

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ КОРЫ ЮГО-ВОСТОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ: ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЫ

М. В. Минц¹, В. Н. Глазнев², О. М. Муравина²

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 1 ноября 2017 г.

Аннотация: в статье охарактеризовано глубинное строение юго-восточной части Воронежского кристаллического массива и восточной части Украинского щита, принадлежащих Восточно-Европейской платформе. Глубинное строение докембрийской коры и коро-мантийной границы представлено двумя объёмными моделями: 1) сейсмогеологической моделью, объединяющей геологические данные и интерпретацию сейсмических образов коры по данным сейсморазведки отражённых волн, 2) комплексной геофизической моделью, объединяющей данные сейсморазведки преломлённых волн и результаты моделирования по данным гравиметрии и геотермии. На базе созданной сейсмогеологической модели рассмотрена эволюция геодинамических обстановок палеопротерозойского Восточно-Воронежского орогена, который фиксирует область кратковременного разрыва континентальной коры в его восточной части. Результаты моделирования демонстрируют возможности комплексной геофизической модели для изучения геодинамических процессов и неотектонических структур региона.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, глубинное строение, земная кора, отражённые волны, плотностное моделирование, геодинамическая модель.

DEEP CRUSTAL STRUCTURE IN THE SOUTH-EAST OF VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF ON GEOPHYSICAL DATA: GEODYNAMIC EVOLUTION OF PALEOPROTEROZOIC AND THE CURRENT STATE OF CRUST

Abstract: the article described a deep structure of the South-Eastern part of the Voronezh crystalline massif and Eastern Ukrainian shield, owned by the East European platform. Deep structure of the Precambrian crust and crust-mantle border is represented by two spatial models: 1) seismic model, unifying the geological data and seismic images of the crust according to seismic reflected waves; 2) integrated geophysical model, combining data of seismic refracted waves, gravimetric and geothermic modelling results. On the basis of geophysical models created evolution geodynamic environments Paleoproterozoic of the East of Voronezh orogen, which captures a short gap area of the continental crust in its eastern part. Results of the modelling demonstrated the potential of the integrated geophysical models to study geodynamic processes and tectonic structures of the region.

Keywords: Voronezh crystalline massif, deep structure, Earth's crust, reflected wave, density modeling, geodynamic model.

1. Введение

Объектом наших исследований является земная кора Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и восточной части Украинского щита (УЩ), принадлежащих Восточно-Европейской платформе (ВЕП), для которой предпринята попытка построения эволюционной геологической модели. Эволюционная модель опирается на сейсмогеологическую модель коры, объединяющую геологические данные и интерпрета-

цию «сейсмических образов коры» по результатам сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) отражённых волн [1–3] и на комплексную трёхмерную геофизическую модель, объединяющую результаты глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) и данные инверсии гравиметрии и геотермии [4–6]. Эти модели позволяют на новом уровне реконструировать эволюцию геодинамических обстановок изучаемого региона ВКМ, принимая во внимание раз-

личия в представлении земной коры по данным МОГТ и ГСЗ-гравиметрии-геотермии.

Сейсмическими исследованиями различных модификаций ГСЗ, выполненными за последние 50 лет, выявлено, что земная кора разделена по вертикали на несколько «слоёв», различающихся скоростью распространения сейсмических волн. Наряду с этим, петрофизическими исследованиями на образцах кристаллических пород установлены взаимосвязи плотностных и скоростных характеристик пород, позволяющие совместно рассматривать скоростную и плотностную расслоенность коры [7–9 и др.]. В такой трактовке наиболее распространённой являлась трёхслойная субгоризонтальная модель коры, использующая наименование слоёв, близко отвечающих оценкам скорости и плотности пород: «гранитный», «диоритовый» и «базальтовый» (или «гранулит-базитовый»). Совершенствование методики ГСЗ и технологии комплексной геофизической интерпретации данных, позволило обратиться к более сложным моделям [10–13 и др.], в которых даются обоснования состава горно-порodных ассоциаций слоёв коры. В принципиальном отношении эти модели не отличаются от модели субгоризонтальной расслоенности коры, поскольку в них слабо проявлены взаимосвязи между поверхностными геологическими структурами и глубинными «слоями» коры.

Модели геологического строения коры, базирующиеся на реалистичных разрезах МОГТ, полученных в субвертикальных лучах с применением мощных вибраторов как источников сейсмических сигналов, позволяют надёжно транслировать поверхностные геологические данные на глубину. Основой для таких построений являются «сейсмические образы коры» – разрезы сейсмических отражений, демонстрирующие широкие вариации структурных характеристик кристаллической коры и ведущую роль наклонных отражающих границ в её строении. Наиболее существенные результаты такого подхода к интерпретации данных были получены за последние два десятилетия при реализации крупных региональных проектов: BABEL в Скандинавии [14, 15], LITHOPROBE в Северной Америке [16, 17], FIRE в Финляндии [18] и 1-ЕВ в России [1, 19].

Наличие двух указанных подходов к моделированию позволило обратиться к совмещению [20–23 и др.] в рамках комплексных построений моделей на базе ГСЗ и гравиметрии (скоростные-плотностные модели) и моделей на базе МОГТ (структурно-геологические модели). Полученные в этом приближении модели коры, демонстрируют субгоризонтальную расслоенность геологической среды, на которую выборочно наложены некоторые структурные элементы, заимствованные из картины сейсмических отражений. Альтернативой таким построениям является обоснованная в [24–26] идея о принципиальной независимости моделей субгоризонтальной скоростно-плотностной расслоенности коры и структурно-геологических моделей. Совмещение разнородных интерпретационных данных и их содержательная гео-

логическая трактовка также являются задачами нашего исследования.

Важной проблемой изучения литосферы является содержательная трактовка раздела Мохо [27, 28 и др.], маркирующего границу между корой и мантией. Исторически сложилось, что термины «коро-мантийная граница» и «раздел Мохо» многими авторами рассматривались как взаимозаменяемые, однако по мере накопления знаний о морфоструктурных и петрологических характеристиках переходной зоны и собственно границы между корой и мантией, стало очевидно, что понятия «граница Мохо» и «коро-мантийная граница» совпадают не в полной мере. Если первая – это геофизический образ поверхности планетарного ранга, характеризующейся скачкообразным возрастанием скорости продольных волн с 6.9–7.4 до 8.0–8.2 км/с, то вторая – это комплексный геологический феномен, совмещающий сведения о составе, уровне метаморфизма, реологических свойствах пород, а также структурных особенностях границы между корой и мантией. По данным исследований в отражённых волнах [2, 16, 20, 29, 30] выявлено существование тонкой структуры коро-мантийной границы, которая в пределах докембрийских кратонов проявлена достаточно отчётливо как смена умеренно или интенсивно отражающей нижней коры нижележащей акустически прозрачной мантийной областью. Исследование эволюции коро-мантийного раздела является ещё одной задачей нашей работы.

Сопоставление известных данных о современных и неотектонических движениях с характеристиками комплексной трёхмерной модели литосферы ВКМ, позволяет продвинуться в понимании природы новейших геодинамических событий в регионе.

2. Методы моделирования

Методы геологической интерпретации сейсмических образов коры, получаемых в рамках МОГТ, интенсивно используются в последние два десятилетия. Главной особенностью этой методологии, в нашей постановке, является принцип обратной связи: от геологической характеристики дневной поверхности к интерпретации разреза и далее от разреза к совершенствованию карты поверхности. Повышение достоверности интерпретации достигается за счёт увязки геологических карт и сечений вдоль сейсмических профилей в рамках объёмных геологических моделей коры, коро-мантийной границы и верхней части мантии. В итоге, удастся получить максимально согласованную объёмную модель геологической среды. Полная характеристика принятой методологии интерпретации дана в работах [1, 3, 19].

Первоначальная версия полученной в рамках этой методологии объёмная сейсмогеологическая модель коры, коро-мантийной границы и верхней части мантии ВКМ представлена в монографии [1]. В дальнейшем, южная часть модели была дополнена результатами наших построений [3] по профилю DOBRE [31], пересекающему Днепровско-Донецкую впадину (ДДВ).

Кроме того, новые материалы детальной аэромагнитной и гравиметрической съёмки были использованы для оконтуривания и структурного представления Варваринской структуры в юго-западной части Хоперского блока [3].

Современные методы построения 3D геофизических моделей литосферы основаны на согласованной комплексной инверсии геофизических полей [8, 26, 32–36], в процессе которой проявляется генерализация изучаемой среды, порождаемая дискретностью исходных данных. В нашем подходе исходными данными для моделирования послужили обобщённые результаты интерпретации ГСЗ [4, 37], данные гравиметрии и геотермии [38, 39], а также петрофизические характеристики пород ВКМ [40]. Помимо этого использовались стохастические оценки искомым параметров среды: глубин размещения геофизических границ, термических параметров, взаимосвязей между физическими свойствами горных пород [41].

Полученная в рамках развитой методологии комплексная 3D плотностная и термическая модели литосферы ВКМ и его обрамления [5, 6], охватывают всю область исследований, рассматриваемых в данной работе. Геологическая трактовка результатов геофизического моделирования позволила выявить главные черты строения литосферы региона.

3. Геологический очерк

Объект исследования расположен в пределах ВКМ и восточной части УЩ (рис. 1). ВКМ принадлежит восточной части Сарматии – крупному сегменту архейской коры на юге Восточно-Европейского кратона. Согласно С.В.Богдановой [42], Сарматия включает несколько архейских протократонов, которые объединились в палеопротерозое 2,3–2,0 млрд лет назад. Согласно альтернативной модели М. В. Минца с соавторами [1, 3, 19], Сарматия можно рассматривать в качестве средне-палеопротерозойского (~2,6–2,02 млрд лет) Брянск-Курск-Воронежского внутриконтинентального коллизионного орогена (БКВО), сформированного на архейском континентальном основании, которое соответствует Сарматии. Северо-западная и северо-восточная границы Сарматии перекрыты поздне-палеопротерозойскими породами, образующими Осницко-Микашевичский вулканоплутонический пояс и структуры Северо-Воронежского орогена, которые возникли в процессе объединения Сарматии с Балтикой и Волго-Уралией [1, 19].

3.1. Архейская кора восточной части Сарматии

В строении архейской континентальной коры Сарматии определяющую роль играют гранит-зеленокаменные и гранулитогнейсовые структурно-вещественные ассоциации (рис. 2) с возрастом 3,6–2,9 млрд лет [45, 46], характерным для Среднеприднепровской и Приазовской гранит-зеленокаменной областей (ГЗО) УЩ. В пределах ВКМ Курская ГЗО образована аналогичными по составу комплексами примерно того же возраста – 3,4–2,9 млрд лет [1]. В При-

азовской провинции УЩ преобладают породы гранулитовой фации метаморфизма [45] с возрастом формирования около 3,0 млрд лет [47]. На этом рубеже кора восточной части УЩ представляла единую континентальную область, в которой метаосадочные гранулиты залегают на породах гранит-зеленокаменной ассоциации с неравномерно наложенным метаморфизмом гранулитовой фации [48]. Курско-Бесединский гранулитогнейсовый ареал был сформирован несколько позже – 2,85–2,82 млрд лет назад [49, 50]. В восточной части ВКМ фундамент палеопротерозойского Воронцовского пояса образован слабо изученными архейскими породами Хоперского блока. В юго-западной части блока в тектоническом окне вскрыты бурением и исследованы геофизическими методами архейские породы, слагающие Варваринский выступ. Преобладающая по площади юго-восточная часть этой структуры сложена плагиогнейсами и амфиболитами, а в основании разреза значительную роль играют метапироксениты и амфиболовые гнейсы [3, 51].

