

**ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ
ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА****О. М. Муравина***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 15 ноября 2015 г.

Аннотация: рассматривается трехмерная плотностная модель Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и его обрамления, созданная на основе предложенной ранее методики построения моделей глубинного строения литосферы в условиях неполноты информации. Достоверность результатов моделирования обеспечивается всесторонним использованием априорной информации (геологических, петрофизических, сейсмических и геотермических данных) на стадии формирования стартовой модели среды. Неполнота информации восполняется применением методов стохастического моделирования. На заключительном этапе выполняется инверсия гравитационного поля на основе модифицированного метода локальных поправок.

Ключевые слова: плотность пород, гравитационное поле, сейсмическая модель, инверсия, объемное моделирование, строение литосферы.

DENSITY MODEL OF THE EARTH'S CRUST OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

ABSTRACT DISCUSSES GRAVITY MODEL OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF (VCM) AND ITS FRAMING, CREATED ON THE BASIS OF THE METHOD OF CONSTRUCTING OF MODELS OF DEEP STRUCTURE OF THE LITHOSPHERE UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION. THE RELIABILITY OF THE SIMULATION RESULTS IS SUPPORTED BY THOROUGH USE OF A PRIOR INFORMATION (GEOLOGICAL, PETROPHYSICAL, SEISMIC AND GEOTHERMAL DATA) AT THE STAGE OF FORMATION OF THE STARTING MODEL OF THE ENVIRONMENT. THE INCOMPLETE INFORMATION IS COMPENSATED BY APPLYING METHODS OF STOCHASTIC SIMULATION. THE FINAL STEP IS THE INVERSION OF THE GRAVITATIONAL FIELD BASED ON THE MODIFIED METHOD OF LOCAL CORRECTIONS.

KEY WORDS DENSITY OF ROCKS, THE GRAVITATIONAL FIELD, SEISMIC MODEL, INVERSION, VOLUMETRIC MODELING, LITHOSPHERE STRUCTURE.

Формирование адекватных моделей строения литосферы крупных территорий на основе инверсии гравитационного поля возможно с применением методики комплексной интерпретации сейсмических, геотермических и петрофизических данных на стадии построения стартовой модели [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Однако на практике при региональных исследованиях приходится сталкиваться с неполнотой априорной информации: неравномерностью покрытия территории, различным объемом фактических данных, противоречивостью интерпретации одних и тех же данных различными исследователями. В этом случае при создании моделей глубинного строения эффективными являются приемы статистического оценивания параметров и стохастического моделирования.

В данной работе приводится методика построения моделей глубинного строения литосферы в условиях неполноты информации, которая была использована при создании комплексных плотностных моделей литосферы центральной части Восточно-Европейской платформы разной степени детальности. В качестве

примера рассмотрена плотностная модель Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и его обрамления. Область исследования имеет крайне сложное строение и включает разновозрастные тектонические структуры (рис. 1).

Плотностная модель литосферы является результатом решения трехмерной обратной задачи гравиметрии в сферических координатах. Инверсия гравитационного поля выполнялась в математической постановке в соответствии с работами [2, 8].

В качестве наблюдаемого гравитационного поля была использована глобальная модель EGM2008 [9], трансформированная для территории исследования на уровне рельефа в точки сетки 5' на 5'. Сравнение полученных таким образом значений поля силы тяжести в редукции Буге с данными наземной гравитационной съемки для фрагмента территории исследований [10] показало их хорошую согласованность. Высокое качество модели EGM2008 подтверждается также данными, приведенными в работе [11]. Непосредственно в процессе инверсии было задействовано

