

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

На правах рукописи

ИБРАГИМ АБДУ ЯКУБА

**СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ РЕСПУБЛИКИ НИГЕР ПО
ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ И ПРОГНОЗ УРАНОНОСНОСТИ ЕЁ
ТЕРРИТОРИИ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата геолого-минералогических наук

1.6.9 – Геофизика

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Глазнев Виктор Николаевич

Воронеж – 2022

Введение	4
Глава 1. Региональная геология Республики Нигер	16
1.1. Региональная геология и тектоника	16
1.2. Строение осадочного чехла	19
1.3. Строение кристаллического фундамента	22
1.4. Рифтовые структуры Восточного Нигера	24
1.5. Геологическая характеристика урановых месторождений	27
1.5.1. Характеристика месторождений песчаникового типа	27
1.5.2. Песчаниковые месторождения урана Республики Нигер	30
Выводы к главе 1	34
Глава 2. Петрофизические свойства пород Республики Нигер	35
2.1. Петрофизика кристаллических и осадочных пород	35
2.2. Петрофизика ураноносных пород	39
Выводы к главе 2	43
Глава 3. Региональные геофизические поля Республики Нигер	44
3.1. Гравитационное поле	44
3.2. Магнитное поле	49
Выводы к главе 3	51
Глава 4. Плотностная модель земной коры Республики Нигер	53
4.1. Мощность земной коры	54
4.1.1. Методика стохастической оценки мощности коры	55
4.1.2. Результаты оценки мощности коры	57
4.1.3. Гравитационный эффект границы Мохо	64
4.2. Плотностная модель осадочного чехла	69
4.2.1. Строение осадочного чехла	70
4.2.2. Гравитационный эффект осадочного чехла	77
4.3. Расчёт плотностной модели кристаллической коры	79
4.3.1. Аномальное поле кристаллической коры	80
4.3.2. Параметры решения обратной задачи	83

4.3.3. Плотностная модель кристаллической коры	87
4.4. Плотностная модель земной коры	90
Выводы к главе 4	101
Глава 5. Прогноз ураноносности территории Республики Нигер	103
5.1. Геолого-геофизические данные	103
5.2. Буферные зоны данных	106
5.3. Анализ пространственных данных	108
5.4. Методика и результаты прогнозирования	111
5.4.1. Методика прогнозирования	111
5.4.2. Результаты прогнозирования	117
5.5. Геофизические методы поисков месторождений урана	120
5.5.1. Наземные и аэрогеофизические методы	120
5.5.2. Скважинные геофизические методы	123
Выводы к главе 5	127
Заключение	129
Список литературы	131

Введение

Актуальность работы

В настоящее время уран является важнейшим энергоносителем и будет им ещё долгие годы. Поэтому в мире существуют серьёзные проблемы обеспечения ураном действующих и строящихся атомных электростанций.

Республика Нигер располагает 9% мировых запасов урана [OECD & NEA, 2000], добыча которого ведётся с 1971 и составляет примерно 60 тыс. т. в год. Разрабатываются месторождения палеозойского-мезозойского платформенного прогиба на запад-юго-западном склоне массива Аир (Имурарен, Мадауэла, Арлит, Акаута, Асфасто, Азелик). Все известные крупные месторождения урана в республике Нигер локализованы в прогибе Тим Мерсои и относятся по классификации МАГАТЭ к песчаниковому типу.

Однако до настоящего времени геологическое строение территории Республики Нигер исследовано относительно слабо, степень изученности различных районов неравномерна. Поэтому высока вероятность обнаружения новых месторождений не только в пределах известного ураноносного района, но и на других территориях, имеющих сходное геологическое строение. Одним из таких перспективных районов является северо-восточная часть Чадской синеклизы, примыкающей к массиву Джадо.

Геофизические методы являются основой поисковой системы при выявлении глубокозалегающих месторождений урана. В связи с этим выяснение строения земной коры по результатам интерпретации геофизических данных и выявление особенностей её строения и связи с размещением урановых месторождений на территории республики Нигер – является весьма актуальной задачей. Актуальной в практическом отношении задачей является оценка комплекса геофизических методов, используемых при поисках месторождений урана на территории республики Нигер.

Степень разработанности

Изучение строения земной коры на территории Республики Нигер к настоящему времени выполнялось только методами глобальной сейсмотомографии и региональными построениями по данным функции приёмника [Jessel et al., 2016; Globig et al., 2016]. Эти построения опираются на априорные данные планетарных моделей Земли [Mooney et al., 1998; Laske et al., 2013 и ряд других] и поэтому результаты скоростного строения литосферы отражают различие исходных моделей среды и степень их пространственного разрешения в диапазоне (2-5)[°]. Кроме того, отличие оценок глубины положения границы Мохо, предложенных в рамках разных методов и моделей исходных данных, достигают значений 20-25 км.

Строение земной коры для территории Республики Нигер изучалось и по данным интерпретации гравитационного поля [Bagherbandi, Sjöberg, 2012; Reguzzoni et al., 2013 и др.]. В основном эти работы затрагивают вопросы плотностного моделирования земной коры на базе обобщённых сейсмологических моделей литосферы региона с опорой на данные спутниковых гравитационных аномалий. Пространственная разрешимость построений соответствует исходным моделям и не превышает (1-2)[°]. Результаты построения глубины Мохо, основанные на использовании деконволюции Эйлера для региональных гравитационных аномалий [Tedla et al., 2011], рассматриваются как малодостоверные, что отмечается в [Reid et al., 2012 и др.].

Отметим, что работы по региональному прогнозу металлогении, основанные на комплексе геолого-геофизических данных и результатах изучения строения земной коры территории, до настоящего времени не предпринимались. В опубликованной литературе, как правило, рассматривались только материалы локального прогноза на флангах известных крупных месторождений [Bohari et al., 2018; Bowden et al., 1981; Konate et al., 2007; Rigault, 2010 и др.].

Таким образом, представляется необходимым выполнить ревизию данных по глубине залегания границы Мохо, используя стохастическое

оценивание параметров слоя со случайным распределением источников гравитационного поля [Глазнев 2003; Глазнев и др., 2014]. В дальнейшем следует обратиться к решению трёхмерной обратной задачи гравиметрии для всей территории Республики Нигер и прилегающих областей на основе современных технологий [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2016; Минц и др., 2017; Glaznev et al., 2015; и др.]. На заключительном этапе следует решить задачи металлогенического прогнозирования с выявлением потенциально ураноносных областей, используя современные методы информационных технологий [Калинин, 2011; Муравина, 2009; Муравина, 2012; Муравина, Пономаренко, 2016].

Цель исследования

Основной целью исследования является построение плотностной модели земной коры территории республики Нигер по данным интерпретации гравитационного поля и выявление перспектив поисков урановых месторождений на территории республики.

Основные задачи

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ основных региональных особенностей геологического строения Республики Нигер.
2. Обобщение и анализ физических свойств осадочных и кристаллических пород Республики Нигер.
3. Составление синтетической модели гравитационного поля в редукции Буге на основе данных наземной съёмки и спутниковых наблюдений, которая является основой при решении задач регионального гравиметрического моделирования.
4. Оценка мощности земной коры в пределах территории Республики Нигер и сопоставление полученных результатов с современными моделями земной коры в континентальном и глобальном масштабе.
5. Расчёт гравитационного эффекта осадочного чехла территории Республики Нигер.

6. Создание региональной схемы коровых гравитационных аномалий, в которой исключено гравитационное влияние границы Мохо и осадочного чехла.
7. Расчёт трёхмерной региональной плотностной модели коры территории Республики Нигер.
8. Выявление пространственных закономерностей размещения месторождений урана и анализ связи минерации урана с внутрикоровыми процессами.
9. Характеристика оптимального комплекса геофизических методов поисков урановых месторождений на территории Республики Нигер.

Объект исследования

Объектом исследований является земная кора и верхняя мантия территории Республики Нигер и отражение пространственных неоднородностей распределения её физических свойств в гравитационном и магнитном полях.

Научная новизна работы

Новизна результатов исследования представлена следующими позициями:

1. Построена сводная цифровая синтетическая модель гравитационного поля в редукции Буге, объединяющая данные спутниковой и наземной съёмок для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки.
2. По результатам стохастической интерпретации гравитационного поля дана оценка мощности земной коры территории Республики Нигер и прилегающих стран, которая существенно отличается от глобальной модели CRUST1 [Pasyanos et al., 2014].
3. Составлена региональная модель плотностного строения осадочного чехла территории Республики Нигер, включающая данные глобальной модели LITHO1 и новые результаты сейсмических исследований 2D ОГТ. В модели учтены новые материалы петроплотностных исследований

глубоких скважин в области развития грабенов Западно-Африканской рифтовой системы. Рассчитанный гравитационный эффект от модели осадочного чехла позволил оценить вклад толщ осадочного чехла в наблюдаемое гравитационное поле региона исследований.

4. С учётом гравитационного эффекта раздела кора-мантия и влияния осадочного чехла, впервые выполнено решение обратной задачи гравиметрии в трёхмерной постановке для территории Республики Нигер и прилегающих областей. Построенная плотностная модель позволила выполнить сопоставление выявленных неоднородностей земной коры с данными региональных геолого-тектонических исследований.
5. Впервые получены результаты регионального комплексного минерагенического прогноза месторождений урана для территории Республики Нигер, на основании которого намечены три перспективных участка для постановки поисковых геофизических работ.

Теоретическая и практическая значимость

Важным вкладом выполненных исследований в развитие геофизической науки, в частности в вопросы интерпретации гравиметрических данных, является обоснование возможности создания адекватной трёхмерной плотностной модели земной коры в условиях неполноты исходной информации на основе использования совокупности региональных спутниковых моделей поля и материалов наземных съёмки, с опорой на глобальные сейсмо-плотностные модели литосферы. Ещё одним важным методическим аспектом исследования является объединение формальной эвристической технологии распознавания образов и синергетических принципов оценки информационной содержательности совокупности использованных признаков на основе технологии метода группового учёта аргументом (МГУА). Реализованный подход позволяет получить полную информационную характеристику изучаемого объекта при комплексном прогнозировании и классификации территории, реализуемой в задачах геологического картирования и минерагенического прогнозирования.

Практическая значимость исследования заключается в создании трёхмерной плотностной модели земной коры территории Республики Нигер, основанной на решении региональной трёхмерной обратной задачи гравиметрии в условиях неполноты исходной информации. Представленная плотностная модель земной коры демонстрирует ведущую роль структур Западно-Африканской рифтовой системы и их связь с неоднородностями в нижней и средней коре изучаемой территории. Ещё один аспект практического применения выполненных исследований заключается в прогнозных построениях по определению перспективных участков для постановки полевых поисковых геофизических работ, нацеленных на обнаружение месторождений урана песчаникового типа на территории Республики Нигер.

Методы и материалы исследований

При создании сводной цифровой синтетической модели гравитационного поля в редукции Буге использованы данные региональных наземных и современных спутниковых съёмок гравитационного поля для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки. Создание сводной региональной модели строения осадочного чехла территории исследований, выполнено на основе обобщения планетарных моделей оболочек литосферы и новых результатов сейсмических работ методом отражённых волн по отдельным профилям.

Применён стохастический подход к интерпретации региональных аномалий гравитационного поля на основе использования самой общей модели со случайными сингулярными источниками, расположенными в горизонтальном слое. Решение трёхмерной обратной задачи гравиметрии выполнено на основе использования аппроксимационного оператора расчёта плотности в слое произвольной мощности с учётом весовых функций перераспределения плотности в плане и по вертикали, что позволило построить реалистичную плотностную модель земной коры для территории Республики Нигер.

На стадии региональной оценки перспектив обнаружения новых участков урановой минерализации использованы интерпретационные геофизические результаты по строению верхней части земной коры региона и сведения о геологическом строении. В процедуре прогнозирования ураноносности по комплексу геолого-геофизических признаков реализовано объединение типовых эвристических методов прогноза с оценкой информационной содержательности признаков на основе технологии МГУА.

Защищаемые положения

1. На основе решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии рассчитана плотностная модель земной коры для территории Республики Нигер и прилегающих областей.
2. Обоснован региональный прогноз урановой минерализации на территории Республики Нигер и намечены перспективные участки для постановки поисковых геофизических работ.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объёмом гравиметрических данных по региону и детальностью описания плотностных свойств типичных пород осадочного чехла и кристаллического фундамента. Достоверность модели осадочного чехла обеспечивается как глобальными данными о строении литосферы региона, так и новыми сейсмическими материалами 2D ОГТ, полученными по ряду профилей пересекающих грабены Западно-Африканской рифтовой системы. Результаты плотностного моделирования строения земной коры территории Республики Нигер и прилегающих областей обеспечены корректным начальным приближением модели среды и адекватным алгоритмом решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии.

Достоверность результатов прогнозирования урановой минерализации по территории Республика Нигер базируется на том, что исходные данные включают широкий комплекс геолого-геофизических признаков, информационная содержательность которых независимо оценена по выборке

для набора типичных рудных и безрудных эталонных участков на изучаемой территории.

Апробация результатов

Основные результаты исследования по теме диссертации докладывались на семинарах и конференциях:

1. Региональная научная конференция «Геофизические исследования: методика работ, интерпретация данных». Воронеж, ВГУ, 24-25 апреля 2019 г.
2. VIII международная студенческая научная конференция «Студенческая наука как ресурс инновационного потенциала Развития». Воронеж, ВГУ, 29-30 мая 2019 г.
3. 47-ая сессия Международного научного семинара Д.Г. Успенского–В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, ВГУ, 27-30 января 2020 г.
4. Региональная научная конференция «Результаты геофизических исследований: методика и интерпретация». Воронеж, ВГУ, 21-23 апреля 2020 г.
5. Региональная научная конференция «Современные методы геофизических исследований: методика и интерпретация». Воронеж, ВГУ, 19-21 апреля 2021 г.
6. 11-th Symposium on Structure, Composition and Evolution of the Lithosphere. LITHOSPHERE-2021. Virtual meeting. Finland, Helsinki, 19-20 January, 2021.
7. 48-ая сессия Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 24-28 января, 2022 г.

Личный вклад

Автор лично провёл анализ данных первичных гравиметрических каталогов по территории страны, содержащих более 14500 наблюдений поля с точностью рядовых измерений примерно 0.1 мГал. На основе этих данных была построена сводная карта гравитационных аномалий в редукции Буге для территории Республики Нигер и прилегающих областей в масштабе 1 : 1 000 000 с сечением изолиний в 1 мГал, опирающаяся на данные наземных измерений поля и современные глобальные цифровые модели гравитационного поля Земли. Итоговая цифровая схема аномального гравитационного поля территории Республики Нигер представлена в географических координатах на реальном рельефе региона исследований.

Материалы для содержательной части диссертационной работы были получены автором в ходе реализации проекта РФФИ № 20-05-00190 «Моделирование глубинного строения и эволюции докембрийских тектонических провинций Восточно-Европейского и Северо-Американского кратонов на базе геологических и геофизических данных». В ходе выполнения проекта при участии автора были подготовлены исходные данные и проведены численные расчёты решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии. При участии автора также выполнены прогнозные оценки перспектив обнаружения новых участков урановой минерализации на территории Республики Нигер.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных ВАК для защиты по специальности:

1. Глазнев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2020. № 4. С. 46-58. DOI: 10.17308/geology.2020.4/3126 (RSCI, IF=0.337). (2.25 п.л., личный вклад – 1.20 п.л.).

2. Глазнев В.Н., **Якуба И.А.** Гравитационный эффект осадочного чехла территории Республики Нигер // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 2. С. 71-82. DOI: 10.17308/geology.2021.2/3490 (RSCI, IF=0.337). (1.50 п.л., личный вклад – 0.75 п.л.).
3. Глазнев В.Н., Минц М.В., **Якуба И.А.** Трёхмерная плотностная модель земной коры территории Республики Нигер // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. № 4 (52). С. 6–21. DOI: 10.31431/1816-5524-2021-4-52-6-21 (Scopus, IF=0.783). (1.58 п.л., личный вклад – 0.52 п.л.).
4. Глазнев В.Н., Муравина О.М., **Якуба И.А.** Региональное прогнозирование месторождений урана на территории Республики Нигер // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2022. № 1 (53). С. 32-45. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-32-45 (Scopus, IF=0.783). (1.82 п.л., личный вклад – 0.60 п.л.).

Иные научные статьи:

1. **Якуба И.А.** Петрофизические свойства ураноносных пород Республики Нигер (обзор данных) / Геофизические исследования: методика работ, интерпретация данных: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. А.А. Аузина. Воронеж: «Научная книга». 2019. С. 90–97.
2. **Якуба И.А.** Геологическая и петрофизическая характеристика урановых месторождений песчаникового типа Республики Нигер / Студенческая наука как ресурс инновационного потенциала развития. VIII международная студенческая научная конференция: Материалы и доклады. Часть II. Отв. ред. Л.П. Земскова. Воронеж: Воронежский гос. ун-т. 2019. С. 3–11.
3. **Yacouba I.A.** Champs géophysiques et gisements d'uranium de la République du Niger / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного

семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова. Воронеж: «Научная книга» 2020. С. 317–321.

4. **Якуба И.А.** Методы комплексных аэрогеофизических исследований при поисках месторождений урана на территории Республики Нигер / Результаты геофизических исследований: методика и интерпретация: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. В.И. Жаворонкина, О.М. Муравиной. Воронеж: «Научная книга». 2020. С. 76–82.
5. **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.
6. **Yacouba I.A.** Gravity field from the Moho boundary for the territory of the republic of Niger / Современные методы геофизических исследований: методика и интерпретация: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. Т.А. Вороновой, О.М. Муравиной. Воронеж: «Научная книга». 2021. С. 54–58.
7. **Якуба И.А.**, Глазнев В.Н., Минц М.В. Плотностная модель земной коры территории Республики Нигер / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2022. С. 301–304.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 162 наименования. Основное содержание представлено на 150 страницах, содержит 44 рисунка и 12 таблицы.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.ф.-м.н., проф. В.Н. Глазневу за научное руководство и помощь в написании работы, обсуждения материалов работы и консультации по вопросам современных методов комплексной интерпретации геофизических данных.

Особую признательность автор выражает д.т.н проф. О.М. Муравиной за неоценимую помощь в подготовке и интерпретации данных метод группового учёта аргументов, без которой не могла бы появиться заключительная часть работы. Также автор выражает благодарность к.г.-м.н., доц. В.И. Жаворонкину за ценные рекомендации и помощь в обобщении петрофизических данных, использованных в работе.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры геофизики Воронежского госуниверситета за ценные советы и замечания по диссертационной работе.

Глава 1. Региональная геологии Республики Нигер

Площадь исследований охватывает территорию Республики Нигер и ряд 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; Thieblemont et al; 2016]. Основные этапы этой эволюции, согласно [Begg et al., 2009; Jessell et al., 2016], включают: образование ювенильной архейской коры и стабилизацию кратонов северной Африки (рис. 1.1); 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 рифтовой системе.

1.1. Региональная геология и тектоника

Региональное геологическое строение рассматриваемой области приведено на рис. 1.2. На западе региона осадочный чехол Мали-Нигерской синеклизы, в котором выделяют северную и южную части (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 возрастными от меловых до четвертичных.

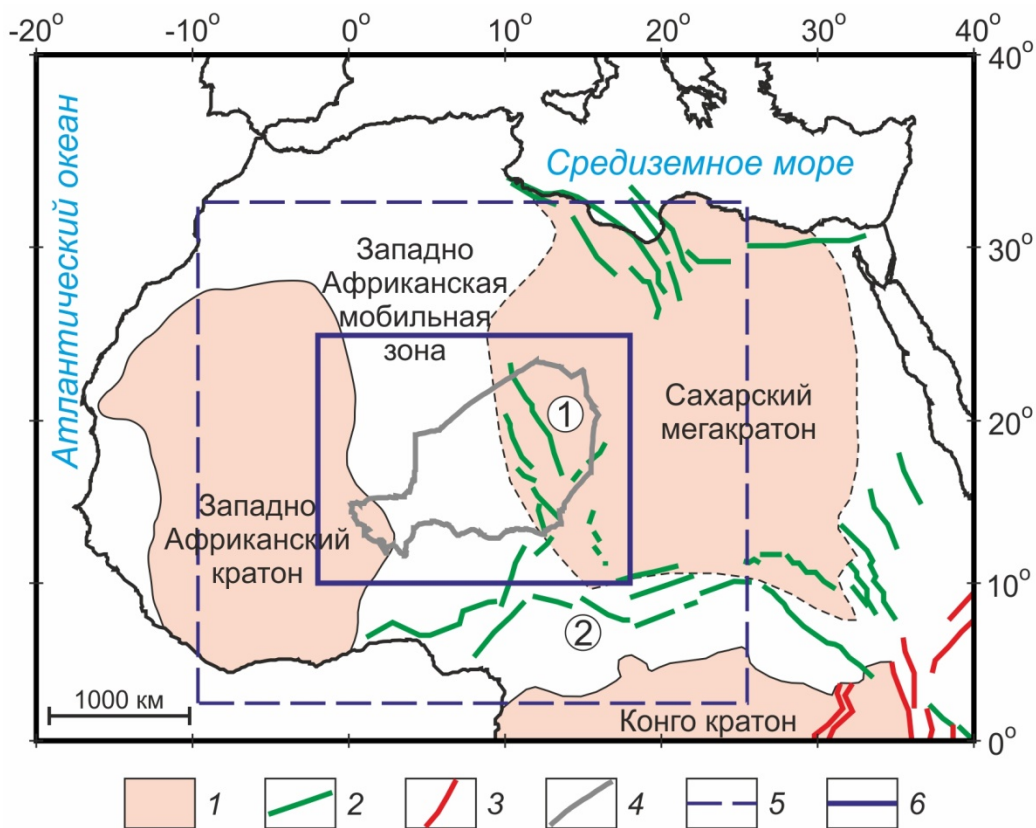


Рис. 1.1. Тектоническая схема Северной Африки по [Milesi et al., 2010; Globig et al., 2016]: 1 – докембрийские кратоны; 2 – мезозойские рифтовые системы (цифрами в кружках обозначены: 1 – Западно-Африканская, 2 – Центрально-Африканская); 3 – кайнозойский Восточно-Африканский рифт; 4 – государственная 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.

Наибольшая мощность чехла характерна для юго-восточной окраины синеклизы, где она достигает 2500 м. Северо-западная ветвь Чадской синеклизы (прогиб Тенере-Термит) представлена системой локальных грабенов Центрально-Африканской рифтовой системы (см. рис. 1.1), 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], причём наибольшей мощностью, до 7000 м, характеризуются отложения мезозоя.

Фундамент докембрийского возраста, относящийся к щиту Туарег [Thieblemont et al; 2016], обнажается в северной и центральной части территории в пределах нагорья Ахаггар (юг Алжира – север Республики Нигер). Собственно, щит Туарег представляет составной ансамбль архейско-протерозойских террейнов [Black et al, 1993] в области Западноафриканской мобильной зоны, ориентированных в субмеридиональном направлении и в

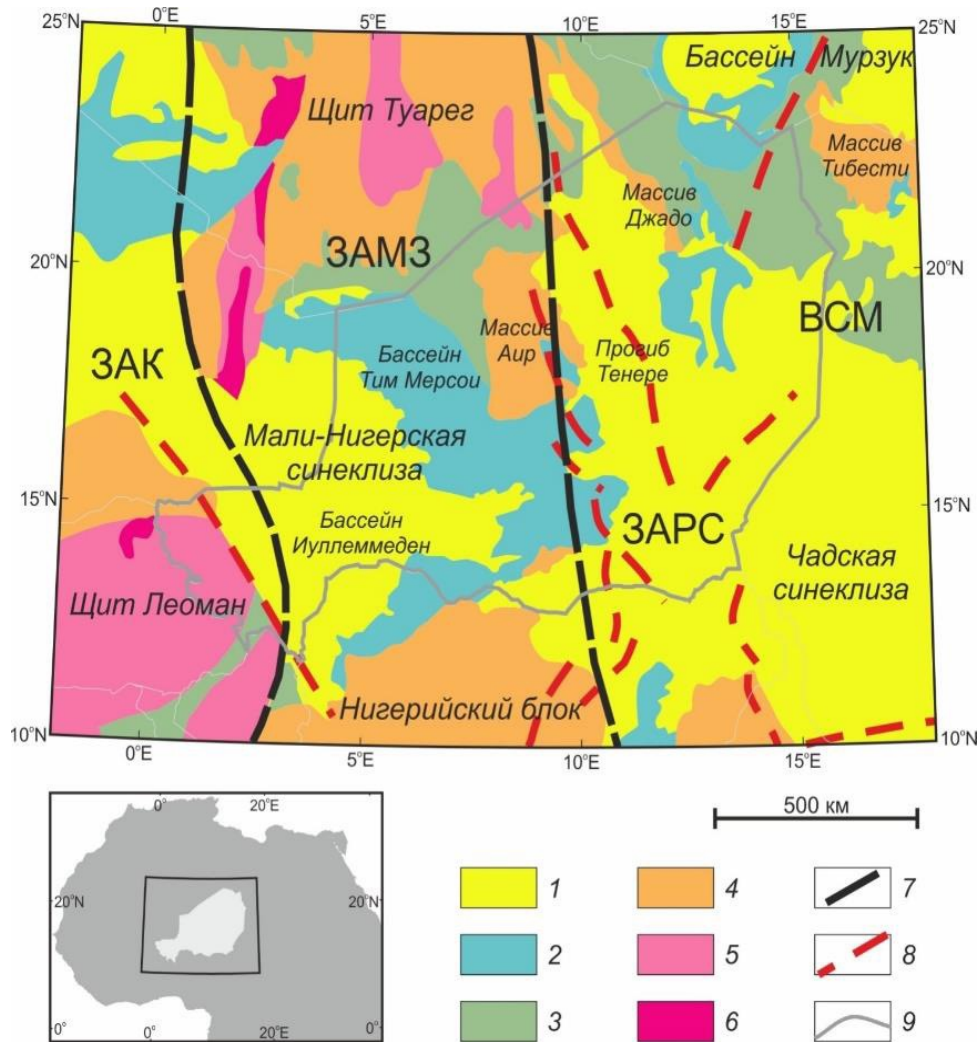


Рис. 1.2. Геолого-тектоническая схема территории Республики Нигер и прилегающих стран, составлена по [Begg et al, 2009; Globig et al, 2016; Jessell et al, 2016; Schluter, 2008]: 1 - четвертичный период; 2 - мезозой-кайнозой; 3 - палеозой; 4 - мезо-неопротерозой; 5 - палеопротерозой; 6 - архей; 7 - границы литосферных кратонов; 8 - крупные системы разломов; 9 - государственные границы. Аббревиатуры: ЗАК- Западно-Африканский кратон; ВСМ – Восточно-Сахарский мегакратон; ЗАМЗ - Западно-Африканская мобильная зона; ЗАРС - Западно-Африканская рифтовая система.

разной мере подверженных более поздней тектонической переработке и интенсивному разновозрастному магматизму [Black et al., 1993; Liégois et al., 2005]. Геодинамическая специфика этого этапа определялась частичным плавлением пород нижней коры в результате деляминации континентальной литосферной мантии региона [Black et al., 1993].

1.2. Строение осадочного чехла

Современные осадочные бассейны региона, сформированные в процессе этой последней реактивации [Guiraud, Maurin, 1992], ниже рассмотрим более подробно, поскольку они являются важным объектом исследования, ориентированного на расчёт гравитационного эффекта этих приповерхностных геологических структур и выявление их ураноносности.

Мали-Нигерская синеклиза (рис. 1.2 и 1.3), в которой выделяют северную и южную части (бассейны Тим Мерсои и Иуллеммеден), сложена морскими и континентально терригенными породами от триасового до палеоцен-эоценового возраста [Genik, 1992]. Мощность осадочных пород в бассейне Тим Мерсои плавно увеличивается к центру бассейна, где достигает величины около 2000 м, и включает мезозойские стратифицированные континентальные и морские серии, основную часть которых составляют нижнемелового и юрские отложения. Осадочные породы бассейна представлены песками, песчаниками, глинистыми песками, глинами, глинистыми сланцами, мергелями и известняками, причём мощности отдельных литологических разностей составляют от первых метров до первых сотен метров [Greigert, 1966; Clermonte et al., 1991]. Для бассейна Иуллеммеден характерно наличие мощных толщ верхнемеловых и палеогеновых пород, представленных континентальными и осадочными комплексами песчаников, глинистых песчаников, глинами, переходящими в песчано-глинистые илы или илистые глины, отмечается также присутствие мергелей и меловых отложений [Gaoh, 1993; Heckman et al., 2019].

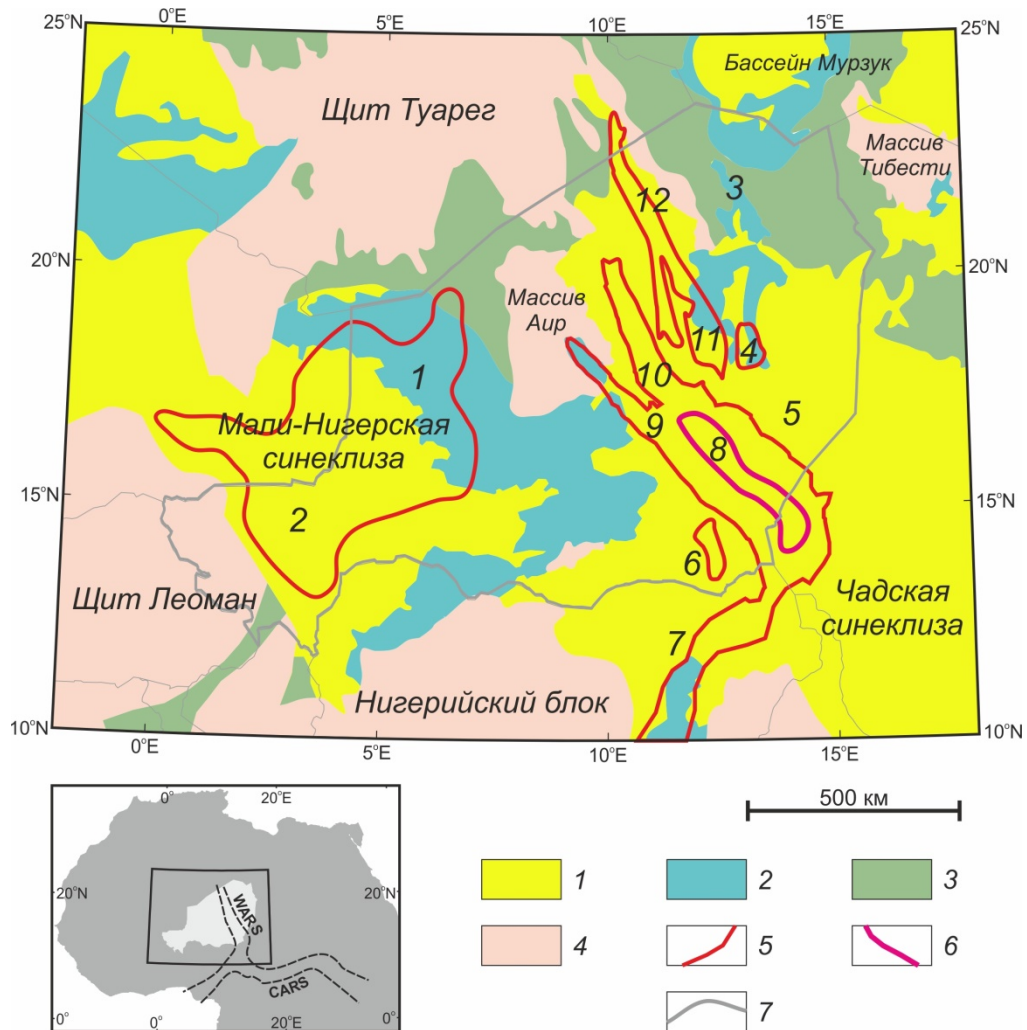


Рис. 1.3. Геологическая схема территории Республики Нигер и прилегающих стран по [Jessell M.W et al, 2016; Guiraud R., Maurin J.C, 1992]. Условные обозначения: 1 – четвертичный период; 2 – мезозой-кайнозой; 3 – палеозой; 4 – протерозой и архей; 5 – контуры грабенов и бассейнов с мощностью осадочного чехла от 1.5 до 10 км; 6 – контуры грабенов с мощностью осадочного чехла более 10 км; 7 – государственные границы. Цифрами обозначены: бассейны Тим Мерсои (1), Иуллеммеден (2), Джадо (3), Билма (4), Агадем (5), Н'Гуэль-Эджи (6), Борно (7); грабены Термит (8), Тефидет (9), Тенере (10), Кафра (11), Грейн (12). Аббревиатуры на обзорной схеме: WARS – Западно-Африканская рифтовая система (ЗАРС); CARS – Центрально-Африканская рифтовая система (ЦАРС).

Структура бассейна Иуллеммеден несимметричная с увеличением мощности чехла до 2500-3000 м в его южной части, где отмечается также более крутое падение стратифицированных толщ осадков с мощностью до первых сотен метров. В целом для Мали-Нигерской синеклизы характерно

несимметричное строение с увеличением суммарной мощности осадочного комплекса до 3000 м в южной его части за счёт интенсивного накопления терригенных и осадочных пород верхнемеловых и палеогеновых пород [Nesckman et al., 2019]. К сожалению, сводных структурных карт изопахит для Мали-Нигерской синеклизы не имеется, а все прогнозные построения ограничиваются отдельными обобщёнными схематическими геологическими разрезами, отражающими отмеченные тенденции строения бассейна.

Разрез Чадской синеклизы, в основании которой залегают породы меловой континентальной серии, в целом аналогичен разрезу Мали-Нигерской синеклизы, и состоит из четырёх суббассейнов: Агадем, Билма, Джадо и собственно бассейна озера Чад [Avbovbo et al., 1986; Brownfield, 2016; Genik, 1993; Guiraud, Maurin, 1992]. Осадочные породы Чадской синеклизы, сложенные стратифицированными образованиями континентальных и, в меньшей мере, морских серий с возрастными от меловых до четвертичных, представлены глинами, глинистыми песчаниками, песками и карбонатами. Наибольшей мощностью чехла, достигающей 2000-2500 м, отличается собственно бассейн озера Чад (рис. 1.3).

Для бассейна Джадо характерно наличие палеозойских пород в основании структуры. Общая мощность чехла достигает примерно 2000 м, но большая часть её приходится на отложения мелового-третичного периодов мощностью до 1200 м [Greigert, 1968]. В целом Чадская синеклиза представляет относительно пологую структуру, осложнённую отдельными понижениями и повышениями мощности осадочного чехла в пределах отдельных суббассейнов. На юго-западном фланге Чадской синеклизы расположен бассейн Борно, выполненный осадочными породами мелового-третичного возрастов [Genik, 1993]. Сводных структурных карт изопахит для Чадской синеклизы не имеется, а все прогнозные построения ограничиваются отдельными схематическими геологическими разрезами по буровым и геофизическим данным на участках поисков углеводородов в собственно бассейне озера Чад.

Бассейн Мурзук на территории исследований представляет часть большого одноименного бассейна, расположенного на юге Ливии и сложен осадочными и терригенными породами с возрастными от кайнозоя до палеозоя [Pegon, 2019]. Сводных структурных карт изопахит для южной части бассейна не имеется и все прогнозные построения основаны на геофизических данных по отдельным участкам поисков углеводородов.

Северо-западная ветвь Чадской синеклизы – система локальных грабенов Центрально-Африканской рифтовой системы (рис. 1.3) простирается в субмеридиональном направлении почти на 1000 км при ширине до 400 км. Осадочные породы системы грабенов представлены континентальными и морскими отложениями от палеозойского до раннетретичного возраста, с максимальной мощностью до 14 км [Genik, 1992; Genik, 1993; Neckman et al., 2019]. Грабены Тенере, Грейн, Кафра, Билма и грабен Термит с его юго-западным продолжением - бассейном Н'Гуэль-Эджи (рис. 1.3) изучены отдельными глубокими скважинами глубиной до 4500 м, нацеленными на поиски углеводородов. По результатам сейсмических исследований 2D ОГТ для ряда профилей, пересекающих некоторые из указанных грабенов, составлены сводные разрезы осадочного чехла с выделением обобщённых комплексов отложений палеозоя, мезозоя и кайнозоя [Ahmed et al., 2020; Genik, 1992; Fairhead, 1986; Liu et al., 2015]. Мощности выделенных комплексов достигают нескольких тысяч метров, причём наибольшей мощностью (до 7000 м) характеризуются отложения мезозоя.

1.3. Строение кристаллического фундамента

Краевые фрагменты щита Туарег слагают массивы Аир и Джадо (см. рис. 1.2). Массив Аир включает в себя докембрийское основание, палеозойский комплекс кольцевых интрузий и область кайнозойского вулканизма. Докембрийский фундамент разделяют на две формации [Schluter, 2008]: гетерогенный метаморфический комплекс и комплекс

гранитоидных интрузий панафриканского возраста. Анорогенный комплекс кольцевых интрузий палеозойского возраста характеризуется разнообразием типов пород. Массив Джадо имеет двухъярусное строение с гранито-гнейсами в основании и нижнепротерозойскими сланцами в верхней части [Schluter, 2008]. Архейский гранито-гнейсовый комплекс перекрыт метаморфизованной терригенной континентальной серией раннепротерозойского возраста.

Нигерийский блок (рис. 1.2), лежащий в Западно-Африканской мобильной зоне, сложен глубоко метаморфизованными породами архея и палеопротерозоя [Schluter, 2008], подвергшимися на стадии панафриканского орогенеза термальной и структурной переработке. Комплексы мезозоя Нигерийского блока, представленные щелочными породами, близки по составу к комплексам массива Аир, что трактуется как результат длительного функционирования мантийных горячих точек [Liégois et al., 2005].