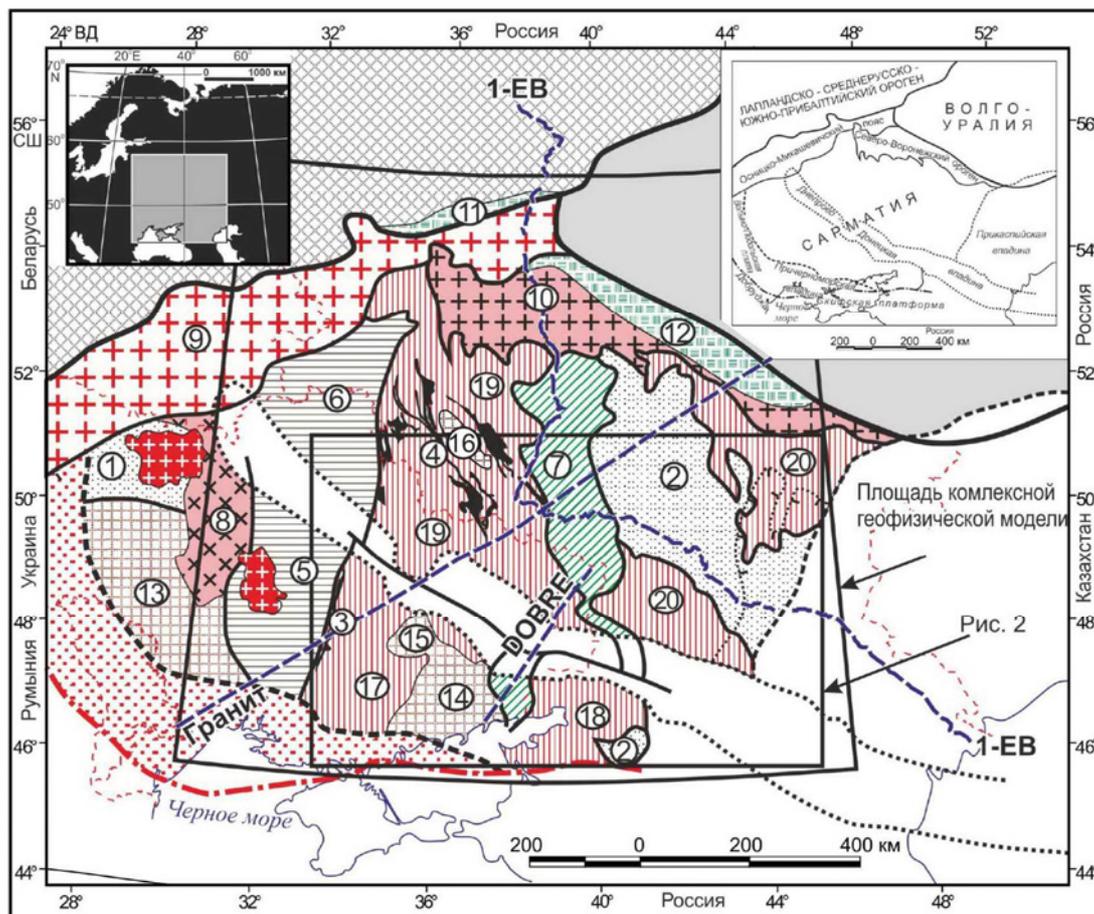
3.2. Средне-палеопротерозойский Брянск-Курск-Воронежский внутриконтинентальный коллизионный ороген

Средне-палеопротерозойские комплексы Брянск-Курск-Воронежского орогена распределены по всей территории Сарматии [1, 3, 19], формируя чередующиеся палеопротерозойские тектонические пояса субмеридианального простирания, которые можно рассматривать в качестве орогенов второго порядка (рис. 1). В пределах ВКМ и сопредельной части УЩ с запада на восток следуют (рис. 1, 2): Ингуло-Ингулец-Кулажино-Брянский ороген, ороген Курской Магнитной Аномалии (КМА) и Восточно-Воронежский ороген (ВВО). ВВО является осевой структурой БКВО и его размещение фиксирует область кратковременного разрыва континентальной коры. В этой статье, оперирующей результатами объёмного сейсмогеологического моделирования [2, 3, 19] по профилям [1, 31, 52] и комплексной 3D литосферы ВКМ [4–6], мы ограничимся характеристикой геологического строения ВВО и сопредельной части орогена КМА.

Ороген Курской магнитной аномалии

В строении орогена КМА (рис. 1, 2), сформированного на фундаменте архейской Курской ГЗО, главную роль играют железорудные вулканогенно-осадочные пояса. Второй по значимости компонент представлен субвулканическими и гипабиссальными интрузивными комплексами мафит-ультрамафитового, кислого и щелочного состава. С заключительной стадией эволюции связано формирование гранитогнейсовых куполов.

Железорудные вулканогенно-осадочные пояса представлены ассоциацией протяжённых (до 100 км и более) тектонических чешуй небольшой мощности и пологих асимметричных синклиналиных структур



Условные обозначения

Мезопротерозой

Плутоны габброанортозитов – гранитов-рапакиви

Лапландско-Среднерусско-Южно-Прибалтийский внутриконтинентальный коллизионный ороген

Архейские и палеопротерозойские комплексы

Сарматия

Палеопротерозойские структурно-вещественные комплексы:

Вулканогенно-осадочные комплексы, умеренного уровня метаморфизма: 1 – Тетеревский, 2 – Воронцовский

Железорудные пояса: 3 – Кривого Рога, 4 – Курской Магнитной Аномалии (КМА)

Гранулитогнейсовые комплексы: 5 – Ингуло-Ингулецкий, 6 – Кулажино-Брянский

Липецко-Лосевский вулканоплутонический комплекс (7)

Росинско-Тикийский амфиболит-гранитоидный комплекс (8)

Вулканоплутонические комплексы вдоль северо-западной и северо-восточной окраин Сарматии: а – Осницко-Микашевичский (9), б – Тульско-Тамбовский (10)

Мафит-ультрамафитовые комплексы сутурных зон: 11 – Апрельский, 12 – Рязанский

Архейские структурно-вещественные комплексы

Гранулитогнейсовые комплексы: 13 – Побужский, 14 – Приазовский, 15 – Славгородский, 16 – Курско-Бесединский

Гранит-зеленокаменные области: 17 – Среднеприднепровская, 18 – Ростовская, 19 – Курская, 20 – Хоперская

Нерасчлененные раннедокембрийские образования:

перекрытый осадочным чехлом фундамент
Волыно-Подольской плиты и Причерноморской впадины

Волго-Уралья

Архейские гранулитогнейсовые комплексы:

Преимущественно мафитовые гранулиты, мафитовые и ультрамафитовые интрузивы; подчиненно диафорированные мафитовые и метаосадочные гранулиты

Геологические границы

разделяющие палеоконтиненты и внутриконтинентальные орогены

разделяющие главные тектонические подразделения во внутренней области палеоконтинентов и орогенов

ограничения овоидов

границы структурно-вещественных комплексов

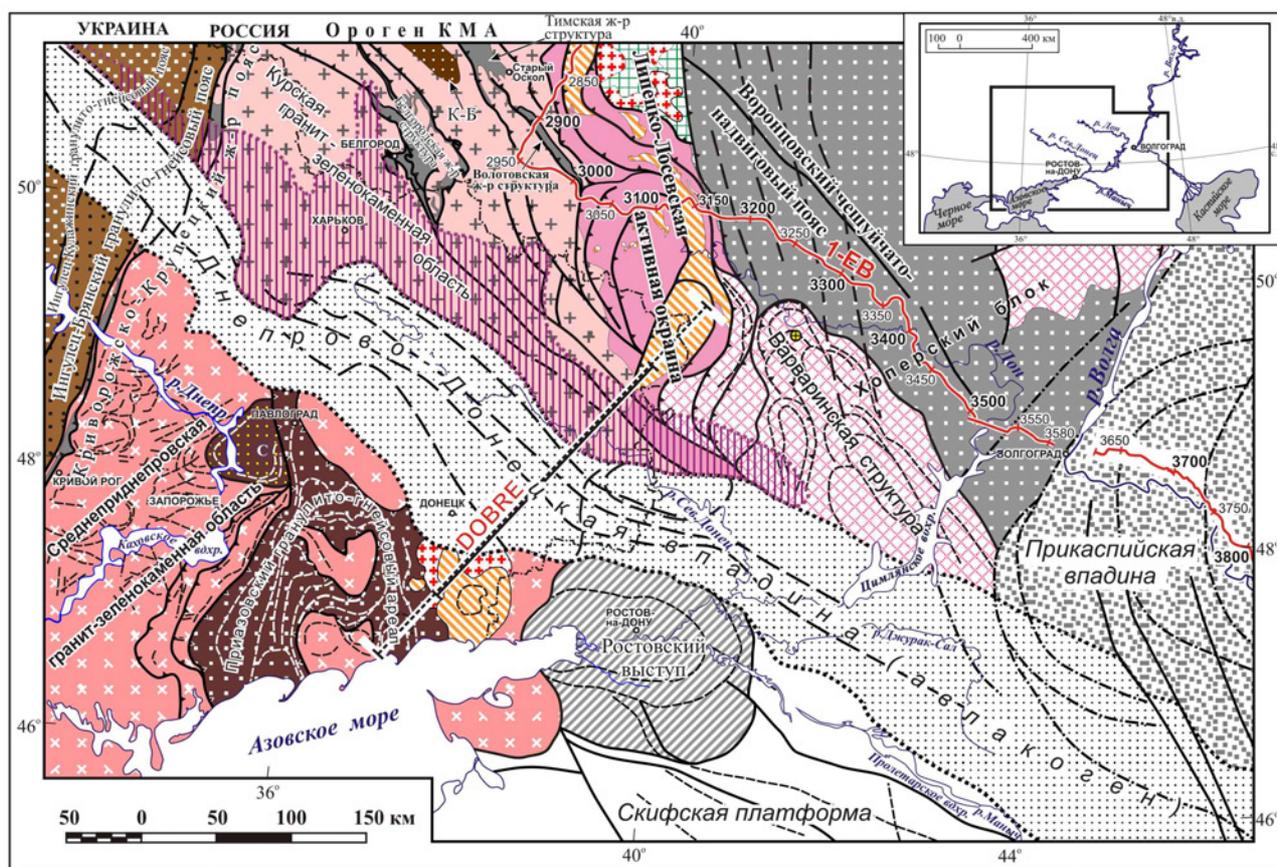
южное ограничение Украинского щита

граница раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы

границы неопротерозой-фанерозойских впадин: а – Днепровско-Донецкой, б – Прикаспийской

Сейсмические профили

Рис. 1. Схема тектонического районирования Сарматии. Врезка слева – географическое положение района, врезка справа – размещение главных тектонических структур.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙ

Воронцовский чешуйчато-надвиговый пояс, 2.2-2.02 млрд лет

Воронцовский метатерригенный комплекс

Липецко-Лосевская активная окраина, 2.1-2.02 млрд лет

Сиениты и граносиениты Павловского и Хлебодаровского комплексов, 2.08-2.05 млрд лет

Граниты и плагиограниты Усманского и Анадольского комплексов, 2.10-2.09 млрд лет

Лосевская серия: метавулканы (амфиболиты), ~ 2.10 млрд лет

Донская серия: тоналито-гнейсы (предположительно, ~ 2.10 млрд лет)

Архейские комплексы пород, частично перекрытые палеопротерозойскими породами воронцовской серии (Ростовский выступ)

Гранулитогнейсовые пояса (ГГП), ~2.2-2.05 млрд лет

Ингулец-Кулажинский ГГП: преимущественно кондалиты

ФАНЕРОЗОЙ

Прикаспийская впадина: осадочные комплексы

Днепровско-Донецкая впадина (авлакоген): вулканогенно-осадочные комплексы

Измененные (разуплотненные) породы в обрамлении Днепровско-Донецкой впадины

СТРУКТУРНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Тектонические нарушения, преимущественно сдвиги

Взбросо-надвиги

Тектонические нарушения, проведенные по границам магнитных и плотностных аномалий

Границы овальных синформ, определяющих строение Прикаспийской впадины

Геологические границы

Структурные линии, проведенные по магнитным аномалиям: а - с указанием наклона по 3-мерной модели, б - с неизвестной ориентировкой

Рис. 2. Геологическая карта юго-восточной части Восточно-Европейского крона. Составлена на основе геологических карт [42, 43] и данных из [3].

 Ингулец-Брянский ГПП: гранат-гиперстеновые гнейсы, кондалиты, эвлизиты

Ороген Кривого Рога - Курской магнитной аномалии (КМА), от ~2.6 до 2.04 млрд лет

 Железородные вулканогенно-осадочные пояса, 2.5-2.05 млрд лет

АРХЕЙ

Гранулитогнейсовые ареалы (ГГА), 3.0-2.8 млрд лет

 Курско-Бесединский (К-Б) и Приазовский ГГА, 2.86-2.82 млрд лет

 Славгородский ГГА (С), ~3.0 млрд лет;

Гранит-зеленокаменные области, 3.6-2.9 млрд лет

 Курская (ГЗО), 3.4-2.9 млрд лет

 Среднеприднепровская ГЗО и ее продолжение в Приазовье, 3.6-2.9 млрд лет

 Хоперский блок (фундамент воронцовской серии)

Продолжение условных обозначений к Рис. 2.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ГЛУБИННЫХ РАЗРЕЗАХ

 "Расслоенная нижняя кора" - предположительно гранулит-базитовый комплекс ("зона рефлексивити")

 "Коро-мантийная смесь" (область с малопротяженными пакетами отражений, транслирующими в мантию структуры нижней коры)

 Мантия (акустически прозрачная область)

 Границы стратиграфических подразделений в палеозойском разрезе Днепровско-Донецкой впадины

 Сейсмические отражения

ГЕОТРАВЕРСЫ

 Геотраверс 1-ЕВ

 Профиль DOBRE: ГСЗ - пунктир, ОГТ - сплошная линия

 Варваринская скважина

шириной от 20 до 50 км. Глубина залегания подошвы крупных синформ по геофизическим данным оценивается в 5–10 км [41]. Пологие юго-западные крылья синформ частично сохраняют нормальный стратиграфический контакт с породами архейского основания, а северо-восточные крылья нередко запрокинуты и/или перекрыты надвинутыми в юго-западном направлении породами архейского гранит-зеленокаменного комплекса. Пауза в тектонической активности от ~2,9 до ~2,6 млрд лет зафиксирована образованием коры выветривания на архейских породах Курской ГЗО [53]. Последующее накопление эпиконтинентальных осадков и высокотемпературных ультракалийевых кислых вулканитов неоархейской лебединской серии [54] позволяет связывать их формирование с инициальной стадией палеопротерозойского рифтинга архейского кратона.

