

Объемная модель глубинного строения Павловского батолита Донского террейна (Восточно-Донской ороген)

©2024 В. Н. Глазнев^{1, 2✉}, О. М. Муравина¹, В. В. Ильин¹, Т. А. Воронова¹

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

²Геологический институт Кольского научного центра РАН,
ул. Ферсмана, 14, 184209, Апатиты, Российская Федерация

Аннотация

Введение: Изучение специфики крупных гранитоидных комплексов континентальной земной коры имеет ключевое значение при геодинамических реконструкциях её развития. Для территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) примером такого объекта является павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс, ограниченная информация о глубинном строении которого до настоящего времени не позволила предложить достоверные модели верхней части земной коры, предназначенные для геодинамических реконструкций. Цель данной работы заключается в создании объёмной петроплотностной модели земной коры, для области развития пород павловского комплекса, на основе интерпретации гравиметрических данных.

Методика: Построение модели коры потребовало привлечения значительной по объёму совокупности геологических, геофизических и петрофизических данных, что было выполнено на основе использования геоинформационной системы ArcGIS. Формирование начальной плотностной модели верхней коры опиралось на региональную плотностную модель литосферы, включая распределение плотности в осадочных слоях чехла, и данные петроплотностной карты кристаллического фундамента ВКМ. Решение обратной трёхмерной задачи гравиметрии выполнялось на основе развитого авторами алгоритма линейной инверсии аномального поля с использованием аппроксимационного представления оператора обратной задачи для горизонтального слоя. Итерационное решение обратной задачи осуществлялось на реальном рельефе изучаемой территории для дискретной сети данных. При построении решения перераспределение аномальных плотностей выполнялось с опорой на априорные геолого-геофизические данные по региону исследований.

Обсуждение результатов: Павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс в области моделирования прослеживается до глубины 8 км, при этом его основной объем развит в пределах от 1 до 6 км. Выявленные морфологические особенности пространственного строения комплекса демонстрируют наличие латеральных неоднородностей в распределении вертикальной мощности. Значения плотности гранитоидов различных фаз весьма близки, что не позволяет достоверно дифференцировать их в рамках модели. Согласно результатам комплексного моделирования, Павловский батолит по форме является силлообразным плутоном с рядом субвертикальных структур, которые интерпретируются как потенциальные магмоподводящие каналы. Плутоны такой формы характерны для обстановок растяжения в условиях ограниченного преобладания давления поднимающейся магмы над литостатическим напряжением.

Заключение: Полученная модель строения верхней коры, опирающаяся на совокупность геолого-геофизических данных, вполне отвечает существующим подходам к пониманию природы



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Глазнев Виктор Николаевич, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

формирования павловского мигматит-гранит-граносиенитового комплекса. Представленная модель может быть использована для формирования содержательных геодинамических построений эволюции Воронежского кристаллического массива.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, павловский комплекс, гранитоиды, плотностное моделирование.

Источник финансирования: Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, проект 23-27-00251.

Для цитирования: Глазнев В. Н., Муравина О. М., Ильин В. В., Воронова Т. А. Объемная модель глубинного строения Павловского батолита (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 2. С. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/104-115>

Введение

Ключевыми объектами изучения при реконструкции геодинамического развития континентальной земной коры служат гранитоидные комплексы, характеристики которых несут на себе отпечаток условий их образования. Примером такого комплекса в пре-

делах Восточно-Сарматского орогена служит павловский мигматит-гранит-граносиенитовый комплекс, который выступает в качестве геодинамического индикатора развития Донского террейна (рис. 1) в контексте регионального изучения Восточно-Европейского кратона [1, 2].