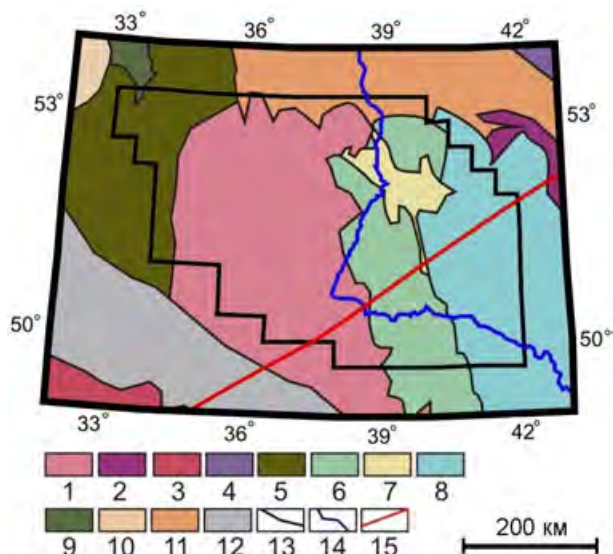


Рис. 1. Основные тектонические элементы области плотностного моделирования литосферы. Раннедокембрийские структуры: 1 – Курская гранит-зеленокаменная область; 2 – кратон Хопер; 3 – фрагмент Украинского щита; 4 – фрагмент Волго-Уральского кратона; палеопротерозойские структуры: 5 – Криворожско-Брянский ороген; 6 – Липецко-Лосевский пояс; 7 – Воронежская депрессия; 8 – Воронцовский пояс; 9 – фрагмент Осницко-Микашевичского пояса; 10 – фрагмент Лапландско-Среднерусско-Южноприбалтийского орогена; 11 – Северо-Воронежский ороген; неопротерозой-фанерозойские структуры: 12 – Днепровско-Донецкая впадина; 13 – границы тектонических элементов; 14 – сейсмический профиль 1ЕВ; 15 – сейсмический профиль Гранит; Рамка в центре обозначает границы петроплотностной карты региона.

остаточное гравитационное поле, полученное после учета гравитационного эффекта осадочных пород. Двумерный массив редуцированного поля был вычислен на рельефе в узлах 3-х минутной сетки. При решении обратной задачи для ВКМ и сопредельных территорий значения остаточных аномалий были проинтерполированы в пятиминутную регулярную сетку.

Стартовая модель строения коры и верхней мантии территории ВКМ и его обрамления была сформирована на основе априорной информации, а при ее недостатке – по результатам стохастического моделирования. В качестве исходных данных были использованы сейсмогеологические материалы, геологические модели строения осадочного чехла и кристаллического фундамента, результаты петрофизических исследований, а также обобщенные данные о потенциальных полях по региону [9, 10].

Для получения максимально достоверных и корректных результатов моделирования последовательно были решены следующие задачи.

На основе сформированной пространственной петрофизической базы данных были разработаны структурные петроплотностные модели: пород осадочного чехла [12, 13, 14, 15], и модель верхней части кристаллического фундамента территории исследования [16, 17].

На основе петроплотностной модели осадочного

чехла был вычислен гравитационный эффект пород осадочного чехла, и показана необходимость его учета при решении обратной задачи гравиметрии [18, 19].

Были рассчитаны автокорреляционные функции локальных аномалий гравитационного поля, что позволило оценить мощность верхнего гравитационного слоя кристаллического фундамента [20, 21]. Значения плотности пород гравитационного слоя были заданы в соответствии с атрибутивной частью разработанной петроплотностной модели кристаллических пород ВКМ и сопредельных территорий [15, 16].

При разработке трехмерных структурных моделей строения региона для оценки положения границы Мохоровичича (Мохо) была использована модель ЕУМОНО2007 [22]. В данной модели глубина залегания раздела Мохо варьирует в пределах некоторого диапазона, задаваемого значениями дисперсии. Исходя из вышесказанного, рассматривались три варианта стартовых моделей, отличающихся положением границы Мохо и, соответственно, вышележащих «базитового» и «диоритового» слоев. Численные эксперименты, выполненные на стадии регионального моделирования (по 15-минутной градусной сетке) показали, что наименьшие значения невязки (разницы между модельным полем и наблюдаемым) получены для модели с максимальной глубиной залегания границы Мохоровичича. С учетом того обстоятельства, что оценки глубин залегания «базитового» и «диоритового» слоев по данным различных исследователей часто существенно расходятся [4, 23, 24, 25, 26], был выполнен контроль положения границ слоев, пересекающий возможность их взаимного пересечения. В схематичном виде структура модели представлена на рис. 2.

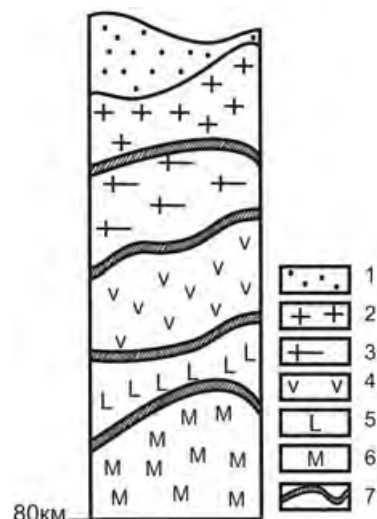


Рис. 2. Схематическая колонка слоев стартовых моделей: 1 – осадочный слой; 2 – гравитационный слой; 3 – «диоритовый» слой; 4 – «базитовый» слой; 5 – переходный слой; 6 – породы верхней мантии; 7 – градиентные слои.

