Научные статьи

УДК 550.382.3 DOI: 10.31431/1816-5524-2021-4-52-6-21

ТРЕХМЕРНАЯ ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ НИГЕР

© 2021 В.Н. Глазнев[1, 2], М.В. Минц[3], И.А. Якуба[1]

[1]Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, 394006; e-mail: glaznev@geol.vsu.ru
[2]Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, 184209
[3]Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017

В работе рассматриваются результаты расчета трехмерной плотностной модели земной коры для территории Республики Нигер в условиях неполноты исходной геолого-геофизической информации. Дано краткое описание геологического строения региона исследований и сформулирована задача исследования. Описана совокупность исходных данных плотностного моделирования, включающая: аномальное гравитационное поле; начальную модель среды; ограничения на искомое решение; весовые функции перераспределения невязок поля. Инверсия аномального гравитационного поля выполнялось в трехмерной постановке для регулярной сетки с шагом 25×25 км в плане и 14 слоев нерегулярной сетки по вертикали. Плотностная модель кристаллической коры, полученная в результате решения обратной задачи, была объединена с априорными данными о плотности слоя верхней мантии и ранее построенной слоистой моделью осадочного чехла региона. Рассмотрены основные особенности плотностной модели земной коры и выполнено сопоставление ее плотностных неоднородностей с региональными геолого-тектоническими данными. Отмечена ведущая роль молодых структур Западно-Африканской рифтовой системы и их связь с плотностными неоднородностями в нижней и средней коре территории Республики Нигер.

Ключевые слова: земная кора, гравитационное поле, трехмерная обратная задача гравиметрии.

ВВЕДЕНИЕ

Создание региональных плотностных моделей земной коры на основе решения обратной задачи гравиметрии требует привлечения всей априорной информации об известных глубинных и приповерхностных неоднородностях изучаемой территории, устанавливаемых по результатам сейсмических исследований, а также сведений о физических свойствах пород коры и их зависимости от термодинамических условий в изучаемой среде. При наличии совокупности таких данных задачу инверсии аномалий гравитационного поля можно рассматривать в комплексной постановке (Буянов и др., 1989; Глазнев, 2003; Муравина, 2016; Glaznev et al., 1996, 2015), которая позволяет получать достоверное решение для распределения плотности в изучаемой среде, как это показано в (Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Mints et al., 2020). Однако для многих районов мира детальные сейсмические материалы отсутствуют, а полнота описания петрофизических свойств ограничивается исследованиями по отдельным геологическим комплексам. В этих условиях, при создании региональных плотностных моделей строения коры, следует использовать глобальные спутниковые данные о геофизических полях (Pavlis et al., 2012) и обобщенные цифровые модели литосферы Земли (Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014), построенные по данным глобальной сейсмотомографии.

Для территории Республики Нигер, слабо обеспеченной детальными сейсмическими наблюдениями, создание трехмерной плотностной модели земной коры должно основываться на наиболее полном учете вклада известных плотностных неоднородностей в наблюдаемое

гравитационное поле. То есть инверсия поля в значения плотности изучаемой среды должна выполняться для региональных коровых гравитационных аномалий, в которых исключено влияние границы Мохо (Глазнев, Якуба, 2020; Yacouba, Glaznev, 2021) и влияние осадочного чехла (Глазнев, Якуба, 2021) всей изучаемой территории и ее обрамления.

В настоящей работе рассматриваются исходные данные, методы и результаты расчета трехмерной плотностной для территории Республики Нигер в условиях неполноты исходной геолого-геофизической информации. Геологической задачей такого плотностного моделирования является создание геолого-геофизической модели земной коры изучаемой территории и обоснование концепции ее эволюции, опирающейся на концептуальные геологические модели и развитые методы геолого-тектонического анализа (Балаганский и др., 1998; Минц и др., 1994, 2017; Mitrofanov et al., 1998).

ГЕОЛОГИЯ РЕГИОНА

Площадь наших исследований охватывает территорию Республики Нигер и прилегающих стран Экваториальной и Северной Африки. В геотектоническом отношении эта территория представляет собой типично континентальную область, являющуюся результатом сложной геодинамической эволюции литосферы, развивавшейся на протяжении более 3.6 млрд лет (Schluter, 2008). Основные этапы этой эволюции, согласно (Begg et al., 2009; Jessell et al., 2016), включают: образование ювенильной архейской коры и стабилизацию кратонов северной Африки (рис. 1);

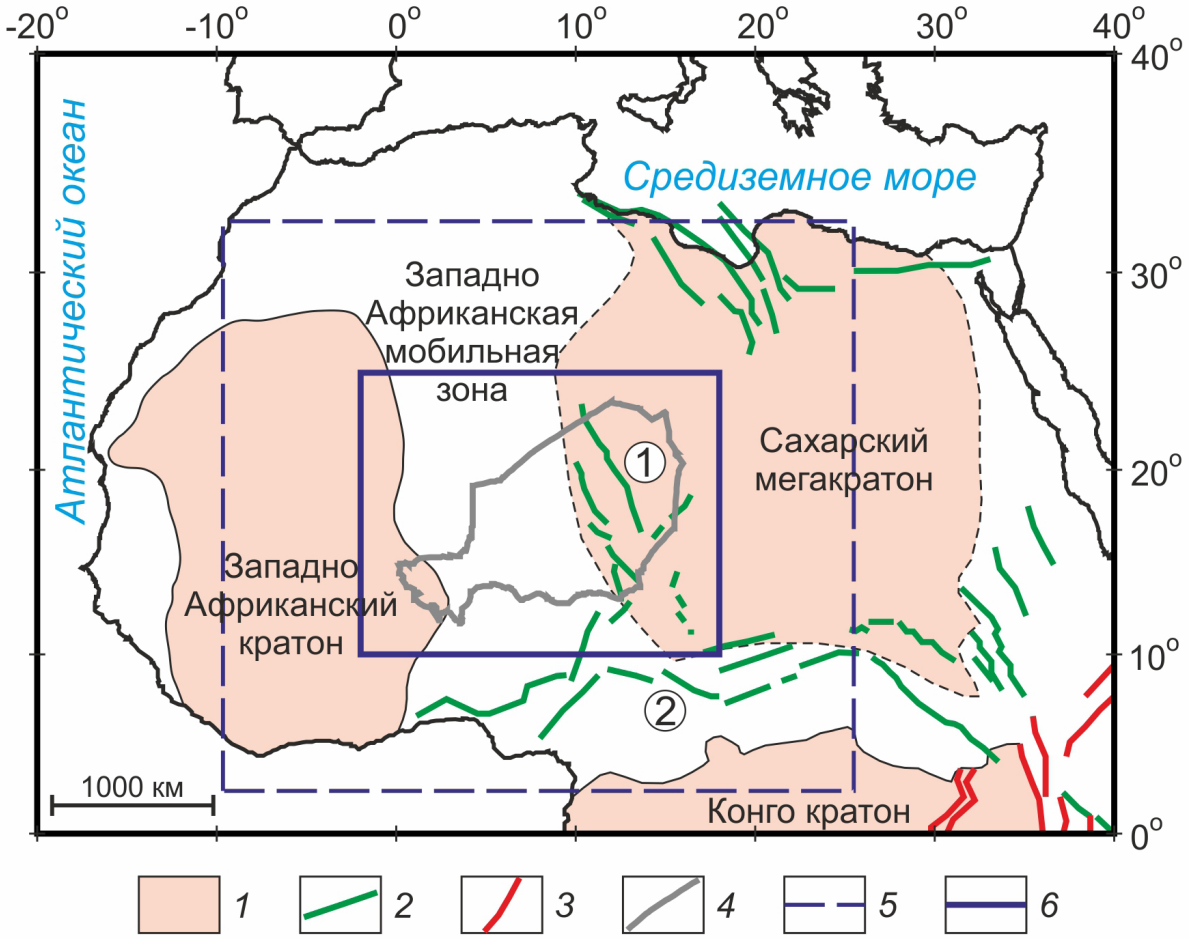


Рис. 1. Тектоническая схема Северной Африки по (Globig et al., 2016; Milesi et al., 2010): *1* — докембрийские кратоны; *2* — мезозойские рифтовые системы (цифрами в кружках обозначены: 1 — Западно-Африканская, 2 — Центрально-Африканская); *3* — кайнозойский Восточно-Африканский рифт; *4* — государственная граница Республики Нигер; *5* — область использованных глобальных цифровых данных (Amante, Eakins, 2009; Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014; Pavlis et al., 2012); *6* — область 3D плотностного моделирования земной коры.

Fig. 1. Tectonic scheme of North Africa (Globig et al., 2016; Milesi et al., 2010): *1* — Precambrian cratons; *2* — Mesozoic rift systems (numbers in circles indicate: 1 — West African, 2 — Central African); *3* — Cenozoic East African Rift; *4* — the state border of the Republic of Niger; *5* — area of global digital data used (Amante, Eakins, 2009; Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014; Pavlis et al., 2012); *6* — the area of 3D crustal density modeling.

переработку коры в протерозойское время и формирование коллизионных складчатых поясов; последующий Панафриканский орогенез (в интервале 450–600 млн лет) и перегруппировку блоков коры. В мезозойский период последовал распад суперконтинента Гондвана, а в кайнозое имел место подъем горячего мантийного материала в области Западно-Африканской мобильной зоны (Liegeois et al., 2005), проявленный на поверхности в виде молодого вулканизма и реактивации тектонических процессов в Западно-Африканской и Центрально-Африканской рифтовых систем.