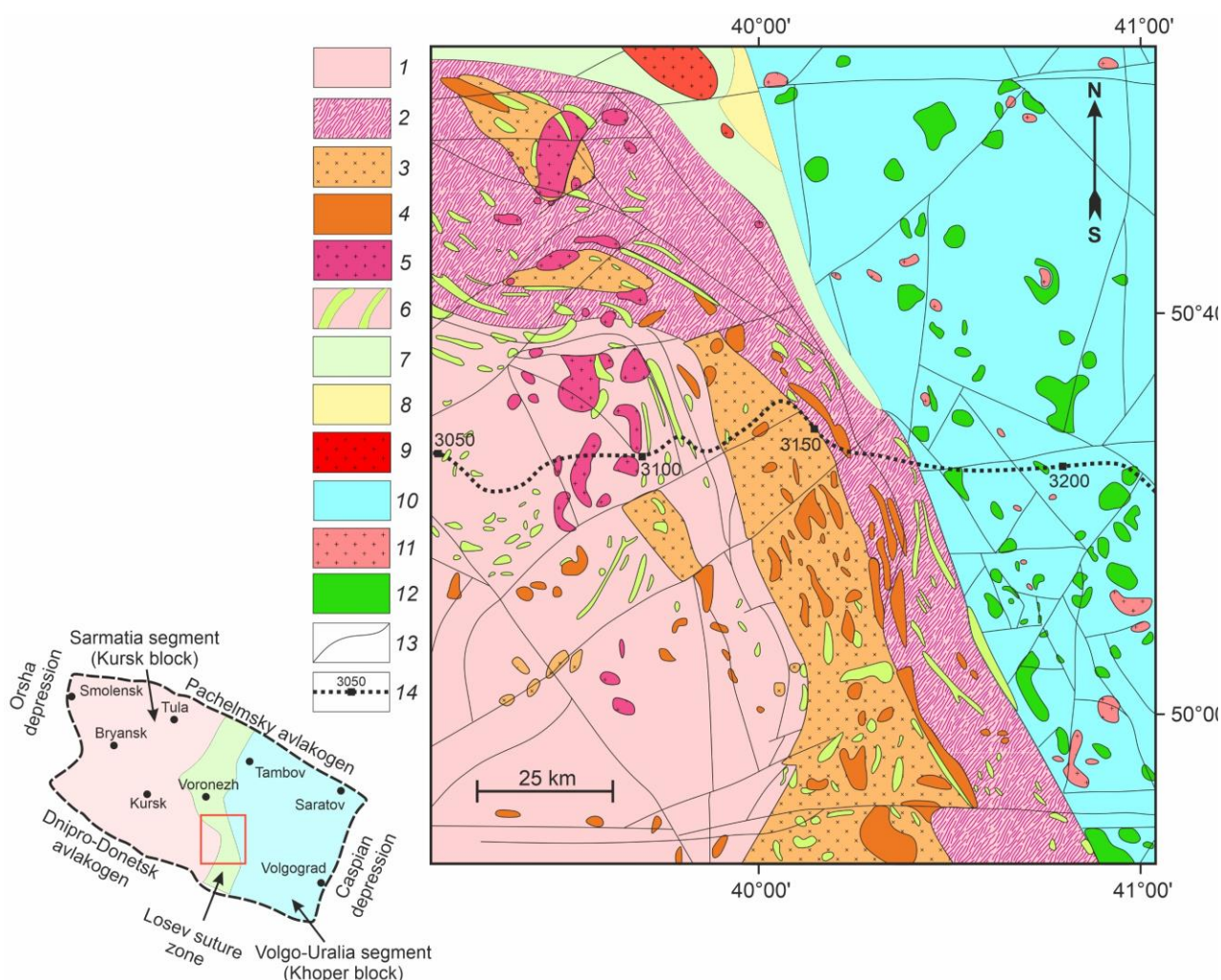


Рис. 1. Схема геологического строения участка моделирования (врезка из [3] с изменениями авторов): 1 – обуюнский нерасчлененный комплекс; 2 – донская породная ассоциация: гнейсы; 3 – павловский гранитоидный комплекс 1 фаза; 4 – павловский гранитоидный комплекс 2 фаза; 5 – лискинский гранитоидный комплекс; 6 – прослои амфиболитов; 7 – лосевская серия: метаэффузивы; 8 – воронежская свита: метаэффузивы; 9 – усманский гранитоидный комплекс; 10 – воронцовская серия: метаосадочные породы; 11 – бобровский гранитоидный комплекс; 12 – мамонский и еланский комплексы: основные и ультраосновные породы; 13 – разломы; 14 – линия геотраверса 1-ЕВ.

[Fig. 1. The scheme of the geological structure of the modeling site (from [3] with changes by the authors): (1) – Oboyan undivided complex; (2) – Don rock association: gneisses; (3) – Pavlovsk granitoid complex 1 phase; (4) – Pavlovsk granitoid complex 2 phase; (5) – Liski granitoid complex; (6) – layers of amphibolites; (7) – Losevo series: metaeffusives; (8) – Voronezh suite: metaeffusives; (9) – Usman granitoid complex; (10) – Vorontsovka series: metasedimentary rocks; (11) – Bobrov granitoid complex; (12) – Mamons and Elan' complexes: basic and ultrabasic rocks; (13) – faults; (14) – geotraverse line 1-EV.]

Несмотря на продолжительную историю изучения гранитоидов павловского комплекса [4–10], существующие геодинамические модели их формирования остаются дискуссионными. В рамках указанных геодинамических моделей вынужденно игнорируются морфологические характеристики глубинного строения рассматриваемого комплекса. Такая информация наиболее полно рассматривалась только в монографии [11], где модель коры, представленная по результатам интерпретации МОВ-ОГТ по геотраверсу 1-ЕВ, не даёт полной детальной картины пространственного положения гранитоидов павловского комплекса и их взаимоотношений с вмещающими породами коры.

В предлагаемой работе акцент сделан на трёхмерном плотностном моделировании строения Павловского батолита, слагающего южную часть павловского комплекса гранитоидов, вместе с его обрамлением. Выбор объекта и масштабов исследований обусловлен наличием высококачественных результатов МОВ-ОГТ по геотраверсу 1-ЕВ, которые в итоге можно сопоставлять с нашими плотностными построениями.

Целью исследования является создание трёхмерной плотностной модели верхней части земной коры, в области развития пород павловского мигматит-гранит-граносиенитового комплекса, на основе использования реализованной авторами технологии комплексного плотностного моделирования по геофизическим данным [12–14], содержательные принципы которой изложены в работах [15, 16]. Опыт использования этой технологии интерпретации данных в условиях платформ и щитов показал высокую результативность таких построений при решении региональных [17–19] и детальных [20–22] геофизических задач. Естественно, что созданная ранее региональная трёхмерная плотностная модель литосферы центральной части Восточно-Европейской платформы и плотностная модель её осадочного чехла [23], были положены в основу более детальных построений для создания моделей верхней части земной коры ВКМ. Ещё одним важным исходным элементом нашего моделирования являлись обобщённые данные о плотности пород кристаллического фундамента территории ВКМ [24, 25], которые выступают в качестве начального приближения плотностной модели верхней коры, а также минимаксных ограничений на искомое решение обратной задачи для верхней части разреза кристаллической коры. Петроплотностная характеристика начального приближения модели распространялась по вертикали на всю мощность «гравиактивного» слоя кристаллической коры, которая для нашего региона варьирует в пределах от 4 до 8 км [26].

Исходные данные

Геологическая позиция павловского комплекса

Павловский мигматит-гранит-граносиенитовый

комплекс, расположенный в Донском террейне, включает в себя гранодиориты, умеренно-щелочные и щелочные граниты, щелочные сиениты и граносиениты, лейкограниты и мигматиты. Породы комплекса слагают куполообразные массивы длиной до 100 км и шириной до 30 км, которые развиты в пределах Донского террейна и спорадически встречаются в восточной части Курского блока (рис. 1).

Состав и петроплотностная характеристика пород исследуемого участка

Гранитоиды павловского комплекса секут и мигматизируют породы донской породной ассоциации, и включают две фазы внедрения: син-тектоническую (амфибол-биотитовые гранитоиды и граносиениты) и пост-тектоническую (биотитовые лейкограниты, аплиты и пегматиты) [3, 8]. С породами обеих фаз внедрения ассоциируют амфиболиты и метапесчаники [7]. Возраст гранитоидов, по данным изотопного датирования акцессорных цирконов уран-свинцовым методом, составляет 2060–2075 млн лет [9, 27, 28]. Плотность гранитоидов павловского комплекса варьируется в пределах 2560–2720 кг/м³ со средним значением 2656 кг/м³ [25, 29].

С породами павловского комплекса пространственно и темпорально сопряжены гранитоиды Лискинского плутона возрастом 2064 млн лет [30], петроплотностные характеристики которых (среднее значение 2650 кг/м³) близки по значениям к гранитоидам павловского комплекса.

На севере участок моделирования захватывает тело гранитоидов усманского комплекса, включающее в себя трондьемиты, гранодиориты и тоналиты, возраст которых варьируется в пределах 2047–2074 млн лет [31]. Среднее значение плотности пород усманского комплекса составляет 2685 кг/м³ [25].

На северо-востоке моделируемой области развиты тела мамонского перидотит-габброноритового и еланского ортопироксенит-норитового комплекса. Возраст пород мамонского комплекса составляет 2085 млн лет [3], возраст еланского – 2050–2065 млн лет [32]. Средняя плотность этих пород составляет 2749 кг/м³ для мамонского комплекса и 2797 кг/м³ для еланского [25].

Основная масса вмещающих пород участка моделирования представлена гнейсами и амфиболитами донской ассоциации со средними значениями плотности 2709 и 2982 кг/см³ соответственно [25]. В восточном и северо-восточном направлении развиты породы воронцовской серии, которые дифференцируются по плотностным характеристикам: сланцы и метапесчаники с близкими значениями плотности 2694–2707 кг/м³; гнейсы, амфиболиты и мигматиты со средним значением 2807 кг/м³ [25].

Методика моделирования

Построение объёмной петроплотностной модели павловского комплекса и его обрамления осуществлялось посредством единой технологии моделирования, ранее опробованной на нескольких детальном участках в пределах Донского и Лосевского террейнов [20–22]. Вся необходимая для решения обратной задачи гравиметрии информация по территории была сведена в единый геоинформационный проект на базе ArcGIS.