Курская серия, слагающая нижнюю часть палеопротерозойского разреза, сложена: эпиконтинентальными осадками, кварцевыми аренидами, толщами железистых кварцитов и сланцев. Выше лежащая оскольская серия представлена бимодальной ассоциацией рифтогенного типа, включающей высококалийевые липариты и высокотитанистые метатолиты. Мощность обеих серий достигает нескольких километров. Существование палеопротерозойских эпиконтинентальных осадочных бассейнов связано с интервалом 2,5–2,05 млрд лет [55]. Согласно косвенным оценкам, накопление железисто-кремнистых формаций ограничено интервалом 2,5–2,45 млрд лет [56]. Интенсивные магматические процессы рифтогенного типа отвечали началу (~2,5 млрд лет) и концу (~2,09–2,04 млрд лет) этого интервала [57, 58]. Оценки температур метаморфизма пород железородных поясов варьируют в интервале от 420–500 до 580–620 С при давлениях от 2–3 до 5 кбар [59, 60]. Относительно высокие темпе-

ратуры метаморфизма вулканогенно-осадочных пород на небольших или умеренных глубинах свидетельствуют о том, что температуры в подстилающей архейской коре должны были достигать уровня гранулитовой фации.

Восточно-Воронежский ороген

Восточно-Воронежский ороген (рис. 1, 2) включает Липецко-Лосевский вулканоплутонический и Воронцовский чешуйчато-надвиговый пояса, которые разделены Лосевско-Мамонским швом.

Воронцовский чешуйчато-надвиговый пояс протяженностью более 600 км при ширине более 200 км охватывает восточную половину ВВО. Материалы геологического картирования и анализ сейсмических образов коры по профилю 1-ЕВ в интервале 3300–3580 км (рис. 3) показывают, что воронцовская серия подстилается корой континентального типа предположительно архейского возраста, которую мы соотносим с Хоперским блоком [1, 3, 19].

Воронцовская серия представляет собой толщу песчанико-сланцевых флишеидных отложений с локальным развитием углито-графитовых сланцев и графитовых гнейсов [61]. В составе обломочного материала значительную роль играют вулканомиктовые и туфогенные компоненты. Спорадическое присутствие голубого кварца [62], свидетельствует о высокотемпературном типе вулканических извержений. Мощность серии в разрезе по профилю 1-ЕВ достигает 15 км (рис. 3), что позволяет говорить о суммарном объеме отложений, порядка 10–15 миллионов куб. км. Метаморфические преобразования пород характеризуются пространственной зональностью типа термальных куполов, а прогрессивный P-T тренд метаморфизма отвечает росту температуры от 460 до 750 С и давления от 2–3 до 5–6 кбар [63].

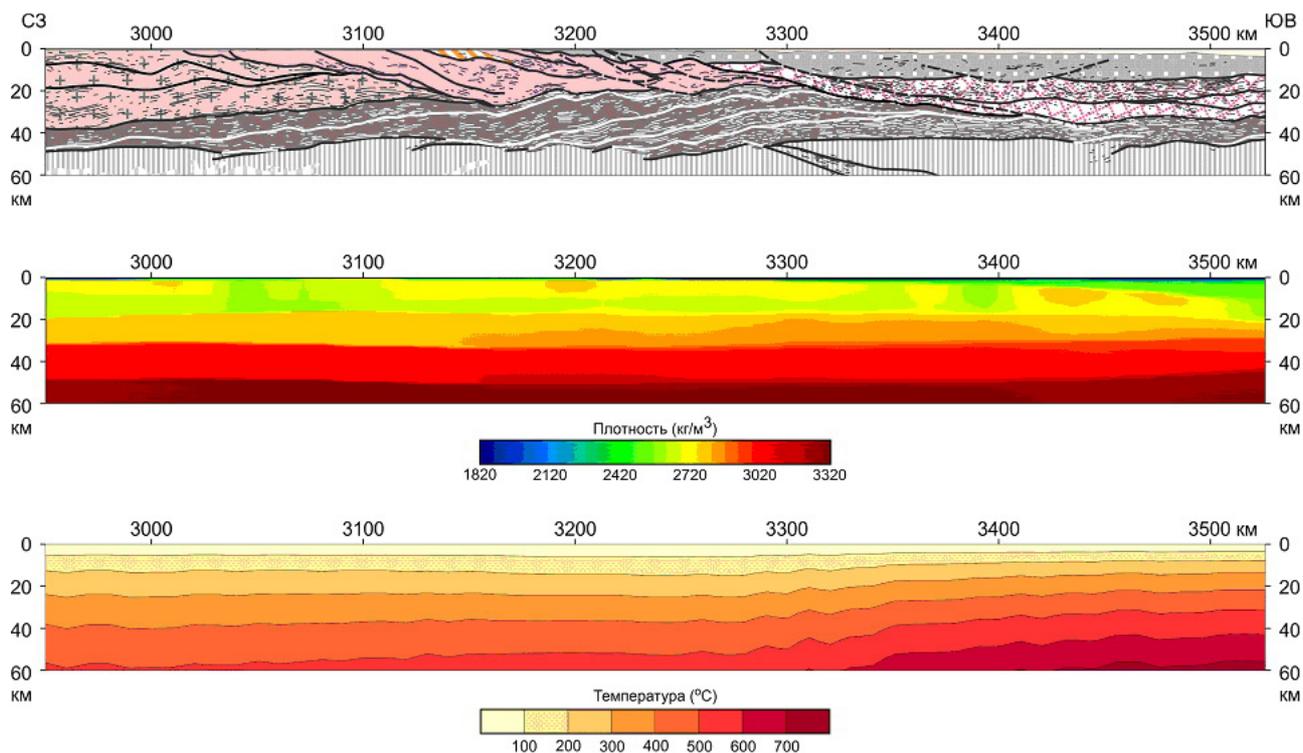


Рис. 3. Геологические разрезы вдоль геотраверса 1-ЕВ в интервале 2900-3500 км: а – структурно-геологический разрез согласно [1, 3]; б, в – плотностной и термический разрезы литосферы по [5, 6].

Воронцовский пояс насыщен интрузивными телами рудоносных мафит-ультрамафитов (Cu-Ni, Pt) и гранитоидов, расположенных в западной части пояса. Наиболее ранние датировки мафит-ультрамафитового магматизма равны 2,18–2,12 млрд лет [64]. Последующие интрузии мафит-ультрамафитовых и гранитных магм охватили короткий промежуток времени продолжительностью около 40 млн. лет: Еланский пироксенит-норит-диоритовый комплекс – 2,09 млрд лет, Мамонский дунит-перидотит-габброноритовый комплекс – 2,07 млрд лет и Новомеловатский массив гранодиоритов – 2,06–2,05 млрд лет назад. Геохимические характеристики мафит-ультрамафитовых пород указывают на их мантийное происхождение с последующей модификацией состава в процессе коровой контаминации [64]. Интрузии гранитов S- и А-типа датированы 2,07–2,05 млрд лет [65].

Возраст осадконакопления воронцовской серии приблизительно равен 2,17–2,10 млрд лет, учитывая согласующиеся оценки возраста молодых детритовых цирконов – 2,09 млрд лет и возраст древнейших магматических ядер детритовых цирконов – 2,16–2,13 млрд лет [66]. Оценка возраста зонального метаморфизма осадков 2,07 млрд лет [67], они находятся в интервале возрастов интрузивных комплексов, однако при размещении интрузивов в пределах метаморфических ореолов интрузивы пересекают породы, которые уже подверглись метаморфизму.

Липецко-Лосевский вулcano-плутонический пояс располагается к востоку от внутриконтинентального орогена КМА и ограничивает с запада Воронцовский пояс (рис. 1, 2). Лосевская серия – один из глав-

ных компонентов Липецко-Лосевского пояса, сложена метаморфизованными осадочно-вулканогенными породами, уровень метаморфизма которых повышается от фации зелёных сланцев в северной части пояса до низов амфиболитовой фации в его южной части [61]. Оценки максимальных значений параметров метаморфизма достигают 500–600 С при давлении 5–6 кбар [63]. Возраст осадконакопления ограничен интервалом 2,18–2,17 млрд лет, возраст метаплагиооритов лосевской серии приблизительно оценен 2,14 млрд лет [68]. На рубеже 2,05–2,04 млрд лет [69] в центральной части пояса возникла депрессия, заполнявшаяся эпиконтинентальным вулканогенно-осадочным комплексом Воронежской серии, породы которой подверглись умеренному метаморфизму при 410 С и давлениях 2–3 кбар [63].

Интрузивные комплексы Липецко-Лосевского пояса представлены породами от ультраосновного до кислого состава. Метагабброиды Рождественского комплекса интродировали лосевскую серию 2,16–2,12 млрд лет назад [70]. Крупные тела кварцевых диоритов, тоналитов и плагиогранитов, принадлежащие Усманскому комплексу, близки по изотопно-геохимическим характеристикам метариолитам Лосевской серии [71] и имеют возраст 2,10–2,05 млрд лет [72, 73]. Изотопный состав Nd указывает на мантийный источник трондьемитовых-риолитовых магм [74] с вариациями состава пород за счёт кристаллизационной дифференциации и коровой контаминации. Массивы Павловского комплекса, интродированные 2,08 млрд лет назад [72] и распространённые в южной части Липецко-Лосевского пояса, сложены преиму-

щественно мигматитами, граносиенитами и гранодиоритами. В поперечном сечении вдоль профиля 1-ЕВ (рис. 3) массивы Павловского комплекса представляют собой пластинообразные тела, залегающие субсогласно в структуре Липецко-Лосевского пояса. Субщелочные диорито-гнейсы Донской ассоциации, представленные в южной части пояса, близки по Sm-Nd и Rb-Sr изотопно-геохронологическим характеристикам гранитоидам Павловского комплекса и сопоставимы с породами активных континентальных окраин фанерозоя [71]. Интрузивная деятельность в пределах пояса завершилась внедрением небольших массивов габбродиорит-анортозитов и монцогранитов, свойственных внутриконтинентальной обстановке [75]. К этому этапу относится и формирование концентрически-зонального Ольховского массива с возрастом 2,07–2,04 млрд лет [76, 77].

4. Объёмные модели глубинного строения ВКМ

В этом разделе рассматриваются модели строения ВКМ, полученные на основе сейсмопрофилирования в отражённых и в преломлённых волнах, которые представлены сечениями коры, верхней части мантии и коро-мантийной границы вдоль геотраверса 1-ЕВ [1], профилей DOBRE [31] и Гранит [52]. Эти данные сопоставляются с данными о распределении плотности и температуры в литосфере, полученными на основе решения 3D обратной комплексной задачи [4–6].

4.1. Объёмная сейсмогеологическая модель

Сейсмогеологическая модель, разработанная в соответствии с изложенными выше методическими принципами, базируется на материалах геологического картирования и результатах геологической интерпретации данных МОГТ по профилям 1-ЕВ [1, 2, 19] и DOBRE [3, 31].

Геотраверс 1-ЕВ, интервал 2950–3520 км

На картине сейсмических отражений по профилю 1-ЕВ (рис. 3) определён опознаются границы крупных геологических комплексов фундамента (рис. 2 и 3). Структурный рисунок внутрикоровых отражений указывает на пространственную связь пород Донской ассоциации и Павловских гранитоидов, которые в интервале 3015–3300 км (рис. 3) слагают единый линзовидный пакет тектонических пластин, надвинутых в западном направлении на породы Курской ГЗО. Этот пакет, с максимальной мощностью около 30 км, достигает поверхности фундамента в интервале 3015–3175 км и выклинивается в восточном направлении в районе пикета 3300 км на глубине около 18 км (рис. 3). Подстилающий Донские гнейсы Курский гранит-зеленокаменный комплекс, в структуре внутрикоровых отражений имеет клиновидную форму, с уменьшением мощности в восточном направлении и полным выклиниванием к пикету 3150 км на глубине 25 км. Структура коры в пограничной области между Курским кратоном и Хоперским блоком, отвечает

представлению о структурах типа «крокодил» (рис. 3 и 5). В сечении плотностной модели геотраверсу 1-ЕВ этот структурный элемент также находит свое отражение, хотя и в менее отчётливой форме.

