской свиты – Байгоровский палеовулкан. На поверхности этот палеовулкан представлен крупной концентрической постройкой андезибазальтов со штоком дацитов в центре. Другая часть андезибазальтов вытягивается в субмеридианальном направлении в виде цепочки вулканических аппаратов трещинного типа (рис. 7). Совокупность этих палеовулканов прослеживается вертикально на глубины 10 км и, вероятно, более, без значительных изменений мощности. По-видимому, на глубинах 4 и более км, мы имеем дело с корнями крупной вулканической цепи, осложненной концентрической постройкой в центре.

Мелкие интрузии по составу разделены по преобладанию групп пород на ультрамафитовые, мафитовые и диоритовые. Самая крупная ультрамафитовая интрузия представлена вскрытым скважинами Шукавским плутоном. Этот плутон подковообразной формы прослеживается до самых глубоких уровней (10 км). Остальные ультрамафитовые тела выделены и оконтурены предположительно по высоким значениям плотности. Они приурочены к зоне Лосевско-Мамонского разлома. Наиболее крупная мафитовая интрузия мамонского комплекса (Рябиновский плутон), по-видимому, имеет форму лополита и поэтому высокие значения плотности, отвечающие этим мафитовым породам, заметно уменьшаются на 4-км срезе. На рисунке 7 также показана серия мафитовых и диоритовых интрузий, большая часть которых подтверждена бурением. Эти интрузии на разных срезах незначительно меняют форму, частично состав (мафиты сменяются диоритами или наоборот). Большинство из них прослеживается до глубин 6-8 км, однако на 10 км значения плотности снижаются. Исключение составляют предполагаемые интрузии, которые проявляются на глубинах более 4 км и высокие значения плотности прослеживаются до 10 км. Следует отметить, что в этой работе выделены несколько крупных интрузивов в зоне влияния Лосевско-Мамонского разлома. Предполагается, что эти интрузивы расслоены, имеют состав ультрамафит-мафитовый и потенциально медно-никеленосны.

Павловский гранитоидный комплекс (рис. 6). На площади исследования представлен Олымским батолитом и северным фрагментом Хохольско-Репьевского батолита. Оба батолита вскрыты скважинами и датированы палеопротерозоем. Это достаточно мощные тела, которые прослеживаются до глубины 10 км. Они имеют сильно извилистые очертания, что подтверждает высказанное ранее мнение [15] об обширном мигматитовом ореоле вокруг них. Судя по характеру изменения плотности на модельных срезах:

уменьшение плотности на севере и, наоборот, увеличение плотности на юге развития этих гранитоидов; изменяется состав батолитов. С глубиной Олымский батолит сменяется более кислыми гранитоидами, а Хохольско-Репьевский приобретает более основной состав. Вероятно, это связано с разным эрозионным срезом указанных батолитов. На 10 километровом срезе мы наблюдаем корни Хохольско-Репьевского батолита. А для Олымского батолита предполагается минимальный эрозионный срез, поэтому он прослеживается как гранитоидное тело вплоть до 10 км.

Выводы

Анализируя стратиграфическую последовательность толщ лосевской серии, постепенное исчезновение с глубиной терригенной части воронежской свиты, а также краевую позицию нерасчлененных гнейсов Лосевского террейна, можно заключить что центральная часть исследуемой площади представляет собой крупную палеосинформу, основание которой сложено нерасчлененными гнейсами и терригенной (нижней) толщей лосевской серии. Выше по разрезу, ближе к центру палеосинформы, прослеживаются ЗКС стрелицкой толщи, а затем с некоторой степенью дискордантности ЗКС подгоренской толщи. С несогласием и перерывом, лосевскую серию перекрывают конгломераты, песчаники, алевролиты воронежской свиты, площадь распространения которой быстро меняется с глубиной, а мощность составляет около 4 км. Результаты глубинного моделирования, а также изотопные Sm-Nd ювенильные данные [16, 20, 29] опровергают вероятность [9, 10] залегания архейских пород под Лосевским террейном.

Батолиты и штоки усманского комплекса, Ольховский плутон и ряд мелких интрузий - вертикальные тела, самые крупные с подводящими каналами, что свидетельствует в пользу их постколлизийного внедрения и в пользу отсутствия воздействия на них складчатости и заметных интенсивных тектоно-магматических преобразований.