Решение обратной задачи гравиметрии производилось по плановой сети 2 на 2 км для точек локальных аномалий поля, заданных на реальном рельефе дневной поверхности. Дискретизация модели среды по вертикали задавалась совокупностью 17-ти горизонтальных слоёв, мощность которых закономерно увеличивалась с глубиной от 0.05 до 4 км [20, 21]. Суммарная мощность всего модельного слоя составляла 16 км [22].

Значения плотности в начальной трёхмерной модели среды задавались в соответствии с петроплотностной картой кристаллического фундамента [25] для модельных слоёв в пределах «гравиактивного» слоя. Для нижележащих слоёв значения плотности вычислялись на основе пространственной интерполяции плотности региональной модели литосферы ВКМ [17–19].

Расчёт трёхмерной модели выполнялся посредством разработанной программы, реализующей решение линейной обратной задачи гравиметрии на основе использования аппроксимационного представления спектральной формы оператора обратной задачи [33] для горизонтального слоя. Собственно решение обратной задачи представляет собой итерационный процесс инверсии невязок поля в локальные поправки к исходной плотностной модели. При этом аномальные плотности перераспределяются в нижележащие слои модели с учётом весовой функции, опирающейся на априорную геологическую модель среды, представленную схемой мощности «гравиактивного» слоя [26] в пределах изучаемой площади и данными о плотности пород кристаллического фундамента [25]. В общем случае весовая функция перераспределения невязок уменьшается с глубиной, что отвечает достоверности априорной информации о среде. На нижней границе модели весовая функция принимает значение близкое к нулю, что гарантирует «сшивку» получаемого решения для верхней части кристаллической коры и исходной региональной плотностной модели литосферы [17–19]. В процедуре итерационного решения обратной задачи учитываются априорные минимаксные ограничения на искомые значений плотности кристаллических пород фундамента [25]. Строгость пределов вариации искомого решения определялась «жесткостью» минимаксных ограничений [22], задаваемой для каждой итерации.

Получаемые результаты решения обратной задачи определяются начальным приближением модели среды и достоверностью априорной информации. Результативная трёхмерная плотностная модель верхней части земной коры соответствует установленным ограничениям на плотность изучаемых комплексов

кристаллических пород и отвечает минимуму нормы решения [33].

Построение результирующей геологической модели Павловского батолита осуществлялось путем оконтуривания областей с соответствующими значениями плотности, которые были определены на основании новых лабораторных исследований [29] и данных ретроспективной информации [25]. Выделенные области на разных горизонтальных петроплотностных срезах объединялись в единую трёхмерную структуру посредством встроенных инструментов ArcView.

Обсуждение результатов

В рамках полученных результатов трёхмерного плотностного моделирования основным объектом нашего внимания являются породы павловского мигматит-гранит-граносиенитового комплекса. Характер распределения плотности, показанный для некоторых горизонтальных срезов глубин (рис. 2), позволяет уверенно проследить породы комплекса от поверхности до глубины 8 км. Вертикальная мощность пород комплекса максимальна в южной и северной частях, где она достигает 8 км, и уменьшается в его центральной части до 4–6 км. Относительно однородная приповерхностная плотностная структура комплекса (рис. 2а) становится более дифференцированной по мере увеличения глубины срезов модели (рис. 2б,с). На глубине 8–10 км (рис. 2д) породы комплекса достоверно не выявляются, хотя наличие локальных низкоплотных объектов позволяет предполагать существование подводящих каналов кислого магматизма в верхне-средней части земной коры региона. Необходимо отметить, что различные фазы генерации павловских гранитоидов, весьма схожие по значениям плотности, не позволяют однозначно идентифицировать эти различия в рамках нашей результативной модели.

Гранитоиды сопряжённого лискинского комплекса, расположенные в северо-восточном обрамлении павловского комплекса, уверенно выделяются на глубинных срезах до 8–10 км (рис. 2д). Пространственная дифференциация пород лискинского комплекса позволяет достоверно транслировать их положение от поверхности на глубину. В целом тела гранитоидов лискинского комплекса имеют относительно изометричную форму и простираются до максимальной глубины 10–12 км.

Характерной особенностью гранитоидных комплексов является сложная пространственная форма выделяемых объектов, которая не сохраняется при их трансляции на глубинные срезы модели. Контуры наиболее крупных гранитных тел на поверхности кристаллического фундамента, показанные на рис. 2, в большинстве случаев не совпадают с их предполагаемым по данным плотностного моделирования глубинным положением. Для Павловского батолита отмечается значимое смещение его корневой части в восточном направлении, а для лискинских и павловских гранитоидов северо-восточной части участка исследований можно предполагать существование единой корневой области магматизма.

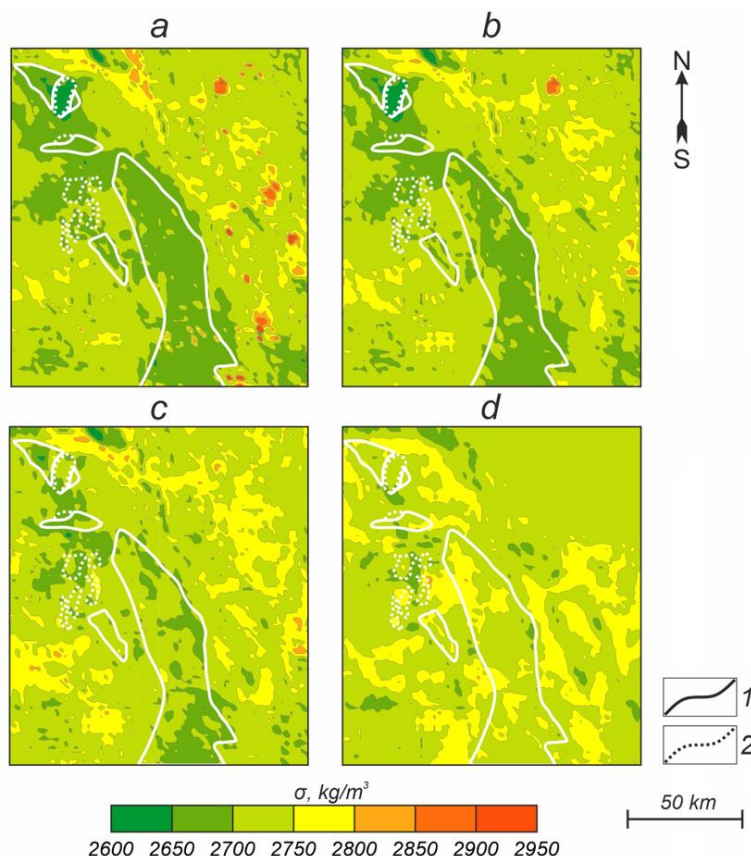


Рис. 2. Схемы распределения плотности на горизонтальных срезах глубин: *a* – 1 км; *b* – 3 км; *c* – 6 км; *d* – 10 км; контуры гранитных тел на поверхности фундамента: 1 – павловский комплекс; 2 – лискинский комплекс.

[Fig. 2. Schemes of density distribution on horizontal sections of depths: (*a*) – 1 km; (*b*) – 3 km; (*c*) – 6 km; (*d*) – 10 km; contours of granite bodies on the surface of the foundation: (1) – Pavlovsk complex; (2) – Liski complex.]