Четырёхслойная кора в интервале 3390–3580 км располагается в границах Воронцовского пояса и Хоперского блока (рис. 2 и 3). Верхний «слой» в интервале 3175–3570 км, отождествляемый с породами воронцовской серии, достигает мощности 15 км к восточному краю интервала. Состав трёх залегающих ниже коровых «слоёв» может быть оценен лишь предположительно. Два из них, насыщенные отражениями, вероятно, образованы мигматизированным гнейсо-амфиболитовым или гранулитовым комплексом. Размещение нижнего «слоя» коры по обе стороны от коллизионного шва позволяет высказать предположение о его формировании в результате подслаивания (андерплейтинга) мантийными расплавами.

В интервале 3000–3400 км картина отражений рисует надвиго-поддвиговый ансамбль, образованный четырех-пятикратным повторением нижнекоревой пластины, подстилающей кору Хоперского блока (рис. 3). Этот ансамбль можно рассматривать в качестве своеобразного аккреционного комплекса. Нижние пластины в интервале 3130–3200 км погружаются в мантию и фрагменты нижней коры как бы растворяются в ней, становясь компонентом коро-мантийной смеси – акустически прозрачной мантийной области, которую пересекают короткие пакеты отражений, транслирующие в мантию структуры нижней коры.

Профиль DOBRE

Профиль DOBRE [31] пересекает восточную часть Приазовской провинции УЩ и юго-восточную часть ВКМ (рис. 2, 4). Задачей этого профиля было исследование строения палеозойской Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ), а собственно строение фундамента платформы, рассматривалось в [31] менее детально. Для выяснения особенностей строения раннедокембрийской коры была выполнена интерпретация картины сейсмических отражений по профилю DOBRE (рис. 4), опирающаяся на результаты исследований по геотраверсу 1-ЕВ и геологическую карту фундамента (рис. 2).

На профиле DOBRE граница между областями коры, сложенными породами Курской ГЗО и Приазовского продолжения Среднеприднепровской ГЗО, выделяется достаточно контрастно благодаря торцовому сочленению структурных рисунков сейсмических отражений: Курская ГЗО заметно пододвинута под область коры Среднеприднепровской ГЗО. Акустически расслоенная «нижняя кора» прослеживается в основании разреза на всем протяжении профиля DOBRE – как под Курской, так и под Среднеприднепровской ГЗО. Отдельные пластины «нижней коры» заметно погружаются в акустически прозрачную мантийную область, формируя линзу коро-мантийной смеси.

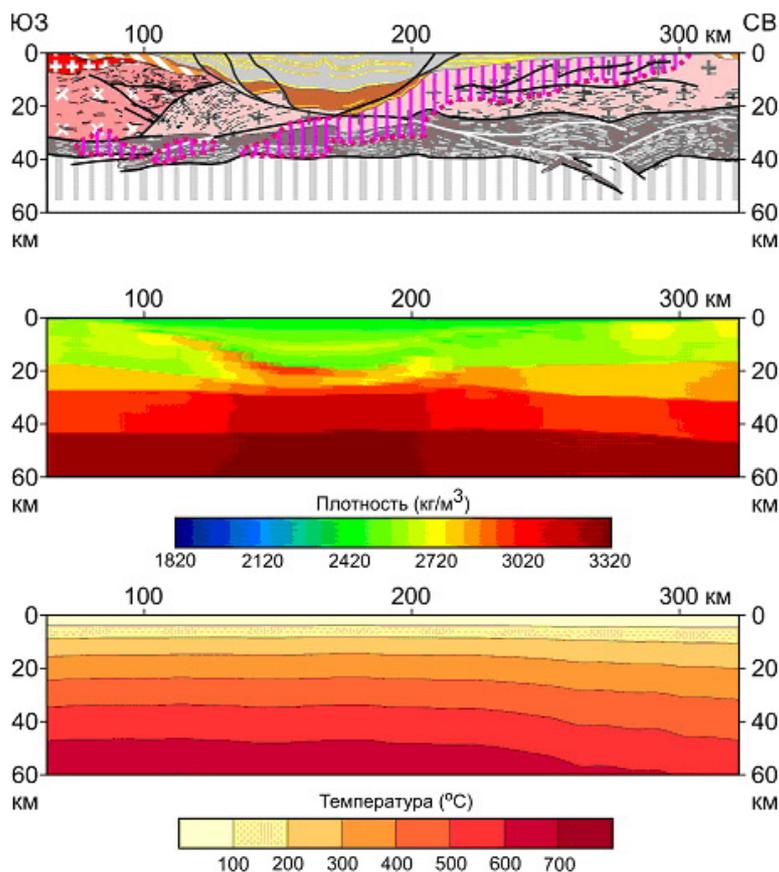


Рис. 4. Геологические разрезы по профилю DOBRE: а – структурно-геологический разрез согласно [3], рисунок сейсмических отражений заимствован из [30]; б, в – плотностной и термический разрезы литосферы по [5, 6].

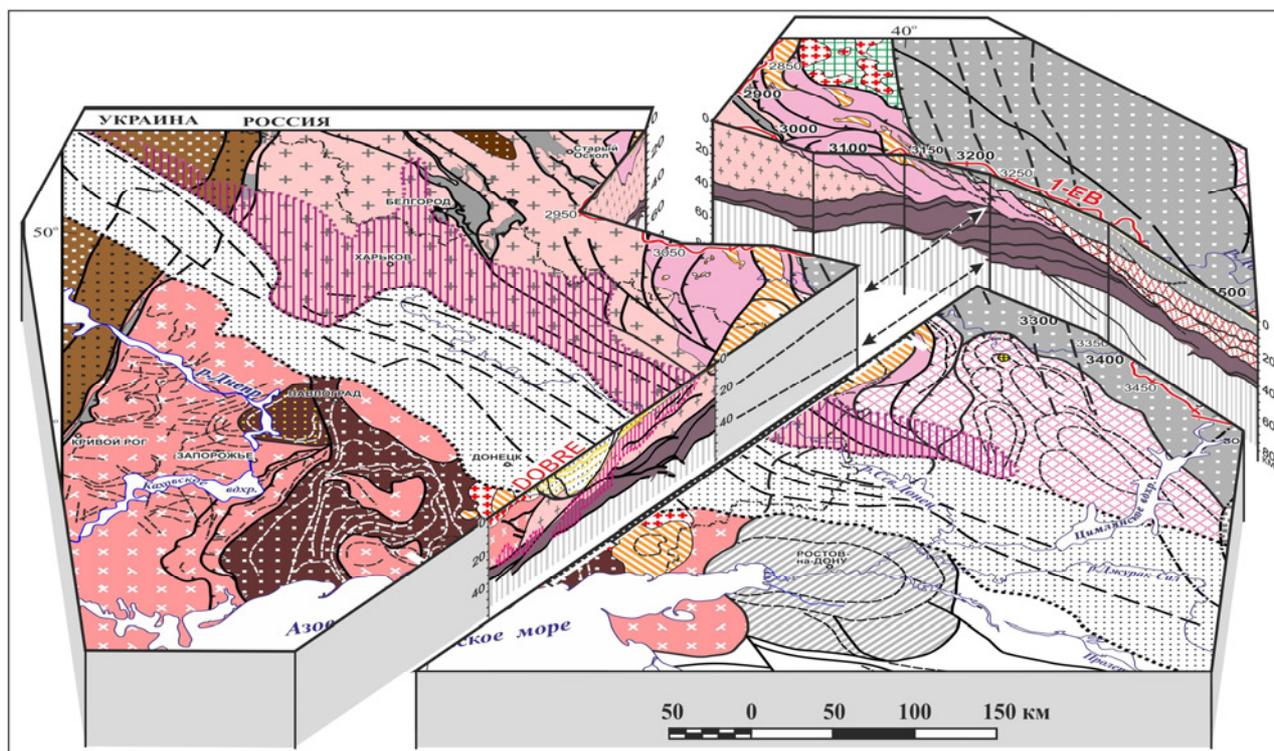


Рис. 5. Объёмная модель глубинного строения Восточно-Воронежского орогена, объединяющая геологическую карту и разрезы по геотраверсу 1-ЕВ и профилю DOBRE (по [3] с уточнениями). Условные обозначения – см. на рис. 2.

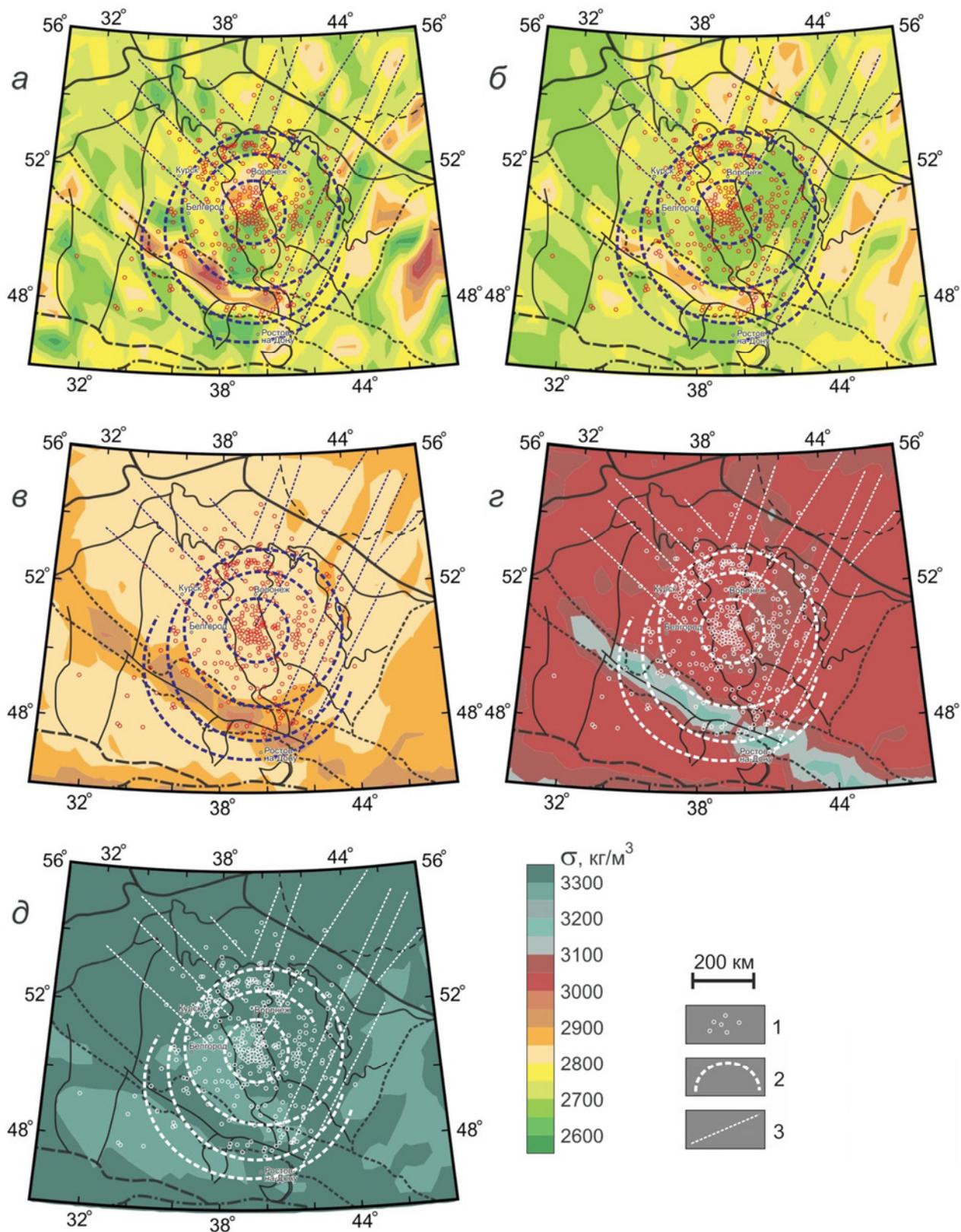


Рис. 6. Распределения плотности в литосфере на уровне: а – кровли гравиактивного слоя, б – кровли средней коры, в – кровли переходного слоя, г – кровли нижней коры, д – границы Мохо (по [5, 6] с дополнениями); и положение эпицентров землетрясений энергетического класса $K_p \geq 6$ (по [73]). Тектонические границы с рис. 1. Условные обозначения: 1 – эпицентры зарегистрированных и исторических землетрясений, 2 – границы концентрических зон, различающихся плотностью эпицентров и особенностями распределения плотности на различных глубинных уровнях, 3 – границы линейных зон, различающихся особенностями распределения плотности в коре.

Объёмная модель

Совмещение сечений по геотраверсу 1-ЕВ и профилю DOBRE в рамках объёмной модели выявили существенные детали геологического строения ВКМ (рис. 5). Пространственное и структурное сопоставление разрезов вдоль профиля 1-ЕВ (в интервале 3100–3400 км) и вдоль профиля DOBRE позволяют достаточно уверенно коррелировать нижнекоровый «слой» в сечениях обоих профилей. Прослеживание этого «слоя» вплоть до южного конца профиля DOBRE согласуется с данными о распространении пород воронцовской серии в пределах Ростовского «выступа». Примечательно совпадение зоны резко пониженных значений поля силы тяжести [38] и низких значений плотности в 3D плотностной модели [6], протягивающейся вдоль северной границы ДДВ. Именно в этой зоне отмечен выход к поверхности фундамента акустически прозрачной области в коре, подстилающей северный борт впадины на разрезе по профилю DOBRE (рис. 2, 4).