Региональное геологическое строение рассматриваемой области плотностного моделирования приведено на рис. 2. На западе региона осадочный чехол Мали-Нигерской синеклизы, в котором выделяют северную и южную часть (бассейны Тим Мерсои и Иуллеммеден), сложен морскими и континентально терригенными породами от триасового до палеоцен-эоценового возраста (Genik, 1992). Суммарная мощность осадочного комплекса достигает 3000 м в южной части синеклизы. Осадочные породы Чадской синеклизы сложены стратифицированными образованиями континентальных и морских серий с возрастами от меловых до четвертичных. Наибольшей мощностью чехла характерна для юго-восточной окраины синеклизы, где она достигает 2500 м. Северо-западная ветвь

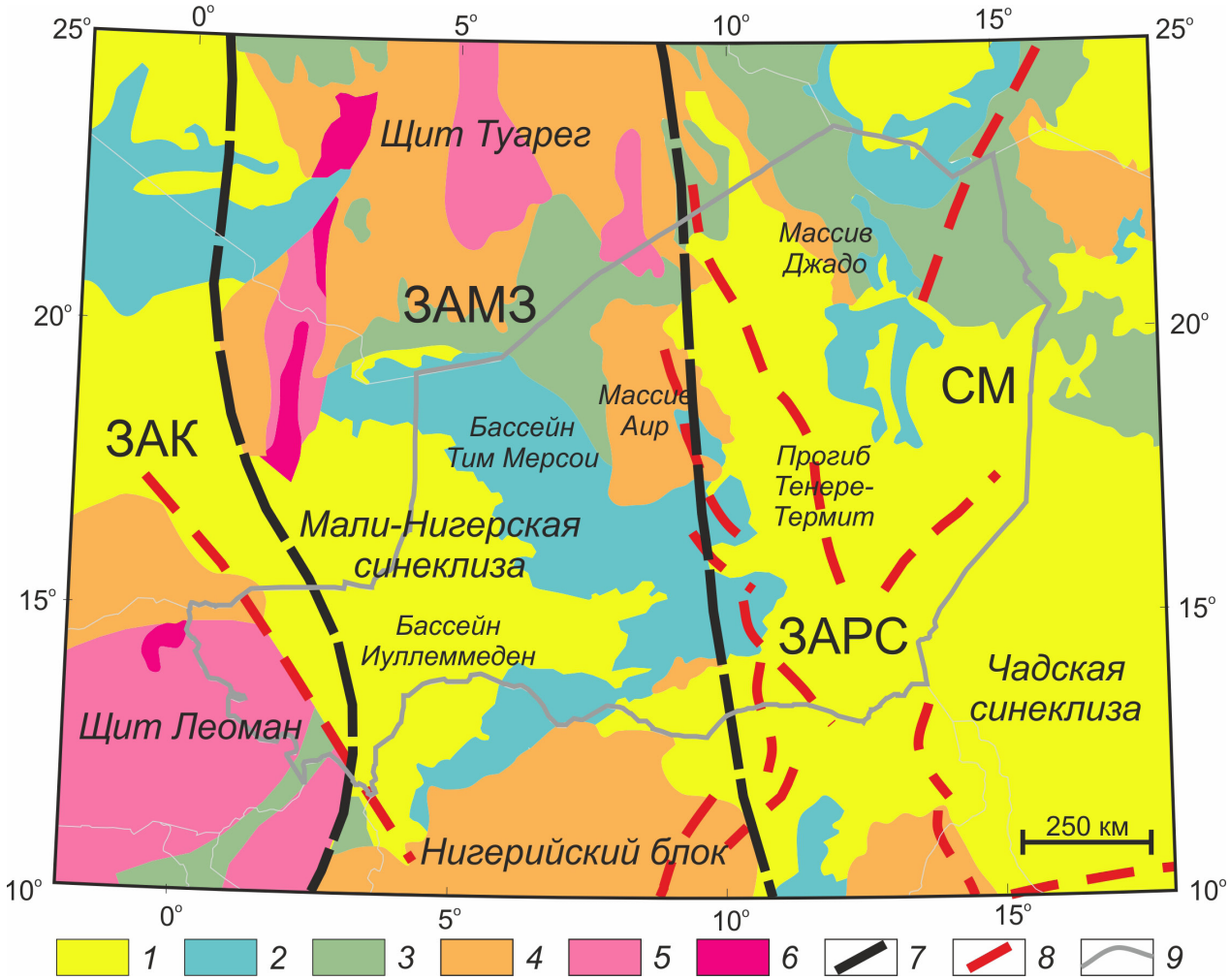


Рис. 2. Геолого-тектоническая схема территории Республики Нигер и прилегающих стран по (Begg et al., 2009; Globig et al., 2016; Jessell et al., 2016; Schluter, 2008): *1* — четвертичный период; *2* — мезозой-кайнозой; *3* — палеозой; *4* — мезо-неопротерозой; *5* — палеопротерозой; *6* — архей; *7* — границы кратонов; *8* — системы разломов; *9* — государственные границы, Аббревиатуры: ЗАК — Западно-Африканский кратон; СМ — Сахарский мегакратон; ЗАМЗ — Западно-Африканская мобильная зона; ЗАРС — Западно-Африканская рифтовая система.

Fig. 2. Geological and tectonic scheme of the territory of the Republic of Niger and adjacent countries (Begg et al., 2009; Globig et al., 2016; Jessell et al., 2016; Schluter, 2008): *1* — Quaternary; *2* — Mesozoic-Cenozoic; *3* — Paleozoic; *4* — Meso-Neoproterozoic; *5* — Paleoproterozoic; *6* — Archaean; *7* — craton boundaries; *8* — fault systems; *9* — state borders, abbreviations: ZAK — West African craton; CM — Saharan megacranon; ZAMZ — West African Mobile Zone; ZARS — West African

Чадской синеклизы (прогиб Тенере-Термит) представлена системой локальных грабенов Центрально-Африканской рифтовой системы (рис. 1), простирающейся в субмеридиональном направлении почти на 1000 км при ширине до 400 км. Осадочные породы грабенов сложены континентальными и морскими отложениями от палеозойского до раннетретичного возраста, с максимальной мощностью до 14 км (Ahmed et al., 2020; Genik, 1992), причем наибольшей мощностью, до 7000 м, характеризуются отложения мезозоя.

Фундамент докембрийского возраста, относящийся к щиту Туарег (Thieblemont, 2016), обнажается в северной и центральной части территории (рис. 2). Щит представляет составной ансамбль архейско-протерозойских террейнов в области Западно-Африканской мобильной зоны, подверженных более поздней тектонической переработке и интенсивному магматизму (Liegeois et al., 2005). Краевые фрагменты щита Туарег слагают массивы Аир и Джадо (рис. 2). Массив Аир включает в себя докембрийское основание, палеозойский комплекс кольцевых интрузий и область кайнозойского вулканизма. Массив Джадо имеет двухъярусное строение (Schluter, 2008) с гранито-гнейсами в основании и нижнепротерозойскими сланцами в верхней части. Нигерийский блок, лежащий в Западно-Африканской мобильной зоне, сложен глубокометаморфизованными породами архея и палеопротерозоя (Schluter, 2008). Мезозойский комплекс блока представлен щелочными породами, близки по составу к комплексу массива Аир, что трактуется как результат длительного функционирования мантийных горячих точек (Liegeois et al., 2005). На юго-западе региона выходят породы северо-восточной окраины щита Леоман. В пределах нашего региона, щит представлен серией вулканогенно-осадочных бассейнов и линейных зеленокаменных поясов палеопротерозойского возраста, разделенных полями архейских гранитоидов (Thieblemont et al., 2016).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве аппарата обратной задачи гравиметрии использовалось классическое решение для определения плотности в бесконечной горизонтальной полосе (Кобрунов, Варфоломеев, 1981; Новоселицкий, 1965), развитое на трехмерный случай в (Раевский, 1984). Известно (Cribb, 1976), что такое решение доставляет минимум нормы плотности в случае, когда решение отыскивается во всем нижнем полупространстве. Эффективное применение предложенного метода трехмерной инверсии поля, основанное на аппроксимационном представлении оператора обратной задачи для горизонтального слоя в спектральной форме, было реализовано в работах (Буянов и др., 1989; Глазнев и др., 2002) и усовершенствовано для более общих входных условий задачи в работах (Глазнев и др., 2002; Glaznev et al., 2015). Получаемое решение является квазинормальным (асимптотически нормальным) и эквивалентным относительно весовой функции перераспределения поправок в слое, определяющей структуру искомой плотности (Глазнев и др., 2002; Кобрунов, 2008).