По результатам интерпретации выделены несколько интрузий мафитов и мафит-ультрамафитов, которые ранее на геологических картах не показывались (рис. 8). Кроме этого, прогнозируются две концентрические палеовулканические постройки аналогичные Байгоровскому палеовулкану на северо-западе и северо-востоке изученной площади.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

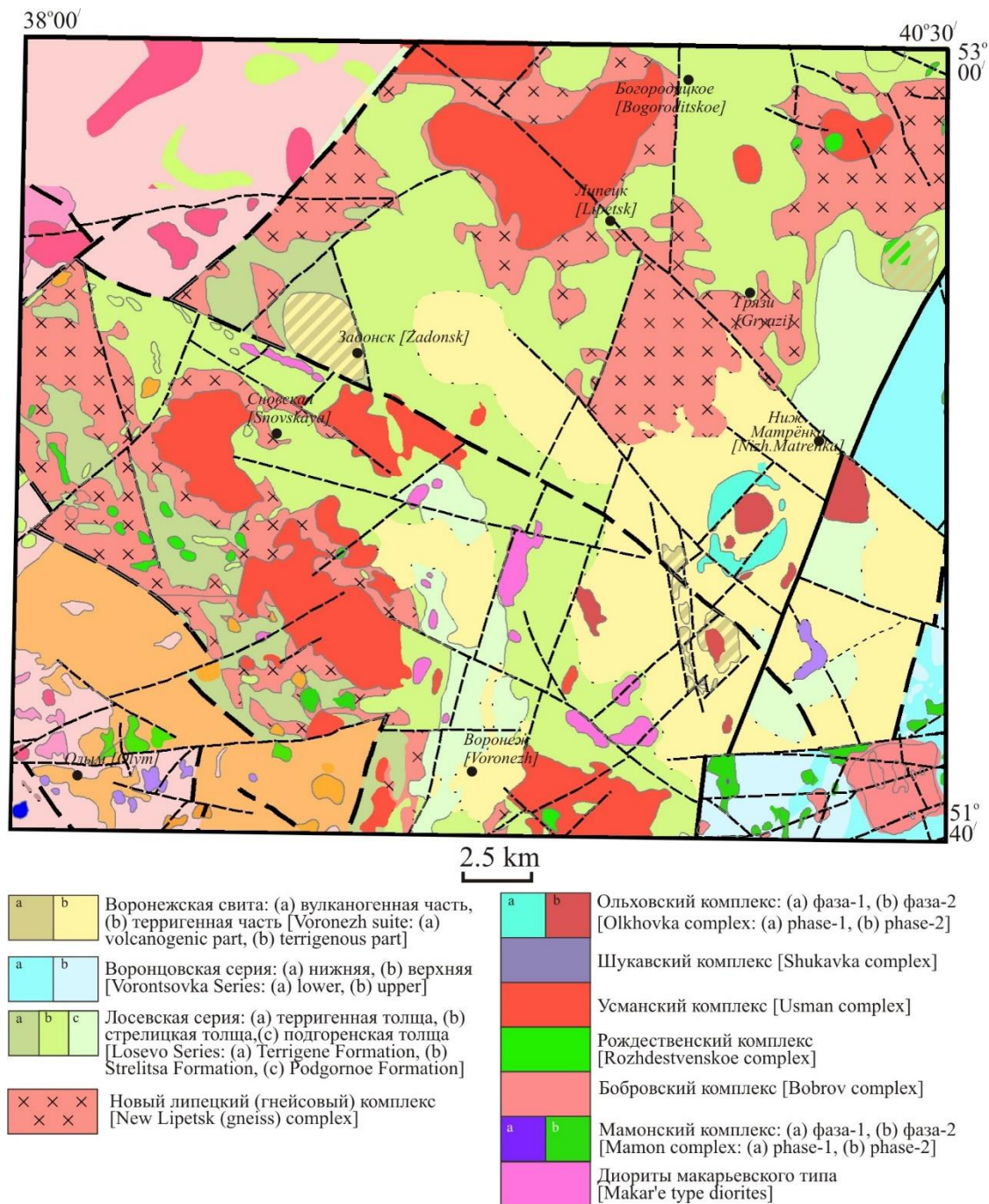


Рис. 8. Уточненная геологическая карта докембрийского фундамента центральной части Лосевского террейна.
[Fig. 8. Revised geological map of the Precambrian basement of the Losevo terrane central part.]