Особенности нижнекорового «слоя» указывают на общность процесса андерплейтинга в пределах Хоперского блока и в сопредельной области Курского кратона. Области тектонического скупивания этого «слоя» и формирование аккреционного надвиго-поддвигового структурного ансамбля на уровне «нижней коры» пространственно совмещены с надвиговым структурным ансамблем в верхней части, образованным тектоническими пластинами «средней коры» Хоперского блока, пород воронцовской серии и пород, слагающих Липецко-Лосевский пояс.

4.2. Трёхмерная комплексная геофизическая модель

Подробная характеристика 3D комплексной геофизической модели ВКМ приведена в [5, 6]. В данном разделе мы рассмотрим только главные особенности плотностной модели, представленной на рис. 6 и 7. Наиболее детально в 3D плотностной модели охарактеризована верхняя часть кристаллического фундамента, для которой имеются достоверные петроплотностные данные по всей территории ВКМ [79, 80]. В

целом, для гравиактивного слоя верхней части кристаллической коры (рис. 6а) характерен широкий диапазон изменений плотности пород – от 2560 кг/м^3 до 3080 кг/м^3 , который отвечает всем типичным породам ВКМ [80]. Среднее значение плотности составляет 2717 кг/м^3 [79], что является типичным значением для древних щитов [81, 82]. Пространственная дифференциация плотности в верхнем гравиактивном слое показывает общую приуроченность аномалий к известным структурам кристаллического фундамента региона.

Степень дифференцированности коры по плотности в более глубоких слоях коры резко снижается, и слои становятся более однородными с закономерным ростом средней плотности с глубиной (рис. 6), что естественно отражает специфику исходной сейсмической скоростной модели коры [4]. На этом общем региональном фоне по плотностным аномалиям в нижней коре резко выделяются глубокие впадины региона: линейная структура ДДВ со значениями плотности до 3000 кг/м^3 и изометричная для Прикаспийской впадины при значениях плотности до 2900 кг/м^3 . Линейная аномалия под ДДВ прослеживается и на уровне переходного слоя коры, где плотность достигает пиковых значений 3180 кг/м^3 .

Таким образом, основные тектонические подразделения, сформировавшиеся в палеопротерозое, в какой-то степени отражаются в картине распределения плотности только на верхних и средних уровнях коры, что соответствует глубинам, не превышающим 30 км. Начиная с уровня средней коры, характер распределения плотности пород изменяется, и корреляция с границами тектонических структур частично нарушается. Исключение составляет структура ДДВ, контуры которой уверенно прослеживаются до верхней мантии. Для ДДВ характерна относительно повышенная плотность пород во всех слоях, за исключением верхней мантии. Однако следует отметить, что точность расчётов плотности в этой области существенно зависит от учёта гравитационного влияния плотности осадочного чехла [83] и, вероятно, требует отдельного более детального решения обратной задачи на сетке с меньшим шагом, чем это дано в [5, 6].

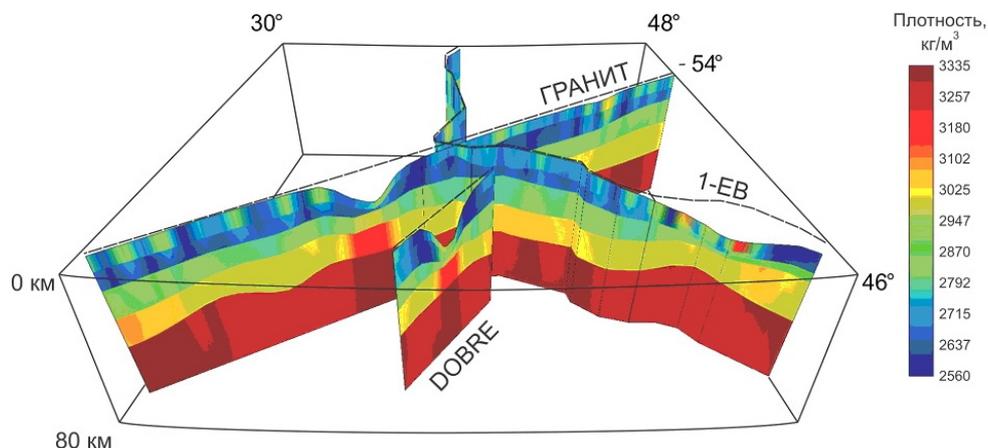


Рис. 7. Плотностные разрезы литосферы по профилю ГСЗ «Гранит», геотраверсу МОГТ 1-ЕВ и профилю МОГТ DOBRE (по [5] с дополнениями).

5. Обсуждение

Рассмотрим особенности представленных выше моделей глубинного строения литосферы по геофизическим данным и соответствующие им тектонические, эволюционно-геодинамические и неотектонические построения на их основе.

5.1. Модель геодинамической эволюции ВВО

Как отмечалось выше, наиболее значительные палеопротерозойские процессы в различных частях БКВО связаны с интервалом времени от 2,2 до 2,0 млрд лет. Палеотектонические реконструкции зарождения и эволюции средне-палеопротерозойского орогена в восточной части Сарматии, ранее выполнявшиеся различными исследователями, представлялись в виде описательных моделей:

а) эволюции тектоно-плитного типа, начинавшейся с раскола архейского континента и завершившейся коллизией восточной окраины Курского кратона с Хоперским блоком или с Волго-Уральским континентом [1, 84, 85];

б) формирования Восточно-Сарматского аккреционного орогена вдоль границы Сарматии с обширной палеоокеанической областью, завершившейся коллизией Сарматии и Волго-Уралии и формированием Восточно-Сарматского орогена, где Воронцовский пояс интерпретируется в качестве аккреционной призмы, сформированной из осадков, которые непосредственно перекрывали океанской дно [66, 71];

в) эволюции внутриконтинентального орогена, связанного с эндогенной активностью мантийно-плюмбового типа [3, 19].

Анализ геофизических данных, приведённых в этой работе, позволяет на новом уровне обратиться к изучению глубинного строения коры и охарактеризовать зарождение и эволюцию Восточно-Воронежского орогена.

Сейсмогеологическая модель

Объёмное представление модели ВВО в [1, 19] базировалось на пространственной корреляции структурно-вещественных комплексов фундамента и их выражения в картине сейсмических отражений по геотраверсу 1-ЕВ. Геолого-геофизическое картирование Варваринской структуры и совмещение в рамках единой модели сечений по геотраверсу 1-ЕВ и профилю DOBRE выявили ряд существенных деталей строения ВВО [3], которые демонстрируются объёмной моделью (рис. 5). Воронцовский пояс имеет синформное строение: породы Хоперского блока (предположительно архей) были надвинуты в западном направлении при формировании ВВО и в северо-восточном направлении в позднем палеопротерозое при формировании Северо-Воронежского орогена. Архейские породы ныне достигают поверхности фундамента в северо-восточной части Воронцовского пояса – в районах Саратовского и Волгоградского Правобережья и в юго-западной части пояса в пределах Варваринской структуры.

Особенности нижнекорового «слоя», зафиксированные профилями 1-ЕВ и DOBRE, указывают на общность процесса андерплейтинга в пределах Хоперского блока и сопредельной области Курского кратона. Области тектонического скупивания нижнекорового «слоя» и формирование аккреционного надвиго-поддвигового структурного ансамбля на уровне «нижней коры» пространственно совмещены с надвиговым структурным ансамблем в верхней части, образованным тектоническими пластинами «средней коры» Хоперского блока, пород воронцовской серии и пород, слагающих Липецко-Лосевский пояс. Окраина Курского кратона образует тектонический клин, вдавленный в восточном направлении на 150 км. Структура коры в пограничной области между двумя континентальными образованиями – Курским кратоном и Хоперским блоком, отвечает представлению о структурах типа «крокодил». В объёмной модели ВКМ по северной части геотраверса 1-ЕВ (интервал 2450–2900 км) была отмечена значительная разница сейсмических образов коры Курского и Хоперского блоков [1, 19]. Для коры Курской ГЗО характерен рисунок сложных деформаций в сочетании с протягивающимися кверху от основания коры акустически прозрачными областями, которые, вероятнее всего, образованы гранитоидами. Кора Хоперского блока, подстилающего породы воронцовской серии, образована чередованием трёх субгоризонтальных «слоёв» выдержанной мощности, контрастно различающихся насыщенностью отражающими объектами (рис. 3).

Зарождение и геодинамическая эволюция ВВО

Объёмное строение воронцовской серии, которая перекрывает мощную континентальную кору в полосе шириной около 400 км, противоречит её интерпретации в качестве аккреционной призмы. По особенностям глубинного строения коры ВВО более всего напоминают структуру эпиконтинентального бассейна, краевая часть которого при коллизии была перемещена на Липецко-Лосевскую активную окраину. На внутриконтинентальное происхождение рудоносных мафит-ультрамафитовых интрузивов внутри пород воронцовской серии, указывает состав магм мантийного происхождения, контаминированных веществом континентальной коры [1, 64, 84]. Чёткая расслоенность коры, подстилающей воронцовскую серию, могла возникнуть в связи с процессами внутрикорового плавления и дифференциации вещества коры под воздействием интенсивного прогрева, зафиксированного термальными «куполами» в пределах воронцовской серии и интрузиями высокотемпературных гранитов Бобровского и Терсинского комплексов [63, 72]. Геохимические характеристики вулканогенных пород лосевской серии и гранитоидов, участвующих в строении Липецко-Лосевского пояса, подобны характеристикам пород вулканоплутонических ассоциаций активных окраин [66, 68, 71, 84, 86], что даёт обоснование для реконструкции палеопротерозойской Липецко-Лосевской как активной окраины. Эта интер-

претация согласуется с сейсмическим образом коры и коро-мантийной границы в основании Липецко-Лосевского пояса.

Признание эпиконтинентальной природы воронцовской серии имеет принципиальное значение для интерпретации ВВО, ограничивая последовательность геодинамических обстановок преимущественно внутриконтинентальными условиями. Разрыв континентальной коры и формирование структуры океанического типа отмечены глубинным разрезом в единственном случае – в осевой части ВВО. Как было отмечено выше, рисунок сейсмических отражений по геотраверсу 1-ЕВ в интервале 3050–3300 км (рис. 3, 5) демонстрирует структуру типа «крокодил», связанную с границей между двумя континентальными образованиями – Курским кратоном и Хоперским блоком, коллизией которых около 2,05 млрд лет назад завершилось формирование Липецко-Лосевского и Воронцовского поясов ВВО. Особенности строения зоны тектонического «скупивания» нижнекорового «слоя» и аккреционного надвиго-поддвигового структурного ансамбля на уровне «нижней коры» в пространственной связи с Лосевско-Мамонским швом, с учётом геохимической специфики пород Липецко-Лосевского пояса, позволяют интерпретировать эту зону как коллизионный пояс, возникший на месте кратковременно раскрывавшегося океана.

Минимальная оценка латерального сокращения коры при формировании ВВО, полученная суммированием протяжённости тектонических пластин аккреционного ансамбля «нижней коры» в интервале 3000–4000 км по геотраверсу 1-ЕВ, без учёта субдуцированной части коры, составляет 450 км [3]. Оценить аналогичным образом латеральное сокращение верхней части коры можно лишь ориентировочно из-за разнообразия состава коровых пластин. Суммируя наблюдаемые в разрезе по геотраверсу 1-ЕВ относительные смещения к западу пород средней коры Хоперского блока и воронцовской серии, можно заключить, что минимальная оценка сокращения верхней части коры равна 200 км. Опираясь на разность этих величин, в отсутствие данных о протяжённости субдуцировавшей плиты, можно ориентировочно оценить ширину океанического бассейна, существовавшего в интервале 2,10–2,05 млрд лет между Курским кратоном и Хоперским блоком, несколькими сотнями километров. Отметим, что на восточной окраине Воронцовского пояса в его сечении геотраверсом 1-ЕВ, отсутствуют признаки «сутурной» зоны, предполагаемой моделями [66, 72].

Опираясь на всю представленную выше информацию, эволюцию ВВО можно охарактеризовать последовательностью геологических процессов, протекавших во внутриконтинентальной обстановке под воздействием мантийно-плюмовой эндогенной активности (рис. 8). Обсуждаемые ниже этапы модели эволюции ВВО не затрагивают особенности проявления мантийно-плюмовой активности в пределах БКВО в целом.

1. Возникновение обширного Воронцовского прогиба, быстро заполнявшегося терригенными осадками с участием отложений «горячих» пирокластических потоков. Период существования бассейна определяется приблизительно в интервале 2,17–2,10 млрд лет. С началом прогибания связано размещение в основании коры ультрамафит-мафитовых магм, представленных ксенолитами в диоритах Новомеловатского интрузива.