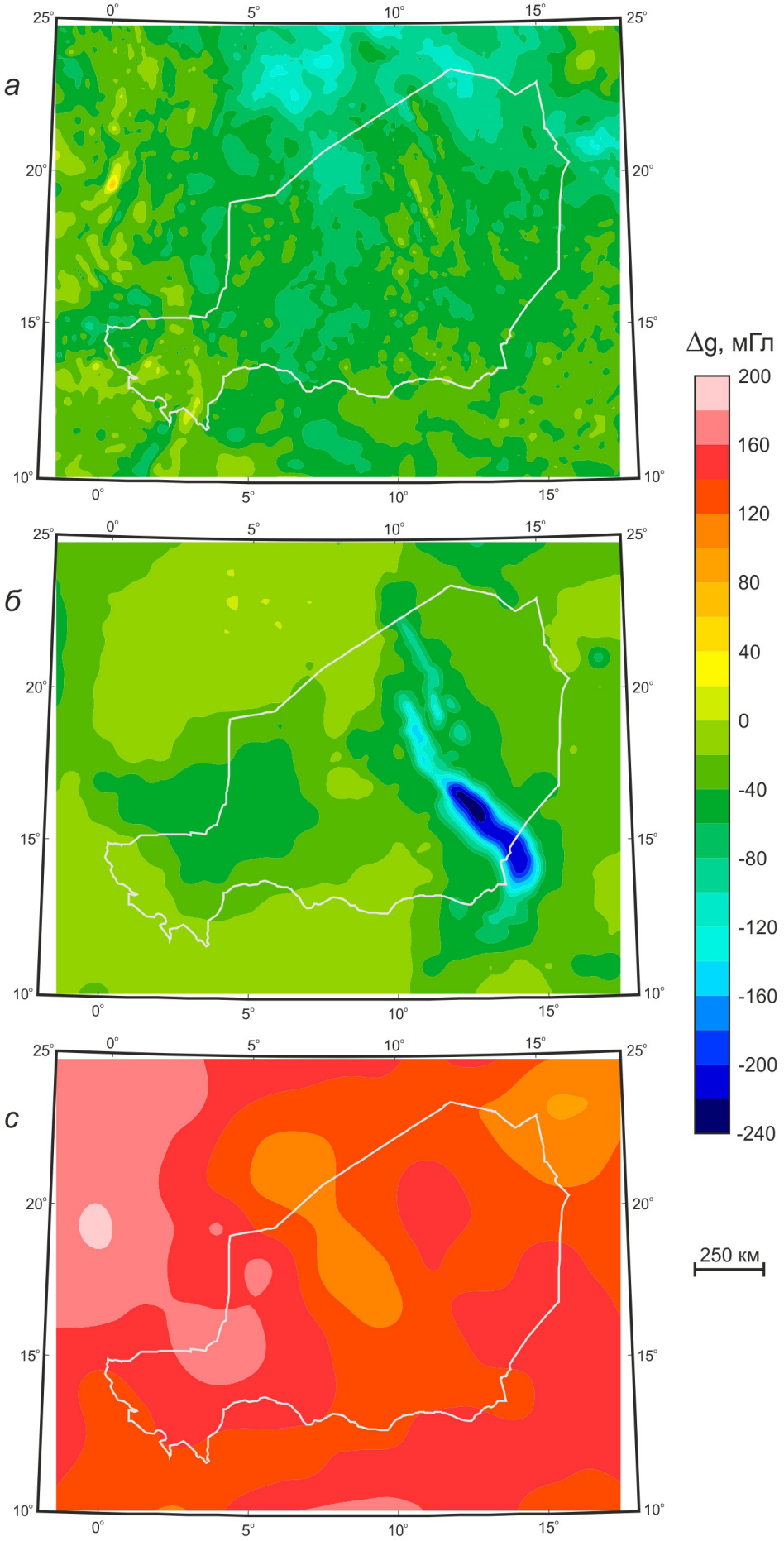
Практическое применение развитого метода трехмерной инверсии требует задания совокупности исходных данных, а именно: аномального гравитационного поля для области моделирования; начальных представлений о модели среды; ограничений на искомое решение для плотности; весовых функций перераспределения невязок поля. Далее рассмотрим указанные исходные позиции плотностного моделирования для изучаемой территории.

Аномальное гравитационное поле. В работах (Глазнев, Якуба, 2020, 2021; Yacouba, Glaznev 2021) рассматривались исходные данные о плотностных моделях, методические особенности расчетов и результаты решения прямых трехмерных задач гравиметрии от границы раздела кора-мантия и слоя осадочных пород чехла для изучаемой территории и ее обрамления (рис. 1). Упрощенные схемы наблюденного и модельных гравитационных полей указанных областей приведены на рис. 3 в единой цветовой шкале. Диапазоны вариаций полей, показанных на этом рисунке, составляют для наблюденного поля: –131÷65 мГал, для поля осадочного чехла: –235÷0 мГал, для поля от слоя пород верхней мантии: 98÷184 мГал. Отметим, что при вычислении гравитационных полей от моделей осадочного чехла и верхней мантии, аномальные плотности брались относительно континентальной плотностной модели Земли (ПМЗ-К) (Картвелишвили, 1983), среднее значение плотности в которой равно 2960 кг/м^3 для однородного слоя до глубины 50 км.

Таким образом, инверсия поля в значения плотности изучаемой среды должна выполняться

Рис. 3. Схемы гравитационных аномалий наблюденного поля (*а*), гравитационный эффект от пород осадочного слоя (*б*) и слоя пород верхней мантии (*в*).

Fig. 3. Schematics of gravity anomalies of the observed (*а*), gravity effect from the rocks of the sedimentary layer (*б*) and the upper mantle layer (*в*).


а
б
с
0°
5°
10°
15°
25°
20°
10°
Δg, мГл
200
160
120
80
40
0
-40
-80
-120
-160
-200
-240
250 км

для региональных «коровых» гравитационных аномалий, в которых исключено гравитационное влияние осадочного чехла и границы Мохо всей изучаемой территории и ее обрамления. Эти «коровые» аномалии, обусловленные плотностными неоднородностями, расположенными в кристаллической коре региона, можно определить как разность наблюденных аномалий поля и вычисленных аномалий от осадочного чехла и слоя пород верхней мантии:

$$\Delta g_{CR} = \Delta g_{OBS} - \Delta g_{SED} - \Delta g_{MOHO}, \quad (1)$$

где Δg_{CR} — аномальное поле кристаллической коры, Δg_{OBS} — наблюденное региональное аномальное поле (рис. 3*а*), Δg_{SED} — аномальное поле осадочного чехла (рис. 3*б*), Δg_{MOHO} — аномальное поле слоя верхнемантийных пород от границы Мохо до глубины 50 км (рис. 3*в*). Отметим, что при вычислении коровых гравитационных аномалий согласно (1) в наблюденное поле Δg_{OBS} вводилась поправка, зависящая от широты точки наблюдений, которая учитывает разность нормального поля модели ПМЗ-К и поля Гельмерта (Картвелишвили, 1983).

Рассчитанная схема гравитационных аномалий Δg_{CR} обусловленных плотностными неоднородностями, расположенными, предположительно, только в кристаллической земной коре региона, приведена на рис. 4. Амплитуда аномалий изменяется от –256 до 45 мГал, что значимо больше, чем диапазон амплитуд наблюденного поля (рис. 3*а*). В морфологическом отношении приведенная схема аномалий частично отражает геологические структуры коры региона (рис. 2). Наиболее яркой особенностью поля Δg_{CR} является субмеридиональная зона положительных аномалий, отвечающая Западно-Африканской рифтовой системе, что косвенно свидетельствует о сложном строении коры в области развития грабенов кристаллического фундамента.

Поскольку задачей наших построений является создание региональной плотностной модели коры, приведенная схема аномалий была преобразована в регулярную сетку с шагом 25×25 км в плане, заданную на реальном рельефе территории (Amante, Eakins, 2009). Сформированный массив аномалий поля, выступающий

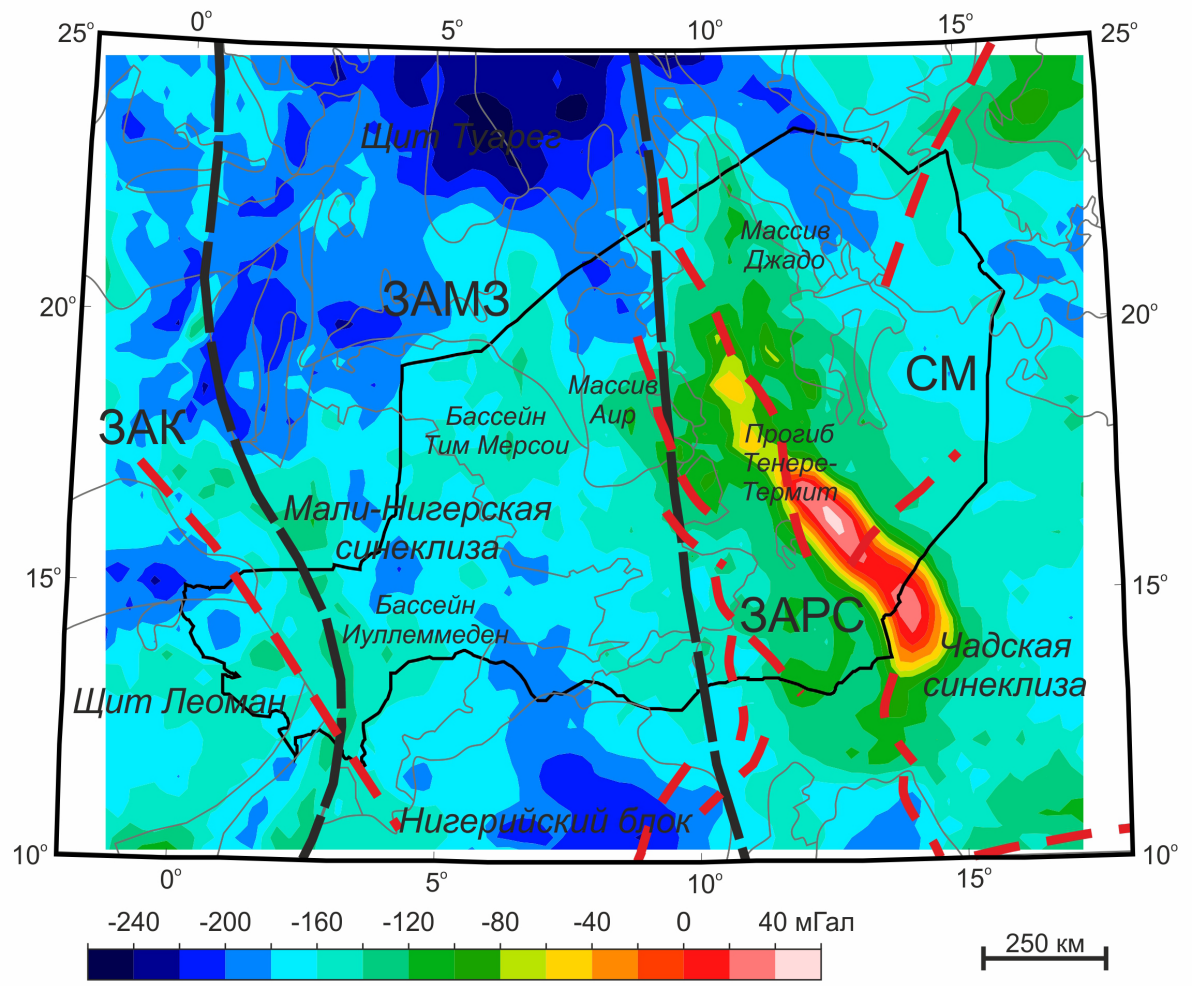


Рис. 4. Схема коровых гравитационных аномалий (геологические границы и тектонические блоки см. на рис. 2).