ЛИТЕРАТУРА

1. Cawood P. A., Kroner A., Pisarevsky S. Precambrian plate tectonics: criteria and evidence // *GSA today*. 2006. Vol. 16. P. 4–11.
2. François C., Pubellier M., Robert C., Bulois C., Jamaludin S. N. F., Oberhänsli R., Faure M., St-Onge M. R., Tl6T. Temporal and spatial evolution of orogens: a guide for geological mapping // *Episodes*. 2022. Vol. 45. P. 265–283. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiugs/2021/021025>
3. Kearey P. Orogeny in: Kearey, P. The Encyclopedia of the Solid Earth, 1993. P. 443–444. Blackwell, 713 p.
4. Корреляционная схема стратиграфии и магматизма ВКМ. Под ред. Б. М. Петрова, Н. М. Чернышова, 2001.
5. Чернышов Н. М., Ненахов В. М., Лебедев, И. П. Стрик Ю. Н. Геодинамическая модель формирования Воронежского кристаллического массива // *Геотектоника*. 1997. № 3. С. 21–31.
6. Ножкин А. Д., Крестин Е. М. Радиоактивные элементы в породах раннего докембрия (на примере КМА). М.: Наука, 1984. 128 с.
7. Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N., Philippova I. B., Zlobin V. L., Babayants P. S., Belousova E. A., Blokh Y. I., Bogina M. M., Bush W. A., Dokukin P. A., Kaulina T. V., Natapov L. M., Piip V. B., Stupak V. M., Suleimanov A. K., Trusov A. A., Van K. V., Zamozhniaya N. G. East European Craton: Early Precambrian History and 3D Models of Deep Crustal