На юго-западе региона (см. рис. 1.2) выходят породы северо-восточной окраины щита Леоман [Hugot, 2004], в пределах которого выделяют архейскую область на северо-западе и область Бауле-Мосси на юго-востоке. Граница между этими областями картируется нечётко в силу последовательного омоложения архейских формаций в процессе эбернской орогении (с возрастом 2000-2200 млн. лет). Породы щита, в пределах нашего региона, сформированы серией крупных вулканогенно-осадочных бассейнов и линейных зеленокаменных поясов палеопротерозойского возраста [Soumaila et al., 2008], разделённых большими полями архейских гранитоидов [Thieblemont et al; 2016].

Ядро массива Тибести слагают метаморфизованные комплексы основных вулканогенно-осадочных пород с возрастом от архея до мезопротерозоя [Schluter, 2008, Thieblemont et al; 2016]. Обрамление пород ядра массива представлено более молодыми слабометаморфизованными породами палеозойского возраста, с интрузиями щелочных пород кислого состава. В верхней части разреза породы массива перекрываются

третичными вулканическими базальтами и андезитами. Предполагается, что массив Тибести сформирован в результате деятельности долгоживущей мантийной горячей точки, порождающей региональный подъем территории и утончение литосферы с проявлением щелочного магматизма [Permenter, 2007].

Массив Джадо имеет двухъярусное строение с гранито-гнейсами в основании и нижнепротерозойскими сланцами, филлитами и кварцитами, смятыми в складки северо-западного простирания в верхней части. На юге (плато Дамагарам) архейский гранито-гнейсовый комплекс несогласно перекрыт слабоскладчатой и метаморфизованной серией Амзара (конгломераты, аркозы, кварциты), сформировавшейся в раннепротерозойской межгорной впадине (рис. 1.2).

Для массива Липтако характерны вулканогенно-осадочные серии нижнего протерозоя, метаморфизованные в фации зелёных сланцев, и большие поля в основном архейских гранитоидов. С метаморфическим фундаментом связаны незначительные рудопроявления золота, лития, меди, молибдена, марганца, свинца, цинка, железа. Верхнепротерозойские и вендские отложения слагают северное окончание Бузем-Атакорской складчатой зоны к югу от Ниамея (песчаники и аргиллиты), складчатую зону Гурма, проходящую вдоль северной окраины массива Липтако (кварциты, сланцы, яшмы, известняки с рудопроявлениями свинца, цинка, железа), и меридиональный прогиб Прош-Тенере к востоку от массива Аир (аркозы, конгломераты).

1.4. Рифтовые структуры Восточного Нигера

Современные крупные осадочные бассейны региона сформированы в процессе реактивации тектонических структур, заложенных на этапе панафриканской орогении. Мали-Нигерская синеклиза, пространственно разделяемая на области бассейнов Тим Мерсои и Иуллеменден, согласно данным [Clermonte et al., 1991] сложена последовательно: ордовикско-

пермскими морскими и континентально терригенными породами, триасово-меловой континентальной толщей, олигоцен-неогеновыми континентальными осадочными сериями. Разрез Чадской синеклизы, в основании которой залегают породы меловой континентальной серии [Guiraud, Maurin, 1992], в целом аналогичен разрезу Мали-Нигерской синеклизы. Северо-западная ветвь Чадской синеклизы – прогиб Тенере (рис. 1.4), выполнена континентальными и морскими отложениями мелового-раннетретичного возраста [Guiraud et al., 1987]. В южной части бассейна Мурзук, расположенного на северо-востоке региона, развиты терригенные континентальные толщи мезозоя и кайнозоя [Davidson et al., 2000].

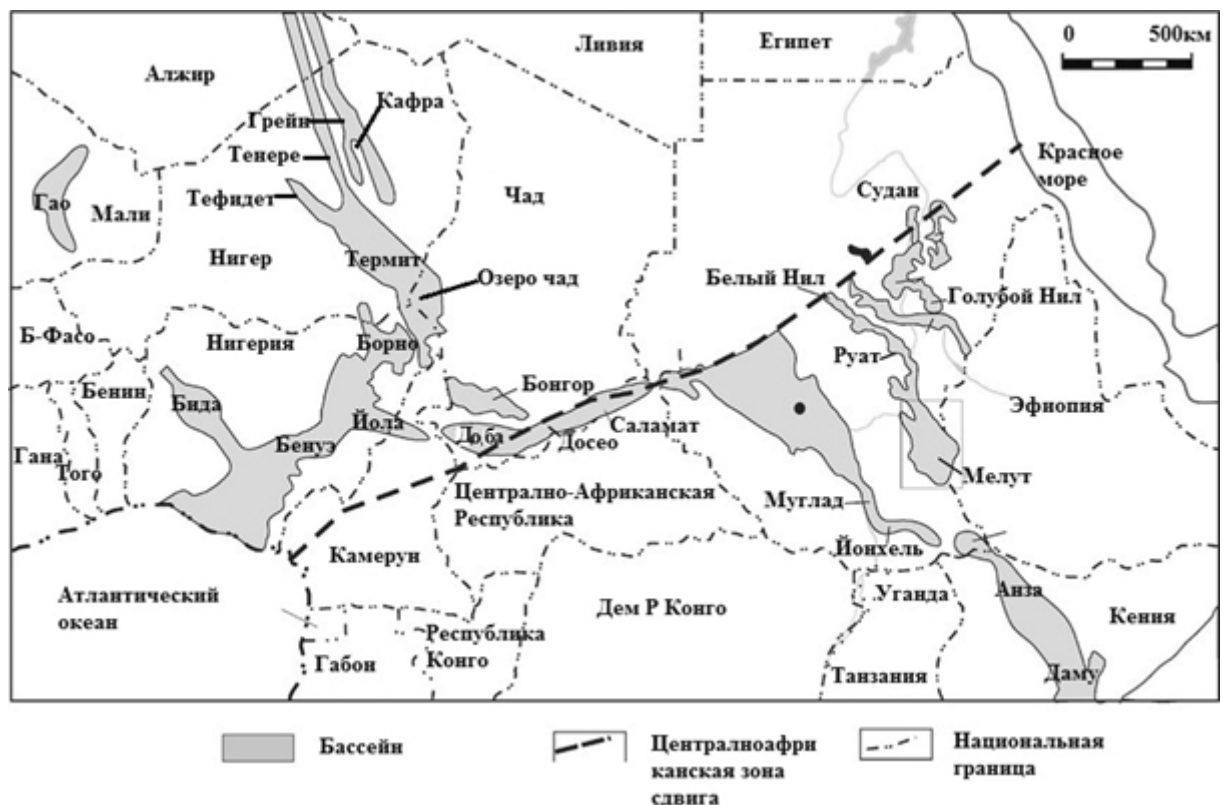


Рис. 1.4. Схема Западно-Африканской и Центрально-Африканской рифтовой системы по [Genik, 1993] и положение Восточно-Нигерской системы грабенов

Мали-Нигерская синеклиза сложена почти полным разрезом ордовикско-пермских (с выпадением верхнего карбона) морских (в нижней части) и континентальных терригенных отложений. Выше залегают

триасово-юрская и меловая континентальные толщи с подчинёнными морскими фациями, которые преобладают в верхнем сеномане - среднем эоцене (песчаники, глины, мергели, известняки). Верхняя континентальная серия имеет олигоцен-неогеновый возраст. Разрез Чадской синеклизы начинается с меловой континентальной серии и в целом аналогичен разрезу Мали-Нигерской синеклизы. В южной части впадины Мурзук (на крайнем северо-востоке) развиты ордовикско-верхнекаменноугольные терригенные отложения (преимущественно морские фации), перекрытые континентальными толщами мезозоя и кайнозоя (рис. 1.2).

Бассейн Восточного Нигера (также известный как бассейн Чада) простирается примерно на 1000 км с севера на юг и 700 км с востока на запад в восточной части Республики Нигер (рис. 1.2 и 1.3) и имеет более чем 14 км осадочного заполнения [Genik, 1992; Harouna et al., 2017]. На западе и северо-западе бассейн ограничен кристаллическими породами фундамента докембрийских массивов Гуре и Аир, на севере - четвертичным массивом Тенере-дю-Тафассассе, а на востоке и северо-западе - мезозойским гранитом Дибелла [Genik, 1992; Harouna et al., 2017]. Бассейн Восточного Нигера представляет сложную структуру, состоящую из нескольких узких субпараллельных грабенов (рис. 1.3 и 1.4). К северу от 17-й параллели находятся грабены Тенере, Грейн, Кафра и Бильма, а к югу грабен Термит с его продолжением в грабене Н'Гуэль-Эджи.

Грабены в восточном Нигере являются частью Западно-Африканской рифтовой системы, которая вместе с Центрально-Африканской рифтовой системой в пределах Чада, Центральноафриканской Республики и Судана образует Западно-Центральноафриканскую рифтовую систему (рис. 1.3 и 1.4) [Fairhead, 1986; Genik, 1993; McNargue et al., 1992; Harouna et al., 2017; Schull, 1988]. Эта рифтовая система простирается от Мали до Кении и развивалась во время распада Гондваны в раннем меловом периоде.

Восточно-Нигерская система грабенов была впервые идентифицирована на основе качественной трактовки отрицательных

гравитационных аномалий [Louis, Rechenmann, 1966; Louis, 1970; Rechenman, 1967; Rechenman, 1969] и впоследствии подтверждена данными сейсморазведки и скважинами. В эту систему входит ряд эшелонированных грабенов (рис. 1.3 и 1.4), охарактеризованных далее. Тефидетский грабен, содержащий нижнемеловые и морские сеномано-туронские кремнисто-глинистые отложения [Faugé, 1966] и простирающийся в длину примерно на 400 км. Грабен Тенере, где скважина Фачи-1 проникла в нижний мел на глубине 3740 м и где эоцен-олигоценые отложения отсутствуют либо из-за эрозии [Zanguina et al., 1998] либо из-за выпадения этих отложений. Кафрский грабен простирающийся более чем на 600 км от алжирско-нигерской границы юго-востоке до Дибеллы и содержащий мелово-третичный осадочный пакет толщиной от 800 до 1000 м, перекрывающий предполагаемый нижнемеловой или пермо-триасовый субстрат. Относительно мелководный грабен Н'Гуэль-Эджи, расположенный к западу от южной оконечности грабена Термит и имеющий около 100 км в длину и 40 км в ширину.

1.5. Геологическая характеристика урановых месторождений

1.5.1. Характеристика месторождений песчаникового типа

По классификации МАГАТЭ все известные крупные месторождения урана в Республике Нигер относятся к песчаниковому типу [Тарханов, Бугриева, 2012; Dahlkamp, 1993]. Месторождения этого типа часто, исходя из их генезиса, называют гидрогенными или инфильтрационными (пластово-инфильтрационными) [Максимова, Шмарнович, 1993]. Наиболее крупные урановые месторождения региона Имурарен, Таза, Мадауэла, Арлит, Акаута, Секирет, Афасто и Азелик [Kinnaird, Nex, 2016] расположены на западных склонах массива Аир (рис. 1.5), представляющего выступ докембрийского фундамента щита Туарег [Liegeois et al., 2005; Schluter, 2008; Thieblemont et al.; 2016]. Эти известные богатые месторождения урана локализованы в палеозойско-мезозойском платформенном прогибе Тим Мерсои и относятся

к песчаниковому типу [Bowell, 2015; Kinnaird, Nex, 2016]. На протяжении полувека на территории Республики Нигер продолжают работы по обнаружению месторождений, однако до настоящего времени геологическое строение региона изучено относительно слабо и весьма неравномерно, что и ограничивает возможности прямой локализации новых перспективных участков на обнаружение месторождений урана.

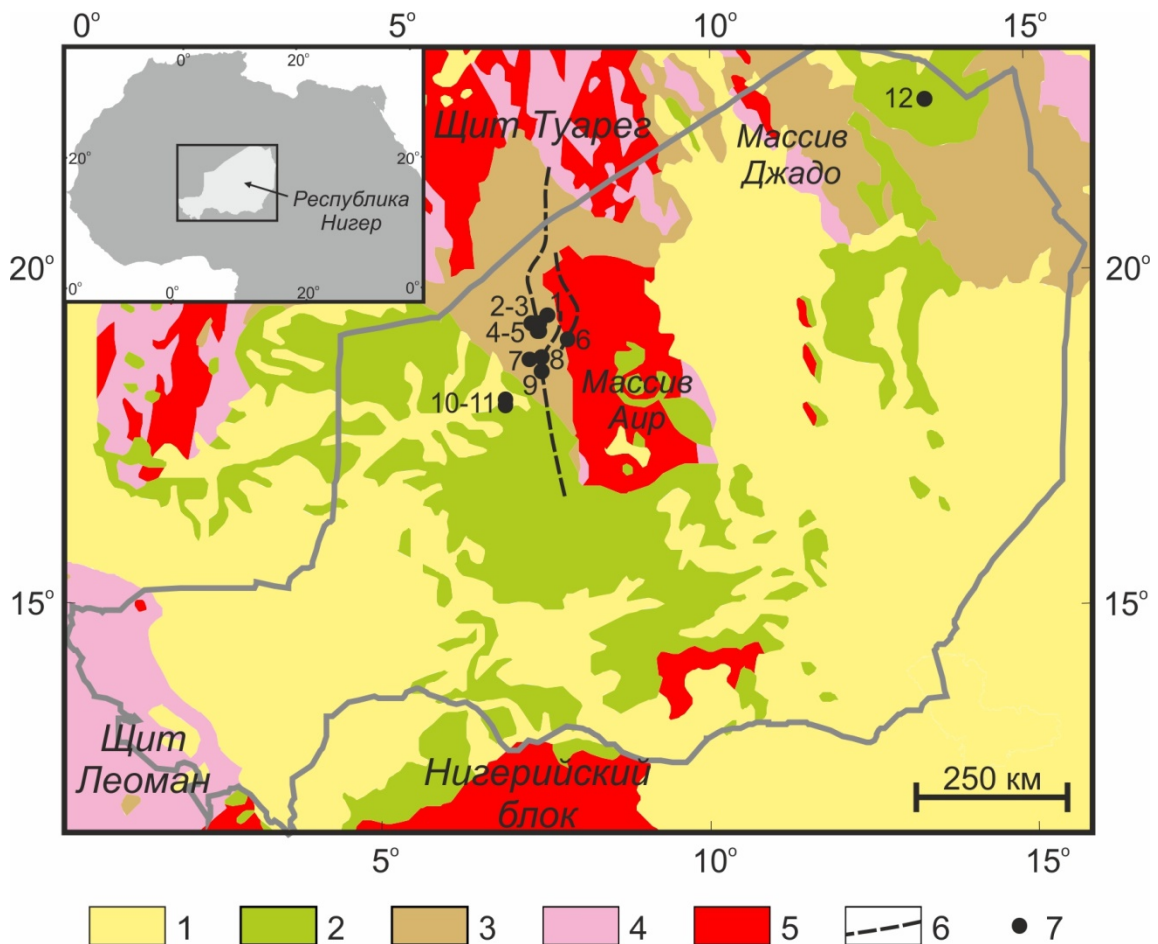


Рис. 1.5. Геологическая схема территории Республики Нигер и прилегающих стран по [Schluter, 2008; Thieblemont et al; 2016], и расположение месторождений урана на территории республики: 1 – кайнозой; 2 – мезозой; 3 – палеозой; 4 – протерозой; 5 – архей; 6 – система разломов Азауа-Арлит; 7 – месторождения урана (1 – Арлит, 2-3 – Таза (Северное и Южное), 4-5 – Акаута (Акаута-1 и Акаута-2), 6 – Мадауэла, 7 – Афасто, 8 – Имурарен, 9 – Секирет, 10-11 – Азелик (Северное и Южное), 12 – Джадо)

В геологическом отношении промышленные инфильтрационные месторождения урана формируются в условиях аридного климата в пределах

крупных осадочных бассейнов, выполненных терригенными континентальными и прибрежно-морскими формациями, толщи которых сложены чередованием водоупорных и водоносных горизонтов [Bowden et al., 1981; Cazoulat, 1985; Jaireth et al., 2008; Pagel, 2005; Rigault, 2010]. В процессе гипергенеза ураносодержащие породы докембрийского гранитоидного комплекса щита Туарег, представленного на территории Республики Нигер массивами Аир и Джадо, формировали кору выветривания, содержащую первичные руды соединений урана окисленного до шестивалентного состояния [Mamadou et al., 2020].

Легкорастворимые шестивалентные соединения урана выносились грунтовыми водами, под действием гидравлического напора, в прилегающие области осадочного бассейна, где на глубине, в условиях щелочной восстановительной обстановки, они восстанавливались до слаборастворимой четырёхвалентной формы, образуя месторождения и рудопроявления [Billon, Patrier, 2019]. Собственно формирование месторождений происходит на геохимических барьерах [Касимов, Воробьев, 2002; Кисляков, Щеточкин, 2000; Bohari et al., 2018], представляющих области резкой смены гидродинамических или физико-химических условий миграции рудоносных грунтовых вод.

В этом процессе важную роль играют крупные разломы [Pagel, 2005], образующие локальные поднятия фундамента, вблизи которых в осадочном комплексе возникают благоприятные условия для формирования рудных полей и отдельных залежей урана. Приуроченность месторождений к синклинорным структурам чехла, ограниченными разломами фундамента субмеридианального и северо-западного простирания отмечается как важный генетический признак всеми исследователями [Тарханов, Бугриева, 2012; Billon, Patrier, 2019; Bohari et al., 2018; Cazoulat, 1985; Pagel, 2005; Sani et al., 2021]. При этом характерной особенностью положения урановых месторождений является их пространственная удалённость от областей выхода гранитоидов докембрийского фундамента на расстояния до

нескольких десятков километров. Горизонтальные размеры линзовидных рудных залежей, например в Ахаггарском рудном поясе, достигают 5-8 км [Тарханов, Бугриева, 2012], при мощности до первых десятков метров и глубинах залегания тел в интервале от дневной поверхности до 500-800 метров [Bowden et al., 1981; Bowell, 2015; Cazoulat, 1985; Croisy, 2013; Kinnaird, Nex, 2016; Pagel, 2005; Rigault, 2010].

1.5.2. Песчаниковые месторождения урана Республики Нигер

Все известные месторождения урана Республики Нигер относятся к Ахаггарскому рудному поясу Мали-Нигерийской провинции, который является одной из крупнейших урановых провинций мира. Общие запасы и ресурсы в ее недрах оцениваются в 450 тыс. тонн урана. Месторождения локализованы в прогибе Тим Мерсои, примыкающем с запада к массиву Аир, представляющему собой крупный выступ докембрийского фундамента (рис. 1.6). Геологическая характеристика района в целом и отдельных его участков даётся по [Тарханов, Бугриева, 2012, 2012; Pagel, 2005; Rigault, 2006].

Массив Аир многократно подвергался тектономагматическим активизациям. В его центре докембрийские сланцы и гнейсы прорваны гранитами дамарского типа (возраст около 600 млн. лет). Наиболее интенсивная активизация магматизма проявилась в верхнем карбоне и с ней связано образование урановой минерализации: сформированные в этот период вулканиты и граниты обогащены ураном. В частности в туфах содержание урана составляет 0,002%. Туфы и граниты легко разрушаются в коре выветривания с выносом этих элементов. Так как массив Аир испытывал периодические воздымания и подвергался эрозии - то он служил источником урана для гидрогенных месторождений.

Собственно бассейн Тим Мерсои, сложен переслаивающимися морскими и континентальными осадками палеозоя, мезозоя и карбона. Тонкозернистые морские отложения многократно сменялись

грубозернистыми прибрежными и континентальными фациями [Pagel, 2005]. В перерывах накапливались мощные грубообломочные дельтовые отложения. Нижний палеозой (кембрий-ордовик) представлен нефтеносными сланцами, девон – песчано-глинистыми морскими отложениями, карбон – элювиальными отложениями, осадками озёр и лагун. В мезозое морские и континентальные песчано-глинистые отложения перемежаются с обогащёнными ураном кислыми вулканитами.

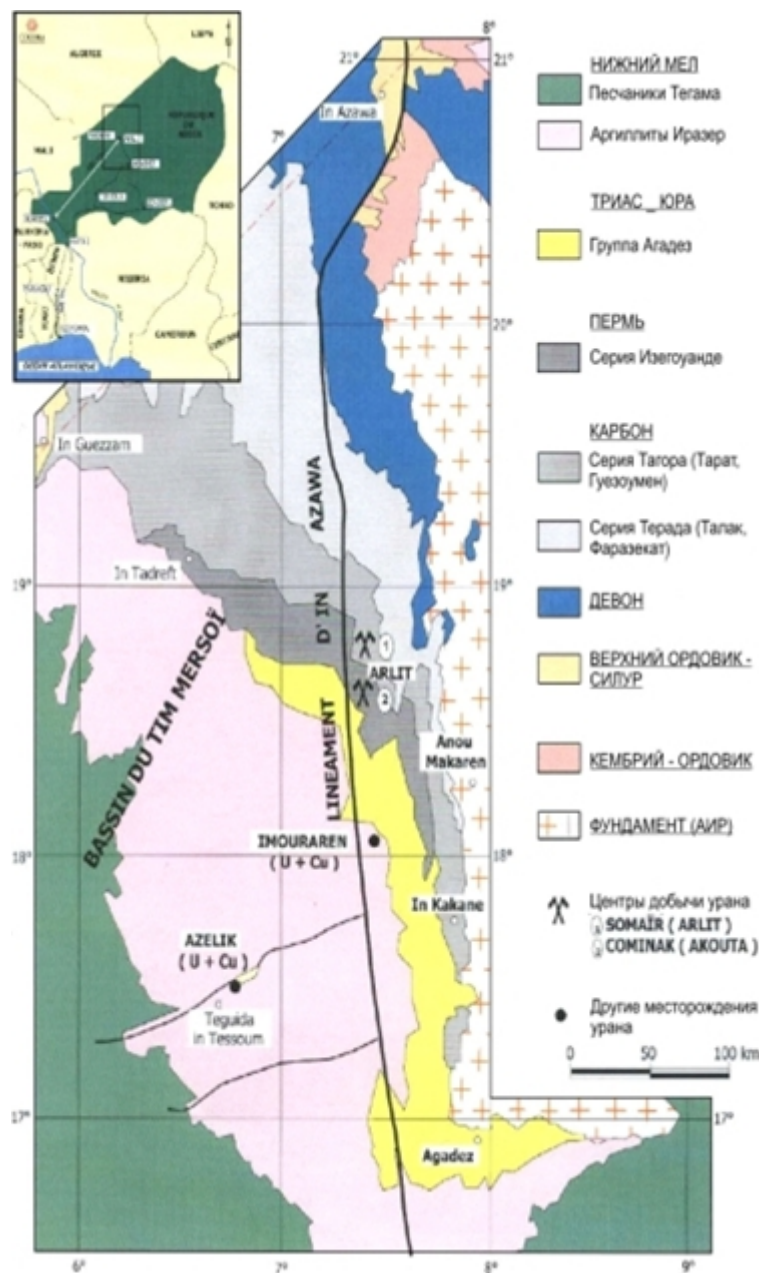


Рис. 1.6. Геологическая карта восточной части бассейна Тим Мерсои на контакте с массивом Аир по [Rigault, 2006]

Ложе осадочного бассейна осложнено горстами и грабенами. Примерно в 50 км к западу от массива Аир проходит меридиональный горст (рис. 1.7), в пределах которого по разломам породы фундамента в виде узкого вала приподняты на несколько сотен метров. Это так называемый линеамент Азауа-Арлит, играющий большую роль в локализации уранового оруденения.

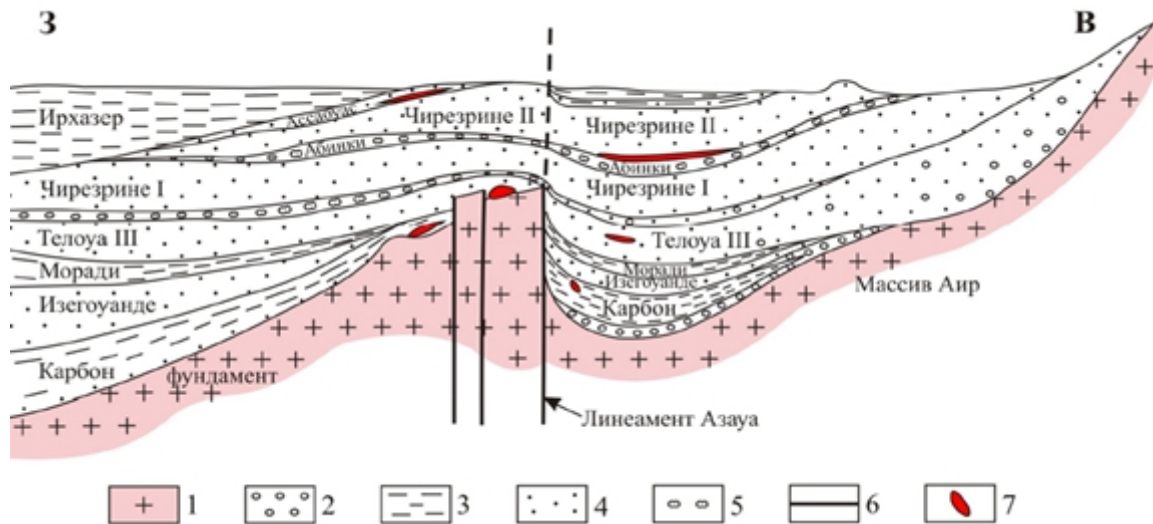


Рис. 1.7. Схематический поперечный разрез бассейна Тим Мерсои и положение урановых месторождений по [Greta, 2008]: 1 – докембрийский фундамент; 2 – конгломераты; 3 – аргиллиты, глинистые сланцы; 4 – песчаники; 5 – органические остатки; 6 – разломы; 7 – месторождения урана

Урановые руды приурочены к горизонтам грубообломочных пород от девона до верхнего мела. Самые крупные месторождения залегают в двух горизонтах нижнего карбона и верхней юры. Самые крупные из них Акаута, Арлит и Имурарен (см. рис. 1.6), расположенные к востоку от линеамента Азауа, приурочены к Ахаггарскому рудному поясу протяжённостью около 100 км и шириной до 10-20 км.

Месторождение Акута [Тарханов, Бугриева, 2012] контролируется впадиной в фундаменте, ограниченной разломами субмеридионального и северо-западного простирания. Самая крупная залежь северного участка приурочена к синклинали с осью северо-восточного простирания. Длина ее 2

км, ширина 0,5 км, мощность от 2 до 14 м. Залежи южного и центрального участков имеют меридиональное простирание и контролируются зоной пластового окисления. Общая протяжённость залежей 2,5 км, ширина извилистых лент ролла от 50 до 300 м. Глубина залегания рудных толщ 235-265 м от дневной поверхности. Рудовмещающими породами служат средне-тонкозернистые песчаники с прослоями аргиллитов, относящиеся к формации Гуезумен нижнего мела (визей), выполняющей дельту палеореки. Промышленные урановые тела пластовой формы, приурочены к отдельным горизонтам песков, разделённым прослоями аргиллитов. Урановые минералы – уранинит, настуран и коффинит – в разных количественных отношениях встречаются в виде тонкой вкрапленности в цементе песчаников и замещают остатки растений.

Месторождение Арлит [Тарханов, Бугриева, 2012] залегает на глубине 35-100 м. Вмещающие породы формации Тарат нижнего карбона (намюр) представлены грубозернистыми песчаниками, переслаивающимися с алевролитами и глинистыми сланцами. Мощность формации от 9 до 55 м. Породы формации Тарат отлагались на эродированной поверхности подстилающих аргиллитов вдоль депрессий, связанных с разломами меридионального, северо-восточного и северо-западного простирания. Пластообразные залежи шириной 600 м и мощностью до 25 м состоят из многоярусных прослоев, приуроченных к грубозернистым горизонтам песчаников, разделённых тонкими слоями и линзами алевролитов. Ролловые формы залежей отсутствуют. Урановая минерализация представлена настураном и коффинитом в равных соотношениях, ассоциирующих с пиритом и марказитом.

Месторождение Имурарен [Тарханов, Бугриева, 2012] расположено в 80 км южнее района Арлит и в 50 км западнее массива Аир. Глубина залегания руд 105–165 м. Размеры месторождения 8 на 5,5 км. Рудные залежи имеют мощность от 7 до 15 м. Вмещающие породы – песчаники юрского возраста формации Чирезерине 2 перекрытые аргиллитами нижнего

мела. Формация Чирезерине 2, представленная аллювиальными и озёрными осадками, заполняет троговую впадину меридионального простирания и ограничена с запада разломом Арлит, с севера – разломом Мадауэла и с юга – разломом Магаги. Руды сложены главным образом минералами шестивалентного урана. Наиболее распространён уранотил, реже встречается коффинит и настуран.

Выводы к главе 1

1. По опубликованным данным кратко рассмотрена геолого-тектоническая позиция структур литосферы Африканского континента и пространственные соотношения границ Западно-Африканского кратона, Восточно-Сахарского мегакратона и разделяющей их Западно-Африканской мобильной зоны. По данным региональных геологических исследований приведена краткая характеристика кристаллических пород фундамента региона.

2. Дана краткая характеристика современных осадочных бассейнов региона, включающая обобщённые данные о мощности осадочных комплексов и литологическую характеристику осадочных пород бассейнов. Отмечено отсутствие сводных структурных карт изопахит осадочных комплексов чехла и не учёт в структурных построениях результатов сейсмических исследований 2D ОГТ в области Восточно-Нигерской системы грабенов.

3. Дана характеристика ряда крупных месторождений урана на территории Республики Нигер, которые относятся к песчаниковому (пластово-инфильтрационному) типу. Рассмотрены основные позиции генезиса такого типа месторождений урана, которые могут быть положены в основу прогнозирования аналогичных месторождений в других частях региона исследований.

Глава 2. Петрофизические свойства пород Республики Нигер

В настоящей главе по опубликованным материалам рассматриваются сведения о физических свойствах кристаллических и осадочных пород региона исследований. Приведено региональное описание плотностных, скоростных, магнитных и электрических свойств пород территории Республики Нигер и прилегающих к ней областей, что необходимо при построении региональных геофизических моделей литосферы. Такое моделирование должно включать начальные представления об объекте, диапазон возможных изменений физических свойств и корреляционные связи между свойствами пород, согласно предложенным в [Glaznev et al., 1989; Минц и др., 2018] технологиям. Более детально рассмотрены физические свойства ураноносных пород, которые лягут в основу формирования оптимального комплекса геофизических поисков урановых месторождений. В целом, сведения о физических свойствах пород являются необходимым условием при выполнении расчётов аномальных геофизических полей и интерпретации геофизических данных, приведённых в последующих главах работы

2.1. Петрофизика кристаллических и осадочных пород

Плотность горных пород. Данные о плотности магматических, метаморфических и метасоматических пород развитых в северной части массива Аир даются по [Кербали, 2000; Li et al., 2018; Muhammad et al., 2018]. Характеристика пород осадочного чехла, рудных и сопутствующих им минералов приведена по [Дортман, 1992; Добрынин и др., 2004].

В таблице 2.1 приведены сводные данные о плотности кристаллических и осадочных пород бассейна Тим Мерсои и массива Аир. Породы кристаллического фундамента в целом незначительно отличаются по плотности от перекрывающих осадочных пород, поскольку среди них преобладают кислые разности. В целом породы чехла и верхней части кристаллического фундамента имеют достаточно типичные значения

плотности, зависящие от основности магматических пород и литологического состава осадков.

Таблица 2.1

Породы	Плотность, кг/м ³	
	Интервал изменения	Средние значения
Гранит	2530 – 2630	2560
Сиенит	2600 – 2630	2620
Гранодиорит	2690 – 2720	2700
Диорит	2790 – 2820	2810
Диабаз	2850 – 2860	2850
Пегматит (жилы в гранитах)	2570 – 2630	2600
Песок	1300 – 2000	1780
Песчаник	2250 – 2670	2460
Алевролит	2620 – 2860	2690
Глина	1200 – 2400	2200
Аргиллит	1700 – 2900	2350
Глинистый сланец	2300 – 3000	2500
Конгломерат	2100 – 3000	–

Магнитные свойства горных пород. Сведения о магнитной восприимчивости пород в пределах северной части массива Аир и пород слагающих фундамент бассейна Тим Мерсои даны по [Кербали, 2000]. Кроме того, магнитные характеристики типичных пород брались из сводок [Дортман, 1992; Дорбынин и др., 2004], что позволило дать приближённую характеристику магнитных свойств кристаллических и осадочных пород региона исследований. Обобщённые результаты о магнитной восприимчивости пород, слагающих бассейн Тим Мерсои, даны в таблице 2.2. Отмечается заметное влияние гидротермального метаморфизма и метасоматоза на первичные свойства пород [Кербали, 2000]. Как правило, магнитная восприимчивость снижается до $0 \div 15 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Заметные изменения магнитной восприимчивости в сторону повышения наблюдаются в зонах тектонических нарушений.

Породы	Магнитная восприимчивость, $\alpha \cdot 10^{-5}$ СИ	
	Интервал изменения	Средние значения
Гранит	0 – 145	45
Сиенит	0 – 50	20
Гранодиорит	1200 – 3100	3000
Диорит	800 – 3400	3200
Габбро	1200 – 8500	8000
Диабаз	–	2500
Пегматит (жилы в гранитах)	20 – 420	35
Туфы	60 – 1250	650
Андезит	5 – 320	30
Песок	0 – 25	2
Песчаник	0 – 1000	200
Алевролит	0 – 300	2500
Глина	0 – 290	100
Аргиллит	10 – 150	60

Электрические свойства горных пород. Результаты изучения удельного сопротивления и поляризуемости горных пород распространённых в бассейне Тим Мерсои приведены в таблице 2.3 по данным [Кербали, 2000; Ерофеев, 1994; Diallo, 2013]. Наиболее высокими значениями удельного электрического сопротивления и низкими значениями поляризуемости характеризуются породы кристаллического фундамента. Исключение составляют кварц-серицитовые сланцы, минимальное удельное сопротивление которых составляет 1500 Ом·м и может быть сопоставимо с сопротивлением плотных песчаников. Их поляризуемость также аномально высока и достигает 10%. Неизменённые породы чехла по поляризуемости дифференцированы слабо. По удельному электрическому сопротивлению дифференциация более значительная. Минимальными значениями параметра характеризуются глины и глинистые сланцы, максимальными – песчаники, аргиллиты и конгломераты.

Таблица 2.3

Породы	Удельное электрическое сопротивление, ρ Ом·м		Поляризуемость, η %	
	Интервал изменения	Средние значения	Интервал изменения	Средние значения
Гранит, гранодиорит	$10^3 - 10^4$	$7 \cdot 10^3$	0,2 – 2,5	0,8
Диабаз	$10^5 - 2 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^5$	0,8 – 4,2	2,4
Пегматит (жилы)	$2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$	-	-	-
Серицитовые сланцы	$1,5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^3$	-	5 – 10	7
Песчаник	100 – 1000	670	0,2 – 2,1	1,2
Алевролит	200 – 900	520	-	-
Аргиллит	50 – 1000	640	-	-
Глина	10 – 100	40	0,1 – 1,7	0,8
Глинистые сланцы	50 – 500	275	0,2 – 2,2	-
Конгломерат	100 – 1000	650	-	-

Упругие свойства горных пород. Данные о скоростных характеристиках горных пород типичных для бассейна Тим Мерсои приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Породы	Скорость продольных волн, V_P км/с		Скорость поперечных волн, V_S км/с	
	Интервал изменения	Средние значения	Интервал изменения	Средние значения
Гранит	5,2 – 6,0	5,7	2,8 – 3,6	2,62
Гранодиорит	5,7 – 6,1	5,9	3,0 – 3,6	2,67
Диабаз	6,2 – 6,8	6,4	2,8 – 4,2	3,02
Серицитовые сланцы	1,95 – 4,74	3,7	-	-
Песчаник	1,8 - 5,6	3,65	0,7-2,1	1,4
Алевролит	0,8 – 5,6	2,4	-	-
Аргиллит	0,9 - 4,5	2,7	-	-
Глина	1,1 – 2,5	1,65	0,1-0,8	0,45
Глинистые сланцы	1,8 - 4,2	3,0	1,3-3,0	2,15
Конгломерат	1,45 - 5,6	3,52	-	-

Породы кристаллического фундамента характеризуются высокими значениями скоростей упругих волн от 5,2 до 6,8 км/с. Только кварц-серицитовые сланцы отличаются более низкими значениями параметра, сопоставимыми с некоторыми осадочными породами. Для пород кристаллического фундамента характерно значительное понижение скорости в пределах зон разломов. Породы осадочного чехла характеризуются более низкими значениями скоростей продольных и поперечных волн. Среди них можно выделить три группы - низкоскоростные (глины), среднескоростные (алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы) и высокоскоростные – песчаники и уплотнённые конгломераты. Для всех осадочных пород характерен широкий диапазон изменения параметров. В первую очередь это вызвано значительным влиянием на упругие свойства пористости и степени обводнённости пород.

2.2. Петрофизика ураноносных пород

Основой для эффективного применения полевых геофизических методов при поисках месторождений урана является дифференциация геологического разреза по физическим свойствам. К сожалению, данных о петрофизических характеристиках пород и руд Республики Нигер, в опубликованной литературе мало [Кербали, 2000; Franconi et al., 2003] и поэтому при описании некоторых параметров использованы справочные данные по сходным ураноносным породам [Дортман, 1992; Ерофеев, 1994].