В рамках разработанной структурной модели стартовые значения плотностей в «диоритовом», «базитовом», переходном слоях и верхней мантии рассчитывались на основе аппроксимационных соотношений,

связывающих плотность и сейсмическую скорость упругих волн с учетом температуры и литостатического давления [2]. Для оценки температуры в среде была рассчитана стохастическая термическая модель региона по методике, предложенной в работе [12].

В итоге была сформирована плотностная модель среды, задающая 2D массивы плотности в узлах регулярной сферической сетки на подошве и кровле каждого из слоев модели среды. Отличие значений плотности на кровле и подошве каждого из слоев, исключая гравиактивный, обусловлены различными РТ-условиями среды, что проявляется на стадии стохастического перехода от скорости к плотности.

На следующем этапе была выполнена коррекция стартовой модели, в процессе которой были сформированы маломощные градиентные слои на границах структурных этажей (рис. 2). Целью этих преобразований было устранение неоднозначности, когда точки на подошве одного и кровле другого слоя имеют одинаковые координаты. Мощность градиентных зон определялась в процессе численного моделирования и для решаемой задачи принималась равной 1 км. Двумерные массивы абсолютных значений плотности, заданные на кровлях и подошвах слоев, преобразованы в 3D модель на регулярной сферической и нерегулярной радиальной сетке. Переход от абсолютных величин плотности $\sigma(\lambda, \varphi, h)$ к их избыточным значениям $\Delta\sigma(\lambda, \varphi, h)$ и, соответственно, к аномальным значениям гравитационного поля, осуществлялся с использованием в качестве нормальной модели плотностной континентальной модели Земли и её гравитационного поля, вычисленного на уровне геоида [27].

С целью снижения степени неоднозначности решения обратной задачи, были заданы пределы допустимого изменения плотности итоговой плотностной модели. Ограничения на значения плотности были сформированы в виде трехмерных массивов минимального и максимального значения абсолютной плотности в каждой точке пространственной сетки модели.

Алгоритм инверсии гравитационного поля, основанный на принципах нормального решения и использующий идею метода локальных поправок [2, 4, 8, 28, 29], предусматривает перераспределение невязки в каждой точке в нижние слои модели в соответствии с весовой функцией. Весовая функция была сформирована как 3D массив значений энтропии условной плотности вероятности в точках модели. Энтропия вычислялась на этапе формирования стартовой модели при пересчете скоростной модели в плотностную.

Инверсия аномалий гравитационного поля осуществлялась с помощью программы, реализующей решение обратной задачи в сферической постановке [2, 4]. Были рассчитаны различные по степени детальности варианты. Для территории ВКМ решение обратной задачи выполнялось по регулярной $5'$ сети (~ 10 км в плане).

В процессе численных экспериментов были определены следующие оптимальные значения параметров работы программы: максимально допустимая толщина аппроксимирующего элемента (сферической пластины) [30, 31], геометрические параметры эквивалентного слоя [32], радиус интервала сглаживания поля в единицах шага сетки в плане и порог локальной дисперсии, количество верхних слоев модели, в которые перераспределяется локальная невязка плотности, полуширина раstra пространственного конуса, в который перераспределяется региональная часть невязки плотности и др. Минимальная точность решения обратной задачи, соответствующая среднеквадратической невязки итераций, принималась равной 5 мГал, а максимальное число итераций в процедуре инверсии не превышало 50.

Рассмотрим результаты плотностного моделирования. На рис. 3 показано распределение стартовой и итоговой невязок наблюдаемого и расчетного полей, которое дает представление о погрешностях стартовой модели и позволяет оценить качество выполненной инверсии поля.