Fig. 4. Schematic of crustal gravity anomalies (geological boundaries and tectonic blocks see Fig. 2).

в качестве исходных данных при решении трехмерной обратной задачи гравиметрии, обеспечивал необходимую генерализацию среды при построении плотностной модели литосферы изучаемой территории.

Начальные представления о модели среды. Положение слоя переменной мощности с искомым решение для плотности определялось по верхней границе — глубиной залегания кристаллического фундамента (местами совпадающего с поверхностью дневного рельефа), а по нижней границе — глубиной залегания раздела корамантия. Плановая сетка исходной модели среды задавалась с шагом 25×25 км как для внутренней области моделирования по нашим данным (Глазнев, Якуба, 2020, 2021; Yacouba, Glaznev 2021), так и для внешней области использованных глобальных цифровых данных (Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014), показанных на рис. 1. Разбиение модели среды по вертикали обусловлено детальностью данных о глубине залегания фундамента (Глазнев, Якуба, 2021) и данными о положении внутрикоровых границ коры в модели LITHO1 (Pasyanos et al., 2014), а также детальностью описания глубины залегания границы Мохо (Глазнев, Якуба, 2020). Исходя из соображения о большей детальности верхней части разреза коры и меньшей детальности для глубоких горизонтов региональной модели коры, выбрано нерегулярное разбиение сетки по вертикали: 1.5; 1; 0.5; 0; –1; –2; –4; –6; –10; –14; –25; –36; –40; –44 км. Наименее детально по вертикали представлена средняя часть кристаллической коры (два слоя мощностью по 11 км), поскольку в модели LITHO1 для нашего региона она достаточно однородна.

Априорная аномальная плотность в трехмерной модели среды принята равной нулю, то есть исходная модель не содержит каких-либо вариаций от нормального значения абсолютной плотности, равной 2960 кг/м^3. В целом, такая упрощенная форма представления исходных данных о среде, рассмотренная в работе (Глазнев, 2003) как частный случай общей задачи 3D инверсии гравитационного поля, вполне отвечает нашей реальной ситуации с существенной неполнотой геолого-геофизической (сейсмической) информации о строении земной коры региона.

Ограничения на искомое решение для плотности. Ограничения на значения плотностей, получаемых в процедуре итерационного решения обратной задачи гравиметрии, принимались по данным о плотности пород фундамента региона (Кербали, 2000; Якуба, 2019а, 2019б) и общих соображений о величинах плотности пород архейской-протерозойской коры (Глазнев и др., 2020; Galitchanina et al., 1995; Rudnick, Gao, 2014). Принятое минимальное значение плотности пород кристаллической коры составляет 2620 кг/м^3, а максимальное значение — 3120 кг/м^3, что достаточно хорошо соответствуют диапазону плотностей коровых слоев для модели LITHO1 (Pasyanos et al., 2014) в пределах нашего региона исследований. Указанные ограничения на величины аномальной плотности, определяемые относительно ее нормального значения 2960 кг/м^3,были сформированы в виде 3D массива для всех точек описанной выше пространственной сетки исходных данных о среде.

Весовая функция перераспределения невязок. Итерационное перераспределение невязок поля в значения аномальных плотностей среды определяется используемым алгоритмом квазинормального решения обратной задачи гравиметрии (Глазнев, 2003; Кобрунов, 2008; Glaznev et al., 2015) в виде некоторой пространственной весовой функцией. В условиях существенной неполнотой геолого-геофизической информации о строении земной коры региона, основой для выбора значений весовой функции послужили данные о плотности и скорости коровых слоев модели LITHO1 (Pasyanos et al., 2014) для изучаемой территории. В каждой точке плановой сетки входных данных весовая функция принималась зависящей только от глубины слоев кристаллической коры модели LITHO1: для верхнего корового слоя значение весовой функции бралось как 1, а для нижнего слоя плавно изменялось от 1 до 0.2 на уровне границы Мохо, как это показано на рис. 5.

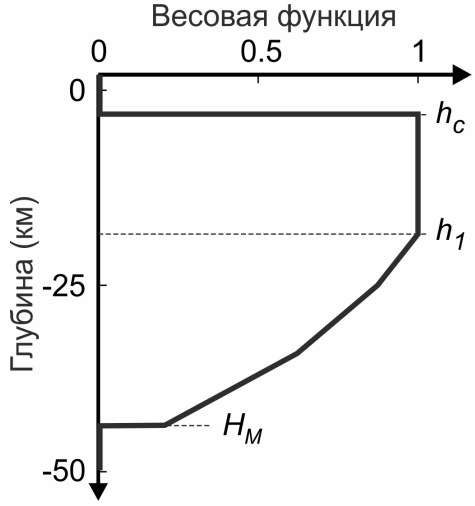


Рис. 5. Схематический график зависимости весовой функции от глубины. Обозначения: h_c — кровля кристаллического фундамента, h_1 — глубина подошвы верхнего слоя кристаллической коры в модели LITHO1 (Pasyanos et al., 2014), H_M — глубина границы Мохо (Глазнев, Якуба, 2020).

Fig. 5. Schematic diagram of the depth dependence of the weight function. Notation: h_c — roof of the crystalline basement, h_1 — depth of the basement of the upper layer of the crystalline crust in the LITHO1 model (Pasyanos et al., 2014), H_M —depth of the Moho boundary (Glaznev, Yakuba, 2020).

Принятый вид весовой функции означает, что решение обратной задачи для плотности отыскивается только в области ограниченной сверху кровлей кристаллического фундамента h_c и снизу — глубиной границы Мохо H_M, причем большая часть невязки перераспределяется в верхнюю часть кристаллической коры до подошвы первого слоя h_1 модели LITHO1. Для нашей области искомого решения (рис. 1), весовая функция была сформирована в виде 3D массива значений, характеризующего неопределенность исходных данных в точках пространственной сетки обратной задачи.

РАСЧЕТ ПЛОТНОСТНОЙ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРЫ

Расчет 3D плотностной модели кристаллической коры по данным региональных коровых аномалий гравитационного поля (рис. 4) выполнялся с использованием разработанной программы, реализующей квазинормальное решение обратной задачи гравиметрии в сферической и декартовой системе координат на реальном рельефе (Глазнев, 2003; Муравина, 2016; Glaznev et al., 2015). В процедуре итерационной инверсии выполнялось разделение невязки поля на «региональную» и «локальную» составляющую, для чего задавался радиус сглаживания поля равный шагу сетки в плане (25 км) и порог «локальной» дисперсии равный 0, что означает выделение в отдельную группу всех локальных аномалий поля в интервале сглаживания. Таким образом, в каждой точке сетки «локальная» часть невязки поля перераспределялась в семь верхних слоев модели с единичной весовой функцией, что обеспечивало коррекцию только верхней части модельной среды в интервале от поверхности рельефа до глубины −6 км. Остальная, «региональная» часть невязки поля, перераспределялась в нижние слои модели среды.

Инверсия аномального гравитационного поля выполнялось в узлах регулярной в плане сетки (с шагом 25×25 км) для области, показанной на рис. 1. Число узлов сетки, отбрасываемое при расчете невязки поля, составляло 10 шагов (250 км), так чтобы минимизировалось влияние краевых искажений в процедуре инверсии. Итоговое решение обратной задачи гравиметрии было получено в результате 25 итераций, как это показано на рис. 6, где величина невязки уменьшилась от 31.65 мГал, соответствующей нулевому приближению поля (рис. 4) для нашей исходной модели плотности, до 3.37 мГал, что является приемлемой точностью при региональном плотностном моделировании земной коры.