Плотность пород и руд. Данные о плотности рудоносных пород развитых в северной части ураноносного массива Аир даются по [Кербали, 2000]. В таблице. 2.5 показаны сводные данные, из которых можно заключить, что урановые руды заметно отличаются по плотностным свойствам от вмещающих пород. Однако плотность урановых руд зависит от текстурных особенностей [Кербали, 2000]: наиболее высокие ее значения ($7500 - 10600 \text{ кг/м}^3$) – у массивных руд, и значительно меньшие ($3900 - 5500 \text{ кг/м}^3$) – у прожилково-вкрапленных и вкрапленных руд. Минералы

сопутствующие урановому оруденению в песчаниках, при значительной их концентрации, могут существенно повысить общую плотность породы.

Таблица 2.5

Породы	Плотность, кг/м ³	
	Интервал изменения	Средние значения
Безрудные гидротермально изменённые пиритизированные породы	2670 – 3700	3180
Ураноносные породы (массивные)	6100 – 10600	8350

Магнитные свойства пород и руд. Сведения о магнитной восприимчивости рудных образований, в пределах северной части массива Аир и пород слагающих фундамент бассейна Тим Мерсои приведены по [Кербали, 2000]. Обобщённые результаты магнитной восприимчивости пород и руд, слагающих бассейн Тим Мерсои, даны в таблице 2.6, из которой следует, что руды урановых месторождений на всех изученных объектах Ахаггарского рудного пояса Мали-Нигерийской провинции немагнитны или слабомагнитны ($\chi < 20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ).

Таблица 2.6

Породы	Магнитная воспр., $\chi \cdot 10^{-5}$ СИ	
	Интервал изменения	Средние значения
Безрудные гидротермально изменённые пиритизированные породы	0,3 – 18	4
Ураноносные породы	0 – 15	12

Магнитная восприимчивость рудовмещающих пород варьирует в пределах ($\chi = 0 \div 250 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ) в зависимости от их литологического состава. Если руды залегают на кристаллическом основании, то магнитная восприимчивость подстилающих пород может достигать $8000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Для модели уранового месторождения песчаникового типа следует отметить, что в зоне полного окисления присутствует антиферромагнетик гематит, обеспечивающий слабо повышенную магнитную восприимчивость и высокие

отношения остаточной и индуктивной намагниченностей окисленных пород [Ерофеев, Номоконова, 2009].

Электрические свойства пород и руд. Результаты изучения удельного сопротивления и поляризуемости горных пород распространённых в бассейне Тим Мерсои приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Породы	Удельное электр. сопротивление, ρ Ом·м		Поляризуемость, η %	
	Интервал изменения	Средние значения	Интервал изменения	Средн. знач.
Безрудные гидротермально изменённые пиритизированные породы	50 - 520	180	10 – 22	-
Ураноносные породы пиритизированные	$10^3 - 2 \cdot 10^3$	-	5 – 15	-

Наиболее высокими значениями удельного электрического сопротивления и низкими значениями поляризуемости характеризуются породы кристаллического фундамента. Исключение составляют кварц-серицитовые сланцы, минимальное удельное сопротивление которых составляет 1500 Ом·м. Их поляризуемость также аномально высока и достигает 10%. Неизменённые породы чехла по поляризуемости дифференцированы слабо. По удельному электрическому сопротивлению дифференциация более значительная. Минимальными значениями параметра характеризуются глины и глинистые сланцы, максимальными – песчаники, аргиллиты и конгломераты. Из табл. 2.7 следует, что под влиянием вторичных процессов электрические свойства пород значительно изменяются. Это происходит в основном за счёт сульфидизации рудных зон и околорудных вмещающих пород.

Радиоактивные свойства пород и руд. В таблице 2.8 приведены радиоактивные свойства кристаллических пород фундамента, являющихся

источником урана, и пород осадочного чехла, в котором формировались инфильтрационные месторождения.

Таблица 2.8

Породы	Концентрация радиоактивных элементов		
	Th·10 ⁻⁴ %	U·10 ⁻⁴ %	K ⁴⁰ ·%
Гранит (массив Таурирт)	14	8	4
Гранит (массив Тимисао)	18	7	4
Гранит (массив Абонкор)	15	8	5
Гранит мигматизированный (массив Фарузий)	14	5	2
Гранит (массив Фарузий)	6	2	1,5
Гранит интрузивный неокембрия	20	15	3
Ураноносные породы	-	0,006% - 0,45%	-
Конгломераты	9,0	2,4	-
Песчаники	10,4	2,9	1,2 - 2,1
Алевролиты	10,4	2,9	1,2 - 2,1
Аргиллит	11,5	4,0	2,7
Глинистые сланцы	11,5	4,0	2,7
Глины	11,5	4,0	2,7

Данные о характеристиках пород консолидированной коры относятся к северной части массива Аир - району Хоггар [Franconi et al., 2003], а данные о свойствах более молодых перекрывающих отложений приводятся по [Кербали, 2000; Тураев и др., 2005]. Источником урана при формировании месторождений песчаникового типа являются граниты разного возраста, широко представленные в пределах массива Аир, и зоны гидротермальной переработки и метасоматоза. В частности, повышение радиоактивности наблюдается в зонах альбитизации и калиевого метасоматоза. Аномально высокая радиоактивность пород наблюдается в зонах дробления, что связано не только с увеличением содержания в них урана, но и с эманированием радона, который сильно влияет на результаты аэро-гаммаспектрометрии [Кербали, 2000]. В гранитоидных массивах наблюдается увеличение содержания урана до 0,19 % - 0,4 %, особенно у молодых гранитов, от центра

к периферии и снизу вверх. Радиоактивность разновозрастных пород одинакового состава увеличивается от древних пород к молодым.

Выводы к главе 2

1. В региональном плане охарактеризованы породы кристаллического фундамента региона, которые хорошо дифференцированы по магнитным свойствам, плотности и радиоактивным свойствам. Наиболее резкой петрофизической границей разреза является граница между фундаментом и осадочным чехлом.

2. Преобладающие в геологическом разрезе осадочные образования существенно различаются по плотности, скоростным параметрам и удельному сопротивлению. Глинистые образования характеризуются повышенными содержаниями радиоактивных элементов. Песчаниковые толщи, с которыми пространственно и генетически связаны урановые месторождения бассейна Тим Мерсои, существенно отличаются от подстилающих и перекрывающих отложений по плотности, скорости упругих волн и удельному сопротивлению.

3. Ураноносные породы фиксируются аномально высокими радиоактивными параметрами и плотностью. Области с восстановительным режимом, где происходило формирование руд, из-за их насыщенности сульфидами характеризуются пониженным электрическим сопротивлением и высокой поляризуемостью.

4. Представленная сводка петрофизических материалов по породам и рудам бассейна Тим Мерсои, позволяет на следующем этапе обратиться к созданию региональных моделей коры и собственно моделей месторождений на основе интерпретации комплекса геофизических данных.

Глава 3. Региональные геофизические поля Республики Нигер

Территория Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки относится к областям слабо обеспеченным данными наземных и аэрогеофизических съёмок, нацеленными на региональное изучение земной коры. В этой ситуации важной задачей является формирование синтетических моделей аномальных потенциальных полей, опирающихся на данные региональных наземных съёмок и новые материалы спутниковых измерений гравитационного и магнитного полей. Такого рода синтетические модели региональных полей использовались в дальнейшем при изучении земной коры в условиях неполноты исходной геолого-геофизической информации.

3.1. Гравитационное поле

Наземная региональная съёмка гравитационного поля на территории Республики Нигер впервые была выполнена в середине шестидесятых годов силами французских геофизиков [Rechenmann, 1966; Rechenmann, Louis, 1966] и проводилась по разно-ориентированным пересекающимся профилям с привязкой к системе опорных геодезических и гравиметрических пунктов. Всего было выполнено более 14500 наблюдений с точностью рядовых измерений поля примерно 0,1 мГал. Суммарная ошибка съёмки составляла не более 0,5 мГал, что позволило авторам построить отчётную карту гравитационных аномалий в редукции Буге для изученной территории в масштабе 1:1 000 000 с сечением изолиний в 1 мГал, на которой показаны также значения измерений в точках съёмки. Именно эти картографические материалы были использованы нами для создания цифровой модели аномального гравитационного поля территории Республики Нигер. Привязка данных наблюдений и их оцифровка выполнялась в системе ArcGIS (в координатах проекции гравиметрической карты [Rechenmann, Louis, 1966]),

что позволило в итоге составить сводный каталог точек наблюдений гравитационного поля в реальных географических координатах.

Помимо данных наземных измерений, для всей территории исследований (Республика Нигер и прилегающие страны Западной и Экваториальной Африки) нами использовалась также спутниковая модель гравитационного поля в редукции Буге EGM2008 [Pavlis et al., 2012], синтезированная на уровне рельефа в узлах регулярной пространственной сетки с разрешением $5' \times 5'$. Используемые точки гравитационного поля в редукции Буге, объединяющие результаты наземной съёмки по нерегулярной сети на территории Республики Нигер и спутниковые данные по регулярной географической сети на территории прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки, приведены на рис. 3.1.

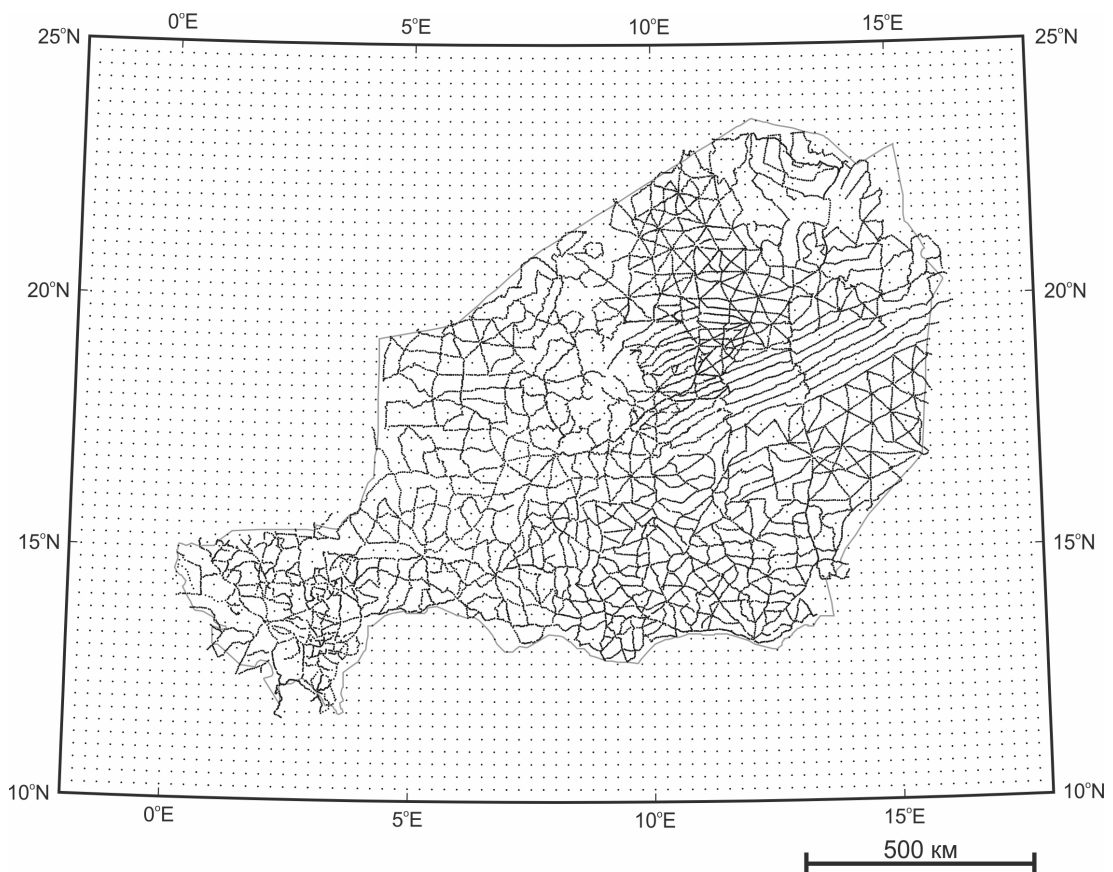


Рис. 3.1. Точки данных в сводной модели гравитационного поля (спутниковые данные EGM2008 здесь показаны на разряженной сетке $15' \times 15'$)

Сопоставление данных модели поля EGM2008 с данными наземных наблюдений выполнялось средствами пространственного анализа в системе ArcGIS только для территории Республики Нигер, где имеется достаточно однородная система наземных точек наблюдений поля. Рассматривались пары точек наземных и спутниковых цифровых моделей поля отстоящих друг от друга на расстояние не более 1 км. Статистика расхождения значений разности полей EGM2008 (Δg_{EGM}) и данных наземной съёмки (Δg_{LD}), приведённая на рис. 3.2, демонстрирует небольшое различие средних уровней полей при общем расхождении для парных точек в диапазоне от -12 до 8 мГал со стандартным отклонением значений поля равным 3,40 мГал. Отметим, что максимальные различия полей пространственно приходятся на локальные области с высокими горизонтальными градиентами поля наземной съёмки, которые в плане совпадают с бортами грабено-образных структур в чехле и кристаллическом фундаменте [Louis, Rechenmann, 1966].

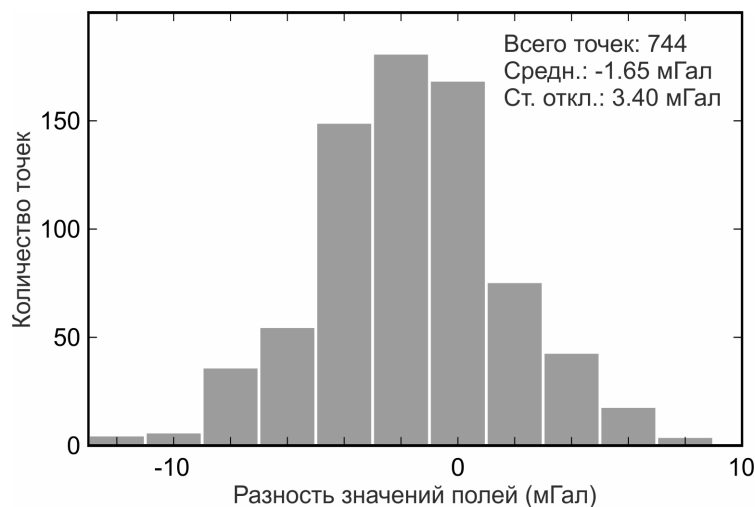


Рис. 3.2. Гистограмма оценки разности значений гравитационного поля в редукции Буге для парных точек: $\Delta g_{EGM} - \Delta g_{LD}$

Таким образом, выявляемые локальные различия в полях во многом объясняются спецификой геологического строения территории и различием детальности пространственного разрешения данных спутниковой и наземной съёмок. В этой ситуации, учитывая, что основным объектом наших

исследований является территория Республики Нигер, наиболее обоснованным представляется использование гравиметрических данных наземных съёмки внутри и поля EGM2008 во внешности этой территории. Такая сводная синтетическая модель гравитационного поля в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя равной 2670 кг/м^3 , точки данных в которой показаны на рис. 3.1, послужила далее основой при решении задач регионального гравиметрического моделирования изучаемой территории.

Построение цифровой модели гравитационного поля в редукции Буге выполнялось по сводной синтетической модели объединения съёмки для регулярной сети с пространственным разрешением в 5 км. На стадии интерполяции сводных материалов съёмки в указанную регулярную плановую сетку, используемую в последующем гравиметрическом моделировании, применялось гармоническое усреднение данных [Глазнев, 2003] в относительно узкой буферной зоне сопряжения съёмки, так чтобы на границах области с разной представительностью данных не возникало резких градиентных скачков поля.

На рис. 3.3 показана схема аномалий гравитационного поля для территории Республика Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки, построенная с применением сглаживания данных. В целом приведённая схема демонстрирует известные закономерности в распределении гравитационных аномалий изучаемой территории [Rechenmann, 1966]. Наиболее высокие значения гравитационного поля характерны для области Западно-Африканского кратона и щита Леоман, где выявлены характерные линейные аномалии в целом субмеридианального простирания. Архейско-протерозойские комплексы фундамента Нигерийского блока отмечаются примерно изометричными слабо отрицательными гравитационными аномалиями. Западно-Африканская мобильная зона характеризуется отрицательными или слабоположительными аномалиями, ориентированными преимущественно в субмеридиональном направлении.

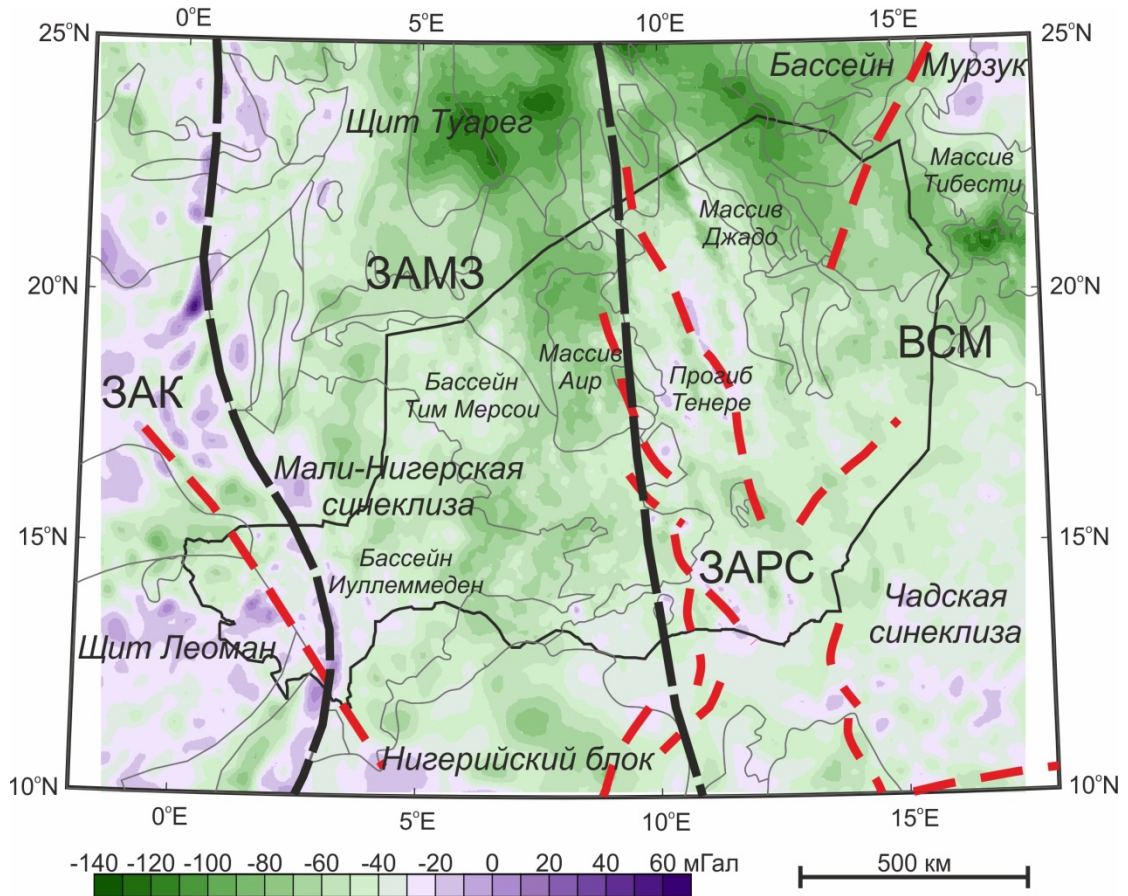


Рис. 3.3. Схема аномалий гравитационного поля в редукции Буге (плотность промежуточного слоя 2670 кг/м^3) для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки. Геологические границы и тектонические блоки см. рис. 1.2

Кристаллические породы архейско-протерозойского фундамента в пределах Западно-Африканской мобильной зоны (щит Туарег, массивы Аир, Джадо, Тибести) выделяются минимальными значениями аномалий гравитационного поля (до $-100 \div -140$ мГал). Изометричная форма этих аномалий в плане примерно соответствует положению указанных массивов на дневной поверхности. Область Восточно-Сахарского мегакратона и территория Чадской синеклизы характеризуются слабоположительными и слабоотрицательными изометричными аномалий гравитационного поля в диапазоне $-40 \div +20$ мГал. В области Западно-Африканской рифтовой системы амплитуды аномалий примерно такие же, а их субмеридиональная ориентировка подчёркивает пространственное положение собственно

системы грабенов, выраженных в чехле и кристаллическом фундаменте (см. рис. 1.3).

3.2. Магнитное поле

На территории Республики Нигер отсутствуют планомерные обобщённые данные по изучению аномального магнитного поля и только в отдельных районах страны имеются детальные карты магнитных аномалий по данным аэромагнитной съёмки [Billon, 2014], реализующие локальные поисковые и разведочные задачи рудной геофизики. Этих данных совершенно недостаточно для построения сводной карты магнитных аномалий в региональном масштабе для всей территории Республики Нигер. Отметим, что достаточно хорошо обеспечена аэромагнитными съёмками территория южной части Алжира, для которой составлена сводная карта аномалий магнитного поля [Vournas et al., 2003; Vournas et al., 2004]. Кроме того, региональные магнитные съёмки частично выполнялись в ряде районов Буркина Фасо, Бенина и Нигерии [Amara et al., 2017; Guiraud et al., 1989; Oha et al., 2016; Vournas et al., 2016], граничащих с Республикой Нигер с востока и юга.

В силу отсутствия обобщённых данных о региональном магнитном поле территории исследований для характеристики магнитного поля Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки нами были использованы данные цифровой модели аномального магнитного поля Земли EMAG2 [Maus et al., 2009; Meyer et al., 2016; 2017]. Эта модель поля, сформированная по материалам спутниковых и наземных съёмок, синтезирована на высоте 4 км над уровнем геоида, в узлах регулярной пространственной сетки с разрешением $2' \times 2'$. Сводная модель магнитных аномалий на территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки, показанная на рис. 3.4, демонстрирует значительные области с отсутствием исходных данных. Тем не менее,

приведённая схема даёт некоторую общую характеристику магнитного поля изучаемой территории.

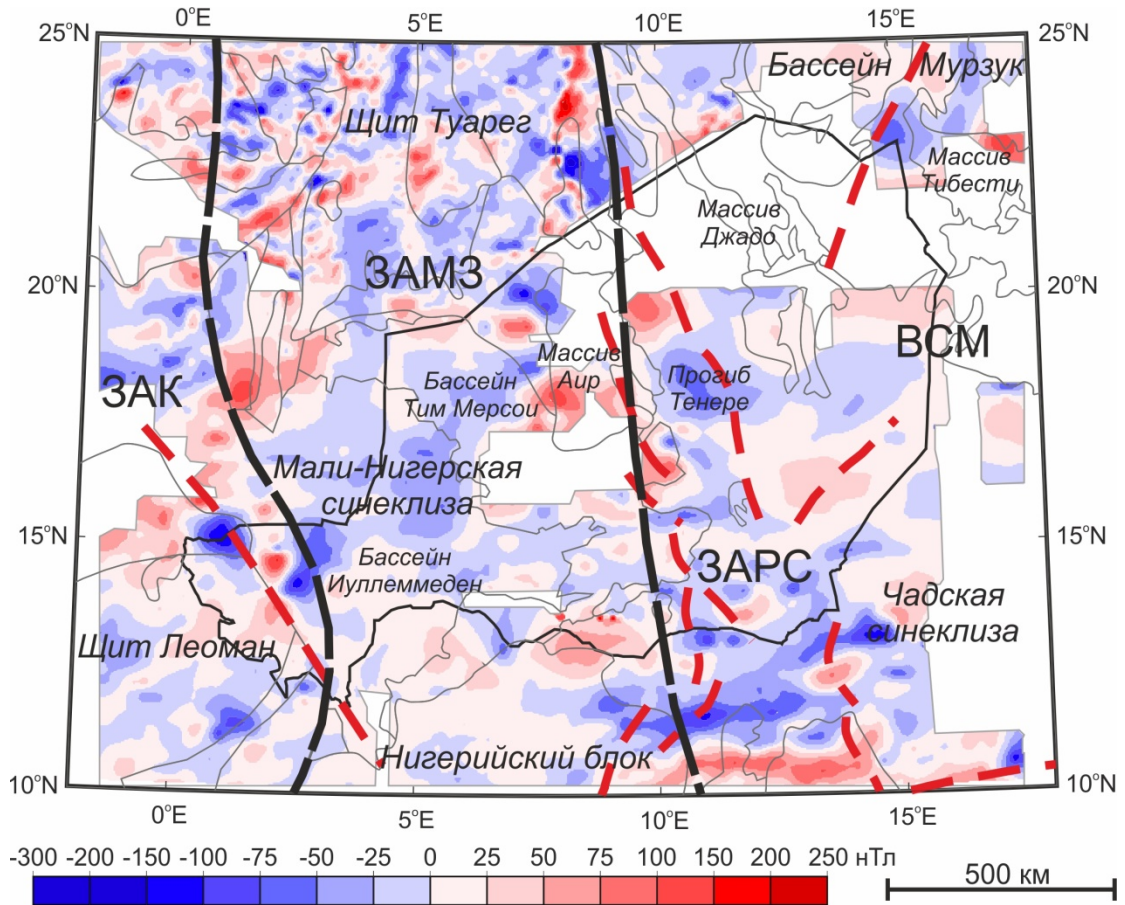


Рис. 3.4. Схема аномалий магнитного поля для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки. Геологические границы и тектонические блоки см. рис. 1.2

В области Западно-Африканского кратона и щита Леоман отмечаются характерные линейные положительные и отрицательные магнитные аномалии в целом субмеридианального простирания. Пространственное положение этих аномалий достаточно хорошо коррелируется с гравиметрическими аномалиями в этой области (см. рис. 3.3). Архейско-протерозойские комплексы фундамента Нигерийского блока отмечаются изометричными слабоположительными магнитными аномалиями – в западной части блока, и линейными субширотными положительными и отрицательными аномалиями в восточной части блока. В этой части

Нигерийского блока отсутствует пространственная корреляция магнитных аномалий с аномалиями гравитационного поля.

Западно-Африканская мобильная зона характеризуется крупными изометричными положительными аномалиями магнитного поля, пространственно приуроченными к области Мали-Нигерской синеклизы. Кристаллические породы архейско-протерозойского фундамента в пределах щита Туарег отмечаются интенсивными изометричными и локальными магнитными аномалиями различной ориентировки. Отметим, что здесь размеры аномалий в плане существенно меньше чем в других областях изучаемой территории, что говорит, во-первых, о большей детальности материалов магнитных съёмок и, во-вторых, о меньшей глубине залегания источников магнитного поля. Положительные магнитные аномалии, приуроченные к массивам Аир и Тибести, выявлены только частично в силу отсутствия первичных данных о поле. В целом форма указанных магнитных аномалий примерно соответствует положению массивов Аир и Тибести на дневной поверхности.

В области Западно-Африканской рифтовой системы просматривается система примерно изометричных и, отчасти линейных, аномалий разного знака в целом ориентированная в субмеридиональном направлении. Эта цепочка аномалий пространственно соответствует положению системы грабенов, выраженных в чехле и кристаллическом фундаменте (см. рис. 1.3). Область Восточно-Сахарского мегакратона на территории Чадской синеклизы характеризуется крупными региональными изометричными аномалиями магнитного поля, что говорит о достаточно большой глубине залегания аномалиеобразующих объектов в этом районе.

Выводы к главе 3

1. Построена сводная цифровая синтетическая модель гравитационного поля в редукции Буге, объединяющая данные спутниковой и наземной съёмок для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и

Экваториальной Африки. Приведён качественный анализ гравитационных аномалий по территории исследований. Сформированная цифровая модель аномалий гравитационного поля служит основой при решении задач регионального гравиметрического моделирования изучаемой территории.

2. Охарактеризовано аномальное магнитное поле (модель EMAG2) территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки. Выявлены некоторые общие морфологические черты пространственной корреляции магнитных и гравитационных аномалий на изучаемой территории.

3. Материалы цифровых моделей поля, синтезированные в регулярную сетку, служат основой для расчётов производных гравитационного и магнитного полей, использованных далее при построении структурно тектонических схем региона и региональном прогнозировании урановой минерализации на территории Республики Нигер.

Глава 4. Плотностная модель земной коры Республики Нигер

Создание комплексных моделей глубинного строения земной коры крупных континентальных регионов традиционно выполняется на основе совместной интерпретации сейсмических, гравиметрических и геотермических данных, что позволяет получать достаточно надёжные геолого-геофизические результаты. Эффективные примеры таких интерпретационных построений, известные для различных регионов мира [Glaznev et al., 1996; Motavalli-Anbaran et al., 2016 и др.], демонстрируют возможности построения геологических моделей крупных континентальных литосферных блоков на основе решения обратных задач геофизики. В основу таких построений положены, как правило, достоверные результаты геофизических данных и сводные материалы о петрофизических свойствах пород изучаемого региона, для совокупности которых можно сформулировать итерационное решение комплексной обратной задачи в общей постановке [Глазнев, 2003; Буянов и др., 1989; Glaznev et al., 1989].

Однако такие идеальные позиции на практике реализуются не всегда, поскольку для многих регионов мира отсутствуют детальные сейсмические материалы о строении земной коры, а полнота описания гравиметрических и геотермических данных характеризуется редкой сетью полевых наблюдений. В этих условиях, при создании моделей строения коры крупных регионов, следует максимально использовать методы стохастических оценок глубинных характеристик изучаемой среды [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2014], а также глобальные спутниковые данные о геофизических полях [Pavlis et al., 2012] и обобщённые планетарные модели строения литосферы Земли [Mooney et al., 1998; Pasyanos et al., 2014]. Для территории исследований привлечение указанных выше обобщённых данных и стохастических подходов является вполне уместным при изучении строения коры в условиях неполноты исходной геолого-геофизической информации.

Основной геологической задачей плотностного моделирования является создание геолого-геофизической модели земной коры территории

Республики Нигер и прилегающих регионов. Итоговые плотностные интерпретационные данные в дальнейшем послужат исходной моделью при детальном изучении геологического строения верхней части земной коры и выявления связей ее геологического строения с размещением основных видов полезных ископаемых. При этом геологическая трактовка результатов моделирования должна базироваться на концептуальных геологических моделях коры и опираться на известные методы [Mitrofanov et al., 1998; Минц и др., 2017] геолого-геофизического анализа данных.

4.1. Мощности земной коры

На территории Республики Нигер до настоящего времени не выполнялись сейсмические зондирования земной коры с контролируемыми источниками и поэтому все оценки мощности земной коры и литосферы получены в результате интерпретации региональных сейсмических данных методами сейсмотомографии и анализа функции приёмника [Jessel et al., 2016; Globig et al., 2016]. Указанные методы опираются на априорные данные и ограничения для планетарных скоростных моделей Земли [Mooney et al., 1998; Laske et al., 2013; Nataf, Ricard, 1996; Bassin et al., 2000] и поэтому результаты сейсмических построений отражают различие исходных моделей среды и степень их пространственного разрешения, составляющую от 2° до 5° дуги большого круга. Томографические скоростные модели, построенные по данным о дисперсии поверхностных волн [Pasyanos, Nyblade, 2007], также опираются на стартовую модель LITHO1.0 [Pasyanos et al., 2014] с пространственной разрешимостью 1°.

Положение глубины границы подошвы земной коры для территории Республики Нигер определялось и по гравиметрическим данным [Bagherbandi, Sjöberg, 2012; Raguzzoni et al., 2013]. Такие оценки мощности земной коры базируются на согласовании обобщённых сейсмологических моделей литосферы с данными спутниковых гравитационных аномалий в редукции Буге. Пространственная разрешимость построений соответствует

исходным моделям, то есть не превышает $(1-2)^\circ$. Ещё один подход к построению глубины Мохо основан на использовании деконволюции Эйлера [Thompson, 1982] для интерпретации региональных гравитационных аномалий [Tedla et al., 2011]. И хотя в этом исследовании заявлено пространственное разрешение в $0,25^\circ$, достоверность полученных величин мощности коры остаётся под вопросом, что отмечается в [Reid et al., 2012]. Следует отметить, что выполненное в [Jessel et al., 2016] сравнение приведённых выше моделей литосферы по всей территории Западной Африки демонстрирует значительные различия в результатах оценки мощности земной коры в районах, не обеспеченных сейсмическими данными, к которым и относится территория Республики Нигер. Здесь различия в глубине положения границы Мохо, построенной в рамках разных методов и моделей исходных данных, достигают 20-25 км.

Таким образом, представляется необходимым выполнить ревизию данных по глубине залегания границы Мохо, используя иные технологии интерпретации, в частности, стохастическое оценивание параметров слоя со случайным распределением источников гравитационного поля [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2014; Глазнев и др., 1978] с последующей оценкой гравитационного влияния границы Мохо на наблюдаемое поле. (см. рис. 3.3) нашего региона.

4.1.1. Методика стохастической оценки мощности коры

В трёхмерном случае, для произвольного случайного изотропного распределения сингулярных некоррелированных плотностных источников в горизонтальном слое [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 1978], получено выражение нормированной автокорреляционной функции случайного гравитационного поля, порождаемой такой моделью. Указанное выражение имеет вид:

$$B_N(\tau, h, H) = \frac{2hH}{H-h} \left(\frac{1}{\sqrt{4h^2 + \tau^2}} - \frac{1}{\sqrt{4H^2 + \tau^2}} \right), \quad (4.1)$$

где h и H – глубина до верхней и нижней границы слоя, а τ - аргумент корреляционной для среднего на окружности значения гравитационного поля.

Определение параметров модельного слоя h и H , основано на использовании критерия минимума невязки (по норме в L_1) между наблюдаемой и теоретической нормированной автокорреляционной функцией гравитационного поля [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2014]. Величина невязки $\delta(h, H)$ даётся выражением:

$$\delta(h, H) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |B_N^{obs}(\tau_m) - B_N^{mod}(\tau_m, h, H)|, \quad (4.2)$$

где B_N^{obs} обозначает наблюдаемую, а B_N^{mod} – теоретическую (модельную) автокорреляционную функцию. Число точек M , используемых для вычисления, должно лежать в интервале радиуса корреляции наблюдаемого поля [Глазнев, 2003]. Отметим, что совместное определение h и H по критерию (4.2) является неустойчивым в силу принципа эквивалентности, но решение задачи можно стабилизировать, используя оценку глубины до верхней границы слоя h и выполняя подбор только по параметру H .

Использование стохастической оценки мощности земной коры, основано на вычислении в скользящем окне размером 300 на 300 км двухмерной автокорреляционной функции наблюдаемого гравитационного поля, интерполированного в правильную регулярную сеть с шагом 5 на 5 км. Пример таких построений для одного участка сводной карты поля приведён на рис. 4.1, где показана вычисленная нормированная автокорреляционная функция поля и собственно оценка мощности земной коры по критерию (4.2). Разумеется, полученные результаты стохастической интерпретации следует рассматривать как приближённую оценку глубин верхней и нижней границ в рамках принятой модели.

По предложенной методике было обработано гравитационное поле территории исследований в скользящем окне расчётов (сдвиг положения скользящего окна составлял половину его ширины). При относительно изотропном распределении поля вычисление усреднённой на окружности

автокорреляционной функции, или одномерной проекции этой функции по направлению с минимальным радиусом корреляции, позволило получить оценки глубины границы Мохо в рамках принятой модели (4.1). Полученные новые данные использовались для создания сводной цифровой модели мощности земной коры и положения границы Мохо региона.

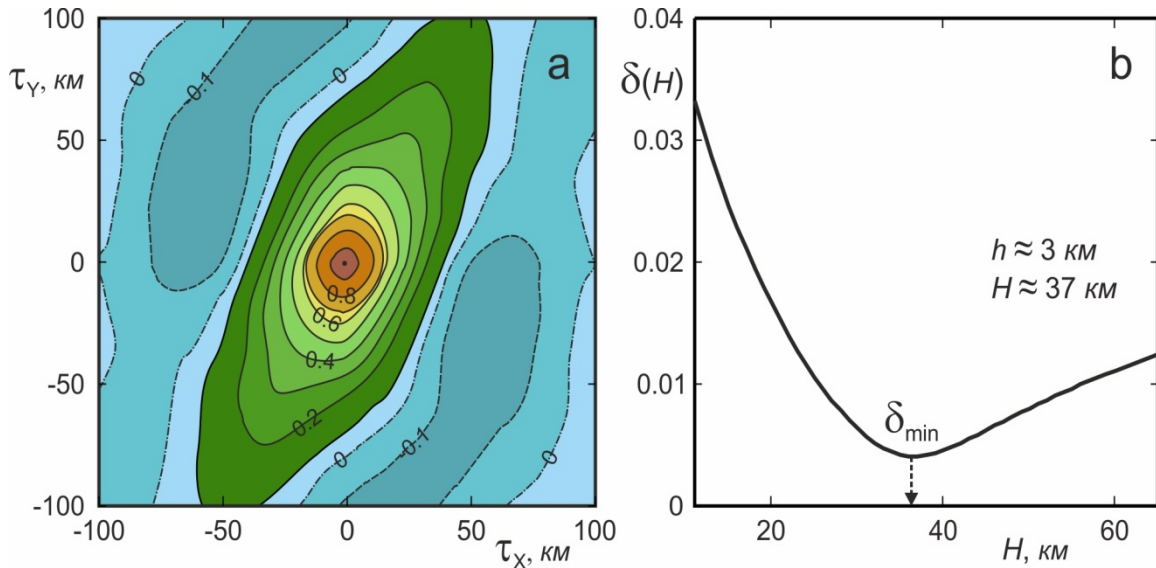


Рис. 4.1. Пример стохастической оценки мощности земной коры: а) двумерная нормированная автокорреляционная функция гравитационного поля, рассчитанная в скользящем окне; б) вид сечения функционала невязки $\delta(H)$, позволяющий оценить глубину нижней границы слоя – H , при заданной величине его верхней границы h

4.1.2. Результаты оценки мощности коры

Результаты стохастической интерпретации гравитационного поля представлены в виде карты мощности земной коры для всей территории исследований и её обрамления [Yacouba, 2021]. Поскольку наши данные являются некоторой оценкой мощности земной коры, то построение изолиний глубин выполнялось с сечением равным 2 км. Итоговая схема мощности коры по данным стохастической интерпретации гравитационных аномалий приведена на рис. 4.2 только в пределах изучаемой территории (см. рис 1.2).