Объёмная модель Павловского батолита, синтезированная по данным трёхмерного плотностного моделирования, в первом приближении представляет единый силлообразный объект с рядом уходящих вниз (до глубины примерно 8 км) субвертикальных корневых

структур (рис. 3). Такая типичная форма гранитных плутонов указывает на их возможное образование в обстановке растяжения [34], при незначительном преобладании давления поднимающейся магмы над литостатическим давлением.

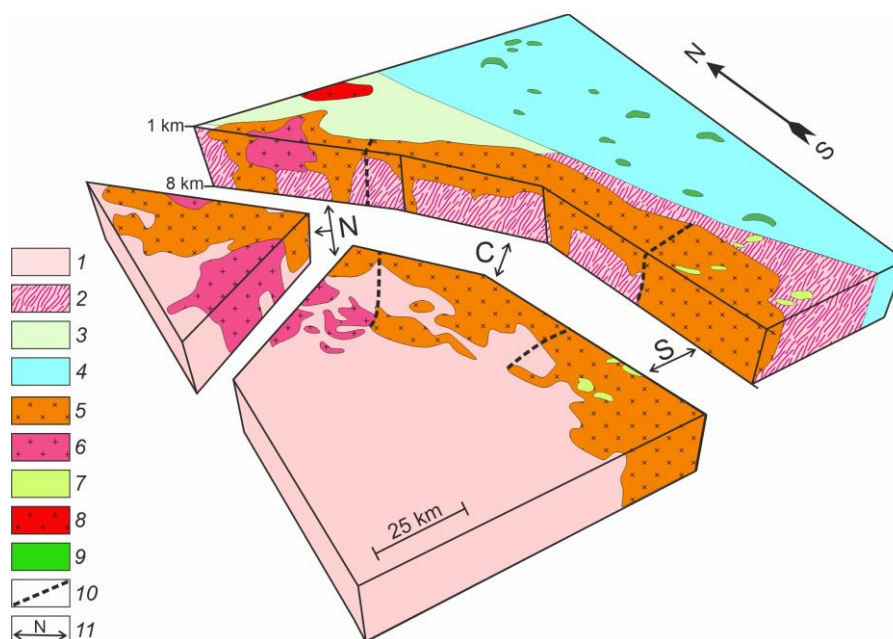


Рис. 3. Объёмная модель глубинного строения Павловского батолита: 1 – вещественные комплексы Курского блока; 2 – донская породная ассоциация; 3 – лосевская серия; 4 – воронцовская серия; 5 – павловский комплекс; 6 – лискинский комплекс; 7 – амфиболиты; 8 – усманский комплекс; 9 – основные-ультраосновные породы; 10 – границы сегментов (подробности в тексте); 11 – наименования сегментов.

[Fig. 3. Three-dimensional model of the deep structure of the Pavlovsk batholith: (1) – material complexes of the Kursk block; (2) – Don rock association; (3) – Losevo series; (4) – Vorontsovka series; (5) – Pavlovsk complex; (6) – Liski complex; (7) – amphibolites; (8) – Usman complex; (9) – basic-ultrabasic rocks; (10) – segment boundaries (details in the text); (11) – segment names.]

Модельную плотностную структуру Павловского батолита можно условно разделить на три морфологически различающихся сегмента: северо-западный (N), центральный (C) и южный (S) (рис. 3). Северо-восточный и южный сегменты слагают относительно локальные зоны с наибольшей вертикальной мощностью. Суммарный объём этих сегментов составляет примерно 10600 км^3 и 7300 км^3 соответственно. Центральный сегмент занимает наибольшую площадь (в проекции на дневную поверхность) и характеризуется меньшей мощностью с двумя локально развитыми вертикальными структурами. Суммарный объём центрального сегмента составляет примерно 7700 км^3 . Такие морфологические особенности пространственной неоднородности строения батолита могут отражать

реликтовые структурно-вещественные зоны с наиболее благоприятными физико-механическими свойствами для подвода магмы и/или могут быть следствием пространственно-временной миграции очагов магмогенерации.

Латеральная пространственная неоднородность гранитоидных комплексов верхней коры наблюдается и на плотностном разрезе, синтезированном для профиля ОГТ 1-ЕВ по данным трёхмерного моделирования (рис. 4). Здесь показано положение павловского и лискинского гранитоидных комплексов, отдельные субвертикальные структуры которых уходят на глубину до 8–10 км. Эти элементы глубинного строения комплексов, вероятно, отражают расположение магмоподводящих каналов изучаемых объектов.

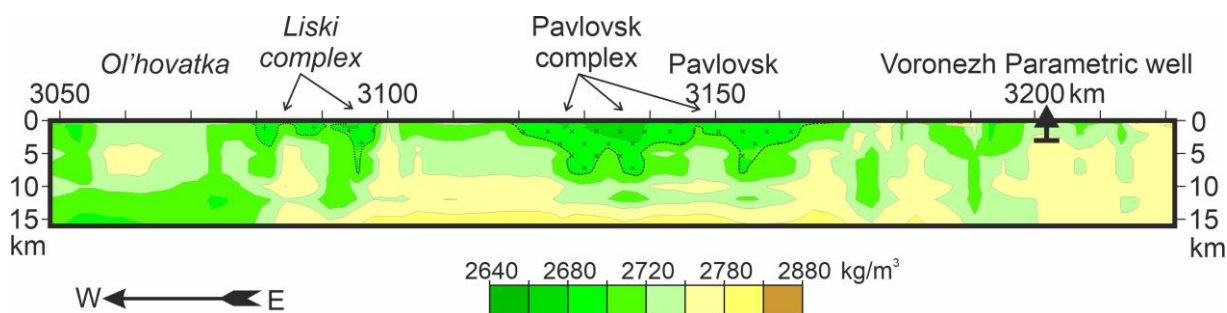


Рис. 4. Петроплотностной разрез по профилю 1-ЕВ.

[Fig. 4. Petro-density section along geotraverse 1-EB.]

Объединение результатов регионального комплексного моделирования литосферы [16–18], интерпретационных материалов МОВ-ОГТ по профилю 1-ЕВ [11] и трёхмерного плотностного моделирования для верхней части земной коры, позволило обратиться к созданию сводного разреза литосферы по территории исследований (рис. 5). Синтез результатов плотностного моделирования и интерпретационных материалов МОВ-ОГТ на едином разрезе позволяет отчасти нивелировать специфику представления среды, присущую каждому из методов, и получить более содержательную картину изучаемой области литосферы. Так, на сводном разрезе, помимо рассмотренных выше пород Павловского и Лискинского гранитных плутонов, выделяется зона, которая по своим значениям плотности отвечает гнейсам, широко представленным на участке моделирования. Вертикальная мощность зоны неоднородна по латерали и заметно уменьшается под областью развития пород павловского комплекса. По морфологии эта зона частично повторяет выделяемую подошву гранитных плутонов, а её плотностные характеристики несколько повышены по сравнению с породами павловского и лискинского комплексов. На основании данных о сжимаемости кислых пород континентальной коры [14] можно обоснованно предполагать, что такие значения плотности являются результатом

уплотнения гранитоидов за счёт литостатического давления, а это, в свою очередь, ставит вопрос о возможной принадлежности выделенных зон к корневым частям изучаемых батолитов.