2. Размещение мафит-ультрамафитовых и гранитоидных интрузивов в породах эпиконтинентального Воронцовского пояса заключено в коротком временном интервале от 2,09 до 2,05 млрд лет.

3. Возникновение термальных куполов с максимальными температурами, достигающими уровня гранулитовой фации, около 2,07 млрд лет назад фиксирует температурный пик этапа. Интрузивный магматизм в пределах Воронцовского пояса в значительной части развивался синхронно или близко по времени с высокотемпературным метаморфизмом.

4. Особенности проявления магматизма и высокотемпературного метаморфизма указывают на мантийно-плюмовую природу этих процессов.

5. Формирование вулканоплутонического Липецко-Лосевского комплекса надсубдукционного типа, породы которого обладают геохимическими характеристиками производных ювенильных магм, контаминированных породами континентальной коры, датировано интервалом от ~2,08 до ~2,04 млрд лет. Этот промежуток времени перекрывается с возрастными мафитовых интрузивов Воронцовского пояса. Между тем, субдукции должно было предшествовать возникновение линейной океанской структуры, для которого геохронологические данные «не оставляют времени». Имеющиеся данные не позволяют объяснить – связано ли это обстоятельство со спецификой геодинамических условий процесса или с недостаточной точностью геохронологических определений, вызванной нарушениями изотопных систем. Наиболее вероятным представляется, что раскрытие океана было весьма кратковременным и локализованным в пространстве.

5.2. Комплексная геофизическая модель литосферы ВКМ

Выявленные при решении комплексной 3D обратной задачи плотностные аномалии в литосфере региона (рис. 6) не показывают чёткой связи с поверхностными геологическими структурами (рис. 3). Только некоторые наиболее крупные или контрастные структуры (рис. 2, 3) прослеживаются в плотностных аномалиях трёхмерной модели: структуры железистых кварцитов, крупные поля гнейсов, структура ДДВ. Эти тенденции, отмеченные ранее в [5, 6], являются отражением конечной дискретизации расчётной модели среды, которая не может служить основой для глубинного геологического картирования, как это, например, реализовано в [87]. Выполненное 3D моделирование было нацелено на создание региональной плотностной референц-модели, относительно которой

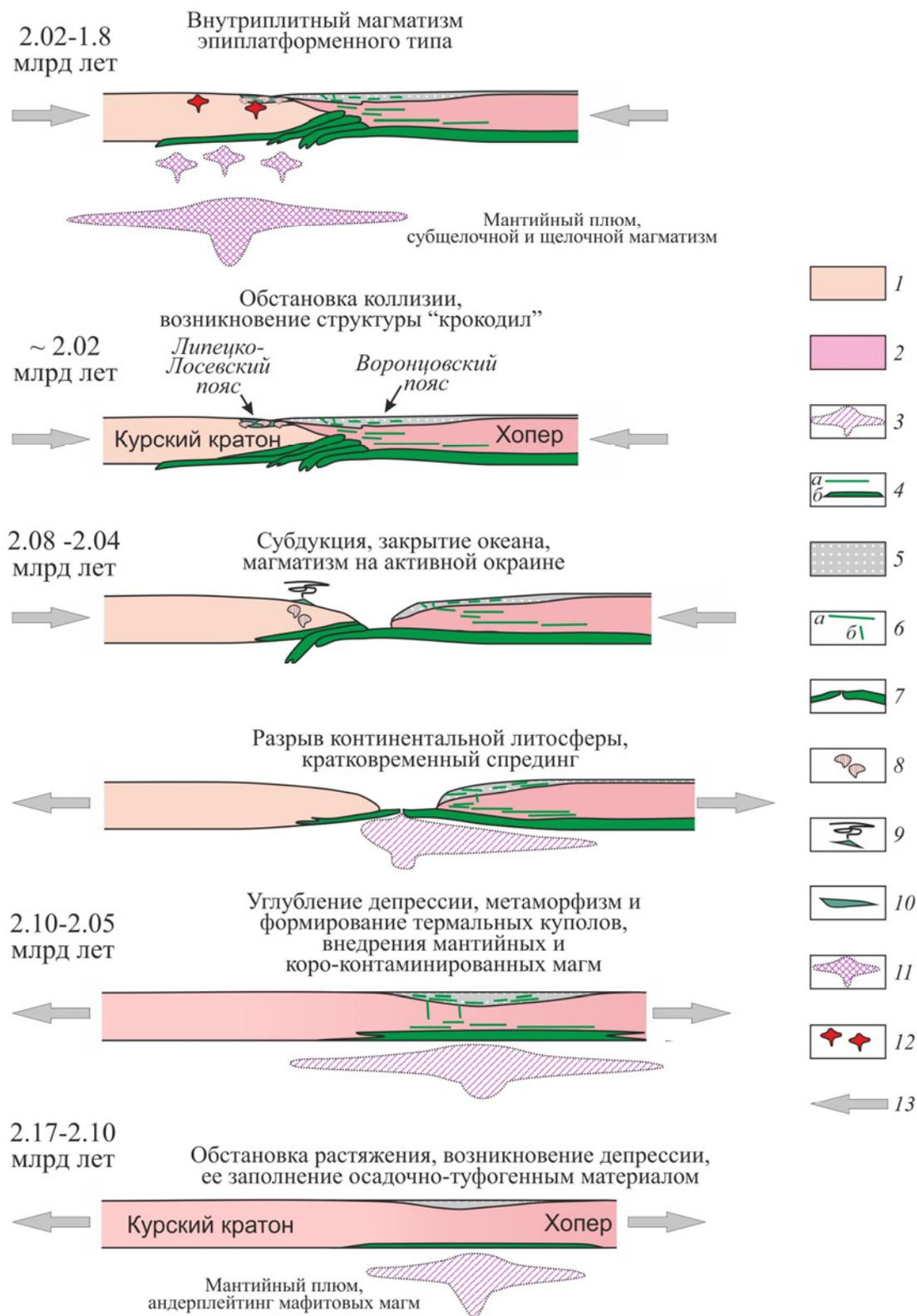


Рис. 8. Модель эволюции Восточно-Воронежского внутриконтинентального коллизионного орогена (по [3] с дополнениями). Условные обозначения: 1-2 – архейская кора: 1 – Курского кратона, 2 – «блока» Хопер; 3 – мантийный плюм, функционировавший от ~2,2 до ~2,1 млрд лет; 4 – мафит-ультрамафитовые интрузивы, образованные в результате интерплейтинга (а) и андерплейтинга (б) мантийных магм; 5 – вулканогенно-осадочный комплекс воронцовской серии; 6 – субогласные мафит-ультрамафитовые интрузивы (а) и дайки (б) Мамонского и Еланского комплексов; 7 – кора коротко-существовавшего океана; 8-10 – надсубдукционный магматизм: 8 – гранитоидные интрузивы Усманского, Павловского и Донского комплексов, 9 – вулканическая деятельность, 10 – лосевская осадочно-вулканогенная серия; 11 – мантийный плюм, функционировавший от ~2,0 до ~1,8 млрд лет и его производные; 12 – щелочные интрузивы платформенного типа; 13 – направления тектонических напряжений.

в настоящее время выполняется более детальное построение геологических объектов [88, 89 и др.]. Тем не менее, и в региональной плотностной модели просматриваются некоторые тенденции пространственного распределения неоднородностей, которые представляют интерес для понимания геологических следствий модели. Ниже рассмотрим именно эти аспекты результатов плотностного моделирования.

По значениям горизонтальных градиентов плотности на разных уровнях региональной модели были выделены структурные зоны север-северо-восточного и северо-западного простирания (рис. 6). Некоторые из этих зон веерообразно расходятся от центра ВКМ. Зоны север-северо-восточного простирания пересекают границы тектонических структур, выделяемых в фундаменте, а наиболее контрастная серия этих зон простирается приблизительно параллельно западному ограничению Прикаспийской впадины, совпадая в плане с зоной Доно-Медведицких дислокаций. Современная складчатая структура этих дислокаций сформировалась в пост-эоценовое время в связи с поздне-альпийской активизацией юго-восточного края ВЕП, вызванной коллизионными процессами на Кавказском отрезке Альпийского пояса [90]. Роль неотектоники в формировании рисунка плотностных аномалий в верхней и средней коре заметна также для структуры ДДВ и Причерноморской впадины (рис. 2, 3, 6). Причём линейное чередование знакопеременных плотностных аномалий в верхней и средней коре, являющееся, предположительно, отражением неотектонических процессов, формирует области аномальных напряжений в коре [91], способствующих образованию валов в осадочном чехле над зонами пониженной плотности фундамента и возможным размещением в них месторождений углеводородов.

Ещё один аспект геодинамических следствий из 3D плотностного моделирования, следует из сопоставления наших результатов с данными о сейсмичности региона [78]. Приведённые на рис. 6 концентрические элементы структурной неоднородности фундамента, построены как некоторое обобщение данных по распределению современной сейсмичности и аномальных особенностей плотностной модели коры. Разумеется, показанный структурный узор достаточно субъективен, но, тем не менее, в нём довольно убедительно просматривается связь между плотностной структурой коры и положением эпицентров землетрясений. Наиболее выразительно эти особенности проявляются для средней коры, переходного слоя, а также отчасти гравитивного слоя (рис. 6). Выявленный структурный «узор» физических характеристик литосферы региона позволяет говорить о некоей современной геодинамической системе радиально-кольцевого типа, ось пространственной симметрии которой несколько наклонена к северу. Закономерное распределение региональных аномалий коровой плотности в этой системе, должно порождать радиальные и тангенциальные зоны деформаций, разрядка напряжений в которых может проявляться как локализованная внутрикоровая сей-

смичность. Таким образом, представленная 3D плотностная модель литосферы, вероятно, отражается в современной геодинамической специфике ВКМ.

Вопрос о механизме формирования выявленной радиально-кольцевой структуры следует рассматривать с позиции тектоники плюмов [92 и др.]. Изучение процессов плюмовой динамики показывает, что для плюмов при достижении основания литосферы наиболее вероятна грибообразная форма, причём диаметр плюмов, зарождающихся в верхней мантии (на глубине 660-км границы), при достижении литосферы равен ~250 км, а итоговый диаметр уплощённой головы плюма может достигать ~500 км [93–95 и др.]. В аспекте нашего исследования особый интерес представляют модели, имитирующие концентрическую зональность строения головы плюма. Численное термомеханическое моделирование [96, 97] показывает, что вследствие изгибания литосферной плиты, реологического разделения земной коры и мантии, нестабильных условий растяжения-сжатия, литосферная плита и рельеф поверхности в надплюмовой области подвергаются закономерной складчатости. При этом в коре формируется система волнообразных форм различного масштаба (рис. 9) с осесимметричной деформацией. Возможно, что именно опосредованное отражение такого процесса, отвечающего последнему этапу плюмовой активности [98, 99], присутствует в региональной плотностной модели литосферы ВКМ.

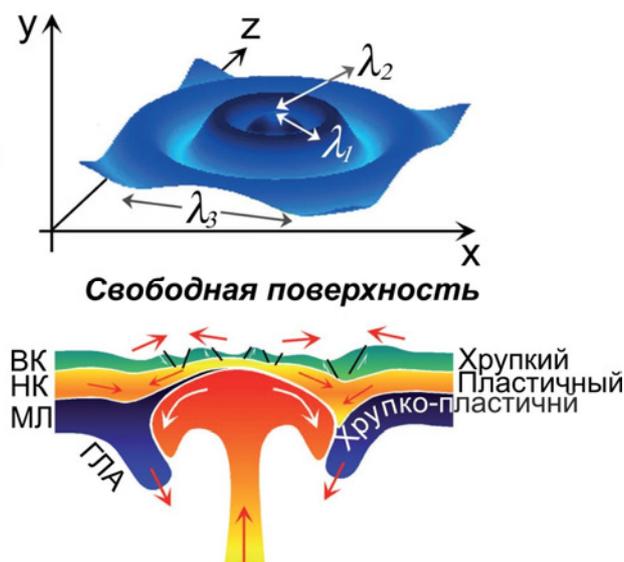


Рис. 9. Численный эксперимент с трёхслойной реологически стратифицированной латерально-гомогенной континентальной литосферой (по [92]): осесимметричная зональность распределения напряжений в надплюмовой области в отсутствие латерального сжатия. Вверху – 3D топография земной поверхности над мантийным плюмом: параметры λ_1 – λ_3 ($\lambda_1 \sim 30$ – 50 , $\lambda_2 \sim 100$ – 150 , $\lambda_3 \sim 250$ – 350 км) контролируются относительной толщиной жёсткой верхней коры (ВК), пластичной нижней коры (НК) и жёстко-пластичной мантийной литосферы (МЛ); ГЛА – граница литосферы и астеносферы; стрелки указывают на перемещение материала на земной поверхности и на глубине.

6. Заключение

Анализ результатов комплексного геофизического моделирования и геологической интерпретации картин сейсмических отражений позволяет сделать следующие выводы.