- Structure // *Geological Society of America Special Paper*. 2015. 510 p.
8. Чернышов Н. М., Лосицкий В. В., Молотков С. П. Структурно-тектоническое районирование Воронежского кристаллического массива (по геологическим и геофизическим данным). *Современные проблемы геологии: материалы сессии геологического факультета ВГУ. Воронеж: ВГУ, 1998. С. 5–7.*
9. Зайцев Ю. С., Агейкин А. С., Голышкина Р. И., Шобанов В. М. Новые данные по геологии докембрия юго-востока Воронежского кристаллического массива // *Петрография докембрия Русской платформы*. 1970. С. 59–74.
10. Зайцев Ю. С., Иванов А. В., Лебедев И. П. Метаморфические комплексы раннего докембрия юго-восточной части Воронежского кристаллического массива. Метаморфические комплексы фундамента Русской плиты. Л.: Наука, 1978. С. 115–131.
11. Крестин Е. М., Бердников М. Д. Связь и эволюция тектоники, магматизма, метаморфизма и рудообразования в докембрии Курско-Воронежского кристаллического массива. Геология, петрология и корреляция кристаллических комплексов Европейской части СССР. Л.: Недра, 1982. С. 202–213.
12. Чернышов Н. М., Бочаров В. Л., Египко О. И. Магматизм и эндогенная металлогения Воронежского массива. Геология, петрология и корреляция кристаллических комплексов Европейской части СССР. Л.: Недра, 1982. С. 41–45.
13. Бочаров В. Л., Тарков А. П., Фролов С. М. Эволюция ультрамафит-мафитового магматизма Воронежского массива: связь с глубинным строением и геодинамикой палеолитосферы // *Магматизм, метаморфизм и геохронология докембрия Восточно-Европейской платформы в связи с крупномасштабным картированием*. 1987. С. 75–76.
14. Которгин Н. Ф. Архейские зеленокаменные пояса Центрального региона России. М.: Изд-во «Современные тетради», 2001. 164 с.
15. Terentiev R. A., Santosh M. Baltica (East European Craton) and Atlantica (Amazonian and West African Cratons) in the Proterozoic: The pre-Columbia connection // *Earth Sci. Rev.* 2020. Vol. 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103378>
16. 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. Vol. 317(6). P. 707–753.
17. Бибикина Е. В., Богданова С. В., Постников А. В., Попова Л. П., Кирилова Т. И., Фугзан М. М., Глушенко В. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Урала: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16.
18. Египко О. И. Некоторые минералогическо-петрографические и геохимические особенности докембрийских гранитоидов юго-восточной части Воронежского кристаллического массива: дисс. ... канд. геол. мин. наук. Воронеж: ВГУ, 1971. 367 с.
19. Savko K. A., Samsonov A. V., Lariонов А. Н., Lariонова Ю. О., Базиков Н. С. Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264.
20. 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. Vol. 246–247. P. 61–80.
21. Горбунов С. И., Зайцев Ю. С., Чернышов Н. М. Основные черты стратиграфии и магматизма Воронежского кристаллического массива // *Советская геология*. 1969. № 10. С. 8–25.
22. Голикин Н. И., Зайцев Ю. С., Клагин Б. Д., Красовицкая Р. С., Павловский В. И., Полищук В. Д. Геология, гидрогеология, железные руды бассейна Курской магнитной аномалии. Кн. 1. Докембрий. М., 1970. Т. 1. 436 с.
23. Стратиграфический словарь СССР. Нижний докембрий. Л.: Наука, 1989. 397 с.
24. Глазнев В. Н., Минц М. В., Муравина О. М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. 2016. № 1(29). С. 53–63.
25. Муравина О. М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2016. № 1. С. 108–114.
26. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Chervyakovskaya M. V., Korish E. H., Larionova Yu. O., Bazikov N. S., Tsybulyaev S. V. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application // *Precambrian Res.* 2021. Vol. 353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106021>
27. Лебедев И. П., Молотков С. П., Кривцов И. И., Лосицкий В. И. Структурно-геологические особенности воронцовской серии Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 1999. № 7. С. 25–31.
28. 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 Res.* 2016. Vol. 273. P. 165–184.
29. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Korish E. H., Sarkisyan L. S. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Research*. 2016b. Vol. 287. P. 48–72.
30. Терентьев Р. А. Габбродиорит-тоналит-трондьемитовая и монцодиорит-кварцдиоритовая ассоциации макареевских интрузивов (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2014. № 1. С. 62–72.
31. Зайцев, Ю. С. Докембрийские конгломераты восточной части Воронежского кристаллического массива // *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1979. № 11. С. 23–30.
32. Раскатов Г. И., Лукьянов В. Ф., Старухин А. А. Тектоника восточной части Воронежского кристаллического массива и его осадочного чехла. Воронеж: ВГУ, 1976. 120 с.
33. Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Res.* 2020. Vol. 346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
34. Минц М. В., Глазнев В. Н., Муравина О. М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2017. № 4. С. 2–23.
35. Глазнев В. Н., Муравина О. М., Жаворонкин В. И., Лебедев И. П., Воронова Т. А. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж: «Научная книга», 2020. 101 с.
36. 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.

37. Глазнев В. Н., Муравина О. М., Воронова Т. А., Холин В. М. Оценка мощности гравиактивного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского Государственного университета. Сер. Геология*. 2014. № 4. С. 78–84.

38. Воронова Т. А., Муравина О. М., Глазнев В. Н., Березнева С. И. Трехмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Донского террейнов (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. 2021. № 1(49). С. 24–35.

39. Муравина О. М., Глазнев В. Н., Воронова Т. А., Терентьев Р. А. Трехмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Воронцовского террейнов (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле*. 2022. № 3(55). С. 45–57.

40. Глазнев В. Н., Жаворонкин В. И., Муравина О. М., Антонова И. Ю., Воронова Т. А., Холин П. В. 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.

41. 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*. Vol. 71. 2021. P. 9–12.

42. Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Изд. «КаЭМ», 2003. 252 с.

43. Страхов В. Н. Теория линейных обратных гравиметрических задач // *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 311. № 5. С. 1093–1096.

44. Муравина О. М., Лошаков Г. Г. Принципы решения прямых задач потенциала при моделировании строения литосферы // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология*. 2015. № 3. С. 97–100.

45. Геологический словарь: в 2-х т. Ред. К. Н. Паффенгольц. 2-е изд-е. М.: Недра, 1978. Т. 2. 456 с.

46. Britannica. The Editors of Encyclopaedia. "fault" // *Encyclopedia Britannica*. 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/fault-geology>. Accessed 02.08.2024.

47. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива). М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС. 2007. 284 с.