Качество полученного решения обратной задачи характеризует схема пространственного распределения итоговой невязки поля, для которой среднее значение невязки составляет 0.13 мГал, а величина невязки варьирует в диапазоне от −5.90 до 5.88 мГал. Причем, экстремальные значения аномалий невязки, представленные одиночными точками, приурочены к краевым частям результативной области моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Плотностная модель кристаллической коры, полученная в результате решения 3D обратной задачи для аномального гравитационного поля (рис. 4), была приведена к абсолютным значениям плотности в среде, опираясь на принятое значение нормальной плотности для региона. По условиям решения рассчитанная плотностная модель кристаллической коры ограничена сверху глубиной залегания фундамента, а снизу — глубиной границы Мохо. Для осадочного чехла и верхней мантии ранее были предложены трехмерные плотностные модели (Глазнев, Якуба, 2020, 2021; Yacouba, Glaznev 2021), которые были включены в общую модель среды. Объединение моделей потребовало интерполяции данных об априорно однородном слое верхней мантии (от границы Мохо до глубины −50 км) и неоднородной слоистой модели осадочного чехла в узлы регулярной плановой сетки с шагом 25×25 км. Для плотностной модели осадочного чехла, выполнялась также линейная интерполяция значений плотности по вертикали в узлы принятой сетки глубин, дополненной слоями на уровне 2.5 и 2 км, что обусловлено наличием осадочных пород на уровне рельефа в ряде точек

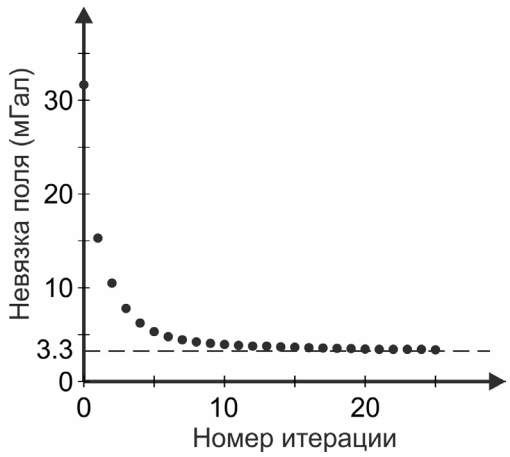


Рис. 6. График изменения невязки поля в ходе итерационного решения обратной задачи гравиметрии. Показано асимптотическое значение невязки равное 3.3 мГал.

Fig. 6. The graph of the change in the field deviation during the iterative solution of the inverse gravimetry problem. The asymptotic value of the field deviation equal to 3.3 mGal is shown.

с максимальными отметками высот (Amante, Eakins, 2009). После такого доопределения среды была составлена сводная плотностная модель земной коры региона, охватывающая слой от поверхности дневного рельефа до глубины –50 км.

Сводная плотностная модель земной коры территории Республики Нигер приведена на рис. 7–9 для ряда фиксированных глубин в единой цветовой шкале плотности. Выбор уровней горизонтальных срезов модели определялся наиболее выразительными в плане результатами плотностного строения земной коры региона исследований.

На верхних уровнях трехмерной модели (рис. 7) проявляются плотностные неоднородности щита Туарег (вместе с массивами Аир и Джадо), которые характеризуются величинами плотности в диапазоне 2630–2880 кг/м^3, что отвечает архейско-протерозойским породам кислого и среднего состава (Кербали, 2000). Наиболее высокие значения плотности характерны для пород западной части щита Туарег, а массивы Аир и Джадо представлены породами с плотностью около 2680 кг/м^3. Отметим, что на глубине 0 км массив Аир разделяется на северную и южную части с узкой перемычкой между ними. На верхних уровнях модели (рис. 7) породы осадочного чехла представлены кайнозойскими и мезозойскими комплексами с плотностью, соответственно, около 2050 и 2370 кг/м^3 (Якуба, 2019а, 2019б).

На глубинном срезе –2 км (рис. 7) породы фундамента имеют значения плотности в диапазоне 2680–2800 кг/м^3. Пространственная дифференциация плотности кристаллических пород весьма незначительна, а наиболее высокие ее значения соответствуют локальным областям в юго-восточном обрамлении массива Аир и в западной части массива Джадо, где значения плотности пород составляют2750–2800 кг/м^3. Указанные локальные области имеют выраженную север- северо-западную (массив Аир) и субмеридианальную (массив Джадо) ориентировки с длиной по простиранию 100–120 км и шириной около 40 км. На глубинном срезе модели –2 км осадочный комплекс пород заполняет региональные бассейны чехла и грабены в фундаменте. Кайнозойские породы чехла характеризуются плотностью примерно 2140–2220 кг/м^3, а мезозойские породы имеют плотность от 2370 и 2430 кг/м^3. Поперечные размеры грабенов уменьшаются с глубиной, причем в северном окончании Западно-Африканской рифтовой системы (к западу от массива Джадо) устанавливается выраженное раздвоение системы грабенов с уменьшением их линейных размеров (рис. 7).

Для срезов на уровнях –6 и –10 км (рис. 8) характерно возрастание плотности пород кристаллического фундамента с глубиной. Здесь на глубине –6 км гранитоидные комплексы щита Туарег имеют плотность в диапазоне 2680–2720 кг/м^3, что сопоставимо с их плотностью на поверхности (Кербали, 2000). Ниже, на глубине –10 км, почти повсеместно залегают породы с плотностью 2760–2830 кг/м^3, которые можно отождествить с породами средней коры. Локальная вытянутая аномалии повышенной плотности, со значениями 2860–2960 кг/м^3, располагается под юго-западной частью массива Аир на глубине –6 км и прослеживается до глубины –10 км с увеличением ее размеров по простиранию. Для области массива Джадо также отмечается локальная аномалия повышенной плотности на срезе –10 км, вытянутая в субмеридианальном направлении к западу от положения массива на поверхности. Можно предположить, что указанные линейные аномалии повышенной плотности на этих глубинах являются подводящими магматическими каналами трещинного типа для массивов Аир и Джадо.

Система аномалий повышенной плотности на срезе –6 км, совпадающая в плане с прогибом Тенере, на глубине –10 км транслируется в юго-западном направлении. Под южным окончанием прогиба Тенере-Термит, в области собственно грабена Термит, плотность пород фундамента достигает величин 2960–3100 кг/м^3, что отвечает породам основного состава. Отметим, что на глубине –14 км просматривается уже вся корневая коровая система главной части грабена Тенере-Термит, выраженная как линейная аномалии повышенной плотности 2980–3100 кг/м^3, с размерами 600 км по простиранию и шириной примерно 70–100 км, вытянутая в юго-западном направлении. Собственно грабены Тенере и Термит, выполненные палеозойским осадочным комплексом пород, представлены на глубинных срезах –6 и –10 км (рис. 8) как локальные области с плотностью 2530–2640 кг/м^3.

На уровне глубин средней коры, вне корневой области грабенов ЗАРС, аномалии плотности носят мозаичный вид со значениями плотности кристаллических пород 2780–2890 кг/м^3. Далее на глубине –25 км плотность незначительно возрастает до 2910–2930 кг/м^3 при незначительной дифференциации в плане (рис. 9). На этом глубинном срезе наиболее ярко выраженной особенностью модели является линейная аномалия плотности со значениями 2970–3060 кг/м^3, вытянутая в юго-западном направлении. В плане эта аномалия, с размерами примерно 500 км по простиранию и шириной около 60 км, совпадает с южной частью грабена Термит. На уровне нижней коры, плановая дифференциация модели становится еще меньше и значения плотности коровых пород варьирует в пределах 2860–2940 кг/м^3 вне

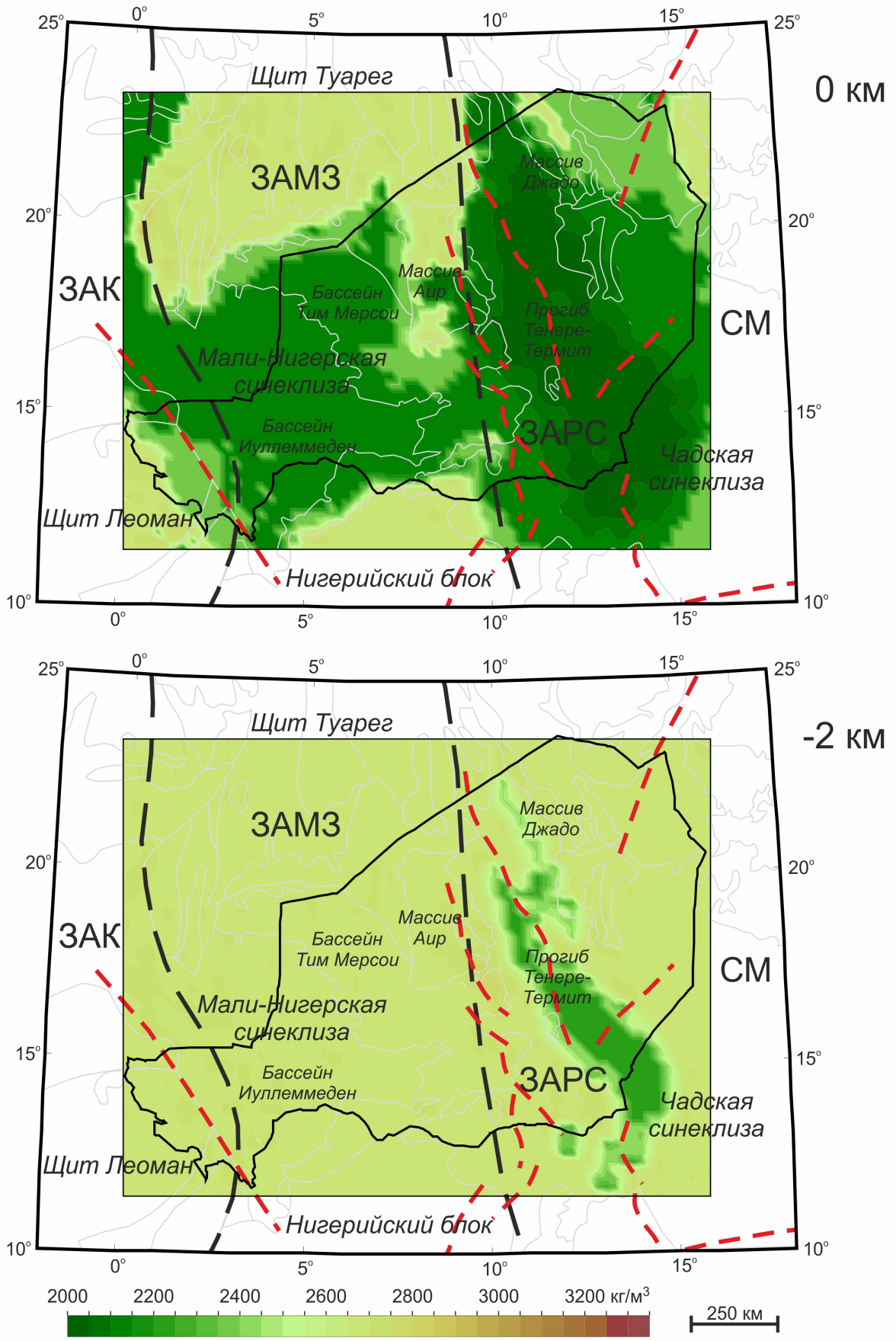


Рис. 7. Плотность на уровнях глубин 0 и –2 км.