1. Геофизические модели, представленные в рамках МОГТ и ГСЗ-гравиметрия-геотермия дают принципиально различную и лишь частично совпадающую информацию о строении коры: глубине размещения коромантийной границы и раздела Мохо и об особенностях распределения плотности пород в верхней коре.

2. Степень различий пород по плотности в более глубоких слоях коры резко снижается параллельно с закономерным ростом средней плотности с глубиной. На общем региональном фоне в плотностных аномалиях нижней коры резко выделяются глубокие впадины региона: ДДВ со значениями плотности до 3000 кг/м³ и Прикаспийская впадина со значением плотности до 2900 кг/м³.

3. Субгоризонтальная плотностная расслоенность континентальной коры накладывается на ранее сформированную геологическую структуру, плотностная дифференциация пород с глубиной уменьшается; особенности плотностной расслоенности в преобладающей степени определяются современным и относительно недавним состоянием коры, но могут быть, и нарушены в результате более поздних деформаций.

4. Представления о нижней коре континентов как о «зоне рефлексивити» и как о слое значительно повышенной плотности и скорости, частично подтверждаются сравнением представленных моделей. Однако в участках размещения наклонных пакетов тектонических пластин отчетливо видно, что эти понятия не являются эквивалентными: нижняя кора это наиболее высокоплотный элемент субгоризонтальной плотностной расслоенности, а сейсмический образ «зоны рефлексивити» преимущественно связан с процессами магматического андерплейтинга и интерплейтинга в обстановках рифтогенного растяжения и мантийно-плюмовой активности [26].

5. Объёмная сейсмогеологическая модель расширяет возможности реконструкции истории формирования коры и прогнозирования месторождений полезных ископаемых в сопоставлении с данными детального плотностного моделирования. Модель региональной плотностной расслоенности характеризует современное состояние коры. Изучение вариаций этой расслоенности может служить источником сведений о региональных и локальных изменениях напряженного состояния коры, что важно для понимания природы геодинамических процессов.

6. Эволюция Восточно-Воронежского орогена характеризуется закономерной последовательностью событий мантийно-плюмовой природы:

1) 2,17 млрд лет – возникновение эпиконтинентального Воронцовского прогиба, заполнявшегося терригенными осадками и отложениями пирокластических потоков. С началом прогибания связано размещение в основании коры ультрамафит-мафитовых

магм. Формирование прогиба завершилось около 2,10 млрд лет.

2) 2,09–2,05 млрд лет – мафит-ультрамафитовый и гранитоидный магматизм; высокотемпературный метаморфизм, зафиксированный формированием термальных куполов 2,07 млрд лет назад.

3) Быстрое развитие Липецко-Лосевской зоны, включавшее кратковременный разрыв континентальной литосферы и возникновение океанической структуры, завершившиеся субдукцией, коллизией (возникновением Восточно-Воронежского орогена) и восстановлением единства континентальной области датировано интервалом от ~2,08 до ~2,04 млрд лет. Имеющиеся данные не позволяют объяснить синхронность главных событий в истории Воронцовского пояса и пограничной с ним Липецко-Лосевской зоны, – вероятно, раскрытие океана вдоль западной окраины Воронцовского прогиба было весьма кратковременным и локализованным в пространстве.

7. В результате комплексного геофизического моделирования коры ВКМ установлено:

1) С неотектоническими дислокациями (в частности, с Доно-Медведицкой зоной) связаны зоны чередования знакопеременных плотностных аномалий в верхней и средней коре, которые формируют области аномальных напряжений, способствующих образованию валов в осадочном чехле над зонами пониженной плотности фундамента с возможным размещением в них месторождений углеводородов.

2) Структурный «узор» физических характеристик литосферы региона фиксирует существование современной геодинамической системы радиально-кольцевого типа, предположительно связанной с локальным проявлением эндогенной активности мантийно-плюмового типа, которая может порождать радиальные и тангенциальные зоны деформаций. Разрядка напряжений в этих зонах проявляется как современная локализованная внутрикоровая сейсмичность.

Благодарности

Авторы признательны рецензентам – К. А. Савко и Н. В. Шарову за внимательное прочтение рукописи и замечания, учёт которых позволил значительно уточнить ряд положений статьи.

Исследование выполнено в рамках грантов РФФИ № 15-05-01214 и № 16-05-00975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс в 2г. / М. В. Минц [и др.] // – М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2010. – Т. 1. – 408 с.; Т. 2. – 400 с.
2. Минц, М. В. Объёмная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия / М. В. Минц // Геотектоника. – 2011. – № 4. – С. 3–29.
3. Минц, М. В. Строение и эволюция средне-палеопротерозойского Брянск-Курск-Воронежского внутриконтинентального коллизионного орогена (Восточно-Европейский кратон) / М. В. Минц, В. А. Буш, С. Н. Агеев // Геодинамика и тектонофизика. –

2014. – V. 5, – № 3. – P. 717–742.
4. Глазнев, В. Н. Сейсмо-плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива / В. Н. Глазнев, О. М. Муравина, А. И. Дубянский // Материалы 42-ой сессии Международного семинара «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». – Пермь: ГоИ УрО РАН, ПГНИУ, 2015. – С. 44–46.
 5. Глазнев, В. Н. Плотностное моделирование земной коры центральной части Восточно-Европейской платформы / В. Н. Глазнев, М. В. Минц, О. М. Муравина // Вестник КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. – 2016. – № 1 (29). – С. 53–63.
 6. Муравина, О. М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 1. – С. 108–114.
 7. Christensen, N. I. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view / N. I. Christensen, W. D. Mooney // J. of Geoph. Res.. – 1995. – V. 100 (B6). – P. 9761–9788.
 8. Three-dimensional modelling of the Lapland Granulite Belt and adjacent structures of the Baltic Shield from geophysical data / A. F. Buyanov [et al.] // Geology of the eastern Finnmark – western Kola peninsula region. Geological Survey of Norway, Special Publication / Eds. D. Roberts, N. Nordgulen. – 1995. – V. 7. – P. 167–178.
 9. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / Ред. Н. М. Чернышов. – Воронеж: «Научная книга», 2012. – 330 с
 10. Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga – Kostomuksha – Lovisa geotraverse / F. P. Mitrofanov [et al.] // Int. Geol. Rev., 1998. – V. 40. – N 11. – P. 990–997.
 11. GGT/SVEKA Working Group The GGT/SVEKA Transect: structure and evolution of the continental crust in the Paleoproterozoic Svecofennian orogen in Finland / K. Korsman [et al.] // Int. Geol. Rev., 1999. – V. 41. – P. 287–333.
 12. Lithological interpretation of crustal composition in the Fennoscandian Shield with seismic velocity data / M. Kuusisto [et al.] // Tectonophysics. – 2006. – V. 420. – P. 283–299.
 13. Thybo, H. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere / H. Thybo, I. M. Artemieva // Tectonophysics. – 2013. – V. 609. – P. 605–619.
 14. BABEL Working Group. Evidence for early Proterozoic plate tectonics from seismic reflection profiles in the Baltic Shield // Nature. – 1990. – V. 348. – P. 34–38.
 15. Abramovitz, T. Proterozoic sutures and terranes in the southeastern Baltic Shield interpreted from BABEL deep seismic data / T. Abramovitz, H. Thybo, A. Berthelsen // Tectonophysics. – 1997. – V. 270. – P. 259–277.
 16. How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovičić discontinuity and crust–mantle transition / F. A. Cook [et al.] // Can. J. of Earth Sci.. – 2010. – V. 47. – P. 315–351.
 17. The Lithoprobe trans-continental lithospheric cross sections: imaging the internal structure of the North American continent / P. T. C. Hammer [et al.] // Can. J. of Earth Sci.. – 2010. – V. 47. – P. 821–857.
 18. Finnish reflection experiment FIRE 2001-2005 / Eds. I. T. Kukkonen, R. Lahtinen – Geological Survey of Finland, 2006. – Special paper 43. – 247 p.
 19. East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure / M. V. Mints [et al.] // The Geological Society of America, 2015. – Special Paper 510 – 433 p.
 20. Berzin, R. G. CDP and DSS Data along the Uchta-Kem Profile (the Baltic Shield) / R. G. Berzin, Yu. G. Yurov, N. I. Pavlevkova // Tectonophysics. – 2002. – V. 355. – P. 187–200.
 21. Lyngsie, S. B. Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intracratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine / S. B. Lyngsie, H. Thybo, R. Lang, // J. of Geoph. Res.. – 2007. – V. 112, B12402. – 27 p.
 22. Evidence for preservation of crustal root beneath the Proterozoic Lapland-Kola orogen (northern Fennoscandian shield) derived from P and S wave velocity models of POLAR and HUKKA wide-angle reflection and refraction profiles and FIRE4 reflection transect / T. Janik [et al.] // J. of Geoph. Res.. – 2009. – V. 114 – B06308. – 34 p.
 23. Deep seismic reflection profile in Central Europe reveals complex pattern of Paleozoic and Alpine accretion at the East European Craton margin / M. Malinowski [et al.] // Geoph. Res. Let.. – 2013. – V. 40. – P. 3841–3846.
 24. К вопросу о природе внутрикоровых субгоризонтальных сейсмических границ (интерпретация результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины) / М. В. Минц [и др.] // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 296. – № 1. – С. 71–76.
 25. О природе субгоризонтальных сейсмических границ в верхней части земной коры (интерпретация данных бурения Кольской сверхглубокой скважины) / М. В. Минц [и др.] // Геотектоника. – 1987. – № 5. – С. 62–72.
 26. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust–mantle boundary / V. N. Glaznev [et al.] // Geodynamics & Tectonophysics. – 2015. – V. 6 – № 2. – P. 133–170.
 27. Carbonell, R. The Mohorovičić discontinuity beneath the continental crust: An overview of seismic constraints / R. Carbonell, A. Levander, R. Kind // Tectonophysics. – 2013. – V. 609. – P. 353–376.
 28. 100 years of seismic research on the Moho / C. Prodehl [et al.] // Tectonophysics. – 2013. – V. 609. – P. 9–44.
 29. Multi-genetic origin of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and Moho / W. D. Mooney [et al.] // Continental Lower Crust. – Elsevier, Amsterdam, 1992. – P. 45–79.
 30. Минц, М. В. Сейсмические образы коро-мантийной границы как отражение геодинамики докембрийского корообразования / М. В. Минц // Геофизические исследования. – 2016. – Т. 17. – № 1. – С. 65–82.
 31. Глубинные исследования по профилю DOBRE методом ОГТ / С. Н. Стомба [и др.] // Строение и динамика литосферы Восточной Европы: Результаты исследований по программе EUROPROBE / Отв. ред. Н. И. Павленкова. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2006. – С. 328–332.
 32. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии / А. Ф. Буянов [и др.] // Геофизический журнал. – 1989. – Т. 11. – № 2. – С. 30–39.
 33. Glaznev, V. N. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere / V. N. Glaznev, A. V. Raevsky, G. B. Skopenko // Tectonophysics. – 1996. – V. 258. – P. 15–33.
 34. Глазнев, В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / В. Н. Глазнев // Апатиты, «КаЭМ», 2003. – 252 с.
 35. Муравина, О. М. Принципы решения прямых задач потенциала при моделировании строения литосферы / О. М. Муравина, Г. Г. Лошаков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2015. – № 3. – С. 97–100.
 36. Муравина, О. М. Методология построения комплексных моделей литосферы платформенных областей в условиях неполноты информации / О. М. Муравина, В. Н. Глазнев // Сборник материалов III Школы-конференции «Гординские чтения». – М.: ИФЗ РАН, 2015. – С. 22–26.
 37. Grad, M. The Moho depth map of the European Plate / M. Grad, T. Tiira and ESC Working Group // Geoph. J. Int. – 2009. – V. 176. – P. 279–292.
 38. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / N. K. Pavlis [et al.] // J. Geoph. Res. – 2012. – V. 117. – B4. doi:10.1029/2011JB008916.
 39. The global heat flow database of the International Heat Flow Commission / IHFC-2011. – Режим доступа : <http://www.heat-flow.und.edu/index2.html> (дата обращения 1.11.2017).
 40. Муравина, О. М. Статистический анализ цифровой основы петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2015. – № 2. – С. 94–99.