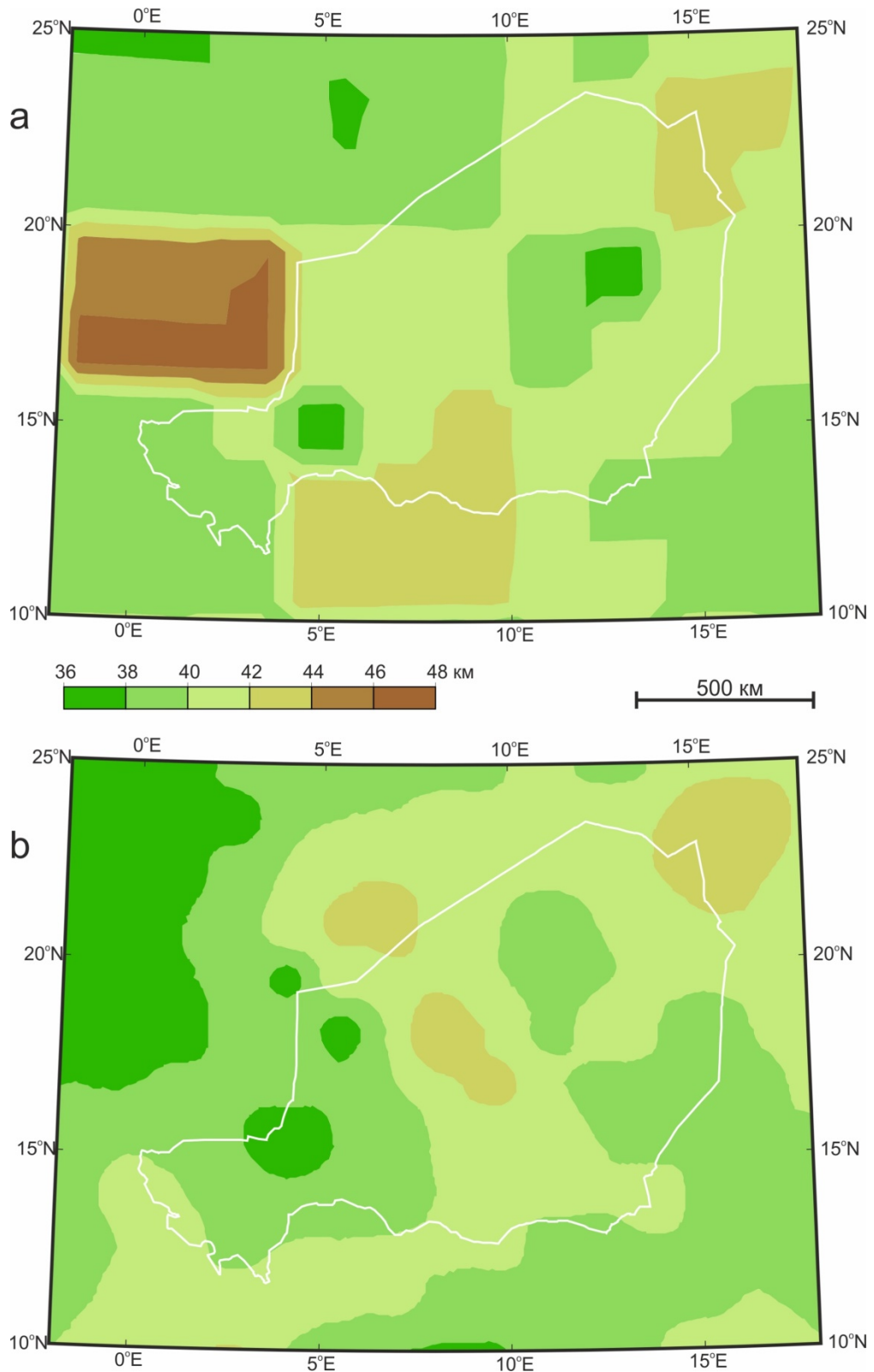


Рис. 4.2. Мощность земной коры: а) модель CRUST1 [Laske et al., 2013]; б) данные по результатам стохастической интерпретации гравитационного поля [Уасоуба, 2021]. Схемы приведены в единой цветовой шкале.

Предложенная схема, сопоставленная с данными о мощности земной коры для модели CRUST1 [Laske et al., 2013], демонстрирует значительные различия показанных моделей, особенно в восточной части региона исследований. Отметим, что пределах территории модель CRUST1 характеризуется наличием крупных элементов исходной сетки данных, унаследованных от первичного набора CRUST1 [Mooney et al., 1998], то есть модель CRUST1 практически не повышает детализации строения коры по сравнению с первичной моделью CRUST5. На эту специфику модели CRUST1 ранее обращалось внимание в [Jessell et al., 2016].

Анализ различий приведённых моделей мощности коры, был выполнен только в тех точках, где имелась стохастическая оценка мощности по изложенной выше методике (всего использовано 70 точек данных в пределах нашей территории). Для корректного сравнения результатов мощность коры модели CRUST1 интерполировалось в точки, с известными стохастическими оценками. Статистика расхождения значений мощности земной коры по нашей методике и интерполированных данных модели CRUST1, приведенная на рис. 4.3, демонстрирует незначительное различие средних величин мощности при общем расхождении моделей в диапазоне от -5 до 9 км со стандартным отклонением равным 3,04 км. При этом, экстремальные

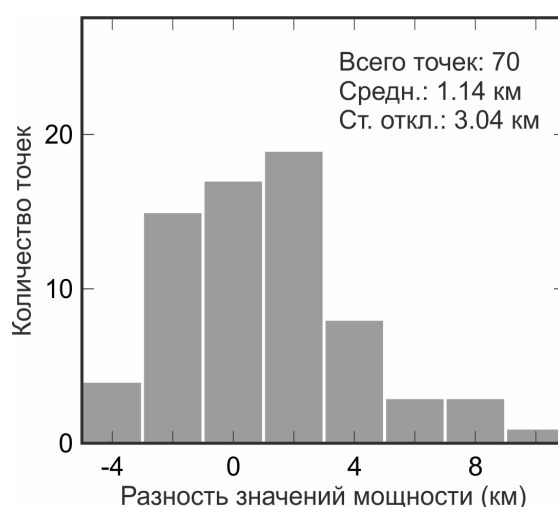


Рис. 4.3. Гистограмма разности значений мощности земной коры по стохастической методике и модели CRUST1

различия мощности коры пространственно приходится на изометричную область с максимальной мощностью для модели CRUST1. Для остальных же частей расхождения моделей лежат в диапазоне стандартного отклонения разности мощностей.

Отметим, что по величинам значений мощности и общей морфологии границы раздела кора-мантия, предложенная модель в целом хорошо сходится с результатами моделирования [Reguzzoni et al., 2013], полученными с предельным пространственным разрешением $0,5^\circ$ на основе согласования модели коры CRUST2 и спутниковых гравитационных аномалий в редукции Буге (модель GOCE). Для высокоточной модели коры LITHO1.0 [Pasyanos et al., 2014], пространственное разрешение которой достигает $0,16^\circ$, следует отметить, что по морфологии границы раздела кора-мантия эта модель подобна нашей, но характеризуется постоянным увеличением мощности на 5-7 км.

Поскольку при построении указанных моделей использовались принципы изостатической компенсации гравитационного поля, целесообразно проанализировать этот аспект и для нашей модели. В качестве данных о высотах рельефа использовалась модель ETOPO1 [Amante, Eakins, 2009], синтезированная для всей территории исследований в узлах регулярной пространственной стеки с разрешением $1' \times 1'$. Анализ связи выполнялся для точек с полученными значениями оценок мощности земной коры и усреднённых в радиальной буферной зоне (радиусом 50 км вокруг каждой из точек) величин рельефа модели ETOPO1. Диаграмма связи значений мощности земной коры и усреднённых высот рельефа региона, показанная на рис. 4.4, демонстрирует характер корреляции параметров, образующих некоторую тенденцию связи между переменными. Линейное уравнение регрессии, приведённое на диаграмме вместе со значением достоверности аппроксимации, описывает соотношение между рассмотренными величинами. Таким образом, выявленная статистическая связь между мощностью коры и усреднёнными величинами высот рельефа

позволяет сделать вывод о частичной изостатической компенсации для крупных блоков коры, являющейся следствием геодинамической эволюции литосферы региона на самом последнем этапе ее развития [Liégeois et al., 2005].

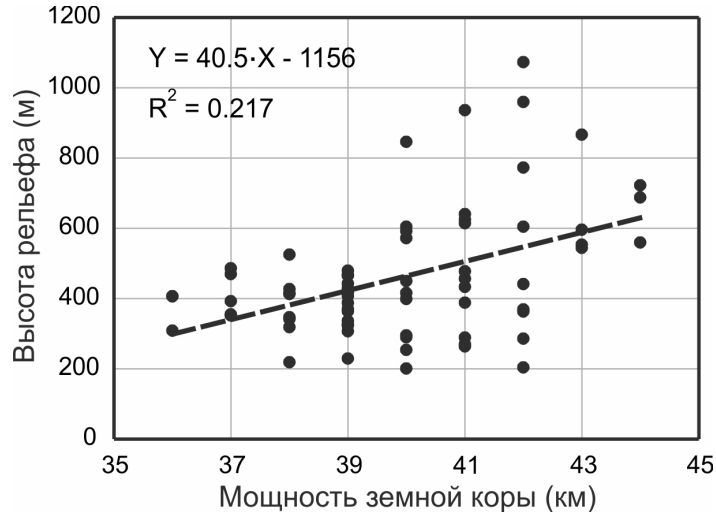


Рис. 4.4. Корреляция высот рельефа и мощности земной коры (показано уравнение линейной регрессии $Y(X)$ и значение величины достоверности аппроксимации R^2)

Ещё одним аспектом нашей модели является возможный характер отражения геодинамических процессов в глубинном положении границы раздела кора-мантия. Такого рода качественный анализ позволяет связывать особенности проявления геодинамики литосферы региона с поведением крупных геофизических неоднородностей [см. Глазнев В.Н и др. 2016; Минц и др., 2017; Glaznev et al., 2015; Jessell et al., 2016; Mitrofanov et al., 1998]. Сопоставление региональной геолого-тектонической схемы территории Республики Нигер (см. рис. 1) и наших данных о мощности земной коры, показанных на рис. 4.5, позволяет наметить некоторые особенности литосферы региона исследований сформулированные ниже.

Восточная граница Западно-Африканского кратона отождествляется с плавным «локальным» изменением мощности земной коры от 40-42 км до 36-38 км, что отличается от выводов [Pasyanos et al., 2014; Jessell et al., 2016; Globig et al., 2016] о повсеместном увеличении мощности коры под кратоном

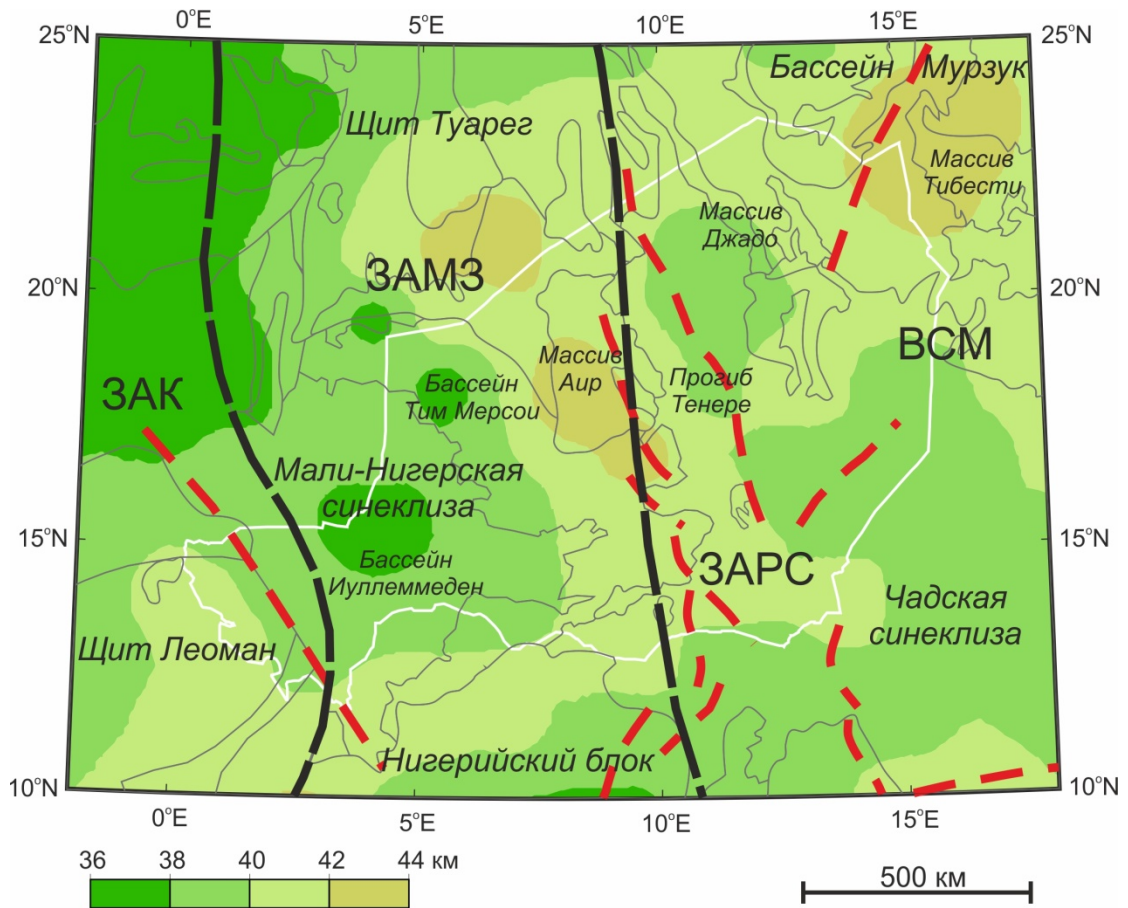


Рис. 4.5. Сопоставление геолого-структурной схемы и данных о мощности земной коры. Геологические границы и тектонические блоки см. рис 1.2

до значений 40-45 км и даже более. Западная граница Восточно-Сахарского мегакратона почти не проявляется в характеристиках мощности земной коры нашего региона, что соответствует и данным из [Globig et al., 2016]. Тем не менее, меридиональная ориентировка структуры Западно-Африканской мобильной зоны, разделяющей эти литосферные кратоны, выражена в аналогичной ориентировке системы «локальных» поднятий и прогибов земной коры вдоль мобильной зоны. То есть в пределах изучаемой территории область ЗАМЗ характеризуется как зона максимальных горизонтальных градиентов мощности земной коры, а предположение о тенденции повсеместного утоньшения земной коры в этой зоне до 35 км [Pasyanos et al., 2014; Globig et al., 2016] – верно лишь отчасти.

Граница раздела кора-мантия под архейскими и палеопротерозойскими щитами, представленными в регионе исследований щитами Туарег, Леоман и

Нигерийским блоком, в нашей модели характеризуется с различной степенью пространственного охвата и детальности. Для щита Туарег, вместе с крупными его фрагментами массивами Аир и Джадо, отмечается общая тенденция некоторого «локального» повышения мощности земной коры по сравнению с прилегающими блоками, что в целом совпадает с результатами построений [Globig et al., 2016; Reguzzoni et al., 2013]. Массив Тибести, ядро которого имеет архейский возраст, выделяется как изометричная область повышенной мощности земной коры до 44 км. Механизм становления указанных массивов на последнем этапе их эволюции, обусловленный магматическим подслаиванием коры [Permenter, Oppenheimer, 2007;], вполне отвечает нашим данным о суммарной мощности коры, понимаемой как латерально-неоднородная область в самой верхней части литосферы. Относительно мощности земной коры щита Леоман и Нигерийского блока выводы можно сделать только для краевых частей этих объектов, где по нашим оценкам мощность земной коры принимает среднее значение в 38-42 км. Указанные значения мощности совпадают с оценками [Reguzzoni et al., 2013], но отличаются от данных [Laske et al., 2013], где мощность коры предполагается на уровне 44-48 км.

Мали-Нигерская синеклиза в наших данных проявляется как область с несколько пониженной мощностью земной коры до 38-40 км, на фоне которой существуют «локальные» зоны уменьшения мощности под бассейнами Иуллеменден и Тим Мерсои. Эти оценки в целом хорошо согласуются с результатами [Jessell et al., 2016; Reguzzoni et al., 2013] и существенно противоречат данным для моделей [Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014] с повышенной мощностью коры до 42-48 км. Область Чадской синеклизы характеризуется средним уровнем мощности коры 38-42 км, на фоне которой просматривается ориентировка области собственно пониженной мощности субмеридианального простирания. Указанные в целом согласуются с результатами [Globig et al., 2016], показывающими аналогичные значения. Мезозойская Западно-Африканская рифтовая система

[Guiraud et al., 1987; Guiraud, Maurin, 1992] в наших данных проявлена как зона субмеридианального градиента мощности коры, без уменьшения ее амплитуды до 32-36 км, предполагаемой по результатам интерпретации [Globig et al., 2016; Tugume et al., 2013].

4.1.3. Гравитационный эффект границы Мохо

На следующем этапе работы был рассчитан гравитационный эффект от границы Мохо для всей области исследований. Инструментом таких вычислений явилась программа для расчёта гравитационного на заданном рельефе дневной поверхности от трёхмерной сеточной плотностной модели изучаемой среды. Данная программа основана на рекурсивном алгоритме [Глазнев, Лошаков, 2012; Муравина, Лошаков, 2015] решения прямой задачи с последовательным необходимым расщеплением каждого элемента среды для обеспечения заданной пространственной дискретизации объектов и гарантированной вычислительной точности прямой задачи.

Рельеф региона, приведённый на рис. 4.6, демонстрируют сложные черты топографии района моделирования, поэтому вычисление гравитационных аномалий от границы Мохо требует расчёта поля на достаточно детальной пространственной сетке в заданных точках рельефа. Такая расчётная сетка для вычисления поля была сформирована в декартовых координатах с дискретизацией в плане 5 на 5 км для всей области моделирования, показанной на рис. 4.6.

Модель среды, представляющая плотностной контакт пород верхней мантии с породами нижней коры, рассматривалась нами как граница с постоянной разностью плотности между этими средами. Плановая дискретизация модели была задана на правильной декартовой сетке с шагом задания 25 на 25 км. Глубина границы Мохо в узлах этой сетки вычислялась методом гармонической интерполяции по заданной системе опорных точек нашей модели мощности земной коры (см. рис. 4.2b) с учётом величин

усреднённого рельефа (рис. 4.6) в этих точках. Аналогичным образом формировалась сетка границы Мохо для модели CRUST1 [Laske et al., 2013].

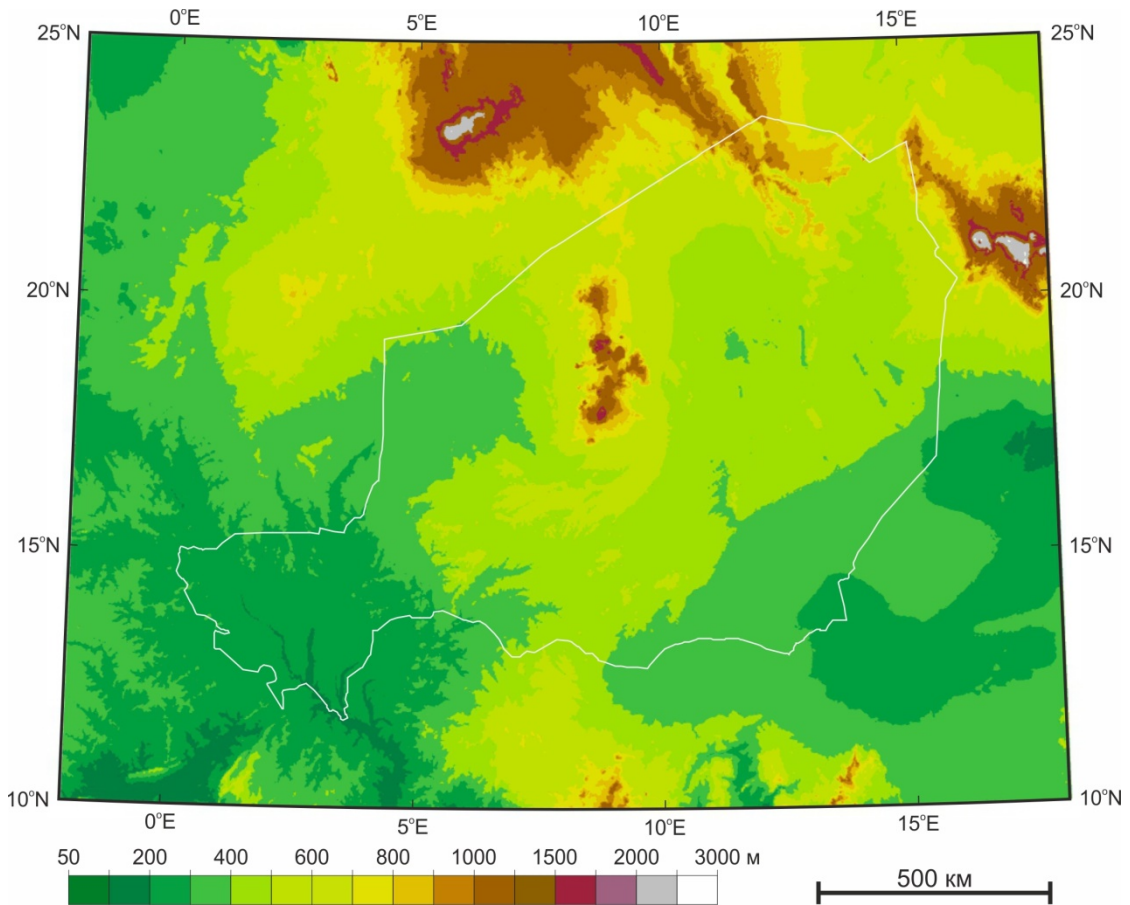


Рис. 4.6. Рельеф региона исследований по данным модели ETOPO1 [Amante et al., 2009]

Важным моментом решения прямой задачи от глубинной границы раздела кора-мантия является выбор пространственной области охвата модели, так чтобы результативные материалы вычислений поля обеспечивали достаточную точность расчёта аномального поля. Исходя из общих соображений [Глазнев, 2003] решение такой региональной прямой задачи гравиметрии требует задания модели среды в области большей, чем результативная, примерно на 400 – 600 км. В нашем случае область задания модели расширялась в плане во все стороны на 500 км, по сравнению с обозначенной областью вычисления поля (рис. 4.6). Отметим, что для нашей модели границы Мохо (рис. 4.2b), за пределами её уверенных оценок, модель дополнялась (расширялась на 500 км в плане) данными модели CRUST1.

Ещё одним важным моментом гравиметрического моделирования, в данном случае решения прямой трёхмерной задачи, является выбор референсной модели среды, от которой будут отсчитываться значения аномальной плотности. В нашем исследовании мы опирались на континентальную плотностную модель Земли (ПМЗ-К) [Картвелишвили, 1983], которая основана на PREM модели Земли [Dziewonski, Anderson, 1981] и характеризуется соответствующим ей нормальным гравитационным полем. Чтобы использовать эту модель, нужно учитывать разницу между её нормальным полем и нормальным гравитационным полем Гельмерта [Картвелишвили, 1983]. Разность этих полей, актуальная для широт нашего региона моделирования, показана на рис. 4.7. В области широт от 10 до 25 градусов, где расположена территория исследований, среднее значение коррекции для перехода от поля Гельмерта к нормальной модели ПМЗ-К составляет 3,65 мГал. Эта величина учитывалась нами при коррекции наблюденного аномального гравитационного поля региона (рис. 3.3).

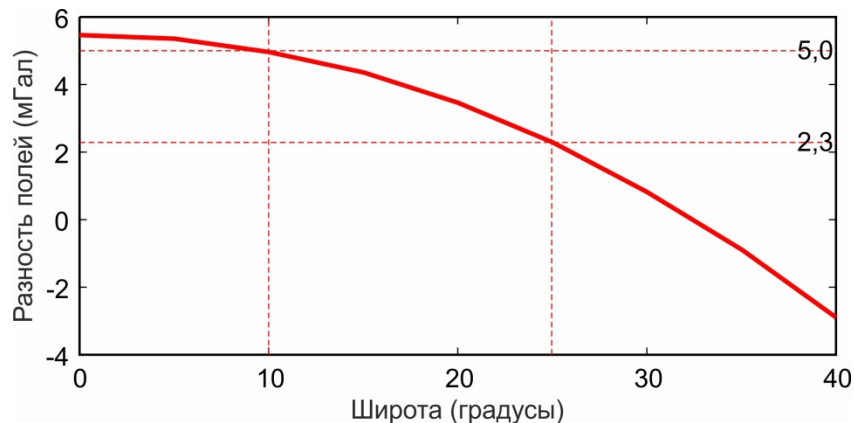


Рис. 4.7. График разницы между нормальным полем Гельмерта и полем модели ПМЗ-К [Картвелишвили, 1983]

Для принятой модели среды вычислим среднюю плотность модельного слоя, основываясь на данных о плотности и мощности трёх верхних слоёв модели ПМЗ-К (табл. 4.1). Учитывая, что максимальная мощность земной коры для региона исследований составляет 47,3 км, согласно модели

CRUST1, примем полную мощность модельного слоя литосферы равной $H_{max} = 50$ км.

Таблица 4.1

Слой	Мощность h , (км)	Плотность σ , (кг/м ³)
Верхняя кора	20	2720
Нижняя кора	15	2920
Верхняя мантия	15	3320

Тогда средняя плотность модельного слоя равна

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1 \cdot h_1 + \sigma_2 \cdot h_2 + \sigma_3 \cdot h_3}{H_{max}} = 2960 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \quad (4.3)$$

где σ – плотность и h – мощность слоёв из табл. 4.1.

Расчёт гравитационного эффекта границы Мохо выполнялся для слоя верхней мантии с избыточной плотностью $\Delta\sigma = 360 \text{ кг/м}^3$, взятой относительно средней плотности модельного слоя. Для сопоставления были решены прямые задачи от нашей модели границы Мохо и модели CRUST1, гравитационный эффект которых показан на рис. 4.8.

Приведённые результаты показывают значительные отличия вычисленных гравитационных аномалий модели CRUST1 и нашей модели Мохо. Эти отличия особенно ярко выражены в областях, где модель CRUST1, использованная в расчётах, сохраняет черты исходной модели CRUST5 с размерами сетки данных 5 на 5 градусов. К таким областям относятся западная и южная части региона исследований (рис. 4.8), где поле модели CRUST1 практически не коррелирует с геологическими особенностями территории (рис. 1.2) и выражает в основном резкие изменения в глубинном положении границы Мохо (рис. 4.8а). В отличие от модели CRUST1, гравитационное поле, обусловленное нашей моделью границы Мохо (рис. 4.8б), в общих чертах демонстрирует тенденцию совпадения с простираемостью структур Западно-Африканской рифтовой системы (рис. 1.2).

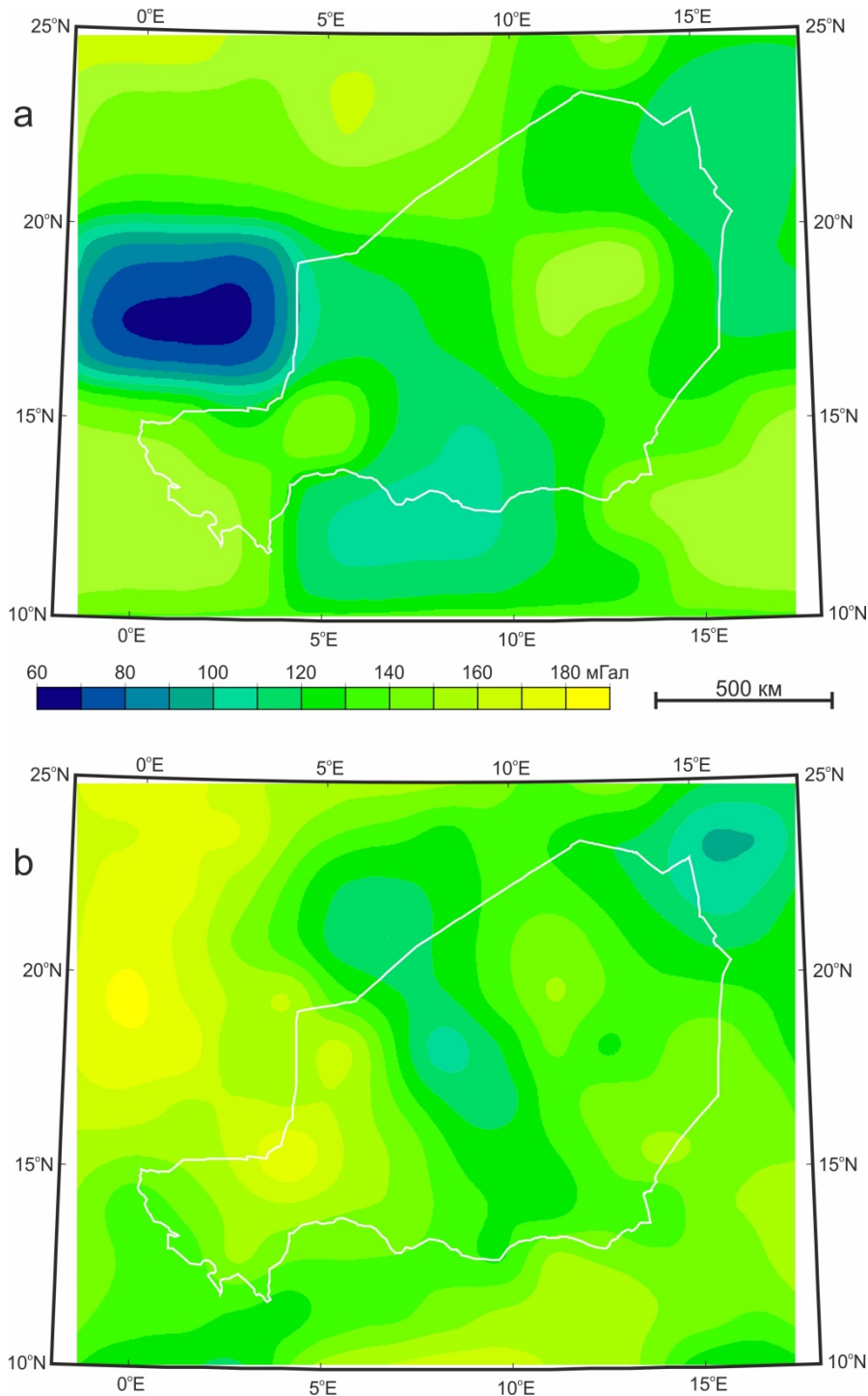


Рис. 4.8. Гравитационные поля от моделей Мохо: (а) модель CRUST1 [Laske et al., 2013]; (б) наши результаты [Глазнев, Якуба, 2020; Yasouba, 2021]. Схемы даны в единой цветовой гамме.

Предложенная модель демонстрирует также заметное повышение аномалий гравитационного поля (рис. 4.8б) от границы Мохо на территории Мали-Нигерской синеклизы и значимо меньшее по амплитуде повышение поля в области Чадской синеклизы. “Локальные” особенности глубинного положения границы Мохо для модели в области бассейнов Иуллемден и

Тим Мерсои (рис. 4.5) выражаются в гравитационном поле как области с относительно повышенными амплитудами аномалий (рис. 4.8б). Для щита Туарег и массивов Аир и Джадо отмечается значимое уменьшение аномалий гравитационного поля от границы раздела кора-мантия.

Поскольку основной задачей исследования является создание плотностной модели земной коры для территории Республики Нигер, далее будем использовать рассчитанное гравитационное поле от нашей модели границы Мохо, как основной результат влияния глубинных неоднородностей, выраженный в гравитационных аномалиях.

4.2. Плотностная модель осадочного чехла

Приповерхностные неоднородности, к которым относятся особенности структуры и плотности пород осадочного чехла, как правило дают значительный вклад в суммарное гравитационное поле земной коры [см. напр. Муравина, 2016; Шипилов и др., 2006; Минц и др., 2017]. Учёт влияния плотностных неоднородностей чехла носит название «геологического редуцирования» наблюдаемого гравитационного поля и выполняется при наличии данных о плотностном строении слоёв осадочного чехла. В качестве таких данных используются результаты сейсмических исследования методом отражённых волн, в модификации общей глубинной точки (ОГТ), и сводные материалы о петрофизических свойствах пород чехла, получаемые по результатам каротажа скважин и лабораторных исследований керн пород [Муравина и др., 2013; Муравина, Глазнев, 2014].

Территория Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки относится к территориям, слабо обеспеченным детальными сейсмическими исследованиями ОГТ. В последнее десятилетие такие исследования, ориентированные на поиски углеводородов, позволили составить геолого-структурные схемы строения чехла для отдельных участков территории Республики Нигер [Brownfield, 2016; Ahmed et al., 2020]. Эти детальные данные, вместе с цифровыми моделями строения

осадочной оболочки литосферы Земли [Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014], могут быть эффективно использованы для геологического редуцирования аномального гравитационного поля региона.

4.2.1. Строение осадочного чехла

На первой стадии работы для создания структурной схемы мощности слоёв осадочного чехла использовались обобщённые данные цифровых моделей [Laske et al., 2013; Pasyanos et al., 2014], охватывающих весь регион исследований. Различие этих моделей заключается в том, что для модели CRUST1 приведены данные о суммарной мощности осадков, а для модели LITHO1 использована более детальная трёхслойная модель с результатами оценок плотности и скорости осадочных пород, полученными в рамках решения 3D задачи сейсмотомографии по поверхностным волнам. Пространственная детализация указанных цифровых моделей, составляющая 1° , отражает основные региональные особенности строения чехла (рис. 4.9).

Собственно решение прямой задачи выполнялось по программе с адаптивной аппроксимацией элементов слоистой среды правильными параллелепипедами с градиентом плотности по вертикали [Глазнев, Лошаков, 2012; Муравина, Лошаков, 2015]. Плотность пород в модели CRUST1 принималась постоянной по латерали и равной средневзвешенной плотности осадочного чехла региона, составляющей 2450 кг/м^3 [Genik, 1993] с вертикальным градиентом плотности $+5 \text{ кг/м}^3 \text{ км}$ [Nguimbous-Kouoh et al., 2010]. В модели LITHO1 использовались данные о плотности осадочных слоёв самой модели [Pasyanos et al., 2014], заданные в узлах пространственной сетки. При решении прямой задачи область задания исходной цифровой модели чехла бралась с расширением во все стороны в плане на 400 км, что обеспечивало достаточную точность вычисления гравитационных аномалий в результативной области.

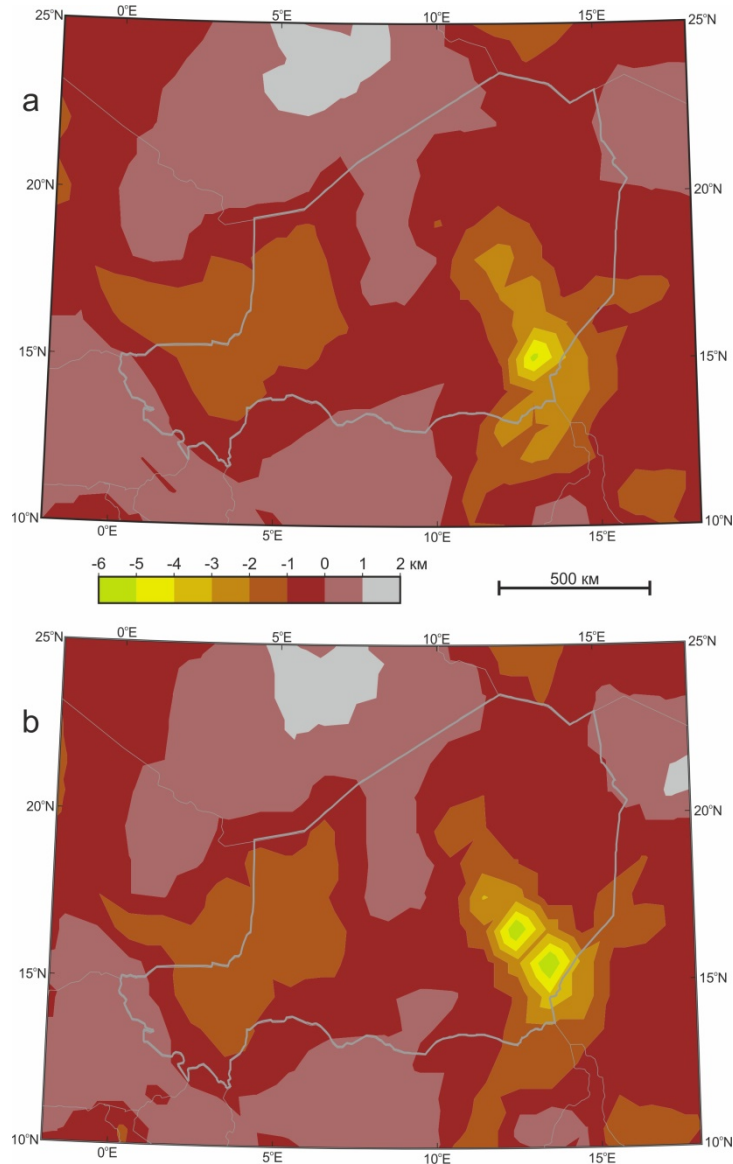


Рис. 4.9. Глубина подошвы осадочного чехла: (a) модель LITHO1 [Pasyanos et al., 2014]; (b) модель CRUST1 [Laske et al., 2013]. Схемы приведены в единой цветовой шкале.