Fig. 7. Density at depth levels of 0 and –2 km.

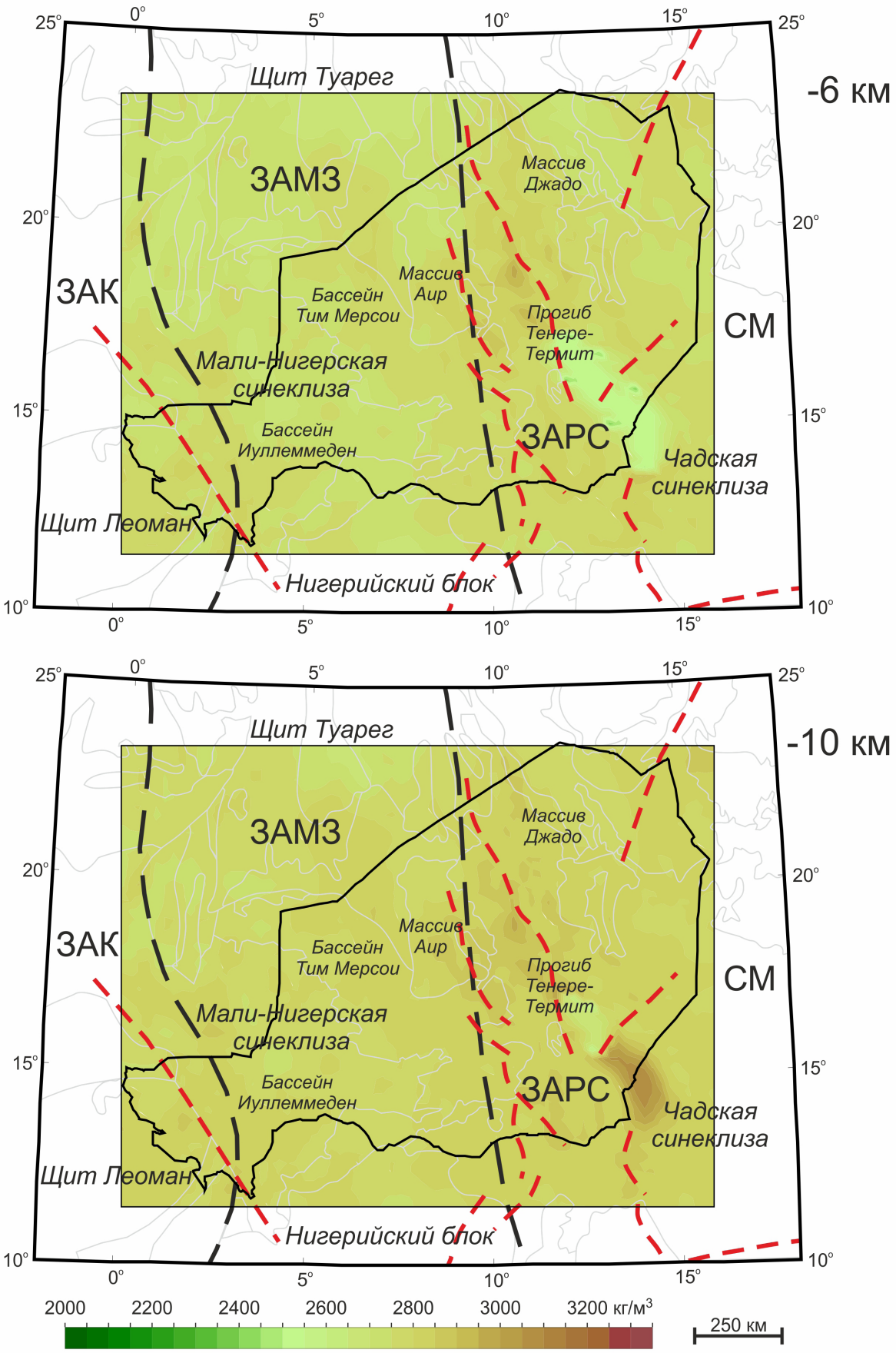


Рис. 8. Плотность на уровнях глубин −6 и −10 км.

Fig. 8. Density at depth levels of −6 and −10 km.

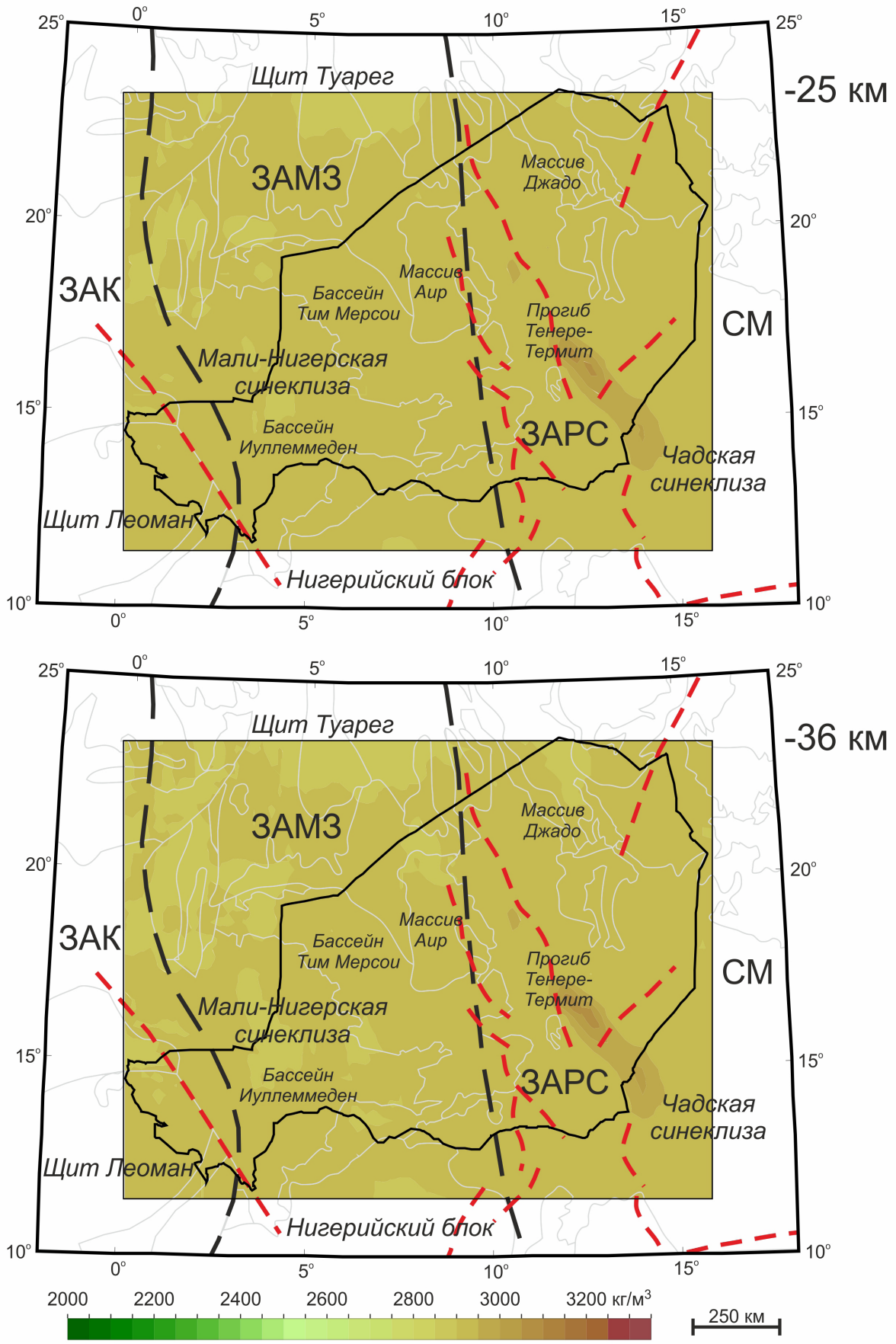


Рис. 9. Плотность на уровнях глубин –25 и –36 км.

Fig. 9. Density at depth levels of –25 and –36 km.

корневой части грабена Термит. В нижней коре под этим грабеном на срезе –36 км отмечается аномалия плотности, аналогичная по размерам, ориентировке и амплитуде, аномалии на глубине –25 км. Эта единая средне-нижне-коровая аномалия предположительно представлена породами основного-ультраосновного состава.

В слое верхней мантии, включенном в нашу модель, рассчитанные значения плотности пород в целом близки к нормальным значениям для плотностной модели мантии (Картвелишвили, 1983), составляющей 3320 кг/м^3.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенный анализ результатов 3D плотностного моделирования позволяет наметить некоторые региональные черты геолого-тектонического строения земной коры территории республики Нигер, наиболее выразительной особенностью, которой является эшелонированная система грабенов ЗАРС (Harouna et al., 2017; Lai et al.,2020). Наши результаты трехмерного плотностного моделирования позволили достоверно выявить наличие глубинной части рифтовой системы, продолжающейся вплоть до границы Мохо (рис. 10). Пространственное положение коровой части рифтовой системы выражено субпараллельными вытянутыми геологическими телами юг-юго-западного простирания, предположительно сложенными породами основного-ультраосновного состава. Размеры наиболее крупных объектов достигают 700 км по простиранию при ширине до 100 км. Верхнекоровые фрагменты некоторых из этих тел, вероятно, являются подводящими магматическими каналами трещинного типа для массивов Аир и Джадо.