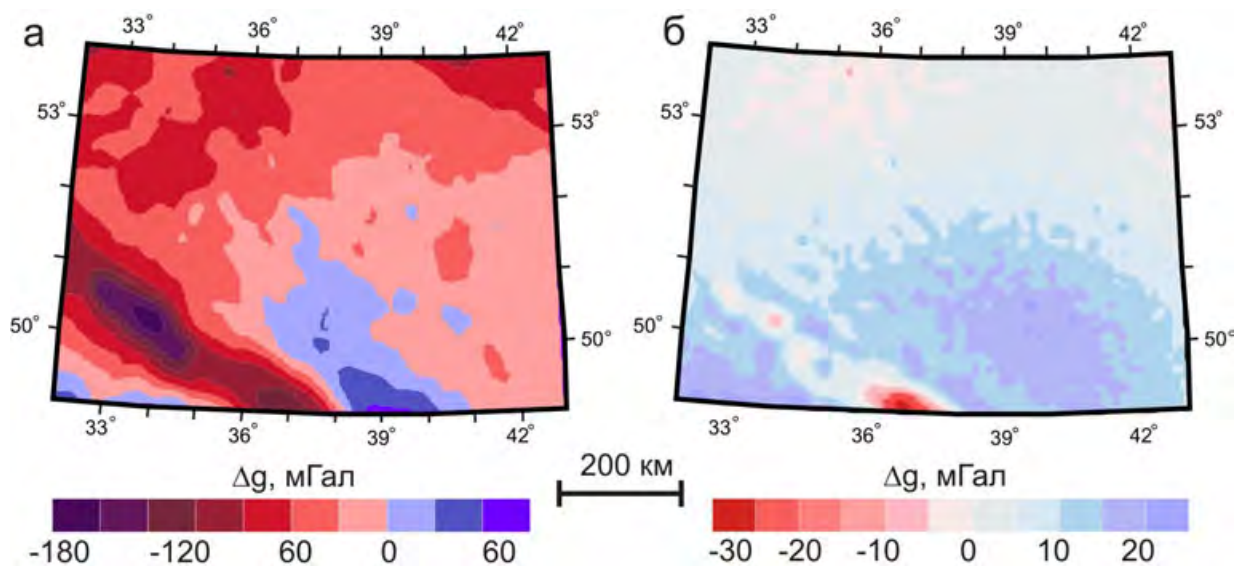


Рис. 3. Стартовая (а) и итоговая (б) невязка гравитационного поля.

Стартовая невязка меняется от (- 208) мГал до (+ 90) мГал, среднее значение невязки равно -56 мГал. Среднеквадратичная невязка итераций для стартовой модели составила ± 53 мГал. Итоговая среднеквадратичная невязка имеет значение $\pm 5,7$ мГал. Среднее значения итоговой невязки составило +1,4 мГал, а пределы ее изменения от -33 мГал до + 25 мГал. Как видно из рис. 3 б, области отрицательных значений итоговой невязки (менее - 5 мГал) приурочены к глубоким частям Днепров-Донецкой впадины. Довольно

большая положительная аномалия невязки находится юго-западной части территории, что необходимо учитывать при анализе плотностной модели.

На рис. 4 продемонстрированы карты распределения плотности в литосфере на кровлях слоев модели для ВКМ. Такое представление результатов моделирования продиктовано особенностями стартовой модели и полученными результатами, когда плотность на кровле и подошве слоя кардинально не изменяется.