Расчёт гравитационного эффекта чехла для моделей CRUST1 и LITHO1, выполненный с регулярным шагом на сетке 25 на 25 км показал, что аномалии поля от моделей чехла хорошо согласуются с региональным структурным планом мощности осадков, но несколько различаются между собой на отдельных участках. Различие полей, представленное в виде гистограммы разности аномальных значений на рис. 4.10, демонстрирует хорошее согласие моделей по плотности, однако детали строения моделей

(см. рис. 4.9) не отражают особенностей чехла в области рифтовых структур Западно-Африканская рифтовая система (рис. 1.3). Отметим, что именно здесь различия аномальных полей от моделей достигают первых десятков миллигал. Таким образом, модели чехла CRUST1 и LITHO1 требуют существенного уточнения в области Западно-Африканской рифтовой системы.

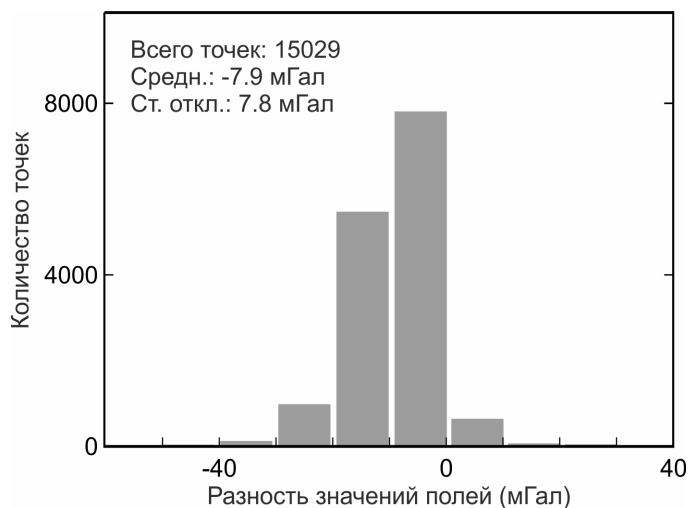


Рис. 4.10. Гистограмма разности аномалий гравитационного поля осадочного чехла ($\Delta g_{\text{LITHO}} - \Delta g_{\text{CRUST}}$) от моделей LITHO1 [Pasyanos et al, 2014] и CRUST1 [Laske et al, 2013] для области расчётов, показанной на рис. 4.9

При последующих построениях, в качестве региональной модели чехла была взята верхняя часть модели LITHO1, которая имеет трёхслойное строение с величинами плотности в слоях. Улучшение модели выполнялось только в области Западно-Африканской рифтовой системы, для которой имеются достоверные сейсмические данные 2D ОГТ по строению осадочного комплекса [Brownfield, 2016; Ahmed et al., 2020 и др.]. Схема мощности чехла, приведённая в [Ahmed et al., 2020], была привязана к географическим координатам изучаемой территории в геоинформационной системе ArcView и векторизована в цифровую карту глубин до кристаллического фундамента с учётом значений высот рельефа в точках векторизации [Amante, Eakins, 2009].

По сейсмическим данным [Brownfield, 2016; Ahmed et al., 2020; Genik, 1992; Fairhead, 1986; Liu et al., 2015] в осадочном чехле территории выявляются три структурных этажа, сложенных породами кайнозоя, мезозоя и палеозоя. Мощности этих толщ определены только на отдельных профилях и не всегда прослеживались до фундамента. Поэтому, детализация цифровой модели чехла потребовала привлечения, помимо сейсмических данных, ряда геологических материалов, рассматривающих интенсивность накопления осадочных пород в палеозойских интракратонных бассейнах северной Гондваны [Perron, 2019]. Приводимые автором многочисленные данные, по району бассейна Хоггар, расположенному в южной части Алжира, совместно с данными результатов сейсмических построений 2D ОГТ по Западно-Африканской рифтовой системе, позволили предложить простые соотношения, связывающие общую мощность чехла и мощности его основных структурных комплексов, приведённые в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Соотношение мощностей структурных комплексов чехла

Мощность чехла, км	Kz, %	Mz, %	Pz, %
< 1.5	66,6	33,3	0
1.5 - 3	60	35	5
3 - 6	50	40	10
6 – 10	40	40	20
10 - 12	33	42	25
> 12	27,5	45	27,5

На основании предложенного обобщения был выполнен переход от суммарной мощности осадков к мощностям отдельных структурных ярусов, которые далее преобразовывались в глубинное положение границ кровли и подошвы слоёв модели чехла для всей территории исследований. Фрагмент сводной схемы глубин подошвы слоёв чехла, составленный из данных модели LITHO1, на внешности области Западно-Африканской рифтовой

системы, и векторизованных сейсмических данных из [Ahmed et al., 2020] внутри этой области, показан на рис. 4.11.

В рамках нашей модельной области диапазоны мощности отдельных комплексов чехла и их средние значения составляют: для кайнозойских пород 0,0 – 4,3 км (среднее 1,52 км), для мезозойских пород 0,0 – 6,1 км (среднее 1,02 км), для палеозойских пород 0,0 – 4,9 км (среднее 0,24 км). Отметим, что малая величина средней мощности палеозойского комплекса говорит о практическом отсутствии в модели LITHO1 третьего слоя чехла (палеозой), который представлен в сейсмических данных [Brownfield, 2016; Ahmed et al., 2020; Genik, 1992; Fairhead, 1986; Liu et al., 2015].

Помимо данных о положении границ слоёв при создании модели чехла использовались сведения о плотности осадочных пород региона, установленные по результатам гамма-гамма плотностного каротажа глубоких скважин бассейна Иуллеммеден и грабенов Термит, Тефидет, Тенере [Genik, 1993; De Marsily, 1994; Lai et al., 2020 и др.]. Поскольку указанные данные о плотности затрагивают лишь верхнюю часть разреза (кайнозой и частично мезозой), то для обобщённого представления плотности пород в области развития грабенов Западно-Африканской рифтовой системы (рис. 1.3) был выполнен анализ плотностных колонок по имеющимся скважинам. Результаты анализа позволили предложить простые линейные соотношения зависимости плотности осадков от глубины их залегания в форме

$$\sigma(z) = \sigma_0 + a \cdot z, \quad (4.4)$$

где σ_0 – значение плотности пород ($\text{кг}/\text{м}^3$) при отсутствии литостатической нагрузки, z – мощность вышележащих пород (км), a – вертикальный градиент плотности ($\text{кг}/\text{м}^3 \text{ км}$), фактически учитывающий сжимаемость осадочных пород, согласно [Глазнев, 2003; Муравина и др., 2013; Муравина, Глазнев, 2014].

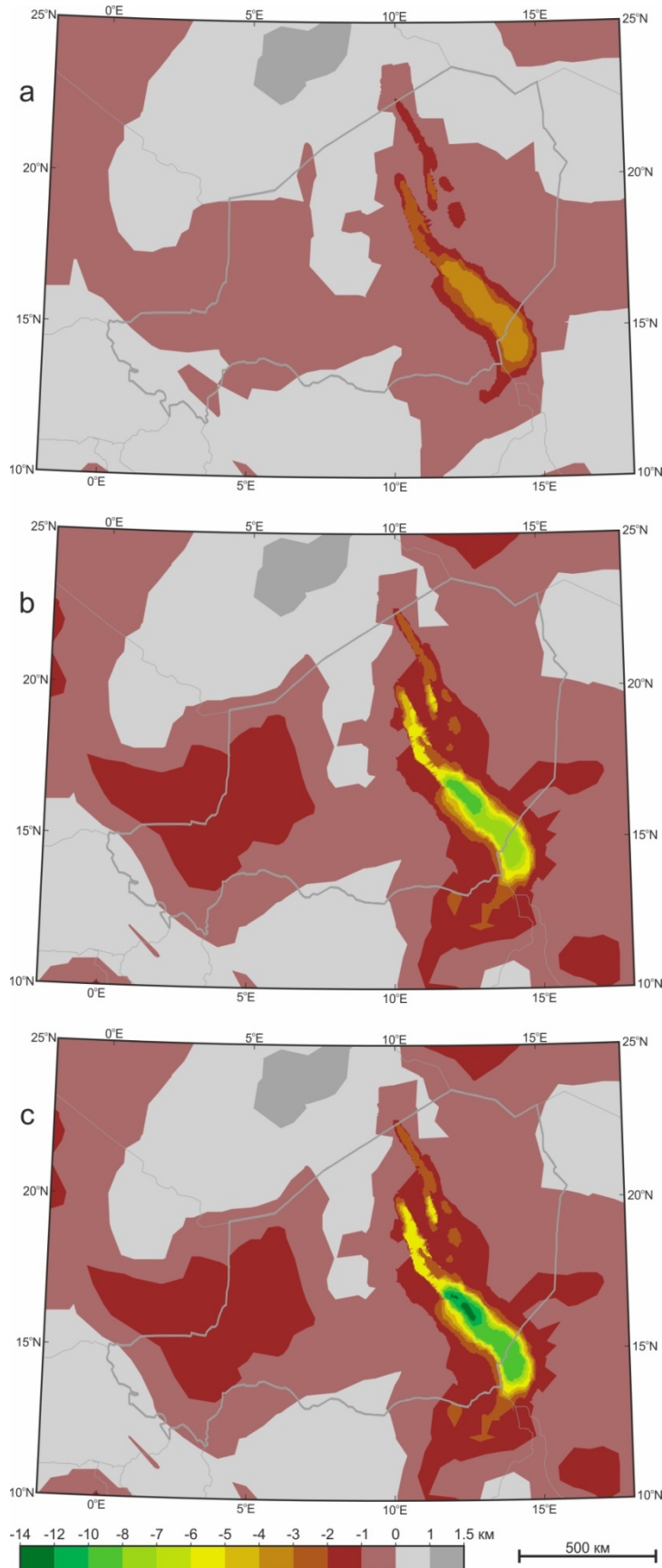


Рис. 4.11. Сводная модель осадочного чехла по данным LITHO1 [Pasyanos et al., 2014] и результатам 2D ОГТ: (а) подошва слоя 1 (кайнозой); (b) подошва слоя 2 (мезозой); (с) подошва слоя 3 (палеозой). Схемы приведены в единой цветовой шкале

Отметим, что для глубоких горизонтов чехла, где данные о плотности брались из данных модели LITHO1, принимались во внимание сведения о плотности палеозойских пород, аналогичного литологического состава, установленных для глубоких впадин Восточно-Европейской платформы и Баренцевоморской плиты [Galitchanina et al., 1995; Муравина, 2013]. Обобщённые данные для коэффициентов, используемых в соотношении (4.4), представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Коэффициенты в зависимости плотности от глубины

Комплекс чехла	σ_0 , кг/м ³	a , кг/м ³ км
кайнозойский	2000	97,5
мезозойский	2370	26,3
палеозойский	2550	13,2

На основе аппроксимационных данных о плотности пород в слоях осадочного чехла (табл. 4.3) и глубинах залегания границ комплексов (рис. 4.11) была составлена сводная цифровая модель строения осадочного чехла по всему региону исследований и его обрамлению. Эта модель включает региональные данные о чехле, содержащиеся в модели LITHO1 и более детальные данные, сформированные на основе сейсмических данных 2D ОГТ и петроплотностных исследований по глубоким скважинам, в области развития грабенов Западно-Африканской рифтовой системы на территории Республики Нигер. Плотность слоёв чехла в сводной модели изменяется по латерали и вертикали в диапазонах: 1860 – 2415 кг/м³ (среднее 2100 кг/м³) для комплекса кайнозойских пород, 2280 – 2640 кг/м³ (среднее 2416 кг/м³) для мезозойских пород и 2540 – 2736 кг/м³ (среднее 2580 кг/м³) для палеозойских пород. В целом приведённые данные хорошо согласуются с плотностями осадочных слоёв в модели LITHO1 [Pasyanos et al., 2014].

4.2.2. Гравитационный эффект осадочного чехла

На следующей стадии сводная цифровая модель чехла была интерполирована в регулярную правильную сетку с плановым шагом 10 на 10 км. Интерполяция выполнялась для региона исследований и его обрамления на дистанции 400 км в плане от границы результативной области расчётов. Полученная 3D цифровая модель, содержащая положение границ и значение плотностей на кровле и подошве слоёв, использовалась для расчёта гравитационного эффекта осадочного чехла по программе решения прямой задачи [Глазнев, Лошаков, 2012; Муравина, Лошаков, 2015]. Расчёт поля от модели осадочного чехла выполнялся в точках регулярной сети 5 на 5 км на реальном рельефе региона [Amante, Eakins, 2009]. В качестве нормальной плотностной модели и её поля относимости использовалась модель ПМЗ-К со средней плотностью равной 2960 кг/м^3 (см. раздел 4.1.3). Вычисленный аномальный гравитационный эффект сводной цифровой модели осадочного чехла приведён на рис. 4.12.

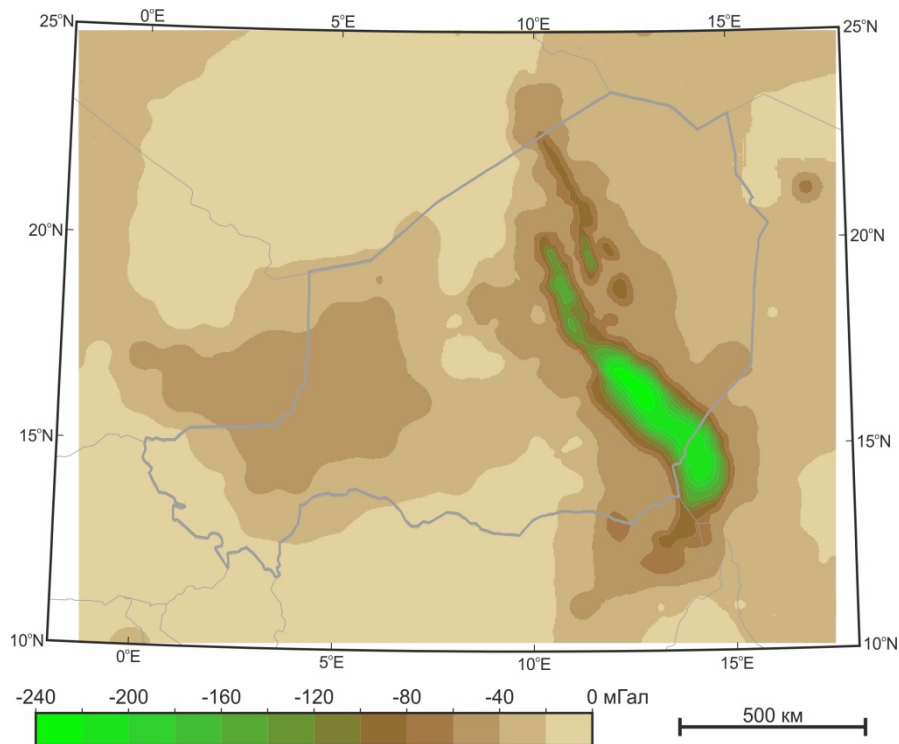


Рис. 4.12. Рассчитанный гравитационный эффект осадочного чехла

Главным морфологическим элементом рассчитанного поля чехла является чётко выраженная субмеридиональная область, отвечающая положению зоны развития грабенов Западно-Африканской рифтовой системы на территории Республики нигер, Чада и Нигерии. Амплитуды аномалий в этой локальной области достигает -240 мГал и соответствует наиболее глубокой части рифтовой системы, в частности грабену Термит, где суммарная мощность осадков составляет почти 16 км (см. рис. 4.11). Грабены Тенере, Кафра и Грейн (см. рис. 1.3) в аномальном гравитационном поле выражены слабее и гравитационные аномалии от осадочного чехла достигают только немногим менее -120 мГал, что обусловлено меньшими плановыми размерами этих геологических структур и меньшей мощностью пород чехла. Локальные изометричные структурные элементы Западно-Африканской рифтовой системы, представленные бассейнам Джадо, Агадема и Н'Гуэль-Эджи (рис. 1.3), отмечаются понижением уровня поля примерно на $10-20$ мГал по сравнению с соседними областями. Локальный бассейн Билма (рис. 1.3) выражен более чётко с понижением уровня поля, по сравнению с прилегающими областями, на $40-50$ мГал. Бассейн Борно, представляющий вытянутую в юго-западном направлении относительно узкую структуру чехла, связывающую Центрально-Африканскую и Западно-Африканскую рифтовые системы (см. рис. 1.3), выражен слабо-градиентной аномалий, такой же ориентировки, с понижением уровня поля на $30-40$ мГал.

Крупные синеклизы и региональные осадочные бассейны достоверно отражены в аномальном гравитационном поле чехла. Мали-Нигерская синеклиза (рис. 1.3) характеризуется пологими изометричными региональными аномалиями гравитационного поля с амплитудой до -60 мГал (рис. 4.12). Минимальные значения аномалий коррелируются с областями повышения общей мощности осадочного чехла в пределах синеклизы (см. рис. 4.11), причём в аномальном поле отражается и латеральные вариации плотности пород чехла, проявляющиеся в наличии двух обособленных минимумов поля в центральной части Мали-Нигерской синеклизы. Чадская

синеклиза, имеющая весьма пологие борта и общее погружение в юго-восточном направлении (см. рис. 4.11), в региональном гравитационном поле проявляется понижением уровня на 30-50 мГал по сравнению с соседними областями (рис. 4.12) вне зоны Западно-Африканской рифтовой системы. Отметим также выраженное восточное и северо-восточное продолжение аномальной области поля Чадской синеклизы, имеющее аналогичные амплитуды, но более локальные формы аномалий (рис. 4.12).

4.3. Расчёт плотностной модели кристаллической коры

Одной из основных задач нашего исследования является создание плотностной модели земной коры для территории Республики Нигер и прилегающих регионов. Методы и алгоритмы расчёт трёхмерной плотностной модели, развитые в работах [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016; Минц и др., 2017; Glaznev et al., 2015], эффективно могут быть использованы и при построении модели земной коры изучаемого региона. В соответствии с развитой концепцией авторов указанных работ, в основу плотностного моделирования литосферы должны быть положены следующие исходные материалы:

- данные об аномальном гравитационном поле региона;
- начальные представления о модели среды;
- ограничения на искомое решение для плотности;
- правила перераспределения невязок поля в процедуре итерационного решения обратной задачи.

Ниже рассмотрим более детально указанные позиции плотностного моделирования для нашей территории исследований и обратимся к процедуре решения обратной задачи гравиметрии в рамках упомянутого подхода. В заключении рассмотрим создание сводных плотностных моделей строения земной коры, которые позволят в дальнейшем перейти к геологической трактовке результатов моделирования и выявлению связей

геологического строения с размещением основных видов полезных ископаемых на изучаемой территории.

4.3.1. Аномальное поле кристаллической коры

Основной задачей данного этапа является создание региональной схемы коровых гравитационных аномалий, в которой будет исключено гравитационное влияние границы Мохо и влияние гравитационного поля осадочного чехла. Указанные гравитационные аномалии от плотностных объектов верхней мантии и осадочного чехла региона рассчитаны в разделах 4.1.3 и 4.2.2. Решение прямых задач в указанных разделах выполнялось относительно единой величины нормальной плотности среды, равной 2960 кг/м^3 (см. выражение 4.3). Отметим также, что при расчётах использовалась единая сетка точек вычислений аномальных полей, шаг которой составлял в плане 5 на 5 км, а вертикальная координата точек вычислений соответствовала реальному рельефу региона.

Таким образом, расчёт гравитационных аномалий, обусловленных только плотностными неоднородностями, расположенными в кристаллической коре региона, можно определить как разность наблюдаемых аномалий гравитационного поля и аномалий от избыточной плотности пород верхней мантии и осадочного чехла, согласно выражению

$$\Delta g_{\text{CR}} = \Delta g_{\text{OBS}} - \Delta g_{\text{МОНО}} - \Delta g_{\text{SED}}, \quad (4.5)$$

где Δg_{CR} – аномальное поле кристаллической коры, Δg_{OBS} – наблюдаемое региональное аномальное поле (см. рис. 3.3), $\Delta g_{\text{МОНО}}$ – аномальное поле от границы Мохо (см. рис. 4.8b), Δg_{SED} – аномальное поле от объектов осадочного чехла (см. рис. 4.12). Отметим, что при расчёте гравитационных аномалий согласно выражению (4.5) в наблюдаемое поле Δg_{OBS} предварительно вводилась поправка, зависящая только от широты точки наблюдений и учитывающая разность нормальных полей модели ПМЗ-К и Гельмерта, показанную на рис. 4.7.

Итоговая схема гравитационных аномалий Δg_{CR} обусловленных плотностными неоднородностями, расположенными, предположительно, только в кристаллической земной коре региона исследований, приведена на рис. 4.13. Фактически эта схема гравитационных аномалий отвечает сетке дискретизации поля равной 5 на 5 км в плане.

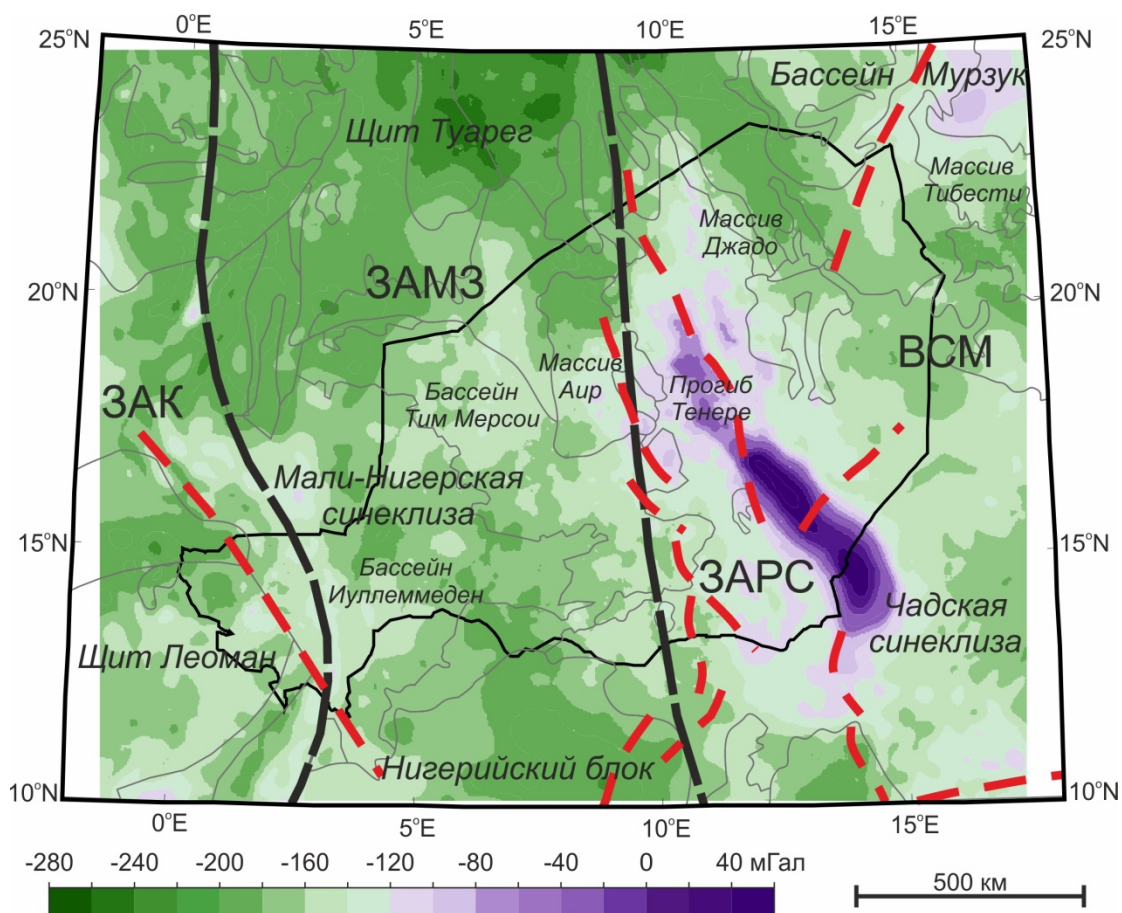


Рис. 4.13. Аномальное гравитационное поле кристаллической коры. Геологические границы и тектонические блоки см. рис. 1.2

Аномалии поля, обусловленные источниками, расположенными в кристаллической коре, отличаются от наблюдаемого поля (рис. 3.3). Амплитуда рассчитанных аномалий поля кристаллической коры изменяется от -280 до 60 мГал. В морфологическом отношении приведённая схема аномалий частично отражает геологические особенности строения кристаллической коры (см. рис. 1.2). Самые низкие значения гравитационных аномалий характерны для архейско-протерозойских комплексов щита Туарег, Леоман и Нигерийского блока. Западно-Африканская мобильная зона

отвечает региональному минимуму поля субмеридионального простираения. Архейско-протерозойские массивы Аир, Джадо, Тибести выделяются пониженными значениями поля, в диапазоне $-180 \div -120$ мГал. Отметим, что форма массивов на поверхности не соответствует форме их локальных аномалий в плане. Наиболее яркой особенностью поля кристаллической коры является субмеридиональная положительная система аномалий, отвечающая Западно-Африканской рифтовой системе, что говорит о достаточно сложном строении коры в области собственно системы грабенов фундамента.

Задачей наших построений является создание региональной плотностной модели коры, поэтому схема аномалий, показанная на рис. 4.13, нуждалась в генерализации, которая обеспечивалась дискретностью задания поля на сетке с шагом 25 на 25 км в плане. Такая генерализованная схема аномалий приведена на рис. 4.14.

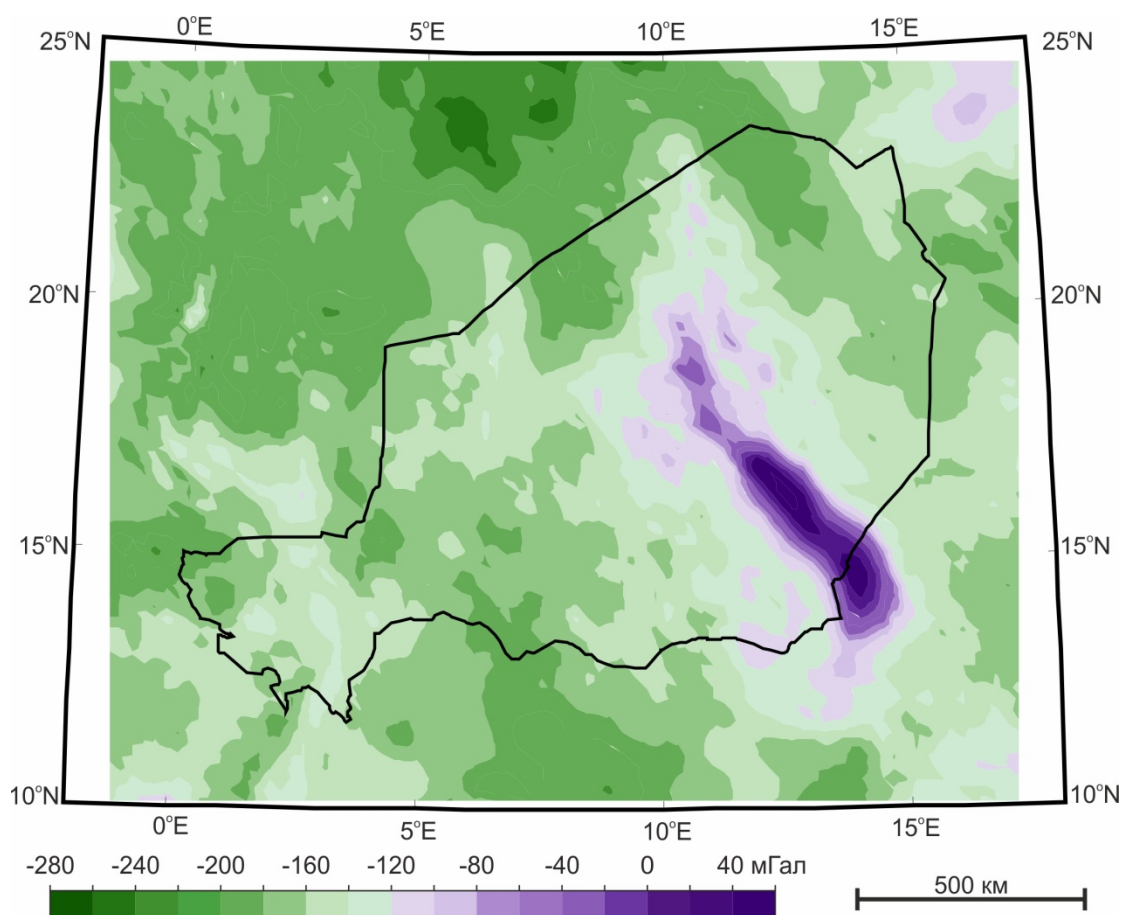


Рис. 4.14. Аномальное региональное гравитационное поле кристаллической коры, используемое для решения обратной задачи

Различия рассчитанных гравитационных аномалий (рис. 4.13) и их генерализованных, сглаженных на более крупной пространственной сетке значений (рис. 4.14), не велики. Только отдельные самые локальные особенности поля отсутствуют в генерализованных данных, но именно это поле, взятое в дискретных точках на реальной поверхности рельефа, отвечает физической сущности нашей задачи создания региональной плотностной модели земной коры.

Сформированный массив региональных гравитационных аномалий поля кристаллической коры, выступающий в качестве исходных данных при решении трёхмерной обратной задачи гравиметрии, обеспечивает необходимую генерализацию среды при построении плотностной модели литосферы изучаемой территории.

4.3.2. Параметры решения обратной задачи

В соответствии с концепцией авторов [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2016; Муравина, 2016; Минц и др., 2017; Glaznev et al., 2015], решение трёхмерной обратной задачи гравиметрии в рамках задачи плотностного моделирования земной коры, требует априорного задания ряда исходных данных и методических параметров инверсии. Для территории Республики Нигер и прилегающих регионов, учитывая слабую обеспеченность материалами глубинных сейсмических исследований, последовательно рассмотрим следующие позиции, используемые в процедуре решения обратной задачи: начальные представления о модели среды, ограничения на искомое решение для плотности, весовая функция перераспределения невязок.

Начальные представления о модели среды. Геометрическое положение слоя с искомым решением о плотности кристаллической коры определялось по верхней границе – глубиной залегания кристаллического фундамента (см. рис. 4.11с), а по нижней границе – глубиной залегания раздела кора-мантия, определяемой мощностью земной коры (рис. 4.5) с

учётом рельефа региона (рис. 4.6). Пространственная детализация исходной, а равно и результативной, модели среды, обеспечивалась плановой сеткой данных с регулярным шагом 25 на 25 км, что отвечает нашей генерализованной модели региональных аномалий гравитационного поля кристаллической коры (рис. 4.14). Разбиение сетки модели среды по вертикали обусловлено детальностью данных о глубине поверхности кристаллического фундамента (см. рис. 4.11с), данными о положении внутрикоровых границ кристаллической коры в модели LITHO1 [Pasyanos et al., 2014], детальностью описания глубины залегания границы Мохо (рис. 4.5, 4.6). Исходя из очевидного соображения, что верхние особенности распределения плотности в среде должны быть описаны более детально, а глубокие горизонты региональной модели плотности могут быть представлены менее детально, выбрано нерегулярное разбиение сетки по вертикали (в км): 1,5; 1; 0; -1; -2; -4; -6; -10; -14; -25; -36; -40; -44. 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. Таким образом, все пространственные данные о модели среды формировались и вычислялись в процессе инверсии поля для узлов фиксированной трёхмерной сетки.

Нормальные значения абсолютной плотности в исходной модели среды задавались постоянной величиной 2960 кг/м^3 , оценённой согласно выражению (4.3), в области от кровли кристаллического фундамента до нижнего уровня нашей модели (-44 км). Априорная аномальная плотность в трёхмерной модели среды принята равной нулю, то есть исходная модель не содержит каких-либо вариаций от нормального значения абсолютной плотности. В целом, такая упрощённая форма представления исходных данных о среде, рассмотренная в [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. С целью ограничения значений плотностей, получаемых в процедуре решения обратной задачи гравиметрии, были заданы пределы возможных вариаций плотности в результативной (рассчитанной) модели среды. Для всех слоёв модели кристаллической коры ограничения на искомую плотность принимались по данным о плотности пород фундамента региона (см. раздел 2.1), а также из общих соображений о возможной величине плотности пород архейско-протерозойской коры [Глазнев, 2003; Глазнев и др., 2020; Galitchanina et al., 1995; Rudnick, Gao, 2014]. Минимально допустимое значение аномальной плотности пород кристаллической коры составляет - 280 кг/м^3 , а максимальное значение – 160 кг/м^3 , что с учётом принятой величины нормальной плотности среды соответствует абсолютным плотностям пород коры в диапазоне от 2680 кг/м^3 до 3120 кг/м^3 . Такие величины вариации плотности кристаллических пород коры достаточно хорошо соответствуют диапазону плотности коровых слоёв для модели LITHO1 в пределах нашего региона исследований. Фактически указанные ограничения на величины аномальной плотности были сформированы в виде 3D массива для всех точек описанной выше пространственной сетки исходных данных о среде.

Весовая функция перераспределения невязок. Важным моментом в решении обратной задачи гравиметрии являются правила пространственного перераспределения невязок поля, представляющих разность между модельным полем на текущей итерации решения и исходным гравитационным полем, в значения аномальных плотностей среды. В соответствии с используемым алгоритмом нормального решения обратной задачи [Глазнев, 2003; Кобрунов, 2008; Glaznev et al., 2015], указанные правила перераспределения невязок задаются некоторой пространственной весовой функцией, которая собственно и определяет количественные характеристики преобразования невязки поля в значения аномальной плотности модели среды. В нашем случае, в условиях существенной

неполноты геолого-геофизической информации о строении земной коры региона, основой для выбора значений весовой функции послужили данные о плотности и скорости коровых слоёв модели LITHO1 [Pasyanos et al., 2014] для всего региона исследований. В каждой точке плановой сетки входных данных весовая функция принималась зависящей только от глубины слоёв 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 (рис. 4.5). Схематически такую весовую функцию в каждой точке сетки данных можно представить в виде дискретного графика зависимости от глубины (рис. 4.15).

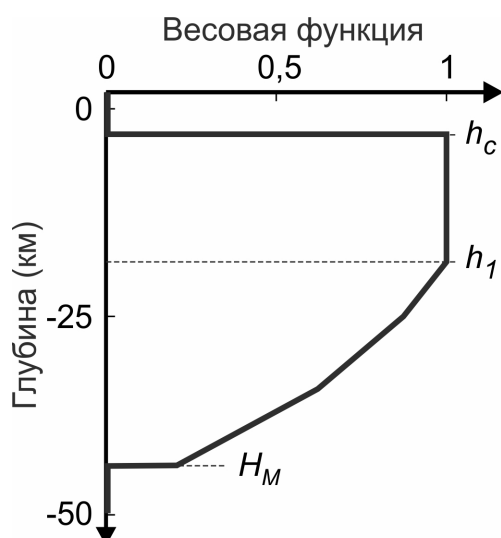


Рис. 4.15. График зависимости весовой функции от глубины. Обозначения: h_c – кровля кристаллического фундамента, h_1 – глубина подошвы верхнего слоя кристаллической коры по данным модели LITHO1, H_m – глубина границы Мохо по нашей оценке.

Приведённый вид весовой функции означает, что решение обратной задачи для плотности отыскивается только в области ограниченной сверху кровлей кристаллического фундамента и снизу - глубиной границы Мохо, причём большая часть невязки перераспределяется в верхнюю часть кристаллической коры. Естественно, что значения глубин h_c , h_1 и H_m не являются постоянными и принимают конкретные значения в каждой точке плановой сетки модели. Таким образом, весовая функция перераспределения плотности была сформирована в виде 3D массива значений, характеризующего неопределённость исходных данных для всех точек пространственной сетки обратной задачи.

4.3.3. Плотностная модель кристаллической коры

Расчёт плотностной модели для кристаллической коры по данным региональных аномалий гравитационного поля (рис. 4.14) выполнялся с использованием разработанной программы, реализующей решение обратной задачи гравиметрии в сферической и декартовой постановке [Глазнев, 2003; Муравина, 2016; Glaznev et al., 2015]. При численном решении использовались данные региональных гравитационных аномалий, нормальное распределение плотности в среде и исходные аномальные значения плотности, относительно её нормальной модели (напомним, что начальная аномальная плотность в модели была взята равной нулю). Кроме того, были сформированы 3D массивы ограничений на искомые величины плотности в модели и значений весовой функции для перераспределения невязок поля в величины плотности. Все указанные массивы входных данных, охарактеризованные выше в разделах 4.3.1 и 4.3.2., заданы в узлах пространственной сетки с плановым шагом, составляющим 25 на 25 км.