Терентьев Роман Анатольевич, к.г.-м.н., в.н.с., Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: terentiev@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0001-9733-6085

Воронова Татьяна Александровна, к.г.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: voronova28@yandex.ru; ORCID 0009-0002-9650-3405

Муравина Ольга Михайловна, д.т.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: muravina@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0003-4772-0825

Глазнев Виктор Николаевич, д.ф.-м.н., профессор Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0002-1016-1866

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Terentiev Roman A., PhD in Geol.-Min., Leading Researcher, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: terentiev@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0001-9733-6085

Tatyana A. Voronova, PhD in Geol.-Min., Associate professor, Voronezh State University, Voronezh. Russian Federation; e-mail: voronova28@yandex.ru; ORCID 0009-0002-9650-3405

Olga M. Muravina, Dr. habil. In Techn., Professor, Voronezh State University, Voronezh. Russian Federation, e-mail: muravina@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0003-4772-0825

Viktor N. Glaznev, Dr. habil in Phys.-Mathem., Professor, Voronezh State University, Voronezh. Russian Federation; Geological Institute of KSC RAS, Apatity, Russian Federation; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0002-1016-1866

All authors have read and approved the final manuscript.

Deciphering of the tectonic elements and internal structure of the Paleoproterozoic Losevo terrane (Volga-Don orogen) using density modeling data

©2024 R. A. Terentiev✉, T. A. Voronova, O. M. Muravina, V. N. Glaznev

Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., 394018, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Introduction: a lot of aspects of terranes geology that make up the orogens remain controversial. This article focuses on the widest part of the Losevo terrane from the Paleoproterozoic Volga-Don Orogen in the south-eastern part of the East European Craton. In this region, the following are the subjects of discussion: the terrane tectonic nature, its relationship with neighboring blocks, kinematics and depth of the limiting faults, shape and occurrence depth of plutons and paleovolcanoes, thickness and subdivision of stratified formations.

Methodology: a three-dimensional model of the distribution of absolute values of density of the earth crust to a depth of 10 km was obtained as a result of the inversion of local anomalies of the gravity field.

Results and discussion: the interpretation of the results of density modeling was realized in three ways: (1) identification of lineaments as a reflection of major faults, (2) tracing the structural features of stratified or similar geological units, (3) characteristics of local, contrasting objects, mainly plutons and paleovolcanoes of different compositions.

Conclusion: The study area is a large paleosynform, the base of which is composed of undifferentiated gneisses and terrigenous (lower) strata of the Losevo Series. The kinematics of major faults limiting the Losevo terrane has been established. Greenstone structures of the Strelitsa and Podgornoe Formations of the Losevo Series have been identified and traced to depth. The Voronezh Suite contours, the thickness of which is about 4 km, have been clarified. The vertical dip of the Usman complex batholiths and stocks, the Olkhovka pluton and other intrusions indicates their emplacement in a post-collisional setting.

Keywords: Paleoproterozoic, greenstone belt, graben, buried synform, pre- and post-collisional intrusions, paleovolcanoes, density modeling

Funding: scientific research was carried out within the framework of the RNF grant no. 23-27-00251.

For citation: Terentiev R. A., Voronova T. A., Muravina O. M., Glaznev V. N. Deciphering of the tectonic elements and internal structure of the Paleoproterozoic Losevo terrane (Volga-Don orogen) using density modeling data // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 3, pp. 79–95. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/3/79-95>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Cawood P. A., Kroner A., Pisarevsky S. Precambrian plate tectonics: criteria and evidence. *GSA today*, 2006, vol. 16, pp. 4–11.
2. François C., Pubellier M., Robert C., Bulois C., Jamaludin S. N. F., Oberhänsli R., Faure M., St-Onge M. R., Tl6T. Temporal and spatial evolution of orogens: a guide for geological mapping. *Episodes*, 2022, vol. 45, pp. 265–283. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2021/021025>
3. Kearey P. Orogeny in: Kearey, P. The Encyclopedia



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Roman A. Terentiev, e-mail: terentiev@geol.vsu.ru

of the Solid Earth, 1993, pp. 443–444. Blackwell, 713 p.