41. Оценка мощности гравитационного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива / В. Н. Глазнев [и др.] // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология.* – 2014. – № 4. – С. 78–84.
42. *Bogdanova, S. V.* East European Craton. / S. V. Bogdanova, R. Gorbatshev, R. G. Garetsky // *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.* – 2016. – Elsevier. – 18 p. – doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.
43. *Саркисова, Н. П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-37, (38) (Воронеж). Масштаб 1:1000000. – МПР РФ, 2001.
44. Геологическая карта Воронежского кристаллического массива масштаба 1:500000 / Молотков, С. П. [и др.] – Воронеж: Югнедра, 1999.
45. *Щербаков, И. Б.* Петрология Украинского щита. / И. Б. Щербаков – Львов: ЗУКЦ, 2005. – 366 с.
46. Палеоархей восточной части Украинского щита по данным U-Pb метода (3,6-3,2 млрд лет) / Н. П. Щербак [и др.] // *Минералогический журнал.* – 2009. – Т. 31. – № 3. – С. 3–9.
47. Изотопный U-Pb возраст пород Васильковского района Орехово-Павлоградской коллизионной зоны / С. Б. Лобач-Жученко [и др.] // *Региональная геология и металлогения.* – 2010. – № 43. – С. 5–17.
48. Палеоархейские тоналиты в палеопротерозойской Орехово-Павлоградской коллизионной зоне Украинского щита / С. Б. Лобач-Жученко [и др.] // *Доклады РАН.* – 2010. – Том 433. – № 2. – С. 212–218.
49. Возраст гранулитового метаморфизма Оскольско-Приазовского блока Сарматии / К. А. Савко [и др.] // *Изотопные системы и время геологических процессов. Матер. IV Росс. Конф. по изотопной геохронологии.* – СПб.: ИГТД РАН, 2009. – Т. 1. – С. 151–153.
50. *Пилогин, С. М.* Монацит-ксенотимовая термометрия выкометаморфизованных гранулитовых комплексов докембрия / С. М. Пилогин, К. А. Савко, А. Н. Конилов // *Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2009.* – С. 316–317.
51. *Грановский, А. Г.* Сравнительный анализ докембрийских структур южной окраины Восточно-Европейской платформы (территория Ростовской области) / А. Г. Грановский, Г. В. Зеленщиков // *Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Материалы Четырнадцатой международной конференции. Ч.1. – Петрозаводск, Кар. НЦ РАН, 2008.* – С. 156–159.
52. Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь / Под ред. С. Н. Кашубина. – Екатеринбург: ФГУГП «Баженовская геофизическая экспедиция», 2002. – 312 с.
53. Возраст неархейских ультракалиевых риолитов – важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко [и др.] // *Мат. VI Российской конф. по изотопной геохронологии.* – СПб: Springer, 2015. – С. 247–249.
54. *Холина, Н. В.* Высокие температуры кристаллизации неархейских риолитов Курского блока Воронежского кристаллического массива: результаты минеральной термометрии / Н. В. Холина, К. А. Савко, В. М. Холин // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология.* – 2016. – № 3. – С. 53–60.
55. Возраст кислых метавулканитов Александровского и Коробковского участков КМА / Щербак, Н. П. [и др.] // *Доклады НАН Украины.* – 1992. – № 6. – С. 120–123.
56. *Савко, К. А.* Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения / К. А. Савко, Н. С. Базиков, Г. В. Артеменко // *Стратиграфия. Геол. Корреляция.* – 2015. – Т. 23. – № 5. – С. 3–21.
57. *Артеменко, Г. В.* Геохронологическая корреляция гранитоидов Воронежского кристаллического массива и Украинского щита / Г. В. Артеменко // *Минералогический журнал.* – 1997. – Т. 19. – № 2. – С. 79–88.
58. *Артеменко, Г. В.* Уран-свинцовый возраст магматических пород Орловско-Тимской зеленокаменной структуры ВКМ / Г. В. Артеменко, Е. Н. Бартицкий, В. И. Мяснянкин // *Доклады АН Украины.* – 1992. – № 7. – С. 113–117.
59. *Савко, К. А.* Минеральная ассоциация оливин-жидрит-ортопироксен-гранат-магнетит в недосыщенных калием сланцах Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко, И. Ю. Кальмуцкая, // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология.* – 2001. – Вып. 11. – С. 115–121.
60. *Савко, К. А.* Минералогия, фазовые равновесия и условия метаморфизма пород Новоялтинского железорудного месторождения КМА / К. А. Савко, М. В. Поскрякова // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология.* – 2003. – № 2. – С. 113–131.
61. *Зайцев, Ю. С.* Метаморфические комплексы раннего докембрия юго-восточной части Воронежского кристаллического массива / Ю. С. Зайцев, А. В. Иванов, И. П. Лебедев, // *Метаморфические комплексы фундамента Русской плиты.* – Ленинград: Наука, 1978. – С. 115–130.
62. *Гурвич, Е. М.* Петрография и вопросы генезиса нижнепротерозойских отложений Воронежского кристаллического массива и Волгоградского Поволжья. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минер. наук. / Е. М. Гурвич. МИНХ и ГП. – М., 1975. – 244 с.
63. *Савко, К. А.* Петрология и геоспидометрия метаморфических пород востока Воронежского кристаллического массива. / К. А. Савко, В. Ю. Герасимов // Воронеж: Изд. ВГУ, 2002. – 131 с.
64. *Terentiev, R. A.* U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: Tectonic implications on Columbia supercontinent / R. A. Terentiev, V. Yu. Skryabin, M. Santosh // *Precam. Res.* – 2016. – Vol. 273. – P. 165–184.
65. Палеопротерозойские граниты А- и S-типов востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования / К. А. Савко [и др.] // *Петрология.* – 2014. – Том 22. – № 3. – С. 235–264.
66. *Terentiev, R. A.* Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics / R. A. Terentiev, M. Santosh // *Int. Geol. Rev.* – 2016. – V. 58. – № 9. – P. 1108–1126.
67. Метаморфическая зональность восточной части Воронежского кристаллического массива: возраст, условия и геодинамическая обстановка формирования / К. А. Савко [и др.] // *Петрология.* – 2015. – Том 23. – № 6. – С. 607–623.
68. *Терентьев, Р. А.* Геохимия цирконов из метаплагиориолитов и трондьемитов Лосевской структурно-формационной зоны Воронежского кристаллического массива / Р. А. Терентьев, К. А. Савко // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология.* – 2015. – № 2. – С. 53–62.
69. *Terentiev, R. A.* 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 / R. A. Terentiev, K. A. Savko, M. Santosh // *Lithos.* – 2016. – V. 246–247. – P. 61–80.
70. *Терентьев, Р. А.* Раннепротерозойские толщи и магматические комплексы Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива: геологическая позиция, вещественный состав, геохимия, палеогеодинамика / Р. А. Терентьев // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* – 2014. – Т. 22. – № 2. – С. 7–31.
71. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // *Геотектоника.* – 2007. – № 1. – С. 43–70.
72. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракрупных пород и гранитоидов / Е. В. Бибикина [и др.] // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* – 2009. – Т. 17. – № 6. – С. 3–16.
73. Петротип палеопротерозойского тоналит-трондьемит-гранодиоритового Усманского комплекса Лосевской структурно-формационной зоны (Воронежский кристаллический массив) / Р. А. Терентьев // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Гео-*

- логия. – 2015. – № 4. – С. 42–60.
74. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: Age, magma source and tectonic implications / R. A. Terentiev [et al.] // Precam. Res.. – 2016. – V. 287. – P. 48–72.
75. Терентьев, Р. А. Геохимия и условия кристаллизации пород габбродиорит–анортозитового и монцогранитного интрузивов Лосевской структурно-формационной зоны (Воронежский кристаллический массив) / Р. А. Терентьев, К. А. Савко, Н. С. Базиков // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология. – 2014. – № 4. – С. 37–52.
76. Возраст пород ранней фазы Ольховского габбронорит-кварцмонцит-гранитного кольцевого комплекса Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов [и др.] // Доклады РАН. – 1998. – Т. 359. – № 5. – С. 680–682.
77. Терентьев, Р. А. Геохимия, минералогия и петрогенезис известково-щелочных пород Ольховского кольцевого массива Восточно-Сарматского орогена, Центральная Россия / Р. А. Терентьев, К. А. Савко // Труды НИИ геологии ВГУ. – Воронеж, 2015. – Вып. 89. – 104 с.
78. 20 лет сейсмологическим наблюдениям на территории Воронежского кристаллического массива. / А. А. Маловичко [и др.] / XX Всероссийская конференция «Глубинное строение, минерогения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов». – Воронеж: Научная книга, 2016. – С. 13–17.
79. Муравина, О. М. Петроплотностная модель кристаллического фундамента Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 41-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского, Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 2014. – С. 171–173.
80. Муравина, О. М. Петроплотностная карта Воронежского кристаллического массива / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского. – М.: ИФЗ, 2016. – С. 133–136.
81. Surface density characteristics of the Baltic Shield and adjacent territories /Galitchanina, L.D. [et al.] // Norges Geologiske Undersøkelse. Special Publication «Geology of the Eastern Finnmark - Western Kola Peninsula Region». Proceedings of the 1st. International Barents Symposium «Geology and Minerals in the Barents Region», Eds. D.Roberts, Ø.Nordgulen. – 1995. – С. 349–354.
82. Геология архея Балтийского щита / Н. Е. Козлов [и др.] – СПб.: Наука, 2006. – 329 с.
83. Муравина, О. М. Петрофизическая характеристика осадочного чехла Воронежской антеклизы / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин В. Н. Глазнев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология. – 2013. – № 1. – С. 189–196.
84. Геодинамическая модель формирования Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов [и др.] // Геотектоника. – 1997. – № 3. – С. 21–31.
85. Металлогения рядов геодинамических обстановок раннего докембрия / Рундквист, Д. В. [и др.]. – М: МПР РФ, РАН, Геокарт, 1999. – 399 с.
86. Терентьев, Р. А. Природа ксенолитов из Новомеловатской интрузии Воронежского кристаллического массива / Р. А. Терентьев // Геохимия. – 2015. – № 12. – С. 1069–1093.
87. Ранний докембрий северо-востока Балтийского щита: Палеогеодинамика, строение и эволюция континентальной коры / Минц М. В. [и др.] // Труды ГИН РАН. – Вып.503. – М.: Научный мир, 1996. – 287 с.
88. Воронова, Т. А. Детальное плотностное моделирование верхней части Воронежского кристаллического массива / Т. А. Воронова, О. М. Муравина, // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология. – 2014. – № 2. – С. 150–154.
89. Оценка мощности гравиактивного слоя земной коры воронежского кристаллического массива / В. Н. Глазнев [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. : Геология. – 2014. – № 4. – С.78–84.
90. Копп, М. Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы / М. Л. Копп – Труды ГИН РАН. – Вып. 552. – М.: Наука, 2004. – 340 с.
91. Оценка напряженного состояния земной коры северо-востока Балтийского щита на основе её плотностной модели / В. Н. Глазнев [и др.] // Физика Земли. – 1988. – № 10. – С. 62–67.
92. Condie, K. C. Mantle Plumes and Their Record in Earth History / K. C. Condie // Cambridge University Press, 2001. – 306 p.
93. Ernst, R. E. Recognizing mantle plumes in the geological record / R. E. Ernst, K. L. Buchan // Ann. Rev. Earth Plan. Sci.. – 2003. – V. 31. – P. 469–523.
94. Farnetani C. G. Beyond the thermal plume paradigm / C. G. Farnetani, H. Samuel // Geophys. Res. – 2005. – V. 32. – L07311. – doi:10.1029/2005GL022360.
95. Бобров, А. М. Структура мантийных течений и поля напряжений в двумерной модели конвекции с неньютоновской реологией / А. М. Бобров, А. А. Баранов // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 7. – С. 1015–1027.
96. Burov, E. The plume head – continental lithosphere interaction using a tectonically realistic formulation for the lithosphere / E. Burov, L. Guillou-Frotier // Geoph. J. Int.. – 2005. – V. 161. – P. 469–490.
97. Burov, E. Asymmetric three-dimensional topography over mantle plumes / E. Burov, T. Gerya // Nature. – 2014. – Vol. 513. – P. 85–90.
98. Балашов, Ю. А. Эндогенные циклы в проблеме корообразования / Ю. А. Балашов, В. Н. Глазнев // Геохимия. – 2006. – №2. – С. 131–40.
99. Балашов, Ю. А. Циклы щелочного магматизма / Ю. А. Балашов, В. Н. Глазнев // Геохимия. – 2006. – №3. – С. 309–321.

Геологический институт РАН, г. Москва

Минц Михаил Вениаминович, зав. лабораторией, доктор геолого-минералогических наук
Тел.: +7(916) 146-0753; E-mail: michael-mints@yandex.ru

Воронежский государственный университет

Глазнев Виктор Николаевич, зав. кафедрой, доктор физико-математических наук
Тел.: 8(473) 220-8385; E-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Муравина Ольга Михайловна, доцент, доктор технических наук
Тел.: 8(473) 220-8385; E-mail: muravina@geol.vsu.ru

Geological Institute RAS, Moscow

Mints M. V., Head of laboratory, Doctor of Geology and Mineralogy Sciences
Tel.: +7(916) 146-0753; E-mail: michael-mints@yandex.ru

Voronezh State University

Glaznev V. N., Head of the Chair, Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Tel.: 8(473) 220-8385; E-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Muravina O. M., Professor assistant, Doctor of Technical Sciences
Tel.: 8(473) 220-8385; E-mail: muravina@geol.vsu.ru