На уровне средней и нижней коры установлено последовательное пространственно смещение корневой части рифтовой системы в юго-юго-восточном направлении и увеличение ее размеров в плане. Отметим также, что выявленная глубинная часть рифтовой системы расположена в области «локального» погружения границы раздела кора-мантия на стыке восточного ограничения Западно-Африканской рифтовой системы и Сахарского мегакратона (рис. 10).

В целом результаты трехмерного плотностного моделирования в области ЗАРС можно трактовать как результат активного рифтогенеза, обусловленного подъемом мантийного диапира (Liegeois et al., 2005) с развитием косого трансрастяжения коры (Балаганский и др., 1998), порождающего одновременное раздвигание и смещение по простиранию бортов структуры растяжения относительно друг друга. Растяжение происходило косо относительно простирания зоны ЗАРС по линии северо-северо-западной ориентировки

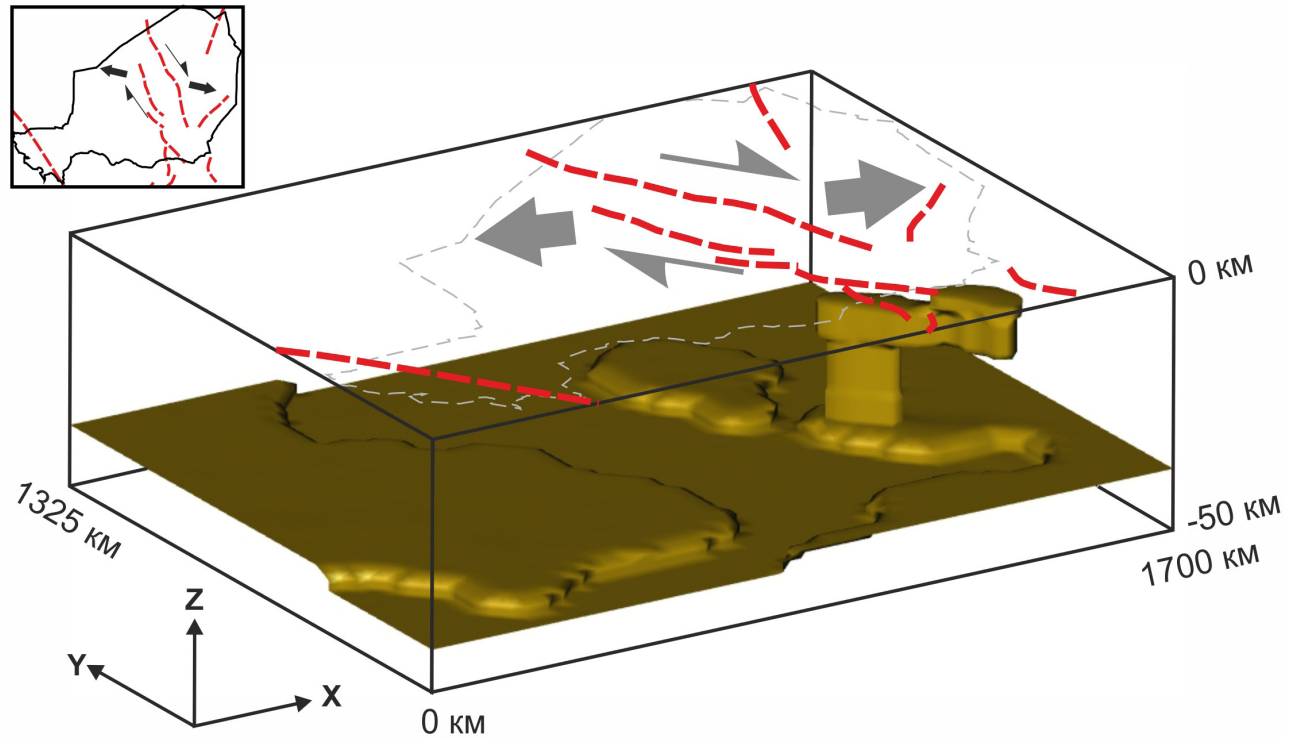


Рис. 10. Изоповерхность для плотности равной 3000 кг/м^3. Показано положение основных разломов ЗАРС (рис. 2) на уровне дневной поверхности; стрелки — направление деформаций растяжения и сдвига.

Fig. 10. Isosurface for density equal to 3000 kg/m^3. The position of the main faults of the ZARS is shown (Fig. 2) at the level of the daytime surface is shown; arrows indicate the direction of tensile and shear strains.

при правостороннем смещении. Плановая форма установленных внутририфтовых корневых структур соответствует основным положениям геодинамических построений для формирования вязко-упругих геосистем литосферы (Ramsay, Huber, 1987; Tron, Brun, 1991).

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению содержания статьи.

Научные исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 20-05-00190.

Список литературы [References]

Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г. Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. 1998. № 2. С. 16-28 [*Balagansky V.V., Glaznev V.N., Osipenko L.G.* The Early Proterozoic evolution of the northeastern Baltic shield: terrane analysis // Geotectonics. 1998. № 2. P. 81–93].

Буянов А.Ф., Глазнев В.Н., Раевский А.Б. и др. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии // Геофизический журнал. 1989. Т. 11. № 2. С. 30-39 [*Buyanov A.F., Glaznev V.N., Raevsky A.B. et al.* Integrated interpretation of gravity, seismic and geothermal data // Geophysical Journal. 1989. V. 11. № 2. P. 30–39 (in Russian)].

Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: «КаэМ», 2003. 252 с. [*Glaznev V.N.* Integrated geophysical models of the Fennoscandian lithosphere / Apatity: K&M, 2003. 252 p. (in Russian)].

Глазнев В.Н., Жаворонкин В.И., Муравина О.М. и др. Строение верхней коры Елецкого участка Лосевского террейна (Воронежский кристаллический массив) по данным плотностного моделирования // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2019. № 3. С. 74–83 [*Glaznev V.N., Zhavoronkin V.I., Muravina O.M. et al.* The structure of the upper crust of the Yeletsky section of the Losevsky terrane (Voronezh crystalline array) according to density modeling data // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2019. № 3. С. 74-83 (in Russian)].

Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 53–63 [*Glaznev V.N., Mints M.V, Muravina O.M.* Density modeling of the Earth crust for the central part of the East-European platform// Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2016. № 1(29). P. 53–63 (in Russian)].

Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Масштаб 1 : 1 000 000. Объяснительная записка / Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2020. 101 с. [*Glaznev V.N., Muravina O.M., Zhavoronkin V.I. et al.* Petrodensity map of the Precambrian basement of the Voronezh crystalline massif / Voronezh:Nauchnaya kniga, 2020. 101 p. (in Russian)].

Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Балаганский В.В. и др. Трехмерная модель верхней коры района Китила-Соданскюля, Финская Лапландия (север Балтийского щита) // Сборник материалов, посвященный 40-летнему юбилею кафедры геофизики ВГУ. Воронеж: ВГУ, 2002. С. 11–20 [*GlaznevV.N., Raevsky A.B., Balagansky V.V. et al.* Three-dimensional model of the upper crust of the Kittila-Sodanskylä region, Finnish Lapland (north of the Baltic Shield) // Collection of materials dedicated to the 40th anniversary of the Department of Geophysics of VSU. Voronezh: VSU, 2002. P. 11–20 (in Russian)].

Глазнев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2020. № 4. С. 46–58. https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3126 [*Glaznev V.N., Yacouba I.A.* Determining the thickness of the Earth's crust in the territory of the Republic of the Niger based on the stochastic interpretation of the gravitational field // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2020. № 4. P. 46–58. (in Russian)].

Глазнев В.Н., Якуба И.А. Гравитационный эффект осадочного чехла территории Республики Нигер // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 2. С. 71–82. https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3490 [*Glaznev V.N., Yacouba I.A.* The gravitational effect of the sedimentary cover located in the Republic of Niger // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2021. № 2. P. 46–58 (in Russian)].

Картвелишвили К.М. Планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли. М.: Наука, 1983. 93 с. [*Kartvelishvily K.M.* Planetary density model and normal gravitational field of the Earth. M.: Nauka, 1983. 93 p. (in Russian)].

Кербали М. Методология комплексных космо-, аэро- и наземных геофизических работ с целью крупномасштабного геокартирования и поисков месторождений урана в условиях района Хоггар (Алжир). Дис. канд. техн. наук. М. 2000. 190 с. [*Kerbaly M.* Methodology of complex cosmo-, aero- and ground geophysical surveys with the aim of large-scale geomapping and prospecting of uranium deposits in the Hoggar region (Algeria). Diss. for the degree of Cand. Of Techn. Sci. M. 2000. 190 p. (in Russian)]

Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 286 с. [*Kobrunov A.I.* Mathematical Foundations of the Theory of Interpretation of Geophysical Data. M.: CentrLitNefteGaz, 2008. 286 p. (in Russian)].

Кобрунов А.И., Варфоломеев В.А. Об одном методе ε-эквивалентного перераспределения и его использовании для интерпретации гравитационного поля // Физика Земли. 1981. № 10. С. 25–44 [*Kobrunov A.I., Varfolomeev V.A.* On one ε-equivalent redistribution method and its use to interpretation of the gravity field // Physics of the Solid Earth. 1981. № 10. С. 25–44 (in Russian)].

Минц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета.