4. *Korreljacionnaya skhema stratigrafii i magmatizma VKM* [Correlation scheme of stratigraphy and magmatism of the early Precambrian of the Voronezh Crystalline Massif]. Ed. Petrov B. M., Chernyshov N. M. MNR RF publ., 1998. (In Russ.)
5. Chernyshov N. M., Nenahov V. M., Lebedev, I. P. Strik Ju. N. Geodinamicheskaja model' formirovaniya Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [A model of geodynamic history of the Voronezh Massif in the Early Precambrian]. *Geotektonika – Geotektoniks*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 186–194 (In Russ.)
6. Nozhkin A. D., Krestin E. M. *Radioaktivnye jelementy v porodah rannego dokembrija (na primere KMA)* [Radioactive elements in rocks of the early Precambrian (on the example of the KMA)]. Moscow, Nauka publ., 1984, 128 p. (In Russ.)
7. Mints M. V., Dokukina K. A., Konilov A. N., Philippova I. B., Zlobin V. L., Babayants P. S., Belousova E. A., Blokh Y. I., Bogina M. M., Bush W. A., Dokukin P. A., Kaulina T. V., Natapov L. M., Piip V. B., Stupak V. M., Suleimanov A. K., Trusov A. A., Van K. V., Zamozhniaya N. G. East European Craton: Early Precambrian History and 3D Models of Deep Crustal Structure. *Geological Society of America Special Paper*, 2015, 510 p.
8. Chernyshov N. M., Losickij V. V., Molotov S. P. Strukturno-tektonicheskoe rajonirovanie Voronezhskogo kristallicheskogo massiva (po geologicheskim i geofizicheskim dannym) [Structural and tectonic zoning of the Voronezh crystalline massif (according to geological and geophysical data)]. *Sovremennye problemy geologii: materialy sessii geologicheskogo fakul'teta* [Modern problems of Geology: materials of the session]. Voronezh, VGU publ., 1998, pp. 5–7 (In Russ.)
9. Zajcev Ju. S., Agejkin A. S., Golyshkina R. I., Shobanov V. M. Novye dannye po geologii dokembrija jugo-vostoka Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [New data on the Precambrian geology of the southeast of the Voronezh Crystalline Massif. Petrography of the Precambrian of the Russian platform]. *Petrografija dokembrija Russkoj platformy – Petrography of the Precambrian of the Russian Platform*, 1970, pp. 59–74 (In Russ.)
10. Zajcev Ju. S., Ivanov A. V., Lebedev I. P. *Metamorficheskie komplekсы rannego dokembrija jugo-vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva. Metamorficheskie komplekсы fundamenta Russkoj plity* [Metamorphic complexes of the early Precambrian of the southeastern part of the Voronezh Crystalline Massif. Metamorphic complexes of the basement of the Russian Plate]. Leningrad, Nauka publ., 1978, pp. 115–131 (In Russ.)
11. Krestin E. M., Berdnikov M. D. Svjaz' i jevoljucija tektoniki, magmatizma, metamorfizma i rudoobrazovanija v dokembrii Kursko-Voronezhskogo kristallicheskogo massiva. Geologija, petrologija i korreljacija kristallicheskih kompleksov Evropejskoj chasti SSSR [Relationship and evolution of tectonics, magmatism, metamorphism and ore formation in the Precambrian of the Kursk-Voronezh Crystalline Massif. Geology, petrology and correlation of crystalline complexes of the European part of the USSR]. Leningrad, Nedra publ., 1982, pp. 202–213 (In Russ.)
12. Chernyshov N. M., Bocharov V. L., Egipko O. I. Magmatizm i jendogennaja metallogenija Voronezhskogo massiva. Geologija, petrologija i korreljacija kristallicheskih kompleksov Evropejskoj chasti SSSR [Magmatism and endogenous metallogeny of the Voronezh Massif. Geology, petrology and correlation of crystalline complexes of the European part of the USSR]. Leningrad, Nedra publ., 1982, pp. 41–45 (In Russ.)