Данные о плотностном строении литосферы и материалы сейсмической интерпретации МОВ-ОГТ позволили обратиться к новой трактовке «сейсмических образов» коры, приведённых в [11]. Данная трактовка, показанная на рис. 5 в виде доменов с относительно однородным плотностным строением и наличием специфически ориентированных отражающих площадок, представляет комплексную характеристику для изученной области средней-нижней коры и верхней мантии. Представленные на разрезе складчатые формы доменов, которые наиболее явно выражены в восточной части фрагмента профиля 1-ЕВ, могут быть отнесены к структурно-вещественным комплексам Воронцовского террейна Волго-Донского орогена [2, 3]. Западный блок, характеризующийся более пологим положением выделяемых доменов, по всей видимости, отражает положение Тимского террейна восточной Сарматии [9]. Выявленные особенности поведения «сейсмических образов» коры на качественном уровне хорошо согласуются с результатами численного моделирования структур конвергентных границ типа субдукция-коллизия в литосфере [35–37]. Таким образом,

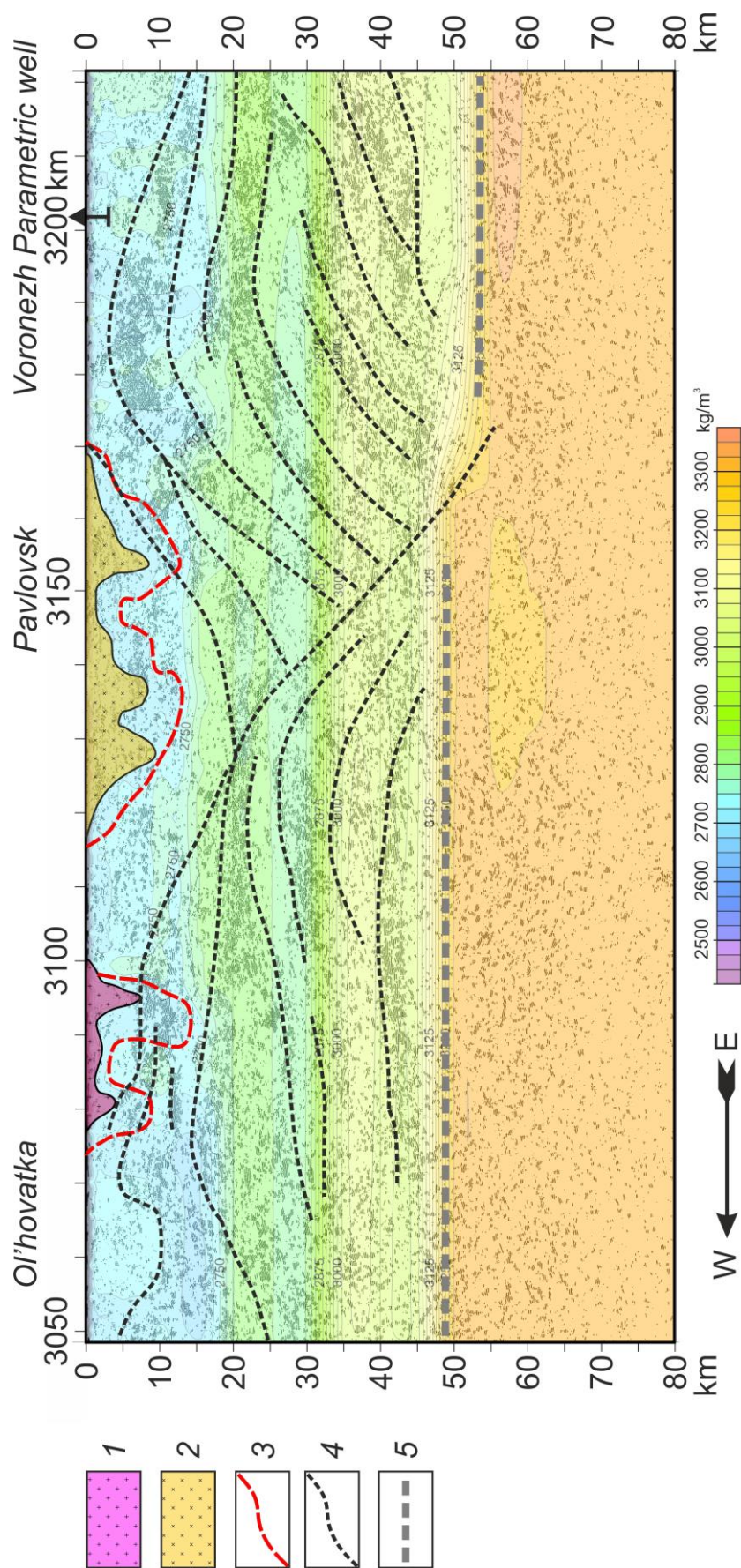


Рис. 5. Синтезированный разрез по профилю 1-ЕВ с результатами плотностного моделирования и интерпретации данных ОГТ: 1 – лискинский гранитоидный комплекс; 2 – павловский гранитоидный комплекс; 3 – потенциальные «корни» гранитных тел; 4 – границы сейсмических доменов; 5 – современное положение границы Моху.
[Fig. 5. Synthesised section along geotransverse 1-EB and the results of the density modelling and interpretation of the CDP data: (1) – Liski granitoid complex; (2) – Pavlovsk granitoid complex; (3) – potential "roots" of granite bodies; (4) – boundaries of seismic domain; (5) – current position of the Moho boundary.]

составленная сводная схема строения литосферы для фрагмента профиля 1-ЕВ, подтверждает ранее высказанную точку зрения [1, 2, 5, 6] о формировании Донского террейна и таксономически соподчинённых с ней магматических образований в условиях конвергентной окраины.

Вывод о происхождении пород Павловского батолита в условиях растяжения, который можно сделать исходя из его морфологических характеристик, согласуется с принятым в настоящий момент представлением о постколлизийном генезисе павловского комплекса [см. 9 и ссылки в ней], частным случаем которого является рассматриваемый батолит. Вместе с тем нельзя не отметить, что обстановка растяжения характерна и для условий магматической тыловой дуги в зоне субдукции. Принципиальную возможность генерации пород, аналогичных породам Павловского батолита, в результате декомпрессионного плавления мантии в условиях тыловой дуги демонстрируют результаты моделирования [38].

Тем не менее, опираясь только на форму изучаемого геологического объекта нельзя сделать однозначный вывод относительно геодинамических условий его формирования. Для определения наиболее достоверного варианта генезиса требуется проведение численного моделирования термодинамической эволюции Павловского батолита.

Заключение

На основе решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии создана модель Павловского батолита, которая впервые даёт детальную информацию о глубинном строении рассматриваемого объекта и аналогичных гранитоидных комплексов Восточно-Сарматского орогена. По результатам моделирования форма Павловского батолита представляет, в первом приближении, силлообразный плутон, большая часть которого залегает на глубине от 1 до 6 км. Оценка объёма кислого магматического материала плутона показывает его пространственную значимую неоднородность по простирацию Донского террейна с севера на юг. В плотностной модели плутона выявлено положение возможных питающих каналов, уходящих на глубину до 8–10 км, расположенных в южной и северной частях исследуемой территории.