Отметим ряд ключевых параметров инверсии, в рамках постановки [Глазнев, 2003; Муравина, 2016; Glaznev et al., 2015], определяющих точность и пространственную специфику получаемых решений. В процедуре инверсии выполнялось разделение невязки поля на «региональную» и «локальную» составляющие, 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. В соответствии с этим правилом, в каждой точке задания поля локальная часть невязки поля перераспределялась в заданное количество верхних слоёв модели. В нашем случае, исходя из общих данных о строении коры (см. разделы 4.1 и 4.2), локальная невязка перераспределялась в семь верхних слоёв модели среды с единичной весовой функцией. То есть «локальные» невязки обуславливают коррекцию только верхней части. Остальная, «региональная» часть невязки поля, перераспределялась в нижние слои модели среды на основе

квазинормального решения обратной задачи гравиметрии [Глазнев, 2003; Кобрунов, 2008].

Инверсия аномального гравитационного поля выполнялось в узлах регулярной в плане сетки (с шагом 25 на 25 км) для области, показанной на рис. 4.14. Число узлов сетки, отбрасываемое при расчёте невязки поля, составляло 10 шагов (250 км) во все стороны от результативной области моделирования, так чтобы не учитывать краевые искажения в процедуре инверсии. Собственно решение обратной задачи гравиметрии было получено в результате 25 итераций, в ходе которых невязка решения уменьшилась от 31,65 мГал до 3,37 мГал (рис. 4.16), что представляется вполне достаточной величиной при региональном плотностном моделировании земной коры.

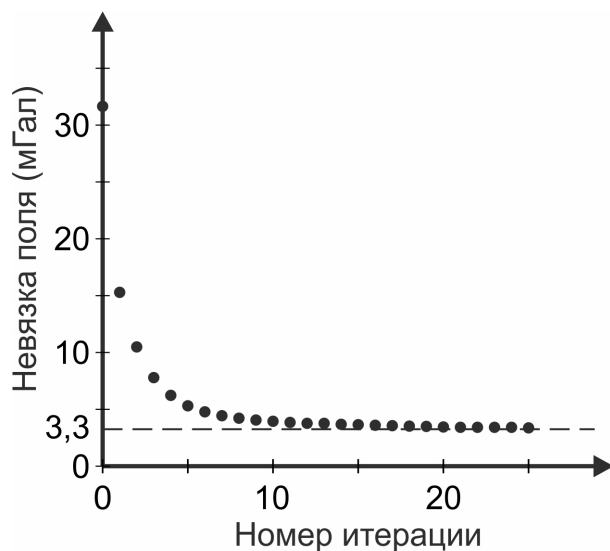


Рис. 4.16. График изменения невязки в ходе итерационного решения обратной задачи гравиметрии. Показано асимптотическое значение невязки равное 3,3 мГал.

Качество полученного решения обратной задачи характеризует схема пространственного распределения итоговой невязки поля после 25-ой итерации, показанная на рис. 4.17. Среднее значение разности модельного и наблюдаемого полей составляет 0,13 мГал, то есть невязка хорошо центрирована относительно исходного аномального гравитационного поля (см. рис. 4.14). Собственно величина невязки поля изменяется в диапазоне от -5,90 до 5,88 мГал, со стандартным отклонением 3,37 мГал.

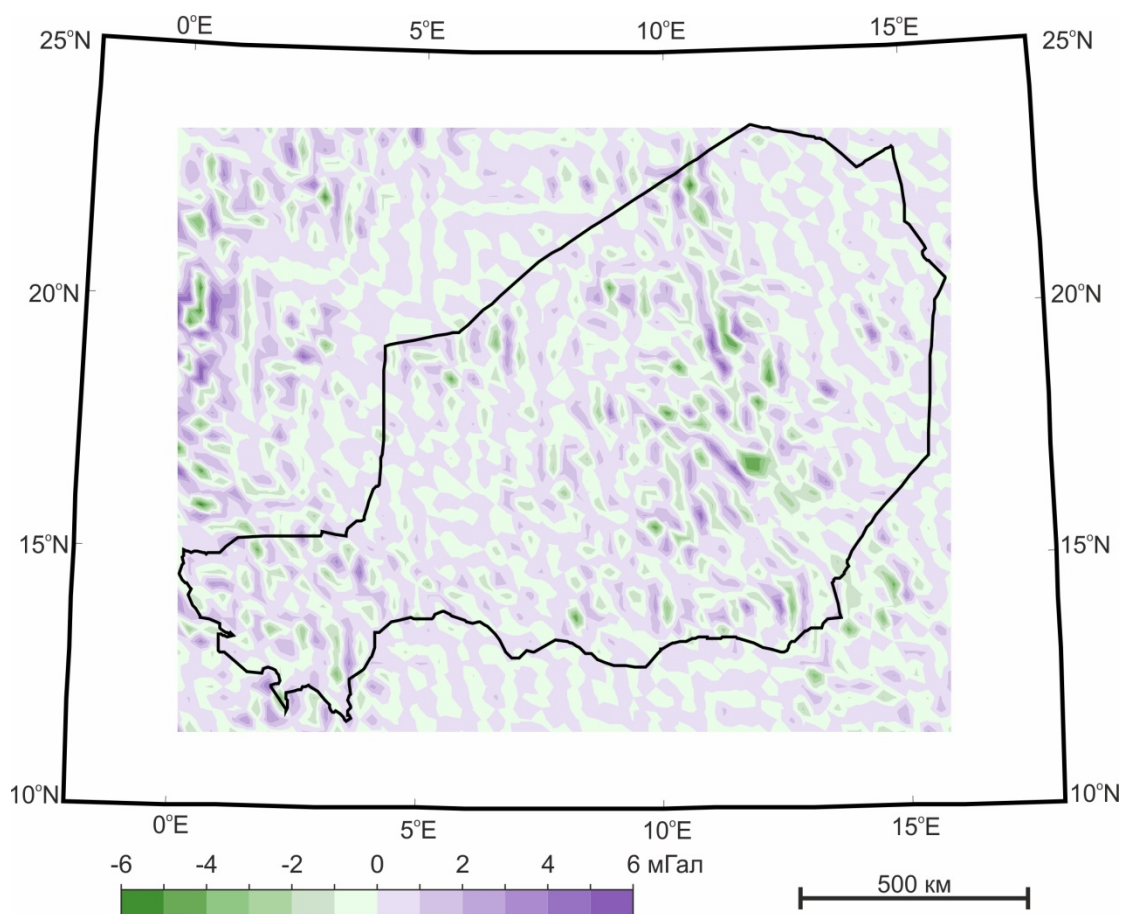


Рис. 4.17. Невязка гравитационного поля для 25-ой итерации решения обратной задачи

Наиболее экстремальные особенности аномалий поля невязки, представленные одиночными точками значений, приурочены к краевым частям результативной области моделирования на западе и северо-западе участка моделирования. Ещё одна группа менее интенсивных локальных аномалий невязки субмеридианального простирания приурочена к северо-восточному ограничению системы грабенов ЗАРС (см. рис. 4.13), где существуют значительные градиенты глубинного положения коровых границ в исходной модели. Указанные особенности распределения аномалий поля невязки следует учитывать при геологической трактовке материалов рассчитанной плотностной модели.

Приведённая схема невязки демонстрирует в целом достаточно хорошее совпадение гравитационного поля от рассчитанной плотностной модели среды и исходного поля региональных гравитационных аномалий

кристаллической коры. Собственно плотностная модель кристаллической коры, полученная в результате итерационной процедуры инверсии аномального поля, рассматривается в следующем разделе.

4.4. Плотностная модель земной коры

Плотностная модель кристаллической коры, рассчитанная в результате решения обратной задачи для регионального аномального поля, на заключительном этапе моделирования была приведена к абсолютным значениям плотности среды, опираясь на нашу нормальную плотностную модель, в качестве которой выступал слой с плотностью 2960 кг/м^3 (см. раздел 4.3.2). Плотностная модель кристаллической коры ограничена сверху поверхностью кристаллического фундамента, а снизу – глубиной границы Мохо, и для этих частей модельной среды также определены соответствующие плотностные модели. Положение раздела кора-мантия охарактеризовано в разделе 4.1, где плотность верхней мантии принята постоянной и равной 3320 кг/м^3 (см. табл. 4.1). Положение границ раздела и значения плотностей слоёв в уточнённой модели осадочного чехла охарактеризовано в разделе 4.2. Естественно, что для полного описания изучаемой среды следует объединить все три пространственных фрагмента указанных плотностных моделей. При этом, аномальное гравитационное поле от объединённой модели среды, согласно выражению (4.5), будет совпадать с наблюдаемым полем изучаемой территории с точностью до величины невязки решения обратной задачи (см. рис. 4.17).

Объединение моделей потребовало интерполяции данных о глубине положения границы Мохо в узлы регулярной плановой сетки с шагом 25 на 25 км и создания дополнительного слоя на нижней границе модели (на глубине -50 км) с плотностью равной плотности мантийных пород (см. табл. 4.1). Для модели осадочного чехла, была выполнена интерполяция данных в аналогичную регулярную плановую сетку и линейная интерполяция значений плотности по вертикали в узлы сетки глубин (в км):

2,5; 2; 1,5; 1; 0; -1; -2; -4; -6; -10; -14. Дополнение модели осадочного слоя двумя самыми верхними слоями, обусловлено тем, что осадочные породы выходят на уровне рельефа в нескольких точках с максимальными отметками высот. После такого объединения плотностной модели верхней и нижней частей среды была составлена сводная плотностная модель земной коры территории исследований, охватывающая слой от поверхности дневного рельефа до глубины -50 км.

Сводная модель региона показана на рис. 4.18 – 4.22 в виде схем плотности, построенных для ряда фиксированных глубин в единой цветовой шкале. Выбор уровней горизонтальных срезов модели определялся наиболее представительными по вертикали и дифференцированными в плане данными о плотностном строении земной коры территории Республики Нигер. Генерализованный анализ представленной модели рассматривается ниже в сопоставлении с данными о поверхностном геологическом строении региона (см. рис. 1.2 и 1.3).

На верхних уровнях трёхмерной модели (рис. 4.18) хорошо проявляются плотностные неоднородности щита Туарег (вместе с массивами Аир и Джадо), которые характеризуются величинами плотности в диапазоне $2650 - 2880 \text{ кг/м}^3$, что отвечает архейско-протерозойским породам кислого и среднего состава (см. раздел 2.1). Наиболее высокие значения плотности характерны для пород западной части щита Туарег, а массивы Аир и Джадо (на срезе 0 км) представлены породами с плотностью около 2680 кг/м^3 . Отметим, что на этой глубине массив Аир отчётливо разделяется на северную и южную части с предположительно узкой перемычкой между ними в самой западной части массива. На верхних уровнях модели (рис. 4.18) породы осадочного чехла представлены кайнозойскими и мезозойскими комплексами с плотностью, соответственно около 2050 и 2370 кг/м^3 .

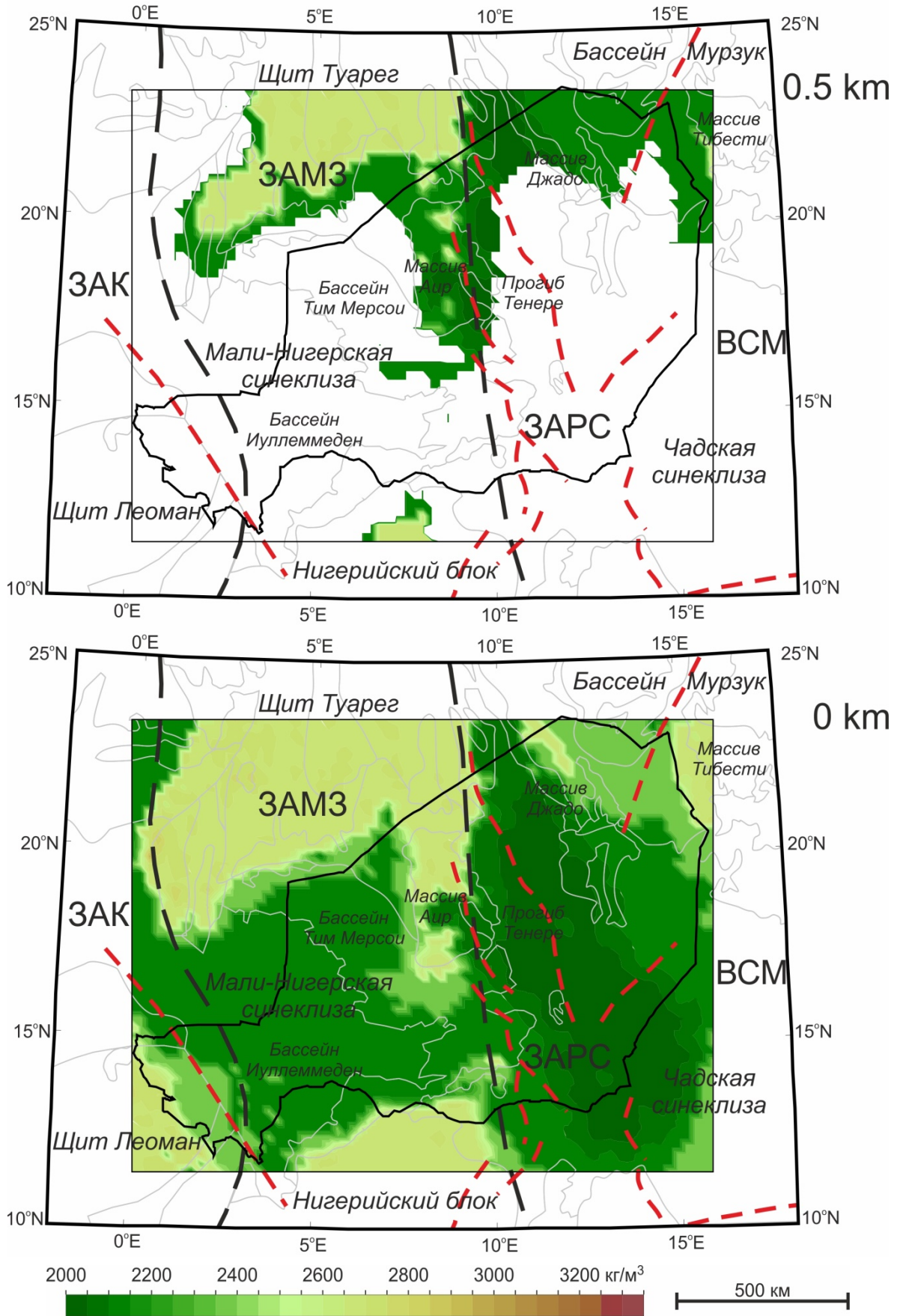


Рис. 4.18. Плотность на уровнях глубин

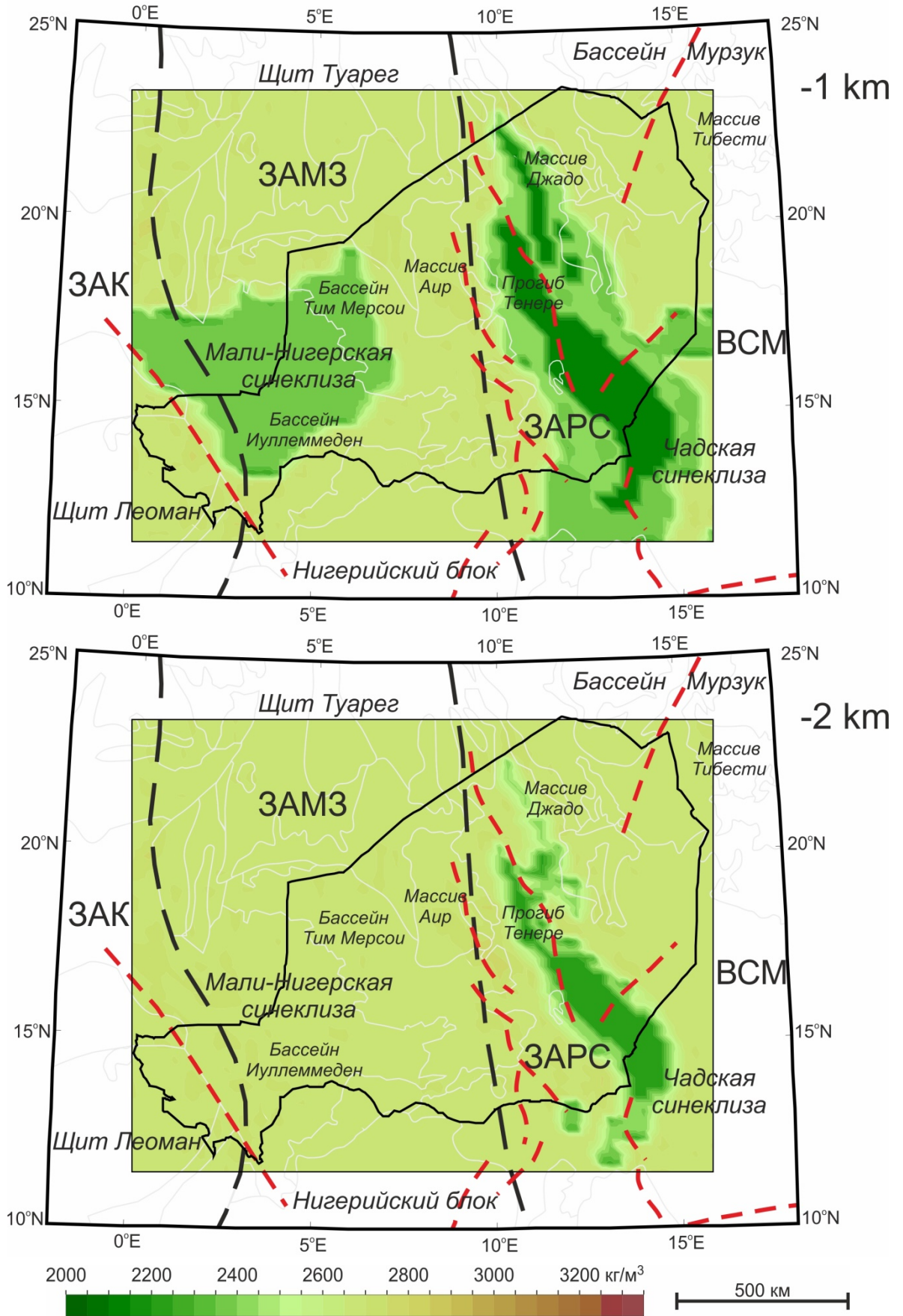


Рис. 4.19. Плотность на уровнях глубин

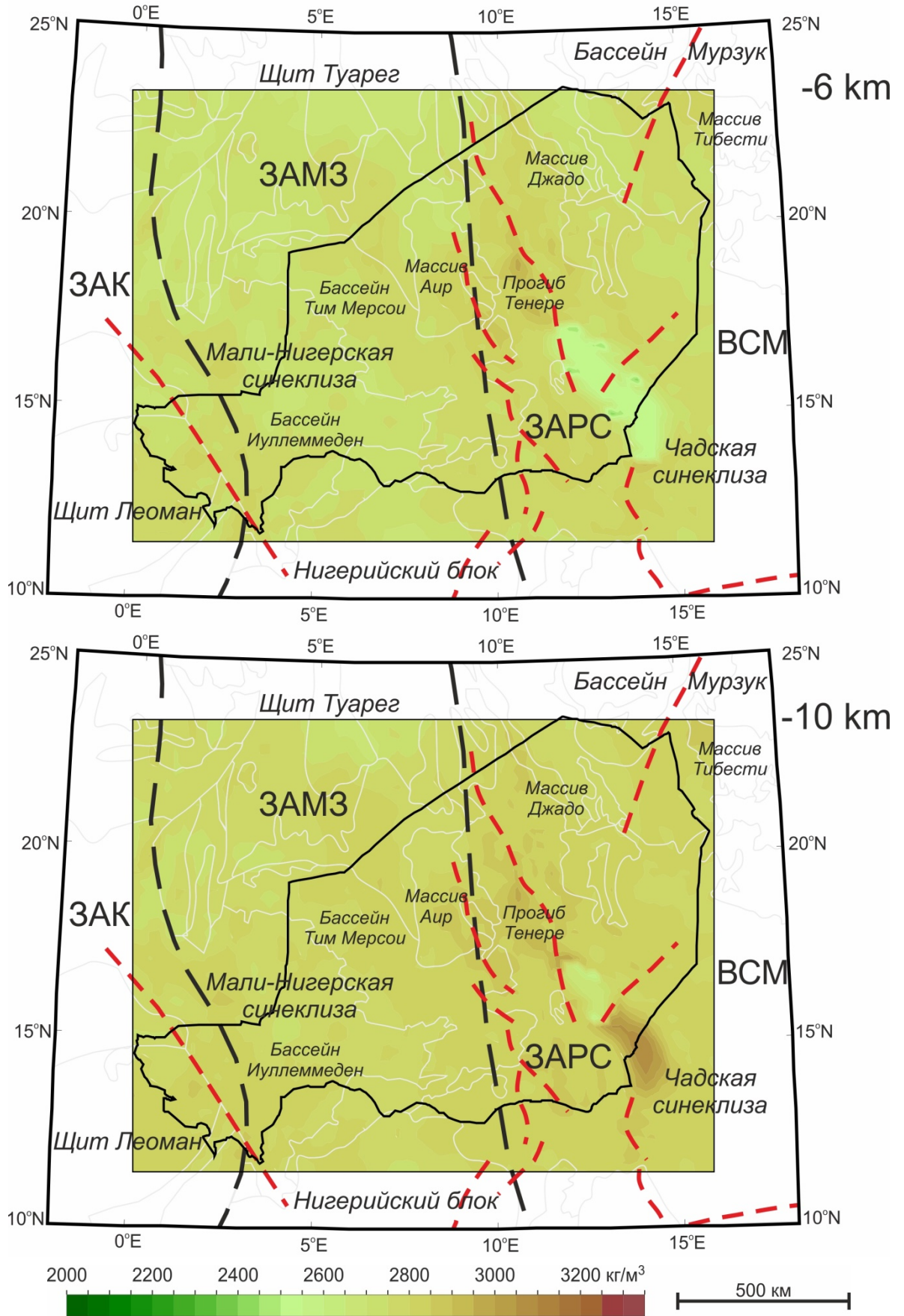


Рис. 4.20. Плотность на уровнях глубин

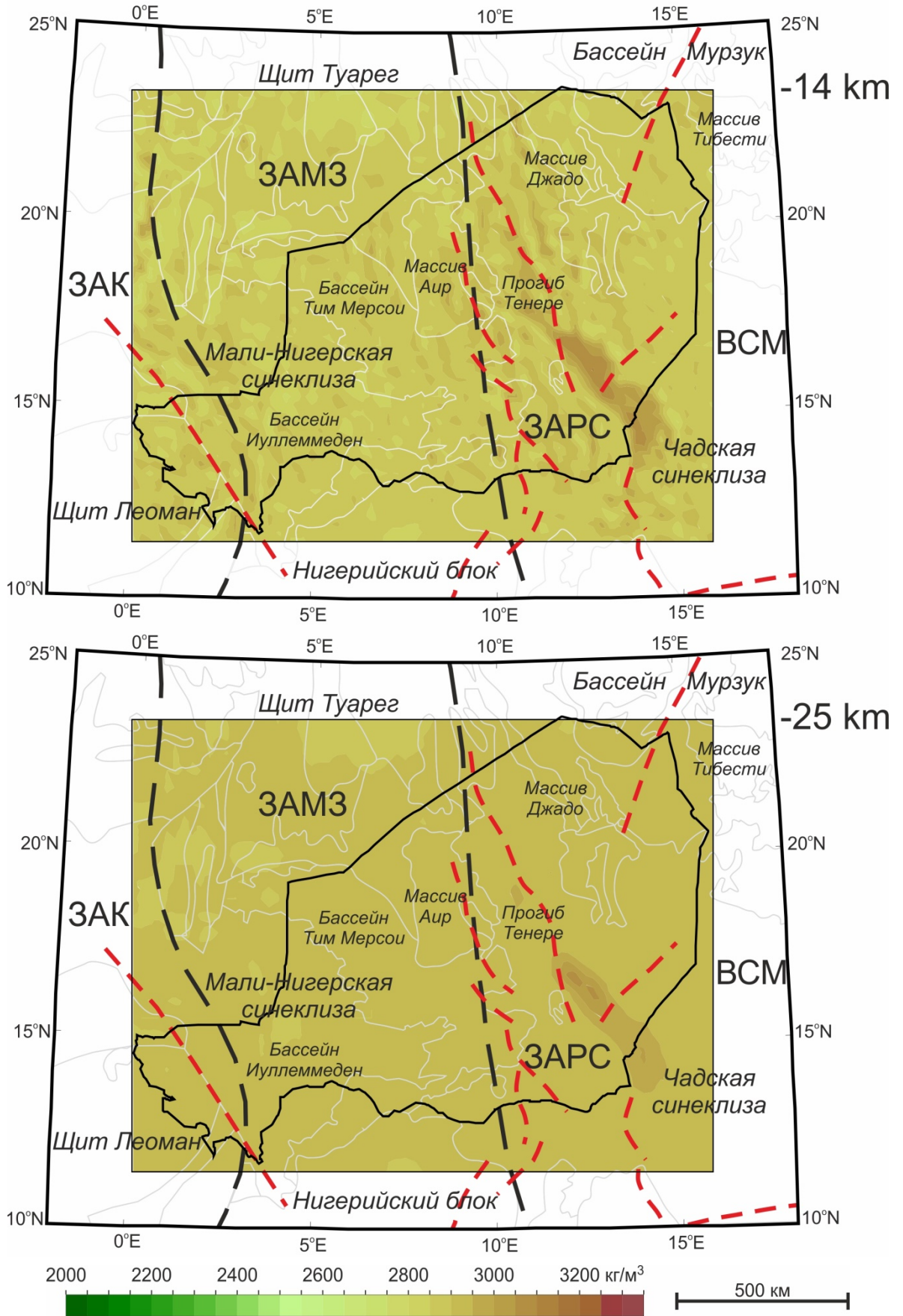


Рис. 4.21. Плотность на уровнях глубин

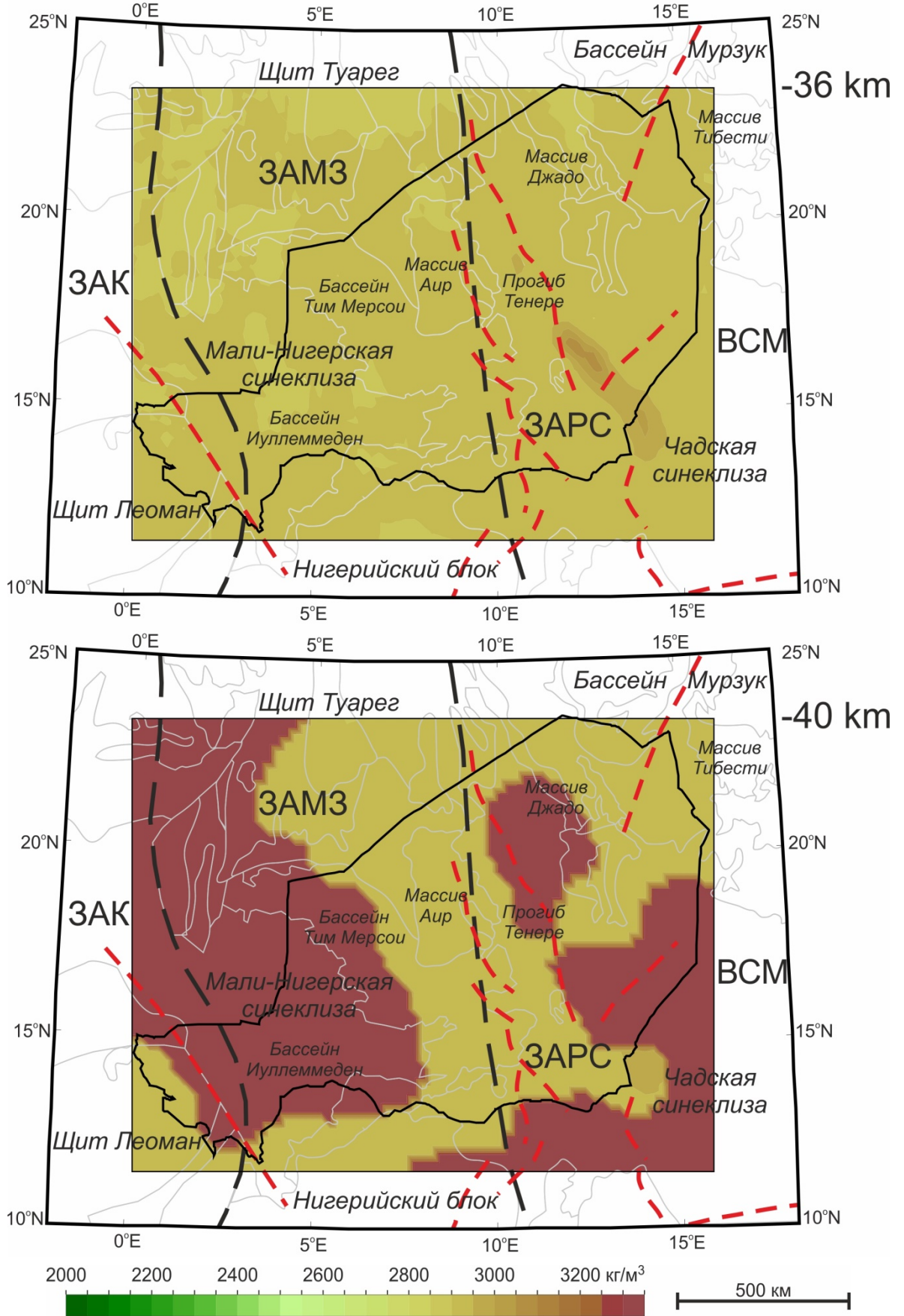


Рис. 4.22. Плотность на уровнях глубин

На глубинных срезах -1 и -2 км (рис. 4.19) породы фундамента имеют значения плотности в диапазоне 2680 – 2800 кг/м³. Пространственная дифференциация плотности кристаллических пород весьма незначительна, а наиболее высокие её значения соответствуют локальным областям в юго-восточном обрамлении массива Аир и в западной части массива Джадо, где на глубине -2 км значения плотности пород равно 2750 – 2800 кг/м³. 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 глубинных срезах модели в -1 и -2 км (рис. 4.19) осадочный комплекс пород заполняет региональные структурные бассейны чехла и грабены в фундаменте. Кайнозойские породы чехла характеризуются плотностью примерно 2140 – 2220 кг/м³, а мезозойские породы имеют плотность от 2370 и 2430 кг/м³. Поперечные размеры грабенов уменьшаются с глубиной, причём в северном окончании ЗАРС (к западу от массива Джадо) устанавливается выраженное раздвоение системы грабенов с уменьшением их линейных размеров.

Для срезов на уровнях -6 и -10 км (рис. 4.20) характерно возрастание плотности пород кристаллического фундамента с глубиной. Здесь на глубине -6 км гранитоидные комплексы щита Туарег характеризуются плотностью в диапазоне 2680 – 2720 кг/м³, что сопоставимо с их плотностью на поверхности (см. раздел 2.1). Ниже, на глубине -10 км, почти повсеместно залегают породы с плотностью 2760 – 2830 кг/м³, которые можно отождествить с породами средней коры. Локальная вытянутая аномалия повышенной плотности, со значениями 2860 – 2960 кг/м³, располагается под юго-западной частью массива Аир на глубине -6 км и прослеживается до глубины -10 км с увеличением её 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 подводными магматическими каналами трещинного типа для массивов Аир и Джадо.

Отметим также систему аномалий повышенной плотности на срезе - 6 км, совпадающую в плане с корневой частью грабена Тенере (рис. 4.20). На глубинном срезе -10 км данная аномалия транслируется далее в юго-западном направлении, где под южным окончанием грабена Термит (рис. 1.3) плотность кристаллических пород фундамента достигает величин 2960 – 3100 кг/м³, что отвечает породам основного-ультраосновного состава. На глубине -14 км (см. рис. 4.21) просматривается уже вся корневая коровая система главной части грабена Тенере-Термит, выраженная как линейная аномалия повышенной плотности 2980 – 3100 кг/м³, 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 (см. раздел 4.2.1), представлены на глубинных срезах -6 и -10 км (рис. 4.20) как локальные области с плотностью 2530 – 2640 кг/м³. Отметим, что на срезе -14 км (рис. 4.21) породы осадочного чехла, заполняющие грабен, не отображаются в аномальной плотности для этой глубины, поскольку размеры сетки модели по вертикали составляли здесь 4 км (выше горизонта сетки) и 11 км (ниже горизонта сетки).

На уровне глубин средней коры (рис. 4.21), вне корневой области собственно грабенов ЗАРС, аномалии плотности носят мозаичный вид со значениями плотности кристаллических пород 2780 – 2890 кг/м³. Далее на глубине -25 км плотность незначительно возрастает до 2910 – 2930 кг/м³ при незначительной дифференциации в плане. На этом глубинном уровне наиболее ярко выраженной особенностью модели является линейная аномалия плотности со значениями 2970 – 3060 кг/м³, вытянутая в юго-западном направлении. В плане эта аномалия, с размерами примерно 500 км по простиранию и шириной около 60 км, совпадает с грабеном Термит.

Глубже по разрезу, на уровне нижней коры (рис. 4.22), плановая дифференциация модели становится ещё меньше и значения плотности коровых пород варьируют в пределах 2860 – 2940 кг/м³ вне 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, включённом в нашу модель (см. рис. 4.22), рассчитанные значения плотности пород в целом близки к нормальным значениям для плотностной модели мантии [Картвелишвили, 1983], составляющей 3320 кг/м³. Отметим, что собственно Западно-Африканская рифтовая система не совпадает в плане с положением зоны максимального подъёма границы раздела кора-мантия и находится в области горизонтального градиента глубины границы Мохо (рис. 4.22) на стыке восточного ограничения ЗАРС и Восточно-Сахарского мегакратона.

Приведённый выше 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; Louis, 1970; Louis, Rechenmann, 1966]. Наши результаты трёхмерного плотностного моделирования позволили достоверно выявить наличие глубинной части рифтовой системы, продолжающейся вплоть до границы Мохо, как это продемонстрировано на рис. 4.23. Пространственное положение коровой части рифтовой системы выражено субпараллельными вытянутыми геологическими телами юго-юго-западного простирания, предположительно сложенными породами основного-ультраосновного состава. Размеры наиболее крупных объектов достигают 700 км по простиранию при ширине до 100 км (см. рис. 4.21). Верхнекоровые фрагменты некоторых таких тел, вероятно, являются

подводящими магматическими каналами трещинного типа для массивов Аир и Джадо (см. рис. 4.19 и 4.20).

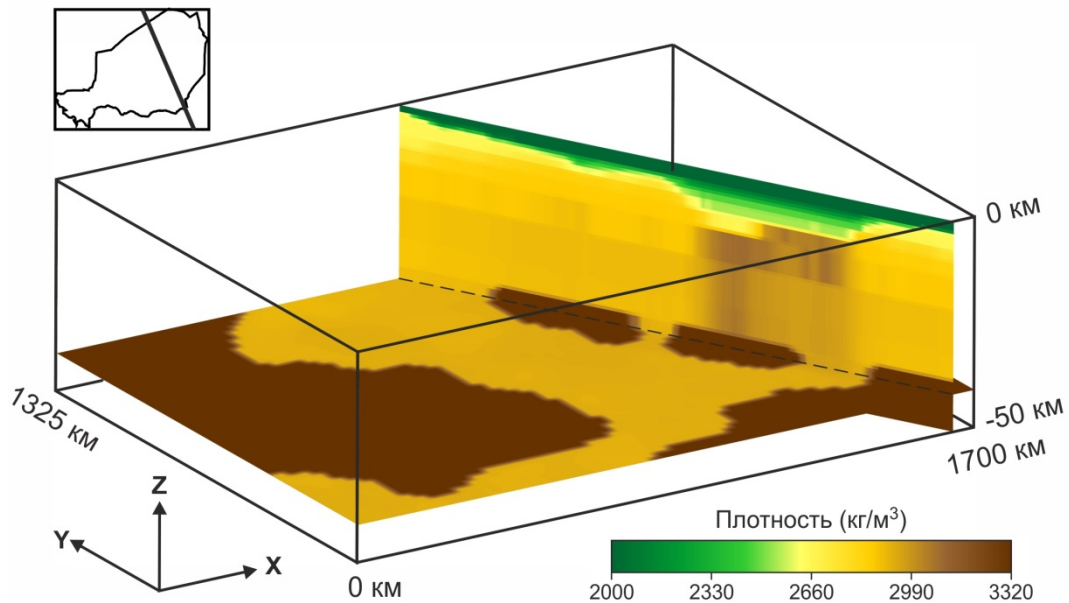


Рис. 4.23. Горизонтальное (на глубине -40 км) и вертикальное сечение плотностной модели земной коры (положение разреза показано на врезке слева вверху)

На уровне средней и нижней коры установлено последовательное пространственное смещение корневой части рифтовой системы в юго-юго-восточном направлении и увеличение её размеров в плане, как это показано на рис. 4.24. 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 Восточно-Сахарского мегакратона (см. рис. 4.22).

В целом результаты трёхмерного плотностного моделирования в области ЗАРС можно трактовать как результат активного рифтогенеза, обусловленного подъёмом мантийного диапира [Liégeois et al., 2005] с развитием косога трансрастяжения коры [Балаганский и др., 1998; Harland, 1971], 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 при правостороннем смещении. Плановая форма формирующихся рифтовых структур соответствует основным положениям геодинамических построений для вязко-упругих геосистем [Ramsay, Huber, 1987; Tron, Brun, 1991].