13. Bocharov V. L., Tarkov A. P., Frolov S. M. Jevojlucija ul'tramafit-mafitovogo magmatizma Voronezhskogo massiva: svjaz' s glubinnym stroenijem i geodinamikoj paleolitosfery // [Evolution of ultramafic-mafic magmatism of the Voronezh Massif: connection with the deep structure and geodynamics of the paleolithosphere]. *Magmatizm, metamorfizm i geohronologija dokembrija Vostochno-Evropejskoj platformy v svjazj s krupnomasshtabnym kartirovanijem – Magmatism, metamorphism and geochronology of the Precambrian of the East European platform in connection with large-scale mapping*, Petrozavodsk, 1987, pp. 75–76 (In Russ.)
14. Kotorgin N. F. Arhejskie zelenokamennye pojasa Central'nogo regiona Rossii [Archean greenstone belts of the Central region of Russia]. Moscow, Publishing house “Modern notebooks” publ., 2001, 164 p. (In Russ.)
15. Terentiev R. A., Santosh M. Baltica (East European Craton) and Atlantica (Amazonian and West African Cratons) in the Proterozoic: The pre-Columbia connection. *Earth Sci. Rev.*, 2020, vol. 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103378>
16. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arcback-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, vol. 317, no. 6, pp. 707–753.
17. Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., Glushhenko V. V. Zona sochlenenija Sarmatii i Volgo-Uralii: izotopno-geohronologicheskaja harakteristika suprakrustal'nyh porod i granitoidov [Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids]. *Stratigrafija. Geol. Korreljacija – Stratigr. Geol. Correl.*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 561–573 (In Russ.)
18. Egipko O. I. *Nekotorye mineralogo-petrograficheskie i geohimicheskie osobennosti dokembrijskih granitoidov jugo-vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva*: diss. ... kand. geol. min. nauk [Some mineralogical and petrographic and geochemical features of the Precambrian granites southeastern part of the Voronezh Crystalline Massif. PhD diss.]. Voronezh, VSU publ., 367 p. (In Russ.)
19. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Larionova Ju. O., Bazikov N. S. Paleoproterozojskie granity A- i S-tipa vostochno-Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geohronologija, petrogenezis i tektonicheskaja obstanovka formirovaniija [Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin]. *Petrologija – Petrology*, 2014, vol. 22, no 3, pp. 205–233 (In Russ.)
20. 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, vol. 246–247, pp. 61–80.
21. Gorbunov S. I., Zajcev Ju. S., Chernyshov N. M. Osnovnye cherty stratigrafii i magmatizma Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Main features of stratigraphy and magmatism of the Voronezh crystalline massif]. *Sovetskaja geologija – Soviet Geology*, 1969, no. 10, pp. 8–25 (In Russ.)
22. Golivkin N. I., Zajcev O. S., Klagish B. D., Krasovickaja R. S., Pavlovskij V. I., Polishhuk V. D. *Geologija, gidrogeologija, zheleznye rudy bassejna Kurskoj magnitnoj anomalii. Kn. 1. Dokembrij* [Geology, hydrogeology, iron ores of the Kursk Magnetic Anomaly basin. Book 1. Precambrian]. Moscow publ., 1970, vol. I, 436 p. (In Russ.)
23. *Stratigraficheskij slovar' SSSR. Nizhnij dokembrij* [Stratigraphic Dictionary of the USSR. Lower Precambrian]. Leningrad, Nauka publ., 1989, 397 p. (In Russ.)
24. Glaznev V. N., Minc M. V., Muravina O. M. Plotnostnoe modelirovanie central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy [Density modeling of the earth crust for the central part of the East-European Platform]. *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle – Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*, 2016, no 1(29), pp. 53–63 (In Russ.)
25. Muravina O. M. Plotnostnaja model' zemnoj kory Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no 1, pp. 108–114 (In Russ.)
26. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Chervyakovskaya M. V., Korish E. H., Larionova Yu. O., Bazikov N. S., Tsybuljaev S. V. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application. *Precambrian Res.*, 2021, vol. 353. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106021>