Установленная по данным трёхмерного моделирования форма плутона свидетельствует о возможном генезисе пород павловского комплекса в обстановке растяжения, что коррелирует с существующими геодинамическими моделями развития изучаемой территории. Пространственные параметры модельного магматического объекта в целом указывают на вариант образование комплекса в условиях, близких к равновесию между давлением поступающей магмы и литостатическим напряжением в земной коре.

В региональном плане, специфика пространственного поведения сейсмических внутрикоровых отражающих площадок на фрагменте профиля 1-ЕВ, пересекающем изучаемую область, совместно с данными

трёхмерного плотностного моделирования позволяет выделить два структурно различных сегмента литосферы. Указанные сегменты могут интерпретироваться как окраинные части континентов Волго-Уралья (на востоке) и Сарматия (на западе). Картина распределения отражающих площадок в пределах выявляемых сейсмических доменов, указывает на конвергентный стиль образования рассматриваемого участка коры, который выражается в различной степени её деформации. Учитывая более крутопадающий характер ориентировки сейсмических доменов восточного сегмента Волго-Урала, можно сделать вывод о продвижении конвергентного фронта с востока на запад, в современных координатах.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Mints M. V., Bush W. A., Ageev S. N. Bryansk-Kursk-Voronezh intra-continental collisional orogen (East European craton) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5 (3). P. 717–742.
2. Shchipansky A. A., Kheraskova T. N. The Volga-Don Collisional Orogen in the East European Craton as a Paleoproterozoic Analog of the Himalayan-Tibetan Orogen // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023. Vol. 14 (2). 0692.
3. Ненахов В. М. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением на примере Воронежского кристаллического массива. М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС. 2007. 284 с.
4. Египко О. И. Некоторые минералого-петрографические и геохимические особенности докембрийских гранитоидов юго-восточной части Воронежского кристаллического массива. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Воронеж: ВГУ, 1971. 367 с.
5. Геодинамическая модель формирования ВКМ / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов, И. П. Лебедев, Ю. Н. Стрик // *Геотектоника*. 1997. № 3. С. 21–31.
6. Ненахов В. М., Бондаренко С. В. Тектоническая эволюция Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива в палеопротерозое // *Геотектоника*. 2011. № 4. С. 43–59.
7. Никитин А. В., Ненахов В. М. О происхождении гранитоидов павловского комплекса и их структурных преобразованиях на стадии консолидированной коры // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 3. С. 46–60.
8. Терентьев Р. А., Савко К. А. Минеральная термобарометрия и геохимия палеопротерозойских магнезиально-калиевых гранитоидов павловского плутона, Восточно-Европейский кратон // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 3. С. 34–45.
9. 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 Research*. 2020. Vol. 346.
10. Петракова М. Е., Анисимов Р. Л., Балтыбаев Ш. К. Об источниках магм для пород потуданского и павловского комплексов в Волго-Донском орогене (Воронежский кристаллический массив) // *Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2021. 18. С. 332–337.
11. 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. *Geol. Soc. of Amer., Special Paper*. 2015. Vol. 510. 433 p.
12. Буянов А. Ф., Глазнев В. Н., Раевский А. Б., Скопенко Г. Б. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии // *Геофизический журнал*. 1989. Т.11. № 2. С. 30–39.
13. Glaznev V. N., Raevsky A. B., Skopenko G. B. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 258. P. 15–33.
14. Глазнев В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: Изд-во «КазМ». 2003. 252 с.
15. Glaznev V. N., Mints M. V., Muravina O. M., Raevsky A. B., Osipenko L. G. 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. Vol. 6. No. 2. P. 133–170.
16. Mints M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M., Sokolova E. Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11 (3). P. 999–1023.
17. Муравина О. М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 1. С. 108–114.
18. Глазнев В. Н., Минц М. В., Муравина О. М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2016. № 1(29). С. 53–63.
19. 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. Серия: Геология*. 2017. № 4. С. 5–23.
20. 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. Серия: Геология*. 2019. № 3. С. 74–83.
21. 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. Серия: Науки о Земле*. 2021. № 1(49). С. 24–35.
22. 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. Серия: Науки о Земле*. 2022. № 3(55). С. 45–57.
23. Муравина О. М., Жаворонкин В. И., Глазнев В. Н. Петрофизическая характеристика осадочного чехла Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2013. № 1. С. 189–196.
24. Муравина О. М., Жаворонкин В. И. Статистический анализ цифровой основы петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015. № 2. С. 94–99.
25. Глазнев В. Н., Муравина О. М., Жаворонкин В. И., Лебедев И. П., Воронова Т. А. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2020. 101 с.
26. 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. Серия: Геология*. 2014. № 4. С. 78–84.
27. 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-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // *Стратиграфия и геол. корреляция*. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16.
28. Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Salnikova E. B., Korish E. N., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The Early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia // *Precambrian Research*. 2018. Vol. 311. P. 1–23.
29. Ильин В. В. Петрофизическая характеристика гранитоидов павловского комплекса и ассоциирующих с ними пород (Воронежский кристаллический массив). *XXIV Уральская молодёжная научная школа по геофизике*: сб. материалов. Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. С. 79–85.
30. Терентьев Р. А. Петрография и геохронология гранитов Лискинского плутона Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 3. С. 43–52.
31. Терентьев Р. А., Савко К.А., Скрябин В. Ю., Кориш Е. Х. Петротип палеопротерозойского тоналит-грондьеит-гранодиоритового усманского комплекса Лосевской структурно-формационной зоны (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015. № 4. С. 42–60.
32. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия). Воронеж: Изд-во ВГУ, 2004. 446 с.
33. Глазнев В. Н., Муравина О. М., Раевский А. Б. Аппроксимационный оператор обратной задачи гравиметрии для горизонтального слоя // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 1. С. 97–105.
34. Hogan J. P., Gilbert M. C., Price J. D. Magma traps and driving pressure: consequences for pluton shape and emplacement in an extensional regime // *J. Struct. Geol.* 1998. Vol. 20. P. 1155–1168.
35. Sizova E., Gerya T., Brown M., Perchuk L. L. Subduction styles in the Precambrian: Insight from numerical experiments // *Lithos*. 2010. Vol. 116. P. 209–229.
36. Gerya T. Precambrian geodynamics: Concepts and models // *Gondwana Research*. 2014. Vol. 25. P. 442–463.
37. Sizova E., Hauzenberger C., Fritz H., Gerya T. P-T-t evolution of mantle and associated crustal rocks in collisional orogens: Insight from numerical experiments // *Earth-Science Reviews*. 2024. Vol. 250. P. 1–23.
38. Qi H., Zhao J. H., Johnson T. E. The fundamental role of H₂O in the generation of Coeval Sodic and potassic granitoids at continental arcs: An example from the Yangtze Block: South China // *J. Petrology*. 2023. Vol. 64. P. 1–24.