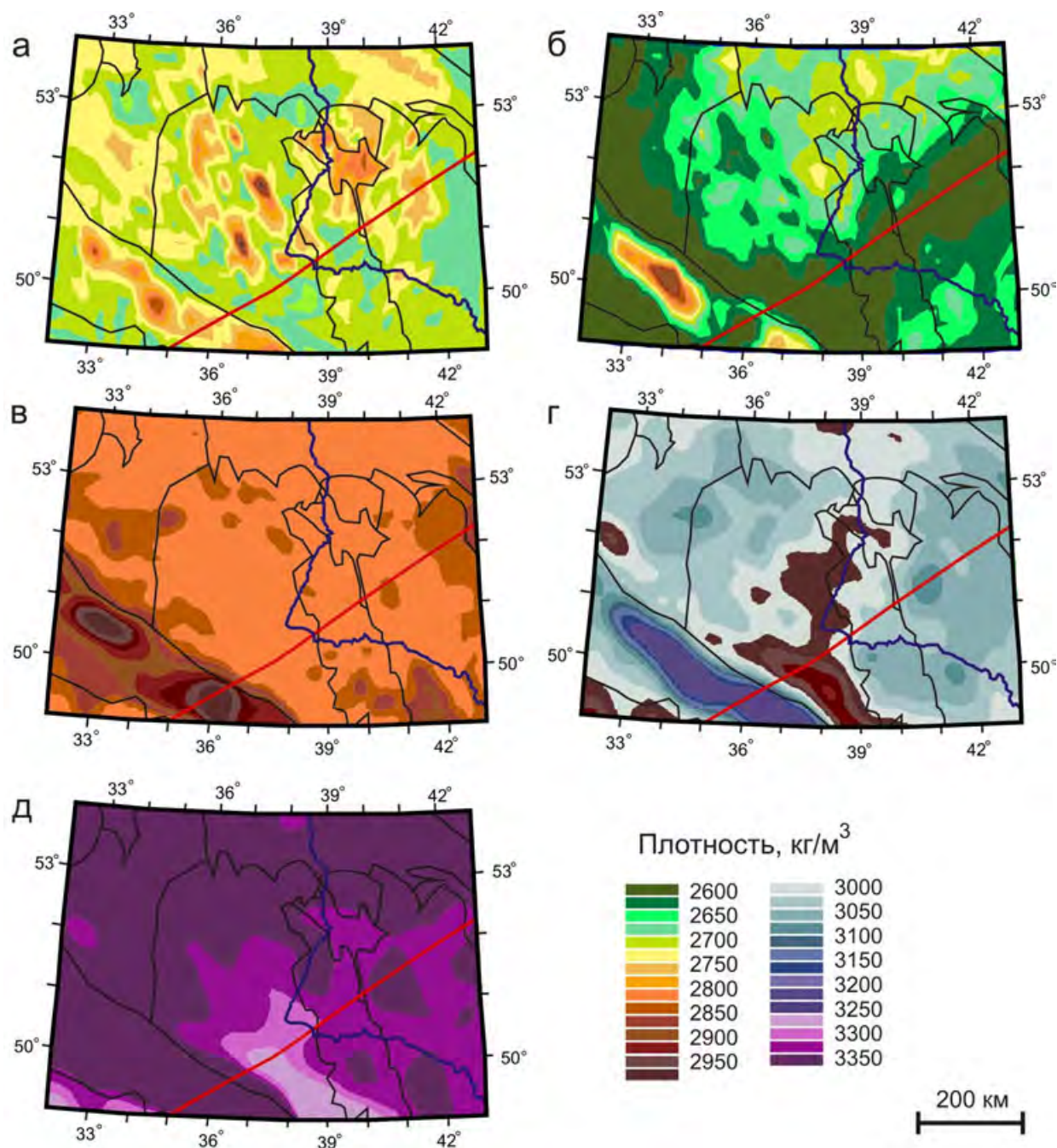


Рис. 4. Распределение плотности в литосфере для территории ВКМ: а – на кровле гравиметрического слоя; б – на кровле «диоритового» слоя; в – на кровле «базитового» слоя; г – на кровле переходного слоя; д – на границе Мохоровичича. Линиями показаны сейсмические профили: 1ЕВ (синим цветом), Гранит (красным цветом) и границы основных тектонических блоков региона (черным цветом) в соответствии с рис. 1.