27. Lebedev I. P., Molotkov S. P., Krivcov I. I., Losickij V. I. Strukturno-geologicheskie: osobennosti voroncovskoj serii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Structure-and-geologic features of the Vorontsovka series of the Voronezh Crystalline Massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1999, no. 7, pp. 25–30 (In Russ.)
28. 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 Res.*, 2016, vol. 273, pp. 165–184.
29. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Korish E. H., Sarkisyan L. S. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Res.*, 2016, vol. 287, pp. 48–72.
30. Terent'ev R. A. Gabbrodiorit–tonalit–trond'emitovaja i moncodiorit–kvarcdioritovaja asociacii makar'evskih intruzivov (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Gabbrodiorite–tonalite–trondjemite and monzodiorite–quartz-diorite associations of the Makaryevsky intrusion (Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 1, pp. 62–72 (In Russ.)
31. Zajcev, Ju. S. Dokembrijskie konglomeraty vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [The Precambrian conglomerates of eastern part of the Voronezh Crystalline Massif]. *Izvestija AN SSSR. Serija geologicheskaja – Izvestia AN USSR: Serija geologicheskaja*, 1979, no. 11, pp. 23–30 (In Russ.)
32. Raskatov G. I., Luk'janov V. F., Staruhin A. A. Tektonika vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva i ego osadochnogo chehla [Tektonika vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva i yego osadochnogo chekhla]. Voronezh, VSU publ., 1976, 120 p. (In Russ.)
33. Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Res.*, 2020, vol. 346. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105790>
34. Minc M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M. Glubinnoe stroenie kory jugo-vostoka Voronezhskogo kristallicheskogo massiva po geofizicheskim dannym: geodinamicheskaja jevoljucija v paleoproterozoe i sovremennoe sostojanie kory [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 Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 4, pp. 2–23 (In Russ.)
35. Glaznev V. N., Muravina O. M., Zhavoronkin V. I., Lebedev I. P., Voronova T. A. Petroplotnostnaja karta dokembrijskogo fundamenta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Petro-density map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif]. Voronezh, «Nauchnaya kniga» publ., 2020, 101 p. (In Russ.)
36. Muravina O. M., Zhavoronkin V. I. Statisticheskij analiz cifrovoj osnovy petroplotnostnoj karty Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Statistical analysis of the digital basis of the petro-density map of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 2, pp. 94–99 (In Russ.)
37. Glaznev V. N., Muravina O. M., Voronova T. A., Holin V. M. Ocenka moshhnosti graviaktivnogo sloja zemnoj kory Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Estimation of the thickness of the gravity layer of the earth's crust of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 4, pp. 78–84 (In Russ.)
38. Voronova T. A., Muravina O. M., Glaznev V. N., Berezneva S. I. Trehmernaja plotnostnaja model' verhnjej kory v oblasti sochlenenija Losevskogo i Donskogo terrejnov (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Three-dimensional density model of the upper crust in the area of articulation of the Losevsky and Donskoy terranes (Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle – Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*, 2021, no. 1(49), pp. 24–35 (In Russ.)
39. Muravina O. M., Glaznev V. N., Voronova T. A., Terent'ev R. A. Trehmernaja plotnostnaja model' verhnjej kory v oblasti sochlenenija Losevskogo i Voroncovskogo terrejnov (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Three-dimensional density model of the upper crust at the junction of the Losevsky and Vorontsovsky terranes (Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle – Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle*, 2022, no. 3(55), pp. C. 45–57 (In Russ.)
40. Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Muravina O. M., Antonova I. Ju., Voronova T. A., Holin P. V. Stroenie verhnjej kory Eleckogo uchastka Losevskogo terrejna (Voronezhskij kristallicheskij massiv) po dannym plotnostnogo modelirovanija [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 Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 3, pp. 74–83 (In Russ.)
41. 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, pp. 9–12.
42. Glaznev V. N. Kompleksnye geofizicheskie modeli litosfery Fennoskandii [Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia]. Apatity, "KaeM" publ., 2003, 252 p. (In Russ.)
43. Strahov V. N. Teorija linejnyh obratnyh gravimetricheskikh zadach [The theory of linear inverse gravimetric problems]. *Dokl. AN SSSR – Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 1990, vol. 311, no. 5, pp. 1093–1096 (In Russ.)
44. Muravina O. M., Loshakov G. G. Principy reshenija prjamyh zadach potenciala pri modelirovanii stroenija litosfery [Principles of solving the direct problem building in modeling structure of lithosphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 3, pp. 97–100 (In Russ.)
45. *Geologicheskij slovar'*: v. 2. Ed. K. N. Paffengol'c. [Geological dictionary: vol. 2. Ed. K. N. Paffenholz]. Moscow, Nedra publ., 1978, vol. 2, 456 p. (In Russ.)
46. Britannica. The Editors of Encyclopaedia. "fault". *Encyclopedia Britannica*, 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/fault-geology>. Accessed 02.08.2024.
47. *Mineragenicheskie issledovanija territorij s dvuhjarusnym stroenijem (na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva)* [Minero-genic Reconnaissance of Two-Stage Structure Terrains (Case Study of the Voronezh Crystalline Massif)]. Moscow, GEOKART. GEOS publ., 2007, 284 p. (In Russ.)