Three-dimensional model of the deep structure of the Pavlovsk batholith of the Don Terrane (East-Don Orogen)

©2024 V. N. Glaznev^{1, 2✉}, O. M. Muravina¹, V. V. Ilyin¹, T. A. Voronova¹

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1,
Voronezh, 394018, Voronezh, Russian Federation*

²*Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy
of Sciences, 14 Fersman st., 184209, Apatity, Russian Federation*

Abstract

Introduction: Investigations of large granitoid complexes of the continental crust are of utmost importance for the geodynamic reconstruction of its development. Within the Voronezh crystalline massif, a granitoid complex is the Pavlovsk migmatite-granite-granosyenite complex. Until recently, we had very little information about its deep structure, which prevented researchers from developing accurate models of the upper part of the crust for further geodynamic reconstruction. The purpose of our study was to create a 3D petrodensity model of the crust in the Pavlovsk complex based on the interpretation of gravimetric data.

Methodology: To create the crust model, we needed a large amount of geological, geophysical, and petrophysical data, which we acquired using an ArcGIS system. The initial density model of the upper crust was based on the regional density model of the lithosphere, including the density distribution in the sedimentary cover and the petrodensity map of the crystalline basement of Voronezh crystalline massif. The three-dimensional inverse gravimetric problem was solved by means of an anomalous field linear inversion algorithm using an approximate inverse problem operator for a horizontal layer. The iterative solution of the inverse problem was performed on the actual landscape of the studied territory for a discrete dataset. The redistribution of anomalous densities was performed based on the a priori geological and geophysical data.

Discussion: The Pavlovsk migmatite-granite-granosyenite complex was observed at a depth of up to 8 km, with the major volume at a depth between 1 and 6 km. The determined morphological features of the spatial structure of the complex indicate the presence of lateral inhomogeneities in the vertical thickness distribution. The density of granitoids of different phases are close enough, which makes it impossible to identify them using the model. According to the obtained comprehensive model, the Pavlovsk batholith has a shape of a sill-like intrusions with a series of subvertical structures, which are interpreted as potential magma channels. Intrusions of such a form are common for situations when there is a limited dominance of the magma pressure over the lithostatic pressure.

Conclusions: The obtained model of the upper crust based in the geological and geophysical information is compatible with the existing approaches to the nature of the Pavlovsk migmatite-granite-granosyenite complex. The suggested model can be used in geodynamic constructions of the evolution of Voronezh crystalline massif.

Keywords: Voronezh crystalline massif, Pavlovsk complex, granitoids, density modelling.

Funding: The study was supported by a Russian Science Foundation grant No. 23-27-00251.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Viktor N. Glaznev, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

For citation: Glaznev V. N., Muravina O. M., Ilyin V. V., Voronova T. A. Three-dimensional model of the deep structure of the Pavlovsk batholith of the Don Terrane (East-Don Orogen) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 2, pp. 104–115. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/2/104-115>

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

REFERENCES

1. Mints M. V., Bush W. A., Ageev S. N. Bryansk-Kursk-Voronezh intra-continental collisional orogen (East European craton). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, vol. 5 (3), pp. 717–742.
2. Shchipansky A. A., Kheraskova T. N. The Volga-Don Collisional Orogen in the East European Craton as a Paleoproterozoic Analog of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2023, vol. 14 (2), 0692.
3. Nenakhov V. M. *Mineragenicheskie issledovaniya territorij s dvukh"yarusnym stroeniem na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Mineragenic studies of territories with a two-tiered structure on the example of the Voronezh crystal massif]. Moscow, GEOKART. GEOS publ., 2007. 284 p. (In Russ.)
4. Egipko O. I. *Nekotorye mineralogo-petrograficheskie i geokhimicheskie osobennosti dokembrijskikh granitoidov yugo-vostochnoj chasti Voronezhskogo kristallicheskogo massiva*: diss. ... kand. geol. min. nauk [Some mineralogical, petrographic and geochemical features of Precambrian granitoids of the southeastern part of the Voronezh crystalline massif. PhD diss]. Voronezh, VSU publ., 1971. 367 p. (In Russ.)
5. Chernyshov N. M., Nenakhov V. M., Lebedev I. P., Strick Yu. N. Geodinamicheskaya model' formirovaniya VKM [Geodynamic model of VCM formation]. *Geotektonika – Geotectonics*, 1997, no. 3, pp. 21–31 (In Russ.)
6. Nenakhov V. M., Bondarenko S. V. Tektonicheskaya ehvoluciya Losevskoj shovnoj zony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v paleoproterozoe [Tectonic evolution of the Losev suture zone of the Voronezh crystalline massif in the Paleoproterozoic]. *Geotektonika – Geotectonics*, 2011, no. 4, pp. 43–59 (In Russ.)
7. Nikitin A. V., Nenakhov V. M. O proiskhozhdenii granitoidov pavlovskogo kompleksa i ikh strukturnykh preobrazovaniyakh na stadii konsolidirovannoj kory [On the origin of granitoids of the Pavlovsk complex and their structural transformations at the stage of consolidated crust]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 3, pp. 46–60 (In Russ.)
8. Terentyev R. A., Savko K. A. Mineral'naya termobarometriya i geokhimiya paleoproterozojskikh magnezial'no-kalievyykh granitoidov pavlovskogo plutona, Vostochno-Evropejskij kraton [Mineral thermobarometry and geochemistry of Paleoproterozoic magnesian-potassium granitoids of the Pavlovsk Pluto, East European craton]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 3, pp. 34–45 (In Russ.)
9. Terentyev 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 Research*, 2020, vol. 346.
10. Petrakova M. E., Anisimov R. L., Baltybaev S. H. K. Ob istochnikakh magm dlya porod potudanskogo i pavlovskogo kompleksov v Volgo-Donskom orogene (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [On magma sources for rocks of the Potudan and Pavlovsky complexes in the Volga-Don orogen (Voronezh crystalline massif)]. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN – Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KNC RAS*, 2021, 18, pp. 332–337 (In Russ.)
11. 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. *Geol. Soc. of Amer., Special Paper*. 2015. vol. 510. 433 p.
12. Buyanov A. F., Glaznev V. N., Raevskij A. B., Skopenko G. B. Kompleksnaya interpretaciya dannykh gravimetrii, sejsmometrii i geotermii [Comprehensive interpretation of gravimetry, seismometry and geothermal data]. *Geofizicheskij zhurnal – Geophysical Journal*, 1989, vol. 11, no. 2, pp. 30–39 (In Russ.)
13. Glaznev V. N., Raevsky A. B., Skopenko G. B. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere. *Tectonophysics*, 1996, vol. 258, pp. 15–33.
14. Glaznev V. N. *Kompleksnye geofizicheskie modeli litosfery Fennoskandii* [Complex geophysical models of the lithosphere of Fennoscandia]. Apatites, "KaeM" publ., 2003, 252 p. (In Russ.)
15. Glaznev V. N., Mints M. V., Muravina O. M., Raevsky A. B., Osipenko L. G. 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, vol. 6, no. 2, pp. 133–170.
16. Mints M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M., Sokolova E. Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations. *Geoscience Frontiers*, 2020, vol. 11 (3), pp. 999–1023.
17. Muravina O. M. Plotnostnaya 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.)
18. Glaznev V. N., Mints M. V., Muravina O. M. Plotnostnoe modelirovanie central'noj chasti Vostochno-Evropejskoj platformy [Density modeling of the central part of the Eastern European Platform]. *Vestnik KRAUNC. Seriya: Nauki o Zemle - Bulletin of the KRAUNTS. Series: Earth Sciences*, 2016, no. 1(29), pp. 53–63 (In Russ.)
19. Mints M. V., Glaznev V. N., Muravina O. M. Glubinnoe stroenie kory yugo-vostoka Voronezhskogo kristallicheskogo massiva po geofizicheskim dannym: geodinamicheskaya ehvoluciya v paleoproterozoe i sovremennoe sostoyanie kory [The deep structure of the crust of the southeastern 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. 5–23 (In Russ.)
20. Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Muravina O. M., Antonova I. Yu., Voronova T. A., Kholin P. V. Stroenie verkhnej kory Eleckogo uchastka Losevskogo terrejna (Voronezhskij kristallicheskij massiv) po dannym plotnostnogo modelirovaniya [The structure of the upper crust of the Yelets section of the Losevsky terrane (Voronezh crystalline massif) according to density modeling data]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 3, pp. 74–83 (In Russ.)
21. Voronova T. A., Muravina O. M., Glaznev V. N., Berezneva S. I. Trekhmernaya plotnostnaya model' verkhnej kory v oblasti sochleneniya 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 crystal massif)]. *Vestnik KRAUNC. Seriya: Nauki o Zemle - Bulletin of the KRAUNTS. Series: Earth Sciences*, 2021, no. 1(49), pp. 24–35 (In Russ.)
22. Muravina O. M., Glaznev V. N., Voronova T. A., Terentyev R. A.