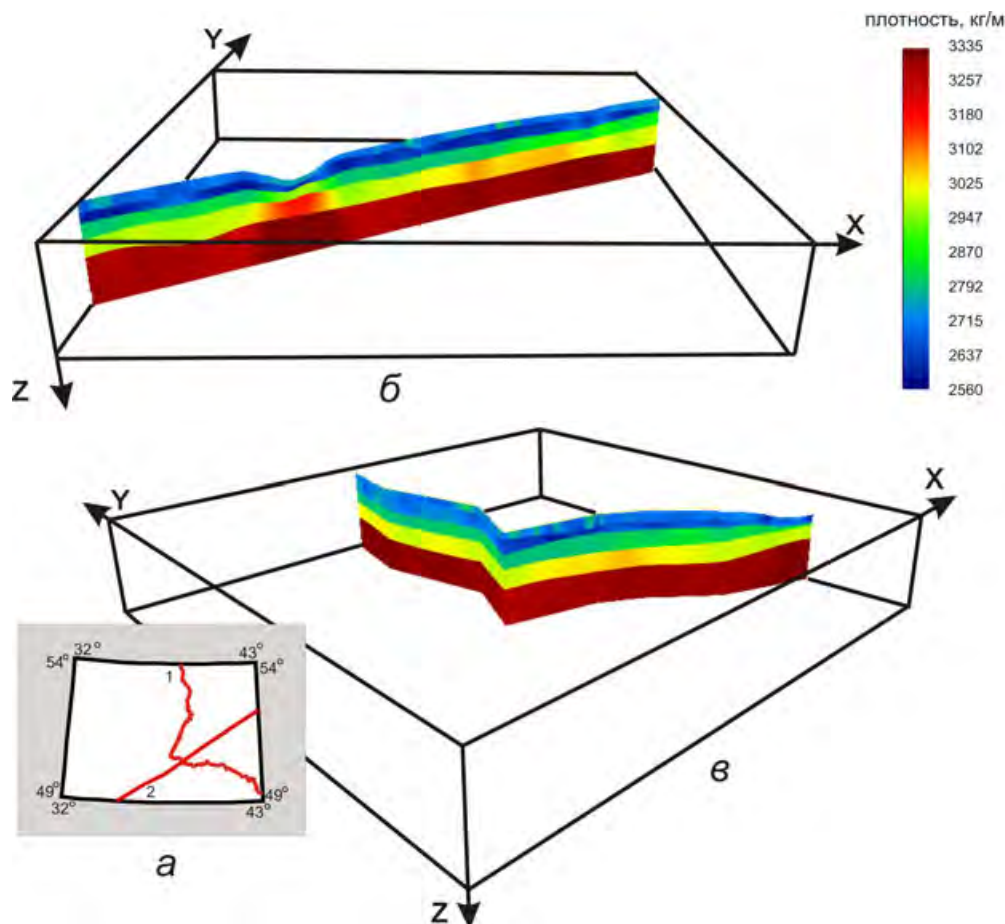


Рис. 5. Геоплотностные разрезы модели по линии сейсмических профилей: а – местоположение сейсмических профилей в пределах территории моделирования: 1 – профиль 1ЕВ; 2 – профиль гранит; б – разрез по профилю Гранит; в – разрез по профилю 1 ЕВ.

Геоплотностные разрезы по линии сейсмических профилей 1ЕВ и Гранит, представленные на рис. 5 (а, б), демонстрируют возможности работы с трехмерной моделью.

Картина распределения плотности в гравитационном слое (рис. 4 а) в целом согласуется с петроплотностной картой, созданной в рамках петрофизической базы данных кристаллических пород ВКМ. Значения плотности варьируют в широких пределах от 2600 кг/м³ до 3000 кг/м³ и выше. В пределах развития Курской гранит-зеленокаменной области средняя плотность пород составляет (2700 ± 25) кг/м³, высокими значениями плотности (свыше 3000 кг/м³) отмечены палеопротерозойские железорудные структуры. Привлекает внимания область повышенных до 2850 кг/м³ значений плотности, границы которой пространственно достаточно четко совпадают с границами Воронежской депрессии. Аномалия пониженных значений плотности находится на юго-восточной окраине Воронцовского пояса. Линейная аномалия повышенных значений плотности (2750 – 2775) кг/м³, фиксируется в пределах Северо-Воронежского орогена. Простираение этой аномалии коррелируется с простираением основных элементов этой тектонической структуры.

«Диоритовый» слой в пределах территории исследова-

ния распространен на глубинах 5–10 км. Для «диоритового» слоя характерны пониженные значения плотности по сравнению с вышележащими и нижележащими слоями. Плотность в «диоритовом» слое меняется в пределах от 2600 кг/м³ до 2750 кг/м³. Области пониженных значений плотности (2600–2650 кг/м³) широкими (100–150 км) полосами обрамляют территорию ВКМ с запада и юга и востока (рис. 3, б).

Предположения о существовании на территории ВКМ зон разуплотнения пород в литосфере на глубинах, соответствующих диоритовому слою, высказывались многими исследователями [10, 33, 34].

Приведенные в этих и других работах оценки гравитационного поля, выполненные с использованием фактических данных о плотности кристаллических пород докембрийского фундамента, дают более высокие значения по сравнению с наблюдаемым полем. Результаты интерпретации сейсмических данных также часто фиксируют наличие слоев с пониженной скоростью на глубинах от 5 до 20 км, что служит подтверждением наличия на рассматриваемых глубинах слоев с пониженной плотностью.

Слой пониженной плотности в восточной части ВКМ был выделен также и по результатам интерпретации данных вдоль профиля 1ЕВ [24, 25, 26].

Для пород «базитового» слоя характерна наимень-

шая степень дифференциации пород по плотности по сравнению не только с гравитационным и «диоритовым» слоями, но и нижележащими переходным слоем и верхней мантией. Значения плотности пород практически не выходят за пределы 2850 – 2900 кг/м³.

В переходном слое диапазон изменения плотности значительно шире – от 2950 кг/м³ до 3100 кг/м³. В принятой градации плотности просматриваются зоны повышенных значений в северо-западной и юго-восточной частях территории. В центральной части отмечается плотностная аномалия пониженных значений 2950 кг/м³ – 3000 кг/м³. Область имеет сложную форму и простирается в юго-восточном направлении. В верхней мантии эта область относительного разуплотнения (3200 кг/м³ – 3250 кг/м³) уменьшается в размерах, имеет изометричную форму и локализуется на юго-западе территории.

Выводы

Полученная объемная модель подтвердила сложное строение литосферы региона, наличие плотностных аномалий не только в верхней и средней коре, но и на больших глубинах – в нижней коре и верхней мантии. Причем, если в гравитационном слое основные тектонические структуры коррелируются с плотностными аномалиями, то в более глубоких слоях такая корреляция практически отсутствует.