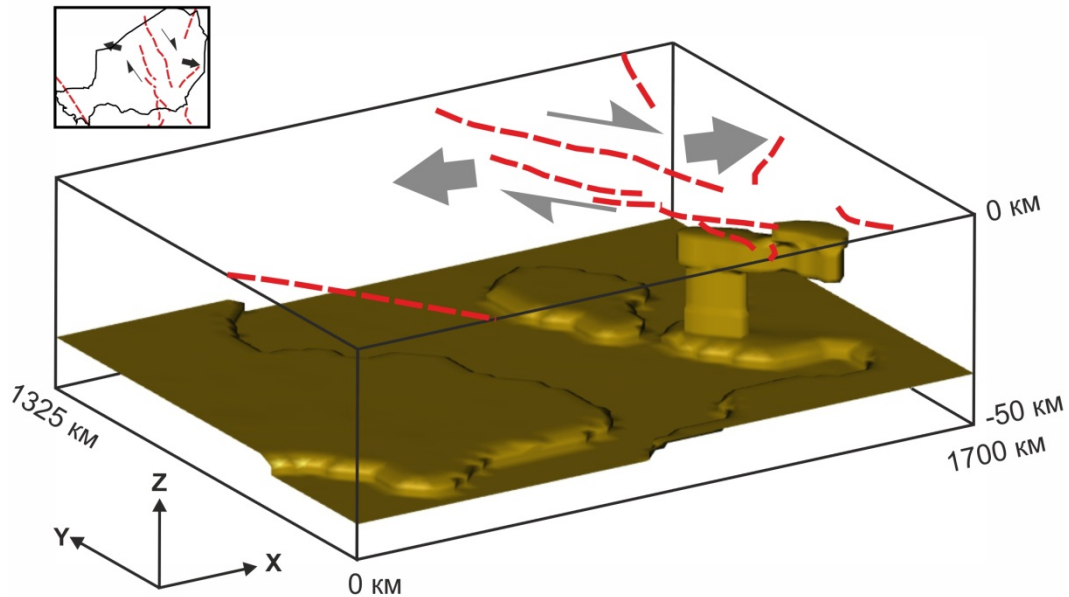


Рис. 4.24. Изоповерхность для плотности равной 3000 кг/м^3 . Показано положение основных разломов ЗАРС (см. рис. 1.2) на уровне дневной поверхности; стрелки – направление деформаций растяжения и сдвига.

Выводы к главе 4

1. По данным стохастической интерпретации построенной сводной модели гравитационного поля выполнена оценка мощности земной коры для территории Республики Нигер и прилегающих стран, которая существенно отличается от глобальной модели CRUST1, особенно в восточной части региона исследований. Решение прямой задачи гравиметрии позволило вычислить вклад плотностного раздела кора-мантия в наблюдаемое гравитационное поле региона.

2. Составлена сводная региональная модель плотностного строения осадочного чехла изучаемой территории, опирающаяся на данные глобальной модели LITHO1, а также новые результаты сейсмических исследований 2D ОГТ. В этой модели учтены новые материалы

петроплотностных исследований глубоких скважин в области развития грабенов Западно-Африканской рифтовой системы на территории Республики Нигер. Рассчитанный гравитационный эффект от модели осадочного чехла позволил оценить вклад мощных толщ чехла в наблюдаемое гравитационное поле региона исследований.

3. В результате исключения гравитационного влияния раздела Мохо и плотностных неоднородностей осадочного чехла, составлена региональная схема гравитационных аномалий, обусловленных, предположительно, неоднородностями плотности, расположенными в кристаллической земной коре региона исследований. Решение трёхмерной обратной задачи гравиметрии для этого аномального поля позволило построить непротиворечивую плотностную модель кристаллической коры для всего региона исследований, опирающуюся на глобальную плотностную модель LITHO1, наши новые данные о мощности земной коры и предложенную сводную плотностную модель осадочного чехла.

4. Рассмотрены основные особенности построенной 3D плотностной модели земной коры территории исследований и выполнено сопоставление выявленных плотностных неоднородностей коры с данными региональных геолого-тектонических построений. Отмечена ведущая роль молодых структур Западно-Африканской рифтовой системы и их связь с плотностными неоднородностями в нижней и средней коре территории Республики Нигер.

Глава 5. Прогноз ураноносности территории Республики Нигер

В данной главе рассматривается методика и результаты прогнозирования месторождений урана песчаникового типа (см. раздел 1.5.2) на территории Республики Нигер, основанные на использовании совокупности региональных геолого-геофизических материалов и новой технологии пространственного анализа данных методом группового учёта аргументов [Глазнев и др., 2022]. Приведены примеры выявления формальных признаков, характеризующих размещение известных крупных объектов урановой минерализации, и реализован их идентификационный анализ, ориентированный на определение информационной содержательности совокупности использованных признаков. Выполнено комплексное региональное прогнозирование месторождений песчаникового типа на территории Республики Нигер, по результатам которого намечен ряд перспективных участков для постановки детальных работ на обнаружение месторождений урана.

5.1. Геолого-геофизические данные

Геофизические материалы, используемые для регионального прогнозирования, должны, с одной стороны, отвечать требованиям, характеризующим опосредованные связи полей с геолого-тектоническими особенностями строения региона [Mints et al. 2020; Muravina et al., 2019b], а с другой стороны, обеспечивать наиболее полное покрытие изучаемой территории соответствующими данными об аномальных полях.

В качестве первичных геофизических данных были использованы региональные материалы гравиметрических и магнитных исследований территории (см. разделы 3.1 и 3.2). Данные об амплитудах аномалий гравитационного и магнитного полей использовались в качестве признаков, характеризующих геофизическую неоднородность изучаемой территории. Кроме того по этим данным были рассчитаны модули горизонтальных градиентов аномального гравитационного и магнитного полей на сетке 5 на 5

км, которые также принимались в качестве признаков для прогнозных построений. По аномалиям гравитационного поля была рассчитана его первая вертикальная производная на сетке 5 на 5 км, которая также выступала в качестве ещё одного признака геофизической неоднородности верхней части разреза коры.

Созданные схемы аномальных полей, а также схемы горизонтальных и вертикальных градиентов полей, позволили обратиться к структурно-тектоническим построениям по указанным геофизическим материалам. На основе анализа морфологических особенностей полей были выявлены системы примерно ортогональных структурных элементов, предположительно связанных с ориентировкой простирания и положением контактов поверхностных геологических комплексов региона. В качестве примера на рис. 5.1 показаны структурные элементы, выделенные по данным анализа аномалий магнитного поля и аномалий первой вертикальной производной гравитационного поля.

Аналогичные построения, выполненные и для остальных геофизических полей, демонстрируют сходные тенденции в структурно-тектоническом районировании региона. Таким образом, выявленный мотив структурного узора территории, установленный по результатам анализа полей, может использоваться в качестве совокупности признаков неоднородности геолого-тектонического строения региона.

Важным элементом геофизических данных является также 3D плотностная модель земной коры территории Республики Нигер и прилегающих областей, полученная в результате решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии (см. раздел 4.4). Полученные данные о плотностном строении верхней части разреза коры (см. рис. 4.18 и 4.19), установленные по результатам решения обратной задачи гравиметрии, также использовались в качестве одного из признаков неоднородности геологического строения региона.

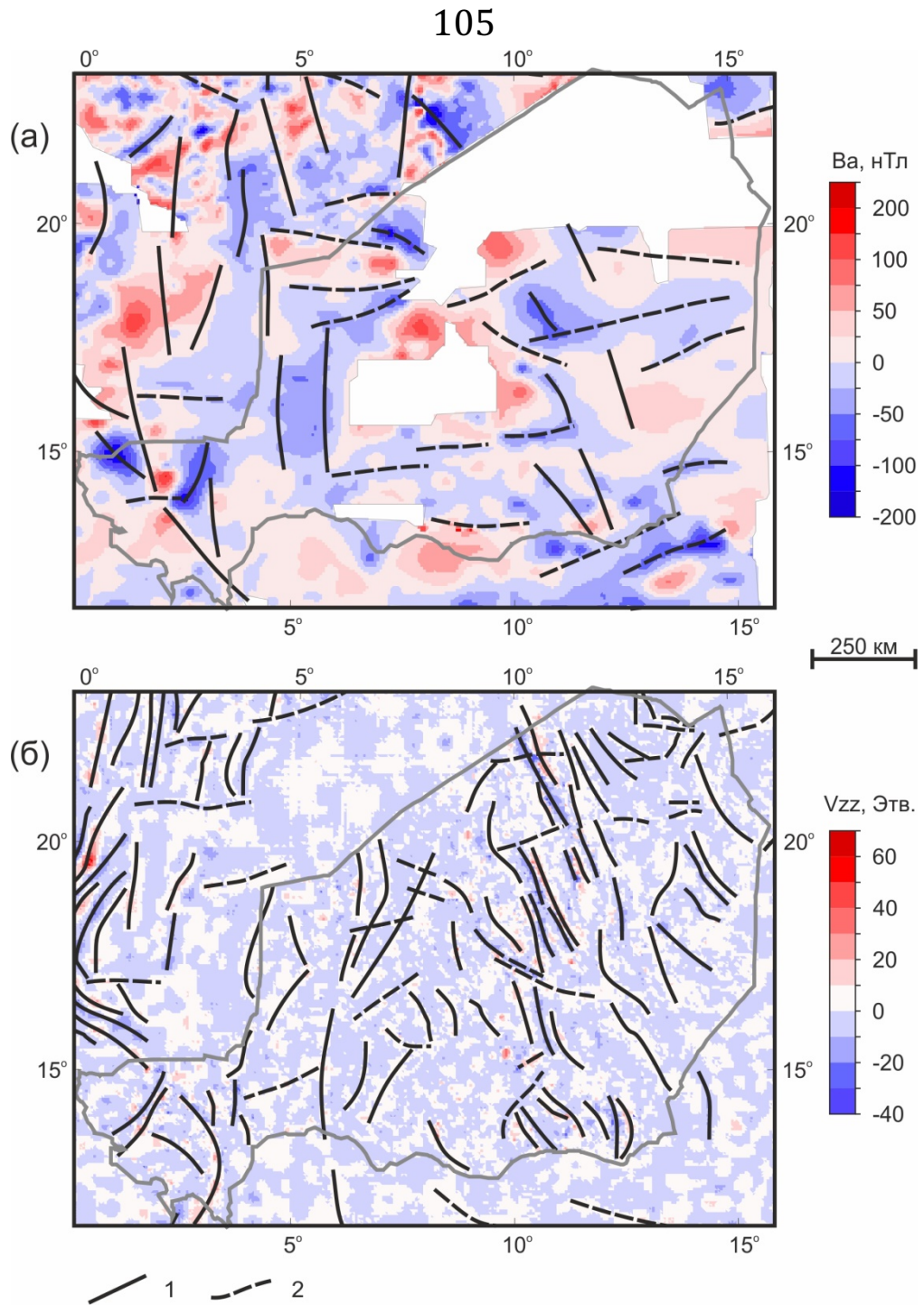


Рис. 5.1. Геофизические поля и элементы структурно-тектонического районирования: (а) – аномальное магнитное поле; (б) – вертикальная производная гравитационного поля. Условные обозначения: 1 – элементы меридионального простирания; 2 – широтного простирания

Как отмечалось выше (см. раздел 1.5.2), для известных крупных месторождений урана уставлена их приуроченность к определённому интервалу глубин в толще осадочного чехла. Составленные схемы мощности слоёв осадочного чехла на территории исследований (см. рис. 4.11),

характеризующие диапазон возможного глубинного размещения пластово-инфильтрационных месторождений урана, могут использоваться в качестве значимого прогнозного признака.

Ещё одним важным прогнозным признаком являются данные о рельефе региона, представленные цифровой модели ETOPO1 [Amante, Eakins, 2009]. С общих тектонических позиций [Артюшков, 1993] неоднородности отметки высот и наклоны рельефа характеризуют степень неотектонических процессов и скорость процессов эрозии дневной поверхности. Разность гипсометрических отметок обеспечивает также гидравлический напор грунтовых вод, играющих роль в формировании урановых месторождений региона (см. раздел 1.5.1). Таким образом, эти характеристики рельефа региона могут также использоваться в качестве прогнозных признаков.

5.2. Буферные зоны данных

Данные по генезису урановых месторождений песчаникового типа (см. раздел 1.5.2) показывают, что эти объекты находятся на некотором пространственном удалении от характерных геолого-геофизических неоднородностей верхней коры. Для операций с такими пространственными данными средствами геоинформатики [ArcGIS, 2001] строятся т.н. «буферные зоны», которые можно рассматривать как некоторую область влияния признака в заданном пространственном диапазоне.

В нашем случае к таким признакам относятся: выходы пород докембрийского гранитоидного комплекса щита Туарег (рис. 1.5), которые являются первичным источником урановой минерализации; структурно-тектонические элементы по геофизическим данным (рис. 5.1), которые ограничивают участки локализации месторождений [Тарханов, Бугриева, 2012; Billon, Patrier, 2019; Sani et al., 2021]; интерпретационные данные трёхмерной плотностной модели (рис. 4.18 и 4.19), горизонтальные градиенты которой характеризуют пространственное положение границ гранитоидных комплексов докембрия.

Пример построения буферных зон линейных структурных элементов, выделенных по аномалиям наблюдаемого гравитационного поля, показан на рис. 5.2а. Пример буферных зон для внешности полигональных областей горизонтального градиента плотности, на глубинном срезе 0 км, показаны на рис. 5.2б.

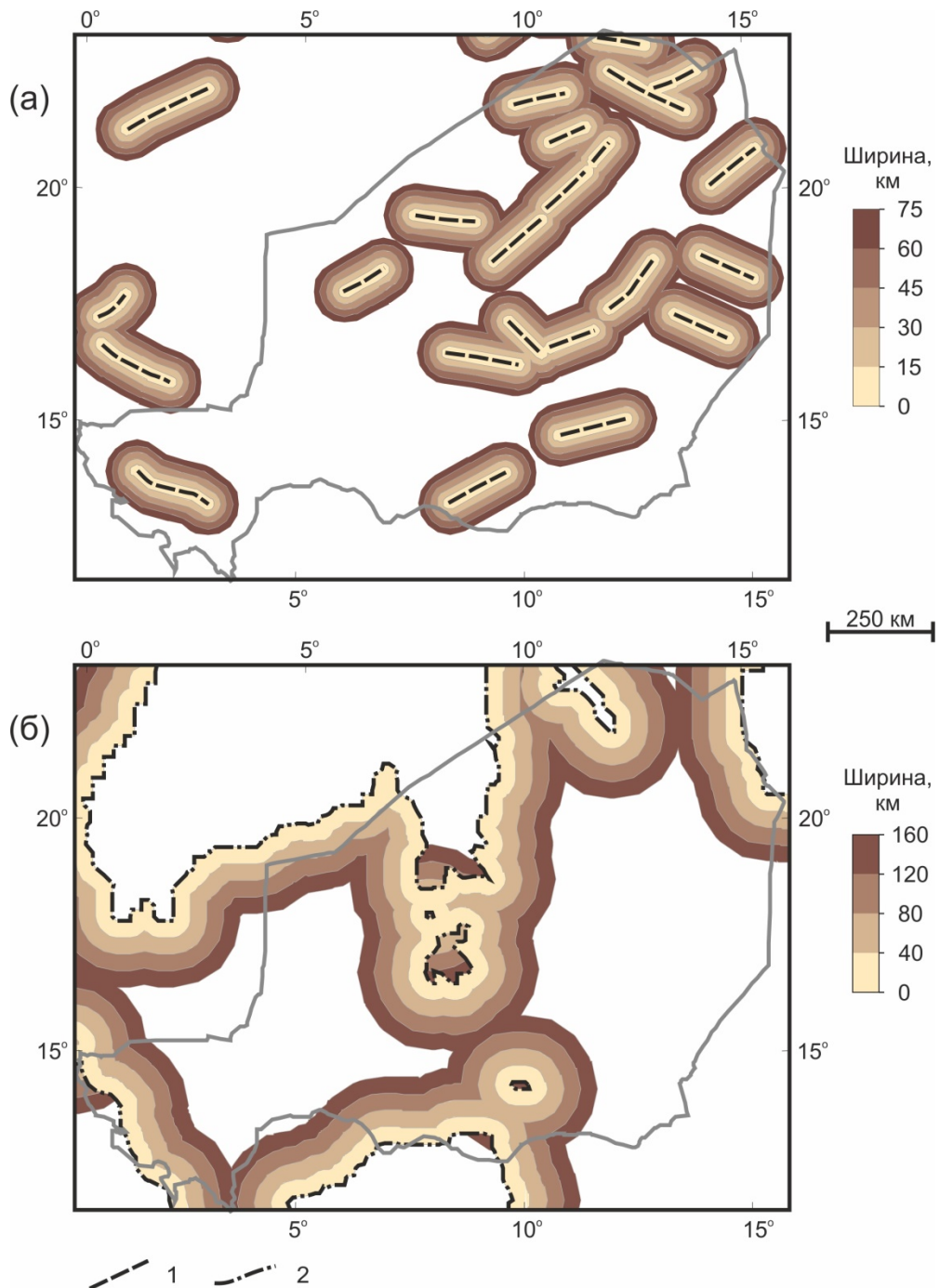


Рис. 5.2. Буферные зоны: (а) – линейных широтных структурных элементов гравитационного поля; (б) – полигональных областей горизонтального градиента плотности. Условные обозначения: 1 – структурные элементы по гравитационному полю; 2 – изолиния плотности 2630 кг/м³.

В целом, построение буферных зон линейных и полигональных объектов наиболее полно соответствуют существу поставленной задачи прогнозирования, так как позволяют определить области, находящиеся на заданном удалении от рассматриваемых геофизических аномалий, а равно и соответствующих им геологических объектов.

5.3. Анализ пространственных данных

Сформированная на основе рассмотренной выше геолого-геофизической информации система признаков включает в себя следующие показатели:

- значение аномалий гравитационного поля;
- величину модуля горизонтального градиента гравитационного поля;
- значение аномалий вертикальной производной гравитационного поля;
- значение аномалий регионального магнитного поля;
- величину модуля горизонтального градиента магнитного поля;
- значение высот рельефа;
- величину модуля горизонтального градиента рельефа;
- значение мощности осадочного чехла;
- значение плотности пород на уровне 0 км в плотностной модели коры;
- буферные зоны расстояний от комплексов докембрийских гранитоидов;
- буферные зоны расстояний от области градиента плотности;
- буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального простирания по данным гравитационного поля;
- буферные зоны расстояний от структурных элементов широтного простирания по данным гравитационного поля;
- буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального простирания по данным вертикальной производной гравитационного поля;

- буферные зоны расстояний от структурных элементов широтного простирания по данным вертикальной производной гравитационного поля;
- буферные зоны расстояний от структурных элементов меридионального простирания по данным регионального магнитного поля;
- буферные зоны расстояний от структурных элементов широтного простирания по данным регионального магнитного поля.

Для регулярного представления всех 17 признаков по изучаемой территории была выбрана ячейка (грид) представления данных с размерами 20 на 20 км, что отвечает детальности исходной геофизической информации и наших интерпретационных построений. Собственно построение грид-модели данных выполнялось стандартными средствами использованной геоинформационной системы [ArcGIS, 2001], что позволило сформировать единообразное описание признаков по территории.

Полученные грид-модели данных позволили проанализировать распределение выбранных признаков для 12 эталонных объектов – известных крупных месторождений урана на территории Республики Нигер (рис. 1.5). Сводные гистограммы распределения признаков для выбранных эталонных объектов показаны на рис. 5.3 только по пятнадцати наиболее выраженным признакам. Распределение признаков на эталонных объектах демонстрирует высокую степень их информационной значимости для классификационных построений по следующим показателям: горизонтальному градиенту гравитационного поля, региональному магнитному полю, горизонтальному градиенту магнитного поля, высотам рельефа, мощности осадочного чехла, расстоянию до комплексов докембрийских гранитоидов, плотности пород, расстоянию до зоны градиента плотности, расстоянию до меридиональных структурных элементов гравитационного поля, расстоянию до широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля.

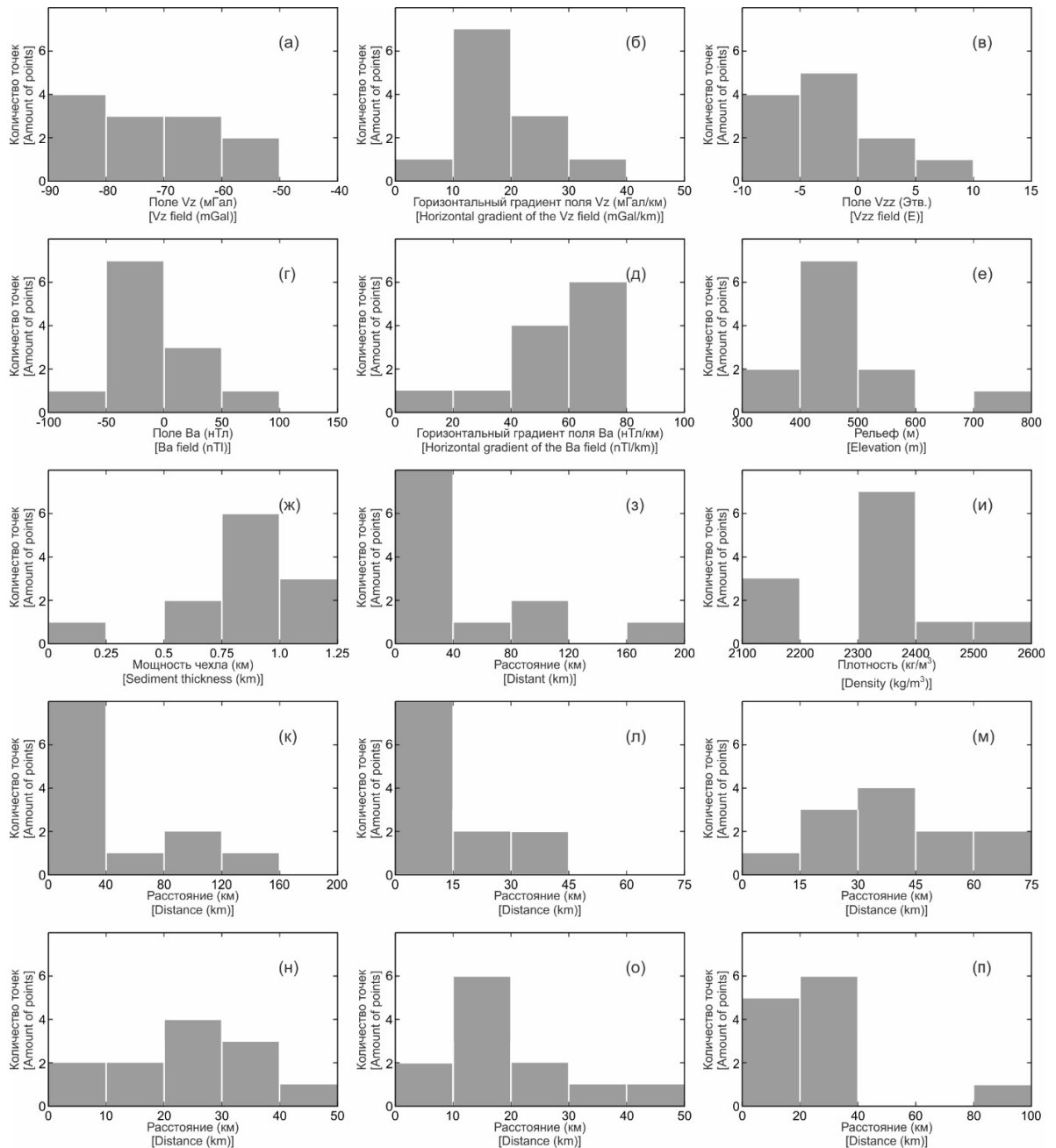


Рис.5.3. Гистограммы распределений признаков для эталонов (N=12): (а) – гравитационное поле; (б) – горизонтальный градиент гравитационного поля; (в) – вертикальная производная гравитационного поля; (г) – региональное магнитное поле; (д) – горизонтальный градиент магнитного поля; (е) – рельеф; (ж) – мощность осадочного чехла; (з) – буферные зоны для комплексов докембрийских гранитоидов; (и) – плотность пород в плотностной модели; (к) – буферные зоны градиента плотности; буферные зоны меридиональных (л) и широтных (м) структурных элементов гравитационного поля; буферные зоны меридиональных (н) и широтных (о) структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля; (п) – буферные зоны широтных структурных элементов регионального магнитного поля.

Для остальных признаков их информационная значимость менее выражена, но и они могут использоваться при прогнозировании, поскольку значения признаков по всей совокупности точек грид-модели данных имеют существенно более широкий диапазон.

Построенные распределения признаков на эталонных объектах позволили выполнить «реклассификацию» грид-моделей данных с использованием стандартных процедур геоинформационной системы [ArcGIS, 2001]. Фактически процедура реклассификации грид-моделей признаков приводит их значения к единой условной шкале, отражающей информационное содержание признака (значение частоты на гистограмме) по отношению к эталону. Для значений величин признаков не характерных эталонам их информационная содержательность принималась равной нулю. Таким образом, полученные грид-модели реклассифицированных признаков представляют входную информацию в новой системе единиц (классов) относительно использованных эталонов.

5.4. Методика и результаты прогнозирования

В данном разделе рассматривается стандартный эвристический подход [Калинин, 2011; Никитин, 1988; Carranza, 2002; ArcGIS, 2001] к прогнозированию перспективных участков уранового оруднения песчаникового типа на территории Республики Нигер и некоторые усовершенствования технологии прогнозирования на основе содержательной информационной оценки признаков по технологии МГУА [Муравина, 2009; Муравина, 2012; Муравина и др., 2019; Муравина и др., 2021; Муравина, Пономаренко, 2016; Muravina et al., 2019a].

5.4.1. Методика прогнозирования

Процедура прогнозного моделирования сводится к задаче классификации в весовом пространстве признаков [Калинин, 2011], что можно сформулировать как вычисление функции вида

$$P(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M w_m \cdot p_m(i, j) \quad (5.1)$$

где N – количество использованных эталонных объектов (в нашем случае $N=12$); m – индекс m -го признака, M – количество признаков; $p_m(i, j)$ – значение m -го реклассифицированного признака в точке грида с координатами i и j , w_m – весовая функция для признака m , $P(i, j)$ – вычисленное значение комплексного признака для точки грида с координатами i и j .

На практике вычисления по формуле (5.1) выполняются стандартными средствами операций над гридами, представленными в программном модуле ArcGIS Spatial Analyst [ArcGIS, 2001]. Принципиально важным моментом в таком моделировании является выбор системы весовых функций w_m , которые обеспечивают оптимальность классификации территории. На первом этапе прогнозирования использовались единичные веса признаков, что является стандартным подходом в рамках ArcGIS Spatial Analyst. Результат такого предварительного прогнозного моделирования показаны на рис. 5.4.

Приведённая схема демонстрирует невысокую пространственную дифференцируемость прогнозных построений, причём положение некоторых эталонных объектов не проявляется в данных регионального прогноза. Очевидно, что такой результат является следствием допущения о равных весах признаков, хотя материалы анализа (рис. 5.4) показывают существенно различающуюся информационную содержательность использованных признаков. Этот аспект проблемы имеет определяющее значение для прогнозирования с использованием совокупности эталонов [Никитин, 1988].

Для оценки информационной содержательности признаков и их весов в выражении (5.1) был использован метод группового учёта аргументов [Муравина, 2012; Муравина, Пономаренко, 2016]. По своей сути технология МГУА, являющегося методом индуктивного моделирования, позволяет выполнять системный анализ данных и формировать идентификационную модель как полиномиальную функцию зависимой переменной от наиболее влиятельных аргументов. Метод основан на генерации и переборе различных

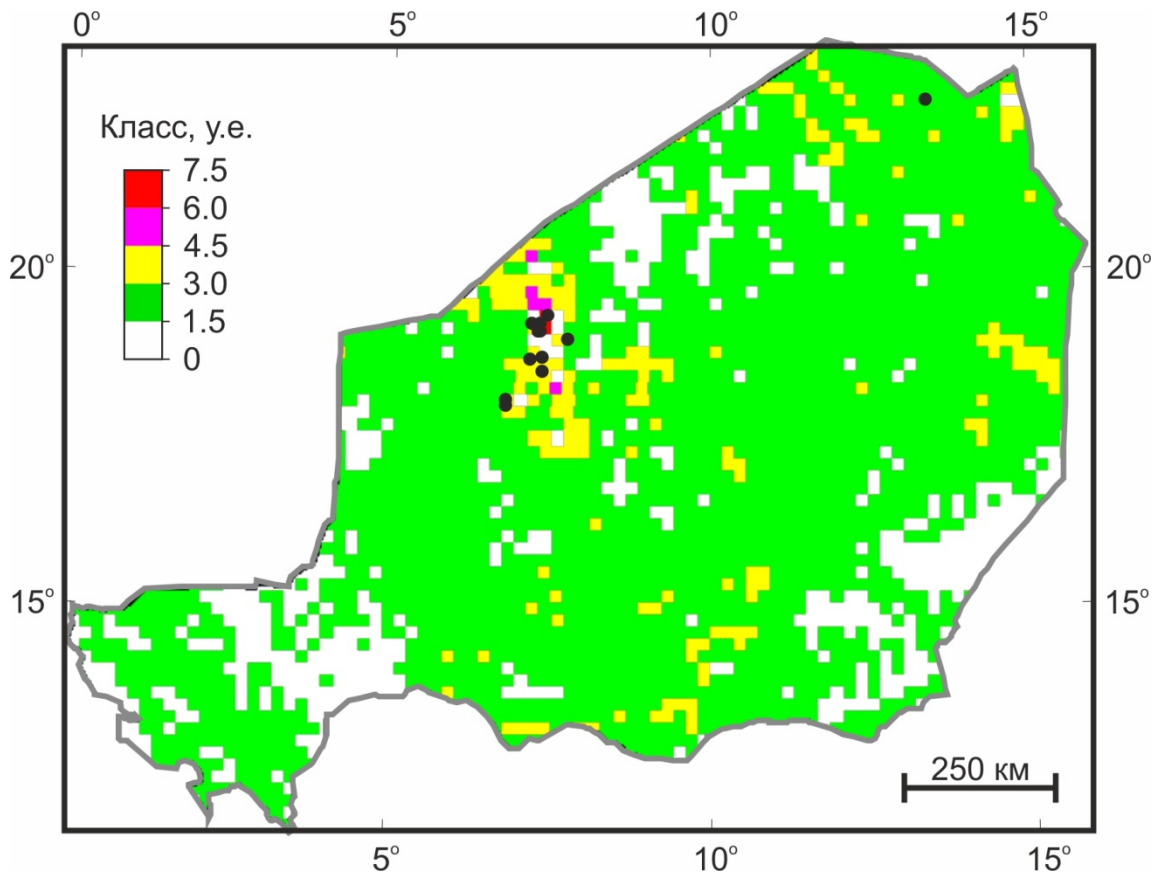


Рис. 5.4. Предварительный прогноз месторождений урана на территории Республики Нигер при единичных весах признаков. Точки – положение известных месторождений песчаникового типа

моделей, отличающихся как структурой, так и параметрами. Варианты структуры уравнений формируются на основе базовой функции, которая представляет собой полином Колмогорова-Габора первой степени для двух переменных [Муравина, 2009]. Усложнение структуры моделей и увеличение количества параметров достигается за счёт организации многорядного алгоритма, что фактически реализует синергетический принцип выбора наилучшей модели. Качество моделирования обеспечивается использованием обучающей и тестовой последовательности данных. Результаты применения МГУА при работе с геолого-геофизическими данными подтверждают его эффективность [Муравина, 2009; Муравина и др. 2019; Муравина, Пономаренко, 2021].

При работе с данными грид-модели реклассифицированных признаков была сформирована матрица данных, включающая значения рассмотренных

выше 17 признаков для всех 12 известных месторождений (рис. 1.5), которая была дополнена таким же количеством заведомо безрудных объектов, равномерно распределённых на участках изучаемой территории, в пределах которых наличие месторождений маловероятно. Таким образом, длина анализируемой последовательности наблюдений составила 24 значения, где зависимая переменная Y принимала значение 1 (наличие месторождения) или 0 (отсутствие месторождения), а в роли переменных-аргументов выступали анализируемые признаки.

Идентификационное моделирование МГУА выполняется с помощью программы, адаптированной для работы с геолого-геофизическими данными [Муравина, Пономаренко, 2016]. В результате моделирования было получено семейство модельных уравнений связей между параметрами, качество которых, согласно принятой технологии применения МГУА, оценивалось по значению критерия регулярности – независимого внешнего критерия, рассчитываемого по формуле:

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_k^K (Y_k - Ym_k)^2}{\sum_k^K Y_k^2}, \quad (5.2)$$

где K – размер тестовой последовательности данных, не задействованных в процедуре формирования модели; Y – фактические значения зависимой переменной; Ym – модельные значения зависимой переменной.

По результатам выполненного идентификационного анализа лучших моделей все признаки были разделены на 4 условных группы, описанные ниже. В первую группу включены признаки, вошедшие в два лучших уравнения ($\varepsilon^2 = 0.15$), включающие буферные зоны меридиональных и широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля, а также буферные зоны широтных структурных элементов гравитационного поля и собственно аномальное гравитационное поле. Во вторую группу вошли признаки, формирующие модельные уравнения со значением критерия ($\varepsilon^2 = 0.17 - 0.20$), к которым отнесены буферные зоны градиента плотности, буферные зоны широтных структурных

элементов регионального магнитного поля и меридиональных элементов гравитационного поля, буферная зона удалённости от архейско-протерозойских комплексов и значения плотности в плотностной модели коры. К третьей группе ($\varepsilon^2 = 0.25 - 0.29$) отнесены менее значимые признаки: модуль горизонтального градиента гравитационного поля, аномалии вертикальной производной гравитационного поля, величина модуля горизонтального градиента магнитного поля, отметки рельефа, мощность осадочного чехла. В последнюю четвертую группу объединены признаки с наименьшей информационной значимостью ($\varepsilon^2 > 0.33$): региональное магнитное поле, буферные зоны меридиональных структурных элементов магнитного поля и наклон рельефа дневной поверхности.

Качество сформированных модельных зависимостей (уравнений) продемонстрировано на рис. 5.5 для выборок из первой и третьей группы данных.

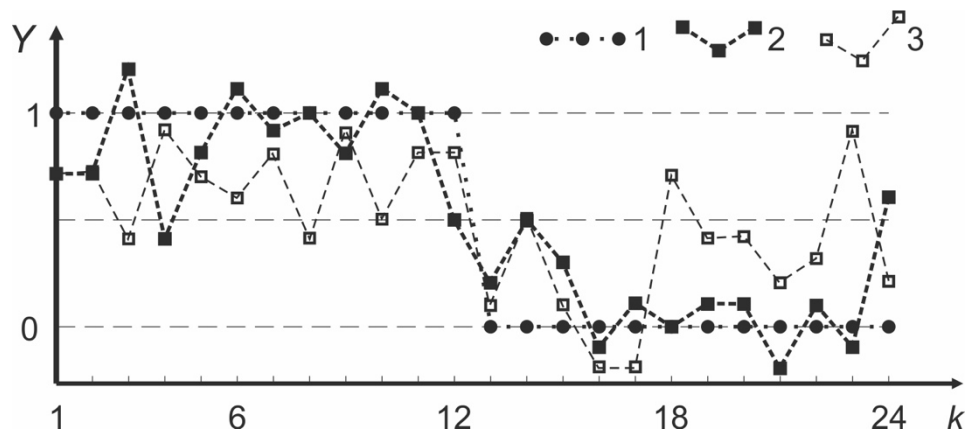


Рис. 5.5. Результаты идентификационного анализа МГУА. По вертикальной оси значение зависимой переменной Y , по горизонтальной оси номера точек в выборке данных. Условные обозначения: 1 — эталонная выборка (с 1 по 12 наличие месторождений, с 13 по 24 их отсутствие); 2 — лучшая модель для первой группы ($\varepsilon^2 = 0.15$); 3 — «худшая» модель для третьей группы ($\varepsilon^2 = 0.29$).

Следует отметить, что в приведённых идентификационных зависимостях, построенных на реальных природных данных, всегда имеют место ошибки, как первого, так и второго рода [Никитин, 1988]. И если для лучшей модели таких ошибок только две — одна первого (точка 4) и одна

второго (точка 24) рода, то для “худшей” модели таких ошибок уже пять – три первого и две второго рода, причём, что важно, они относятся к иным точкам данных. Подобного рода расхождения характеризуют качество идентификации для выбранных признаков и не препятствуют использованию в прогнозировании каждого из них, естественно, со своими весами.

Результатом построения модельных зависимостей МГУА явились разделение совокупности признаков на четыре группы и определение весов влияния признаков по значению критерия (5.2). Рассчитанные веса для первых трёх групп признаков были откорректированы с учётом величин значимых коэффициентов в модельных идентификационных уравнениях для каждого признака. Сводные значения весов показаны в таблице.