Trekhmernaya plotnostnaya model' verkhnej kory v oblasti sochleneniya Losevskogo i Voroncovskogo terrejnov (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Three-dimensional density model of the upper crust in the area of articulation of the Losevsky and Vorontsov terranes (Voronezh crystal massif)]. *Vestnik KRAUNC. Seriya: Nauki o Zemle - Bulletin of the KRAUNTS*, 2022, no. 3(55), pp. 45–57 (In Russ.)

23. Muravina O. M., Zhavoronkin V. I., Glaznev V. N. Petrofizicheskaya kharakteristika osadochnogo chekhla Voronezhskoj anteklizy [Petrophysical characteristics of the sedimentary cover of the Voronezh anteclise]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2013, no. 1, pp. 189–196 (In Russ.)

24. 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 crystal massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 2, pp. 94–99 (In Russ.)

25. Glaznev V. N., Muravina O. M., Zhavoronkin V. I., Lebedev I. P., Voronova T. A. *Petroplotnostnaya karta dokembrijskogo fundamenta Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Petrodensity map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif]. Voronezh, CPI Scientific Book publ., 2020. 101 p. (In Russ.)

26. Glaznev V. N., Muravina O. M., Voronova T. A., Kholin V. M. Ocenka moshchnosti graviaktivnogo sloya zemnoj kory Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Estimation of the power of the gravitational layer of the Earth's crust of the Voronezh crystal massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 4, pp. 78–84 (In Russ.)

27. Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., Glushchenko V. V. Zona sochleneniya Sarmatii i Volgo-Uralii: izotopno-geokhronologicheskaya kharakteristika suprakrustal'nykh porod i granitoidov [The junction zone of Sarmatia and Volga-Uralia: isotope-geochronological characteristics of supracrustal rocks and granitoids]. *Stratigrafiya i geologicheskaya korrelyatsiya – Stratigraphy and geological correlation*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 3–16 (In Russ.)

28. Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Salnikova E. B., Korish E. H., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The Early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia. *Precambrian Research*, 2018, vol. 311, pp. 1–23.

29. Ilin V. V. Petrofizicheskaya kharakteristika granitoidov pavlovskogo kompleksa i asociiruyushchikh s nimi porod (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Petrophysical characteristics of granitoids of the Pavlovsk complex and associated rocks (Voronezh crystalline

massif)]. *XXIV ural'skaya molodyozhnaya nauchnaya shkola po geofizike: sb. materialov* [XXIV Ural Youth Scientific School of Geophysics: coll. art. materials]. Perm, GI UrO RAS publ., 2023, pp. 79–85 (In Russ.)

30. Terentyev R. A. Petrografiya i geokhronologiya granitov Liskinskogo plutona Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Petrography and geochronology of granites of the Liskinsky Pluton of the Voronezh crystalline massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 3, pp. 43–52 (In Russ.)

31. Terentyev R. A., Savko K. A., Scriabin V. Yu., Korish E. H. Petrotip paleoproterozojского tonalit-trond'emit-granodioritovogo usmanskogo kompleksa Losevskoj strukturno-formacionnoj zony (Voronezhskij kristallicheskij massiv) [Petrotype of the Paleoproterozoic tonalite-trondyemite-granodiorite of the Usman complex of the Losev structural-formation zone (Voronezh crystalline massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 4, pp. 42–60 (In Russ.)

32. Chernyshov N. M. *Platinonosnye formacii Kursko-Voronezhskogo regiona (Central'naya Rossiya)* [Platinum-bearing formations of the Kursk-Voronezh region (Central Russia)]. Voronezh, VSU publ., 2004, 446 p. (In Russ.)

33. Glaznev V. N., Muravina O. M., Rayevsky A. B. Approksimatsionnyj operator obratnoj zadachi gravimetrii dlya gorizontalnogo sloya [Approximation operator of the inverse gravimetry problem for a horizontal layer]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 1, pp. 97–105 (In Russ.)

34. Hogan J. P., Gilbert M. C., Price J. D. Magma traps and driving pressure: consequences for pluton shape and emplacement in an extensional regime. *J. Struct. Geol.*, 1998, vol. 20, pp. 1155–1168.

35. Sizova E., Gerya T., Brown M., Perchuk L. L. Subduction styles in the Precambrian: Insight from numerical experiments. *Lithos*, 2010, vol. 116, pp. 209–229.

36. Gerya T. Precambrian geodynamics: Concepts and models. *Gondwana Research*, 2014, vol. 25, pp. 442–463.

37. Sizova E., Hauzenberger C., Fritz H., Gerya T. P-T-t evolution of mantle and associated crustal rocks in collisional orogens: Insight from numerical experiments. *Earth-Science Reviews*, 2024, vol. 250, pp. 1–23.

38. Qi H., Zhao J. H., Johnson T. E. The fundamental role of H₂O in the generation of Coeval Sodic and potassic granitoids at continental arcs: An example from the Yangtze Block: South China. *J. Petrology*, 2023, vol. 64, pp. 1–24.

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

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

Ильин Виталий Викторович, магистр, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru; ORCID 0009-0008-2028-043X

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

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

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

Vitalii V. Ilin, Master's degree student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vitaliy.ilin.2000@bk.ru; ORCID 0000-0000-0000-0000

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

Authors have read and approved the final manuscript.