Таким образом, в результате выполнения процедуры комплексного моделирования получена непротиворечивая плотностная модель строения литосферы Воронежского кристаллического массива и окружающих его территорий до глубины 80 км. Модель соответствует реальному гравитационному полю и в максимальном объеме аккумулирует известные геологические, сейсмические, геотермические и петрофизические данные, относящиеся к региону исследования. Современные геоинформационные технологии и разработанные программные пакеты открывают большие возможности работы с полученными данными, позволяя при этом корректировать их по мере появления новой геофизической и геологической информации. При детальном моделировании отдельных блоков региона полученная модель незаменима для оценки влияния регионального фона, что существенно повышает достоверность получаемых результатов.

Автор выражает глубокую благодарность д.ф.-м.н., зав. кафедрой геофизики В. Н. Глазневу за полезные консультации в процессе исследования и рецензенту данной работы д.ф.-м.н., профессору В. О. Михайлову за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению рукописи работы.

Исследования выполнены в рамках грантов РФФИ № 15-05-01214 и № 16-05-00975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буянов, А. Ф. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии / А. Ф. Буянов, В. Н. Глазнев, А. Б. Раевский, Г. Б. Скопенко // Геофизический журнал, 1989. – № 2. – С. 30–39.
2. Глазнев, В. Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии / В. Н. Глазнев. – Апатиты: Ка-эМ. – 2003. – 252 с.
3. Романюк, Т. В. Сейсмоплотностное моделирование коры и верхней части мантии вдоль геотраверса Кварц / Т. В. Романюк // Физика Земли, 1995. – № 9. – С.11–23.
4. GLAZNEV, V. N. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and the crust–mantle boundary / V. N. Glaznev, M. V. Mints, O. M. Muravina, A. B. Raevsky, L. G. Osipenko // Geodynamics & Tectonophysics. – 2015. – V. 6. – P.133–170.
5. KOZLOVSKAYA, B.-D density model of the crust of southern and central Finland obtained from joint interpretation of the SVEKALAPKO crustal P-wave velocity models and gravity data / E. Kozlovskaya E., S. Elo, S.-E. Hjelt, J. Yliniemi, M. Pirttijärvi, SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group // Geoph. J. Int. – 2004. – V. 158. – P.827–848.
6. TIBERI, C. Deep structure of the Baikal rift zone revealed by joint inversion of gravity and seismological data / C. Tiberi, M. Diament, J. Déverchère, C. Petit-Mariani, V. Mikhailov, S. Tikhotsky, U. Achauer // J. Geoph. Res. – 2003. – V. 108 (B3). – P.1–15.
7. TIKHOTSKY, S. Inversion of controlled-source seismic tomography and gravity data with the self-adaptive wavelet parametrization of velocities and interfaces / S. Tikhotsky, U. Achauer // Geoph. J. Int. – 2008. – V. 172. – P. 619–630.
8. Кобрунов, А. И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных / А. И. Кобрунов. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз. – 2008. – 286 с.
9. PAVLIS, N. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) / N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Factor // J. Geoph. Res., 2012. – V. 117. – Вып. 4. – doi:10.1029/2011JB008916.
10. Антонов, Ю. В. Региональное поле силы тяжести Воронежского кристаллического массива и современная динамика земной коры / Ю. В. Антонов, В. И. Жаворонкин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 1997. – № 3. – С. 139–144.
11. Конешев, В. Н. Сравнение глобальных моделей аномалий гравитационного поля Земли с аэрогравиметрическими измерениями при трансконтинентальном перелете / В. Н. Конешев, В. Б. Непоклонов, В. Н. Соловьев // Гироскопия и навигация, 2014. – № 2. – С. 86–94.
12. Глазнев, В. Н. Стохастическая оценка температурного профиля литосферы Воронежского кристаллического массива: мат-лы 39-ой сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» / В. Н. Глазнев. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – М. – 2012. – С. 68–71.
13. Муравина, О. М. Идентификационный анализ петрофизических характеристик пород осадочного чехла Воронежской антеклизы / О. М. Муравина // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. – 2013. – Т. 22. – С. 20–25.
14. Муравина, О. М. Структурно-параметрические модели петрофизических параметров осадочного чехла Воронежской антеклизы / О. М. Муравина, В. Н. Глазнев // Изв. СО РАЕН. – Иркутск: Изд. ИГТУ. – 2014. – № 1 (44). – С.81–87.
15. 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.
16. Муравина, О. М. Макет петроплотностной карты Воронежского кристаллического массива (данные и анализ): мат-лы 42-ой сессии международного семинара им.

- Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин. – Пермь: ИГФ УрО РАН. – 2015. – С. 150–152.
17. *Муравина, О. М.* Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива: мат-лы XV Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» / О. М. Муравина, В. И. Жаворонкин, В. Н. Глазнев. – М.: ИФЗ РАН. – 2014. – С. 170–173.
18. *Глазнев, В. Н.* Петроплотностная модель и гравитационный эффект осадочного чехла Воронежского кристаллического массива и его обрамления: мат-лы 40-ой сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» / В. Н. Глазнев, В. И. Жаворонкин, М. В. Минц, О. М. Муравина, Н. Е. Хованский. – М.: ИФЗ РАН. – 2013. – С. 107–112.
19. *Глазнев, В. Н.* Учет гравитационного эффекта осадочного чехла Воронежского кристаллического массива обрамления: мат-лы 2-ой школы-семинара «Гординские чтения» / В. Н. Глазнев, В. И. Жаворонкин, О. М. Муравина. – М.: ИФЗ РАН. – 2012. – С. 43.
20. *Глазнев, В. Н.* Оценка мощности гравиактивного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива / В. Н. Глазнев, О. М. Муравина, Т. А. Воронова, В. М. Холлин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – Сер.: Геология. – 2014. – № 4. – С. 78–84.
21. *Глазнев, В. Н.* Мощность гравиактивного слоя верхней части земной коры Воронежского кристаллического массива по результатам стохастического анализа гравитационного поля: мат-лы 42-ой сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» / В. Н. Глазнев, О. М. Муравина, Т. А. Воронова, Е. Б. Кислова. – Пермь: ИГФ УрО РАН. – 2015. – С. 46–48.
22. *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.
23. Литосфера Воронежского кристаллического массива по геофизическим и петрофизическим данным / Под ред. Н. М. Чернышова. – Воронеж: «Научная книга». – 2012. – 330 с.
24. *Минц, М. В.* Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия / М. В. Минц // *Геотекто-*
- ника*, 2011. – № 4. – С. 3–29.
25. *Минц, М. В.* Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. Т. 2. / М. В. Минц, А. К. Сулейманов, П. С. Бабаянц [и др.] // Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России». – Вып. 4. – М.: «ГЕОКАРТ», «ГЕОС», 2010. – 400 с.
26. *MINTS, M. V.* East European Craton: Early Precambrian history and 3D models of deep crustal structure / M. V. Mints, K. A. Dokukina., A. N. Konilov, I. B. Philippova [et. all] // *Geol. Soc. of Amer., Special Paper.* – 2015. – V. 510. – 433 p.
27. *Картвелишвили, К. М.* Планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли / К. М. Картвелишвили. – М.: Наука. – 1983. – 93 с.
28. *GLAZNEV, V. N.* A model of the deep structure of the north-eastern part of the Baltic Shield based on joint interpretation of seismic, gravity, magnetic and heat flow data / V. N. Glaznev, A. B. Raevsky, N. V. Sharov // *Tectonophysics*, 1989. – V. 162. – P. 151–164.
29. *GLAZNEV, V. N.* A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere / V. N. Glaznev, A. B. Raevsky, G. B. Skopenko // *Tectonophysics*, 1996. – V. 258. – P. 15–33.
30. *Глазнев, В. Н.* Решения прямой двухмерной задачи магнитометрии с использованием адаптивной аппроксимации тела: мат-лы 39-ой сессии международного семинара им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» / В. Н. Глазнев, Г. Г. Лошаков. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 2012. – С. 80–83.
31. *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.
32. *Алексидзе, М. А.* Приближенные методы решения прямых и обратных задач гравиметрии / М. А. Алексидзе. – М.: Наука. – 1987. – 336 с.
33. *Афанасьев, Н. С.* Строение и состав коры и верхов мантии Воронежского кристаллического массива вдоль профиля ГСЗ Купянск-Липецк / Н. С. Афанасьев, А. П. Тарков // Бюл. МОИП отд. Геол. – 1982. – Т. 57. – Вып. 5. – С. 11–20.
34. *Груздев, В. Н.* Коровые аномалии глубинной электропроводности Воронежского кристаллического массива / В. Н. Груздев, В. И. Жаворонкин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – Сер.: Геология. – 2015. – № 1. – С. 96–101.

Воронежский государственный университет

Муравина О. М., доцент кафедры геофизики, кандидат
геолого-минералогических наук
E-MAIL: MURAVINA@GEOLVSU.RU
Тел. 8(473) 220-83-85

VORONEZH STATE UNIVERSITY

MURAVINA O.M., GEOPHYSICAL DEPARTMENT, CANDIDATE OF THE GEO-
LOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES
E-MAIL: MURAVINA@GEOLVSU.RU
TEL: 8(473) 220-83-85