Сер. Геология. 2017. № 4. С. 2–23. [*Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M.* Deep structure of the crust in the southeast of the Voronezh crystalline massif according to geophysical data: geodynamic evolution in the Paleoproterozoic and the current state of the crust // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2017. № 4. P. 2–23 (in Russian)].

Минц М.В., Глазнев В.Н., Раевский А.Б. Трехмерная модель геологического строения верхней коры района Кольской сверхглубокой скважины и сопредельных территорий Кольского полуострова // Геотектоника.1994. № 6. С. 3–22 [*Mints M.V., Glaznev V.N., Raevskiy A.B.* Three-dimensional geological model of the earth's upper crust, the Kola ultradeep borehole and adjacent areas of the Kola peninsula // Geotectonics. 1995. V. 28. № 6. P. 457–475].

Муравина О.М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2016. № 1. С. 108–114 [*Muravina O.M.* Density model of the Earth's crust of the Voronezh crystalline massif // Vestnik Voronezh state university. Ser. Geology. 2016. № 1. P. 108–114 (in Russian)].

Новоселицкий В.М. К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести // Физика Земли. 1965. № 5. С. 25–32 [*Novoselitsky V.M.* On the theory of determining the change in density in the horizontal layer by anomalies of gravity // Physics of the Solid Earth. 1965. № 5. С. 25–32 (in Russian)].

Раевский А.Б. Применение линейных трансформаций при гравитационном моделировании верхней части земной коры на кристаллических щитах (на примере западного района Кольского полуострова). Дисс. канд. физ.-мат. наук. Апатиты, 1984. 102 с. [*Raevskiy A.B.* Application of linear transformations in gravitational modeling of the upper part of the earth's crust on crystalline shields (on the example of the western region of the Kola Peninsula). Diss. for the degree of Cand. ofPhys.-Math. Sci. Apatity. 1984. 102 p. (in Russian)].

Якуба И.А. Петрофизические свойства ураноносных пород Республики Нигер (обзор данных) // Геофизические исследования: методика работ, интерпретация данных: Материалы ежегодной молодежной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина. Воронеж: «Научная книга». 2019а. С. 90–97 [*Yacouba I.A.* Petrophysical properties of uranium-bearing rocks of the Republic of Niger (data review) // Geophysical research: methods of work, data interpretation: Materials of the annual youth scientific conference of the Department of Geophysics of Voronezh State University. Ed. A.A. Auzin. Voronezh: Nauchnayakniga, 2019a. P. 90–97 (in Russian)].

Якуба И.А. Геологическая и петрофизическая характеристика урановых месторождений песчаникового типа Республики Нигер / Студенческая наука как ресурс инновационного потенциала развития. VIII междунар. студенческая науч. конф. Материалы и доклады Часть II. Отв. ред. Л.П. Земскова. Воронеж: Воронежский гос. ун-т. 2019б. С. 3–11 [*Yacouba I.A.* Geological and petrophysical characteristics of uranium deposits of sandstone type of the Republic of Niger / Student science as a resource of innovative development potential. VIII International.student scientific. Conf. Materials and reports Part II. Ed. L.P. Zemskova. Voronezh: Voronezh state univ. 2019b. P. 3–11].

Ahmed K.S., Liu K., Paterne M.A. et al. Anatomy of Eastern Niger Rift Basin with Specific References of Its Petroleum Systems // International Journal of Geosciences. 2020. V. 11. № 5. P. 305–324. https://doi.org/10.4236/ijg.2020.115016

Amante C., Eakins B.W. ETOPO1 – 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data sources and Analysis // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24.National Geophysical Data Center, NOAA. 2009. https://doi.org/10.7289/V5C8276M

Begg G.C., Griffin W.L., Natapov L.M. et al. The lithospheric architecture of Africa: seismic tomography, mantle petrology and tectonic evolution // Geosphere. 2009. V. 5. № 1. P. 23–50. https://doi.org/10.1130/GES00179.1

Cribb J. Application of the generalized linear inverse to the inversion of static potential data // Geophysics. 1976. V. 41. № 6. P. 1365–1369. https://doi.org/10.1190/1.1440686

Galitchanina L.D., Glaznev V.N., Mitrofanov F.P. et al. Surface density characteristics of the Baltic Shield and adjacent territories // Norges Geologiske Undersokelse. 1995. Special Publ. V. 7. P. 349–354.

Genik G.J. Regional framework, structural and petroleum aspects of rift basins in Niger, Chad and the Central African Republic // Tectonophysics. 1992. V. 213. P. 169–185. https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90257-7

Glaznev V.N., Raevsky A.B., Skopenko G.B. A three-dimensional integrated density and thermal model of the Fennoscandian lithosphere // Tectonophysics. 1996. V. 258. № 1–4. P. 15–33. https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00147-6

Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. et al. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust–mantle boundary // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. № 2. P. 133–170. https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176

Globig J., Fernandez M., Torne M. et al. New insights into the crust and lithospheric mantle structure of Africa from elevation, geoid, and thermal analysis // Journal Geophysical Research. Solid Earth. 2016. V. 121. P. 5389–5424. https://doi.org/10.1002/2016JB012972

Harouna M., Pigott J.D., Philp R.P. Burial history and thermal maturity evolution of the Termit Basin, Niger // Journal of Petroleum Geology. 2017. V. 40. № 3. P. 277–297. https://doi.org/10.1111/jpg.12676

Jessell M.W., Begg G.C., Miller M.S. The geophysical signatures of the West African Craton // Precambrian Research. 2016. V. 274. № 3. P. 3–24. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.010

Lai H., Li M., Mao F. et al. Source rock types, distribution and their hydrocarbon generative potential within the Paleogene Sokor-1 and LV formations in Termit Basin, Niger // Energy Exploration & Exploitation. 2020. V. 38 № 6. P. 2143-2168. https://doi.org/10.1177/0144598720915534

Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's

Crust // Geophysical Research Abstracts. 2013. V. 15. EGU2013-2658.

Liegeois J.P., Benhallou A., Azzouni-Sekkal A. et al. The Hoggar swell and volcanism: Reactivation of the Precambrian Tuareg shield during Alpine convergence and West African Cenozoic volcanism / Plates, plumes, and paradigms. Eds: Foulger G.R., Natland J.H., Anderson D.L.Geological Society of America, Special Paper. 2005. P. 379-400. https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.379

Milesi J.P., de Lamotte D.F., de Kock G. et al. Tectonic map of Africa, 1:10 000 000 scale / Paris: CCGM-CGMW, 2010.

Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M. et al. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // Geoscience Frontiers. 2020. V. 11. № 3. P. 999–1023. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003

Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G. et al. Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga-Kostomuksha-Lovisageotraverse // International Geology Review, 1998. V. 40. № 11. P. 990–997. https://doi.org/10.1080/0020681980946

Pasyanos M.E., Masters G., Laske G. et al. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth // Journal Geophysical Research. Solid Earth. 2014. V. 119. Iss. 3. P. 2153–2173. https://doi.org/10.1002/2013JB010626

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal Geophysical Research, Solid Earth. 2012. V. 117. B04406. https://doi.org/10.1029/2011JB008916

Ramsay J.G., Huber M.I. The Techniques of Modern Structural Geology. V. 2. Folds and Fractures. London:Academic press, 1987. P. 309–700.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust / In: Treatise on Geochemistry (Second Edition). Eds.: R.L. Rudnick. Elsevier. 2014. V. 4. P. 1–51. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6

Schluter T. Geological Atlas of Africa / Berlin: Springer, 2008. 318 p.

Thieblemont D. Geological Map of Africa at 1:10M scale / Cape Town:CGMW-BRGM, 2016. https://doi.org/10.14682/2016GEOAFR

Tron V., Brun J.P. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems // Tectonophysics. 1991. V. 188. Iss. 1–2. P. 71–84. https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90315-J

Yacouba I.A., Glaznev V.N. The thickness of the Earth's crust in the territory of Republic of the Niger according to the stochastic interpretation of the gravity field / In: Kukkonen I.T., et al., (Eds.). Lithosphere 2021 – Eleventh Symposium on the Structure, Composition and Evolution of the Lithosphere in Finland. Helsinki: Institute of Seismology, University of Helsinki, 2021. Report S-71. P. 157–160.

THREE-DIMENSIONAL DENSITY MODEL OF THE EARTH'S CRUST OF THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF NIGER

V.N. Glaznev[1,2], M.V. Mints[3], I.A.Yakuba[1]

[1]*Voronezh State University, Voronezh, Russia, 394006*
[2]*Geological Institute of Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia, 184209*
[3]*Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017*

The paper considers the results of calculation of the three-dimensional density model of the Earth's crust for the territory of the Republic of Niger in conditions of incomplete initial geological and geophysical information. A brief description of the geological structure of the research region is given and the task of the study is formulated. The initial data set of density modeling is described, including: the anomalous gravity field, the initial model of the medium, the constraints on the desired solution, and the weight functions of redistribution of field incompatibilities. Inversion of the anomalous gravity field was performed in a three-dimensional formulation for a regular grid with a 25×25 km spacing in the plan and 14 layers of irregular vertical grid. The density model of the crystalline crust obtained by solving the inverse problem was combined with a priori data on the density of the upper mantle layer and the previously constructed layered model of the sedimentary cover of the region. The main features of the density model of the Earth's crust are considered and its density heterogeneities are compared with the regional geological and tectonic data. The leading role of young structures of the West African rift System and their relationship with density inhomogeneities in the lower and middle crust of the territory of the Republic of Niger was noted.

Keywords: earth's crust, gravity field, three-dimensional inverse problem of gravimetry.

Поступила в редакцию 09.10.2021 г.
После доработки 14.11.2021 г.
Принята к публикации 27.12.2021 г.