Таблица 5.1

Вес признаков		
№	Признак	Вес
1	Буферные зоны широтных структурных элементов гравитационного поля	1.0
2	Буферные зоны меридиональных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля	1.0
3	Значения плотности в плотностной модели	0.9
4	Буферные зоны удалённости от архейско-протерозойских комплексов фундамента	0.9
5	Значения аномалий гравитационного поля	0.8
6	Величина мощности осадочного чехла	0.8
7	Буферные зоны меридиональных структурных элементов гравитационного поля	0.8
8	Буферные зоны градиента плотности	0.7
9	Буферные зоны широтных структурных элементов магнитного поля	0.7
10	Буферные зоны широтных структурных элементов вертикальной производной гравитационного поля	0.6
11	Величина модуля горизонтального градиента гравитационного поля	0.4
12	Величина модуля горизонтального градиента магнитного поля	0.3
13	Отметки рельефа	0.2
14	Значение вертикальной производной гравитационного поля	0.1

Как явствует из приведённой таблицы, признаки отличаются по своему вкладу в общее значение комплексного параметра. Максимальным весом обладают признаки, полученные по геофизическим полям и геологическим данным (признаки 1-10), и ещё четыре признака имеют существенно меньший вес. В целом полученные веса признаков в опосредованной форме отражают описанную выше систему априорных геолого-геофизических сведений о поисковых критериях наличия урановых месторождений песчаникового типа.

Основным методическим аспектом данного раздела является объединение формальной эвристической технологии распознавания образов [Калинин, 2011; ArcGIS, 2001; Carranza, 2002] и синергетических принципов оценки информационной содержательности совокупности использованных признаков на основе технологии МГУА [Муравина, 2009, 2012; Муравина и др., 2019а; Муравина, Пономоренко, 2016; Muravina et al., 2019а]. Реализованный подход позволяет получить полную ранжированную характеристику изучаемого объекта и, частично, сократить общее количество признаков, сохранив при этом максимальное количество полезной информации. Именно такие аспекты прогнозирования, обозначенные как наиболее актуальные в задачах геологического картирования и минерагенического прогнозирования [Бабаянц, Трусов, 2022], выходят в настоящее время на первый план комплексных методов анализа геолого-геофизических данных.

5.4.2. Результаты прогнозирования

Изложенная обобщённая технологии была реализована при региональном комплексном прогнозе месторождений урана песчаникового типа по территории Республики Нигер. Сформированная оптимальная совокупность признаков позволила построить пространственное распределение комплексного параметра на изучаемой территории (рис. 5.6) и

выделить ряд перспективных областей, которые характеризуются высокими значениями параметра (>3.2 условных единиц).

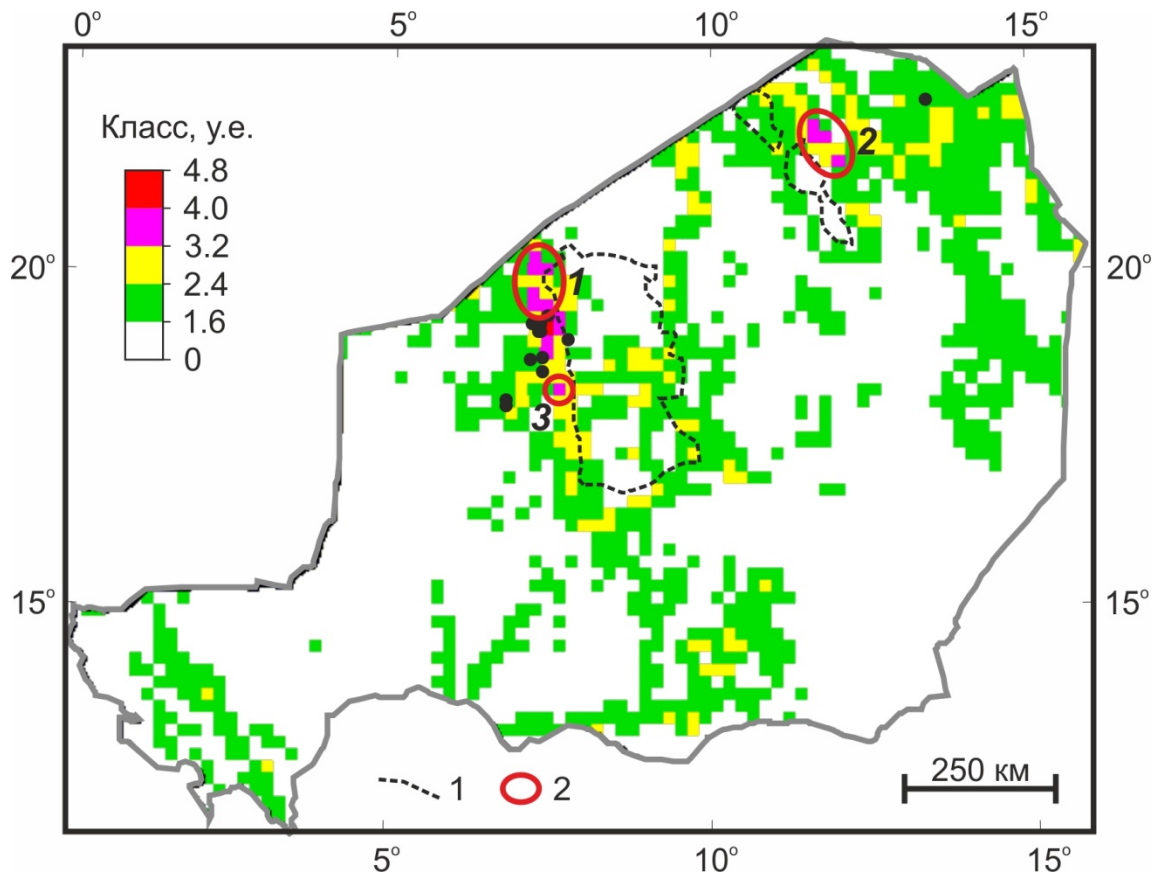


Рис. 5.6. Итоговый прогноз месторождений урана на территории Республики Нигер. Точки – положение известных месторождений песчаникового типа. Условные обозначения: 1 – границы массивов Аир и Джадо; 2 – участки перспективные на обнаружение месторождений (курсивом показаны их номера)

Первая такая область (рис. 5.6) располагается в северо-западном обрамлении массива Аир и сопряжена с субмеридиональной зоной трансрастяжения, сформированной региональным разломом Азауа-Арлит [Konate et al., 2007]. Прогнозная область 1 находится на удалении в несколько десятков км к северу от группы известных крупных месторождений Акаута-1, Акаута-2, Арлит и по всем признакам может рассматриваться как наиболее перспективная для детальных поисков новых месторождения урана песчаникового типа.

Вторая интересная аномальная область комплексного параметра расположена к востоку от массива Джадо (рис. 5.6). В геологическом отношении область 2 соответствует пологому северо-западному борту бассейна Джадо [Глазнев, Якуба, 2021] и пространственно совпадает с корневой частью массива Джадо, установленной по результатам плотностного моделирования земной коры [Глазнев и др., 2021]. С тектонических позиций область 2 приурочена к системе структурных элементов меридионального простирания, выявленной по данным анализа аномалий вертикальной производной гравитационного поля (рис. 5.1б). В целом прогнозная область 2, хотя и находится на удалении около 200 км от известного месторождения Джадо, по совокупности геолого-геофизических признаков может рассматриваться как достаточно перспективная для постановки детальных поисковых работ на обнаружение урановой минерализации песчаникового типа.

Третья аномальная область комплексного параметра (рис. 5.6) имеет существенно меньшие размеры в плане. Указанная область приурочена к региональному разлому Азауа-Арлит [Konate et al., 2007] и расположена в нескольких десятках километров к югу от месторождения Секирет (рис. 5.1). По совокупности геолого-геофизических признаков область 3 также может быть рекомендована для проведения детальных поисковых работ на обнаружение урановой минерализации песчаникового типа.

Особо отметим, что при детализации комплексных исследований на перспективных прогнозных участках работ следует совместно рассматривать региональные геофизические построения для земной коры в целом и более детальные геолого-геофизические результаты построений по ее верхней части. Примеры таких комплексных регионально-локальных минерагенических исследований показали их высокую результативность для конкретных объектов на территории Балтийского щита [Белашев и др., 2015; Glaznev et al. 2015; Mitrofanov et al., 1998] и Воронежского кристаллического массива [Минц и др., 2017].

5.5. Геофизические методы поисков месторождений урана

Поисками и добычей урана в Республике Нигер занимаются иностранные компании, которые строго соблюдают коммерческую тайну и не разглашают сведений о методиках проводимых геофизических исследований. В силу этого наши рекомендации по методике геофизических работ на уран основываются только на имеющихся редких иностранных публикациях и достаточно широком списке работ российских авторов. Геологическая специфика урановых месторождений инфильтрационного типа, изложенная в разделе 1.5, собственно и является основой для формирования типового комплекса геофизических работ на объектах такого рода. Помимо этих данных предлагаемый комплекс опирается и на сведения о физических свойствах вмещающих пород и собственно урановых руд, которые были изложены в разделе 2.2. Таким образом, современный подход к проведению поисково-оценочных работ на уран должен характеризоваться высоким пространственным разрешением и представительностью данных, чему в полной мере отвечает комплекс аэрогеофизических исследований [Yacouba, 2020].

Ниже рассмотрим комплекс поисково-разведочных геофизических работ, предлагаемый для постановки на новых перспективных участках уранового орудинения песчаникового типа на территории Республики Нигер.

5.5.1. Наземные и аэрогеофизические методы

Комплекс наземных и аэрогеофизических методов при поисках месторождений урана традиционно включает радиометрические, магнитометрические, геоэлектрические исследования и, реже, гравиметрию и сейсмические методы [Бабаянц и др., 2011; Кербали, 2000; Пахомов и др., 2006; Трусов, 2011; Billon, 2014; Bisset et al., 2013].

Пример эффективности аэро-гамма и аэромагнитной съёмки показан на рис. 5.7 для участка поисковых работ на уран в области осадочного бассейна Тин Серирины (щит Туарег) в самой южной части Алжира [Nacer, Khaldi,

2014]. Район поисковых работ располагается на продолжении системы разломов Азауа-Арлит (см. рис. 1.5) за пределы территории Республики Нигер и примыкает к её северной границе.

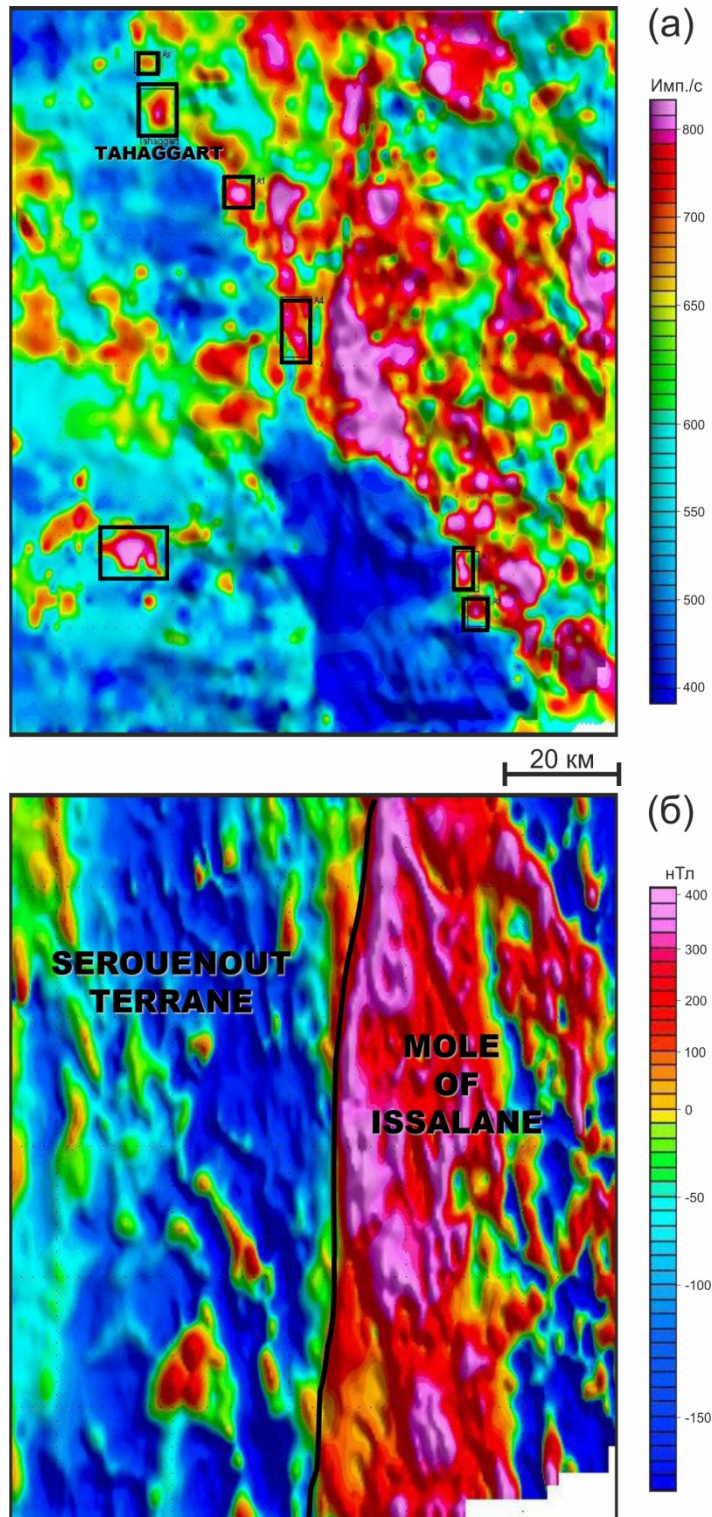


Рис. 5.7. Карта результатов радиометрической съёмки (а) и магнитной съёмки (б) по [Nacer, Khaldi, 2014]. На карте радиометрии показаны подтверждённые наземной съёмкой аномалии, на карте аномалий магнитного поля показан основной разлом Азауа-Арлит

Докембрийский гранитоидный массив, фактически являющийся продолжением массива Аир, отображается обширной областью повышенных значений поля магнитного поля и относительно сложным распределением радиометрических аномалий, что обусловлено мощностью перекрывающих его осадочных толщ. Сложный характер магнитного поля в пределах массива обусловлен вещественной неоднородностью и тектоникой массива. Зона разлома Азауа-Арлит отчётливо выделяется пониженными значениями радиационного поля и резким горизонтальным градиентом аномального магнитного поля. Оконтуренные на радиометрической карте аномалии заверены бурением, которое подтвердило наличие урановой минерализации.

Таким образом, рациональное сочетание метода гамма-спектрометрии и магнитной съёмки при детальном геологическом картировании и поисках месторождений урана являются эффективным средством оптимизации геологоразведочного процесса за счёт повышения точности и сокращения времени на опосредованное исследование территории [Бабаянц, 2015]. Результаты аэромагнитной съёмки обеспечивают возможность решения задач структурного картирования и выявления косвенных поисков урановых месторождений. Результаты аэрогамма-спектрометрических исследований позволяют строить радио-геохимические карты изучаемой территории на стадии картировочных исследований. И на стадии прогнозно-поисковых работ, в благоприятных условиях, определять концентрации содержания U, Th и K по спектральному составу гамма-излучения природных радионуклидов [Бабаянц и др., 2011; Бабаянц и др., 2015; Трусов, 2011; Высокоостровская и др., 1983; Шувалов, 1984].

Что касается аэроэлектроразведочных работ, то в общем объёме геофизических исследований на уран такие методы приобретают всё большее значение. В частности это касается методов измерения естественных переменных электромагнитного поля в области частот звукового диапазона, а также методов многочастотного электромагнитного профилирования и зондирования, основанных на использовании

искусственных импульсных источников поля [Романов, 2013; Трусков, 2011; Nacer, Khaldi, 2014 и др.].

Исходя из геологической и петрофизической моделей урановых месторождений песчаникового типа на территории Республики Нигер (см. раздел 2.2), методы электроразведки в варианте сопротивлений, позволяют решать задачи картирования разломов и изучения структурно-вещественных особенностей осадочного чехла, являющихся косвенными признаками уранового оруденения. Методами электроразведки можно изучать внутренне строение ролловых структур, что обусловлено наличием зон повышенного удельного сопротивления, возникающих при заполнении пор кальцитом и кварцем в пределах роллового фронта [Романов, 2013; Якуба, 2020]. Электромагнитные методы, как и методы удельного сопротивления, в используются для обнаружения высоко-проводящих пород и позволяют решать задачи обнаружения электрических неоднородностей на глубине [Трусков, 2011].

Отметим, что в условиях поисков урановых месторождений песчаникового типа на территории осадочных бассейнов Республики Нигер методы гравиразведки и сейсмические методы могут иметь подчинённое значение в общем комплексе геофизических исследований.

5.5.2. Скважинные геофизические методы

На стадии заверки и разведки урановых месторождений выполняются буровые работы. Все пробуренные картировочные и поисковые скважины должны изучаться скважинными геофизическими методами с целью получения информации о геологическом строении разреза, выявления рудных горизонтов и оценки качества руд. При поисках урановых месторождений песчаникового типа скважинными методами решаются следующие основные задачи [Ерофеев, Номоконова, 2009; Язиков, Легавко, 2012; Diallo, 2013 и др.]: литологическое расчленение разреза; детальное изучение фациально-литологического строения и фильтрационных свойств

пород рудовмещающих горизонтов; выявление рудных интервалов и параметров уранового оруденения (мощность, средние содержания полезного компонента). Эти задачи, как правило, могут быть решены следующим комплексом геофизических исследований скважин (ГИС) [Бровин и др., 1997; Ерофеев, Номоконова, 2009; Язиков, Легавко, 2012]:

- электрический каротаж (КС, ПС) скважин для литологического расчленения разреза и изучения фильтрационных свойств;
- гамма-каротаж с целью выявления интервалов с урановой минерализацией и определения параметров уранового оруденения, а также литологического расчленения разреза;
- каротаж магнитной восприимчивости для выявления и картирования зоны полного окисления песчаниковых месторождений;
- инклинометрия для оценки истинного положения стволов скважин и установления координат рудных пересечений в пространстве;
- кавернометрия для контроля за величиной диаметра скважин, что необходимо для расчета поправок на поглощение гамма-излучения в буровом растворе при интерпретации данных гамма-каротажа; результаты кавернометрии дают также дополнительный материал для литологического расчленения разреза;
- другие специальные виды каротажа: нейтрон-нейтронный, гамма-гамма плотностной каротаж, токовый каротаж, термометрию, расходомерию и др.

Из специальных видов каротажа при поисках урановых месторождений наиболее широко используется каротаж мгновенных нейтронов деления, позволяющий оценивать содержание урана непосредственно в породе, а не через гамма-активные продукты распада. В основе указанного комплекса методов ГИС лежат петрофизические особенности геологического разреза для типичных песчаниковых месторождений территории Республики Нигер (см. раздел 2.2.).

На рис. 5.8 приведён пример расчленения разреза по результатам каротажных исследований методами ГК, КС, ИК и ПС с выделением литологических разностей осадочной толщи и выделения рудных интервалов на одном из песчаниково-инфильтрационных месторождений урана Республики Казахстан [Ерофеев, Номоконова, 2009].

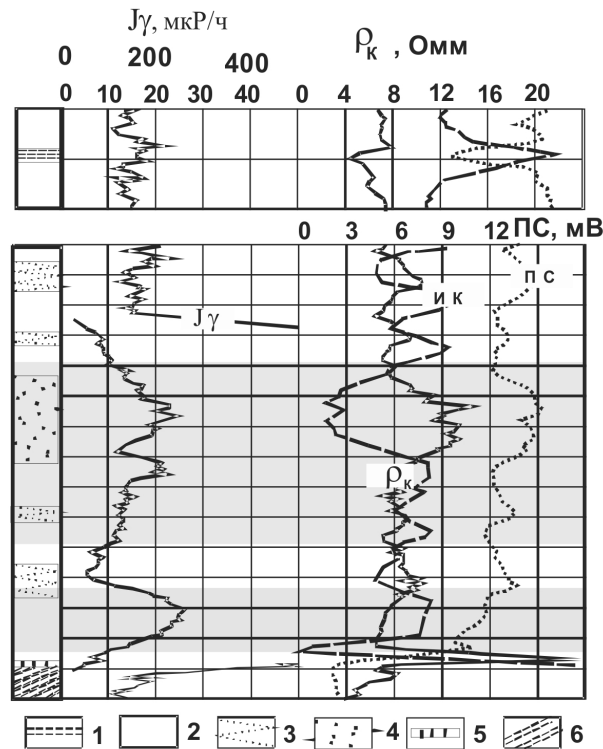


Рис. 5.8. Выделение основных разновидностей горных пород по данным ГИС: 1 – глины; 2-4 – пески: средне-мелкозернистые (2), разномернистые (3), разномернистые с гравийным материалом (4); 5 – карбонатизированный песчаник; 6 – аргиллиты. Затененные зоны – рудные урановые интервалы

Результаты гамма-каротажа позволяют уверенно выявить в разрезе рудные интервалы. Данные КС, ИК и ПС позволяют не только расчленить разрез на основные литологические разности: глины, пески, песчаник и аргиллиты, но и разделить пески по гранулометрическому составу. В данных ГИС отмечается согласованное изменение графиков различных методов каротажа, что позволяет однозначно выполнять расчленение разреза по комплексу признаков. В целом, результаты интерпретации данных ГИС на типичном месторождении урана песчаникового типа свидетельствуют о высокой эффективности использованного комплекса каротажа.

Возможности электрического каротажа при литологическом расчленении осадочного чехла в условиях бассейна Тим Мерсои (см. рис. 1.2) показаны на рис. 5.9 [Diallo, 2013]. На них представлены диаграммы КС с зондами различной длины (RLLS и RLLD соответственно для большого и малого интервалов), что позволило исследовать разрез на разном удалении от ствола скважины. Кроме того, в скважине выполнен каротаж методом ПС (SP).

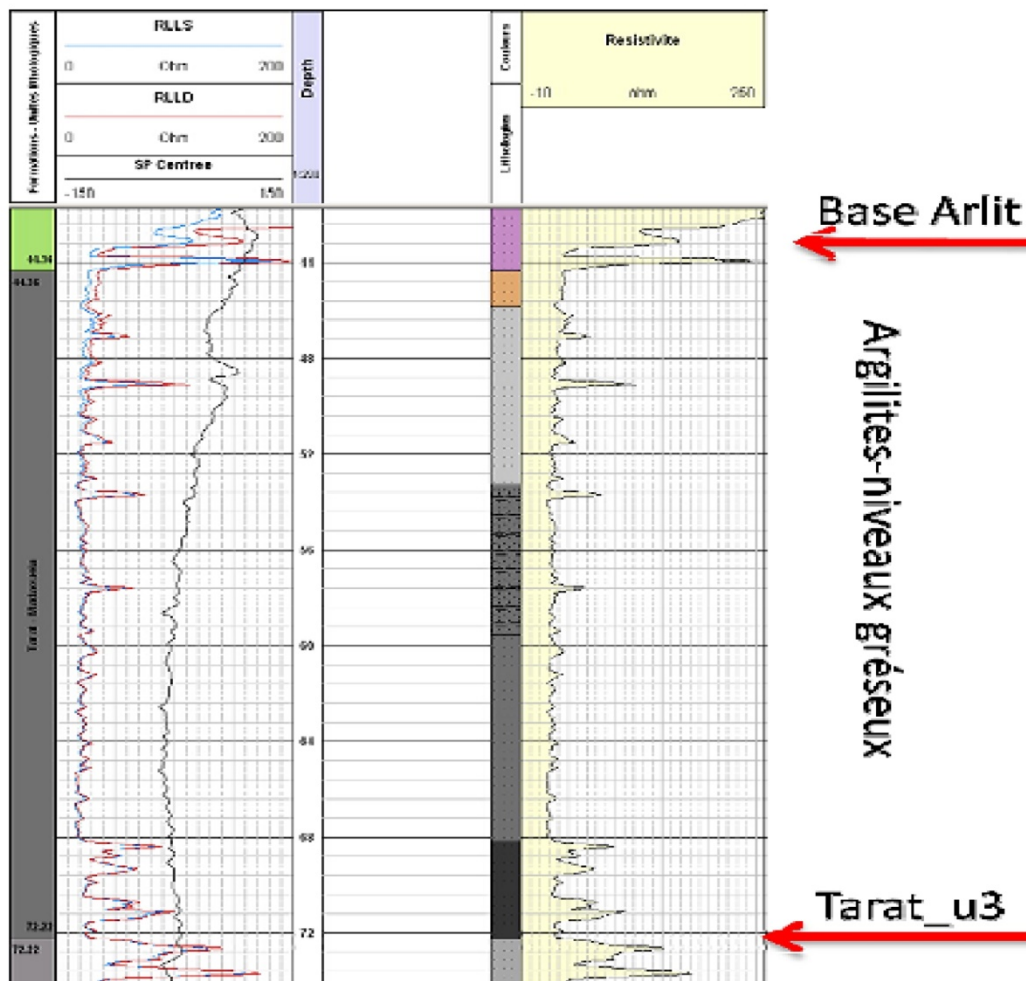


Рис. 5.9. Результаты каротажа методами КС и ПС (SP) по скважине GART_u035 на интервале глубин 42-75 м по [Diallo, 2013]

Геологический разрез осадочного чехла в районе Арлит, где пробурена скважина, представлен двумя большими группами пород. Первая - сероцветная формация верхнего карбона, представленная чередующимися песчаниками, алевролитами и глинами, сформированными в речных,

дельтовых и лиманных условиях. Вторая - красноцветная формация пермского и юрского возрастов, представленная чередованием песчаников, алевроитов, глин и известняков, сформированных в континентальной окислительной среде. По данным ГИС выше группы Тарат U3 отмечаются значения удельного сопротивления менее 30 Ом·м, соответствующие аргиллитам с прослоями песчаников (рис. 5.9). Кровля этой толщи фиксируется резким увеличением сопротивления на глубине 44,36 м. Выше залегают породы Арлит, представленные средне- и грубозернистыми песчаниками. Данные ПС по этой скважине менее информативны. Тем не менее, на диаграмме отмечаются отдельные аномалии разного знака. Отрицательные аномалии поля спонтанной поляризации свидетельствуют о наличии в разрезе сульфидов, углистого вещества, являющихся геохимическими барьерами на которых формируются руды урана. Такие аномальные зоны могут быть также связаны с нисходящими потоками подземных вод. Относительные повышения поля самопроизвольной поляризации могут свидетельствовать о наличии восходящих потоков подземных вод. Подобные участки также интересны с точки зрения поисков урана, так как с восходящими водами связаны зоны восстановления.

Отметим, что полученная при исследовании скважин информация помимо прямых данных о наличии урановых руд, может служить надёжной основой для интерпретации аэрогеофизических и наземных съёмок.

Выполненный краткий анализ результатов геофизических съёмок и методов ГИС при поисках урановой минерализации на перспективных участках возможного обнаружения месторождений песчаникового типа, свидетельствует о высокой эффективности геофизических методов.

Выводы к главе 5

1. На основе объединения формальной эвристической технологии распознавания образов и синергетических принципов оценки информационной содержательности использованных признаков, на основе

технологии МГУА, реализован подход к региональному прогнозированию территории по системе эталонов, который позволяет получить полную ранжированную комплексную характеристику изучаемой площади.

2. Предложенная методика комплексного анализа региональных геолого-геофизических данных демонстрирует хорошую эффективность и дифференцированность минерагенического прогноза на выявление участков перспективных на обнаружение месторождений урана песчаникового типа для территории Республики Нигер.

3. Сформированы основные направления и последовательность детальных геофизических работ при поисках месторождений урана песчаникового типа на выявленных перспективных прогнозных участках территории Республики Нигер.

Заключение

Представленные в диссертационной работе исследования направлены на изучение плотностного строения земной коры территории Республики Нигер на основе интерпретации аномалий гравитационного поля, а также выявление перспективных участков для поисков урановых месторождений на территории Республики. Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Построена сводная цифровая синтетическая модель гравитационного поля в редукции Буге, объединяющая данные спутниковой и наземной съёмок для территории Республики Нигер и прилегающих стран Западной и Экваториальной Африки. На основе стохастической интерпретации гравитационных аномалий дана оценка мощности земной коры изучаемой территории. С учётом гравитационного эффекта раздела кора-мантия и влияния плотностных неоднородностей осадочного чехла, впервые выполнено решение обратной задачи гравиметрии в трёхмерной постановке для территории Республики Нигер и прилегающих областей. Таким образом, «на основе решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии рассчитана плотностная модель земной коры для территории Республики Нигер и прилегающих областей» (**защищаемое положение № 1**), которая позволила сопоставить выявленные неоднородности земной коры с данными региональных геолого-тектонических исследований территории.

2. При региональном прогнозировании ураноносности по комплексу геолого-геофизических признаков реализовано объединение стандартных эвристических методов прогноза с одновременной оценкой информационной содержательности использованных признаков на основе технологии МГУА. Таким образом, впервые «обоснован региональный прогноз урановой минерализации на территории Республики Нигер и намечены перспективные участки для постановки поисковых геофизических работ» (**защищаемое положение № 2**).

Защищаемое положение № 1 доказано с помощью материалов, изложенных в главе 2, 3 и 4. Защищаемое положение № 2 доказано с помощью материалов, изложенных в главе 5.

Достоверность полученных результатов обеспечивается значительным объёмом гравиметрических данных, детальностью описания плотностных свойств пород чехла и фундамента, объединением глобальных моделей литосферы региона с новыми интерпретационными материалами 2D ОГТ. Результаты плотностного моделирования строения земной коры изучаемой территории обеспечены корректным начальным приближением модели среды и адекватным алгоритмом решения трёхмерной обратной задачи гравиметрии. Достоверность результатов прогнозирования урановой минерализации территории базируется на комплексе геолого-геофизических признаков, информационная содержательность которых независимо оценена по выборке для совокупности рудных и безрудных эталонных участков.

Полученные в ходе исследования результаты плотностного моделирования являются свидетельством корректного использования достоверных исходных данных, начального приближения среды, разумных ограничений на решение и адекватного алгоритма решения трёхмерной обратной задачи. Вклад диссертационной работы в развитие методов интерпретации данных гравиметрии, заключается в обосновании возможности создания адекватной трёхмерной плотностной модели земной коры в условиях неполноты исходной информации на основе использования совокупности региональных спутниковых моделей поля и материалов наземных съёмки, с опорой на глобальные сейсмо-плотностные модели литосферы. Важным методическим аспектом исследования является объединение формальной эвристической технологии распознавания образов и синергетических принципов оценки информационной содержательности совокупности использованных признаков на основе технологии метода группового учёта аргументом (МГУА).

Список литературы

1. Артюшков Е.В. Физическая тектоника / М.: Наука. 1993. 456 с.
2. Бабаянц П.С. Аэрогеофизические технологии – эффективное средство оптимизации геологоразведочного процесса // Разведка и охрана недр. 2015. № 12. С. 25-32.
3. Бабаянц П.С., Керцман В.М., Лёвин Ф.Д., Трусов А.А. Особенности современной аэрогамма-спектрометрии // Разведка и охрана недр. 2015. № 12. С. 10-15.
4. Бабаянц П.С., Трусов А.А. Методы распознавания образов при геологическом картировании и прогнозе оруденения / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. СПб.: ВСЕГЕИ. 2022. С. 19-21.
5. Бабаянц П.С., Трусов А.А., Лаврова Т.Ю. Комплексные аэрогеофизические работы при поисках месторождений урана гидрогенного типа // Разведка и охрана недр. 2011. № 7. С. 56-59.
6. Балаганский В.В., Глазнев В.Н., Осипенко Л.Г. Раннепротерозойская эволюция северо-востока Балтийского щита: террейновый анализ // Геотектоника. 1998. № 2. С. 16-28.
7. Белашев Б.З., Бойчук М.А., Горьковец В.Я., Иванов А.А., Климовский А.В., Климовская Е.Е., Нилов М.Ю., Полин А.К., Попов А.А., Попов М.Г., Раевская М.Б., Свириденко Л.П., Спиридонов А.М., Соколов С.Я., Фролов А.А., Шаров Н.В., Шеков В.А., Щипцов В.В., Мыскова Т.А., Осипенко Л.Г., Раевский А.Б., Попов А.А., Минц М.В., Муравина О.М., Глазнев В.Н., Пашкевич И.К., Старостенко В.И., Савченко А.С., Цветкова Т.А., Aaro S., Korhonen J.V., Skilbrei J.R., Рудашевский В.Н., Рудашевский Н.С., Жданова Л.А., Иванов Н.М., Корсакова М.А., Литвиненко В.И., Воробьев М.А., Дударев А.Г., Максимович Л.А. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минералогия) / Издательство: Карельский научный центр РАН. Петрозаводск. 2015. 322 с.

8. Бровин К.Г., Грабовников В.А., Шумилин М.В., Язиков В.Г. Прогноз, поиски, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием / Алматы: Гылым. 1997. 384 с.
9. Буянов А.Ф., Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Скопенко Г.Б. Комплексная интерпретация данных гравиметрии, сейсмометрии и геотермии // Геофизический журнал. 1989. Т. 11. № 2. С. 30–39.
10. Высокоостровская Е.Б., Краснов Л.И., Зубов С.И. Михайлова М.Е., Мукарева Г.Б., Никитин В.Я., Новиков Ю.Б., Плющев Е.В., Серых А.С., Смирнов В.А. Аэрорадиометрическое картирование. Методические рекомендации / Л.: Мингео СССР. 1983. 104 с.
11. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты, «КаЭМ». 2003. 252 с.
12. Глазнев В.Н., Лошаков Г.Г. Об одном методе моделирования рудных объектов с использованием адаптивной аппроксимации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2012. № 1. С. 243-246.
13. Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование земной коры центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2016. № 1 (29). С. 53–63.
14. Глазнев В.Н., Минц М.В., Якуба И.А. Трёхмерная плотностная модель земной коры территории Республики Нигер // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2021. № 4 (52). С. 6–21. DOI: [10.31431/1816-5524-2021-4-52-6-21](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-6-21)
15. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Воронова Т.А., Холин В.М. Оценка мощности гравиактивного слоя земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. № 4. С. 78–84.
16. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Лебедев И.П., Воронова Т.А. Петроплотностная карта докембрийского фундамента

Воронежского кристаллического массива. Масштаб 1 : 1 000 000. Объяснительная записка / Воронеж. Изд-во «Научная книга». 2020. 101 с.

17. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Якуба И.А. Региональное прогнозирование месторождений урана на территории Республики Нигер // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. № 1 (53). С. 32-45. DOI: [10.31431/1816-5524-2022-1-53-32-45](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-1-53-32-45)

18. Глазнев В.Н., Павловский В.И. Раевский А.Б. Автокорреляционные функции потенциальных полей, обусловленных горизонтальным слоем со случайным расположением источников // Физика Земли. 1978. № 8. С. 85–90.

19. Глазнев В.Н., Раевский А.Б., Балаганский В.В., Маннинен Т. Трёхмерная модель верхней коры района Киттила-Содансрюля, Финская Лапландия (север Балтийского щита) / Сборник материалов, посвящённый 40-летию юбилею кафедры геофизики ВГУ. Воронеж. ВГУ, 2002. С.11-20.

20. Глазнев В.Н., Терентьев Р.А., Жаворонкин В.И., Кораблинов П.В., Притыка И.В. Комплексные геолого-геофизические исследования при поисковых работах в условиях Северного Урала // Руды и металлы, 2011. № 3-4. С. 37-38.

21. Глазнев В.Н., Якуба И.А. Мощность земной коры территории Республики Нигер по данным стохастической интерпретации гравитационного поля // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2020. № 4. С. 46-58. DOI: [10.17308/geology.2020.4/3126](https://doi.org/10.17308/geology.2020.4/3126)

22. Глазнев В.Н., Якуба И.А. Гравитационный эффект осадочного чехла территории Республики Нигер // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 2. С. 71-82. DOI: [10.17308/geology.2021.2/3490](https://doi.org/10.17308/geology.2021.2/3490)

23. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород) / М.: Нефть и газ. 2004. 368 с.

24. Дортман Н.Б. (Ред.). Петрофизика: Справочник. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / М.: Недра, 1992. 391 с.

25. Ерофеев Л.Я. Электрические свойства минералов и горных пород / Томск: Изд. ТПУ, 1994. 53 с.
26. Ерофеев Л.Я., Номоконнова Г.Г. Геофизические методы исследования месторождений урана / Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 105 с.
27. Калинин Д.Ф. Информационно-статистический прогноз полезных ископаемых / СПб.: ФГУНПП «Геологоразведка». 2011. 164 с.
28. Картвелишвили К.М. Планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли / М.: Наука. 1983. 93 с.
29. Касимов Н.С., Воробьев А.Е. (Ред.). Геохимические барьеры в зоне гипергенеза / М.: Изд. МГУ. 2002. 395 с.
30. Кербали М. Методология комплексных космо-, аэро- и наземных геофизических работ с целью крупномасштабного геокартирования и поисков месторождений урана в условиях района Хоггар (Алжир) / Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М. 2000. 190 с.
31. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование / М.: ЗАО Геоинформмарк. 2000. 608 с.
32. Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных / М.: ЦентрЛитНефтеГаз. 2008. 286 с.
33. Максимова М.Ф., Шмарнович Е.М. Пластово-инфильтрационное рудообразование / М.: Недра. 1993. 160 с.
34. Минц М.В., Глазнев В.Н., Муравина О.М. Глубинное строение коры юго-востока Воронежского кристаллического массива по геофизическим данным: геодинамическая эволюция в палеопротерозое и современное состояние коры // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2017. No 4. С. 5–23.
35. Минц М.В., Соколова Е.Ю., Варданыц И.Л., Смирнов М.Ю., Успенский Н.И., Голубцова Н.С., Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Таран Я.В., Золотая Л.А., Коснырева М.А., Яковлев Я.Г., Рокитянский И.И., Рязанцев П.А., Нилов М.Ю., Глазнев В.Н., Муравина О.М. Объёмная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным

МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН, 2018. – N 2. – С. 34-46. DOI: [10.17076/geo656](https://doi.org/10.17076/geo656)

36. Муравина О.М. Возможности метода группового учёта аргументов при статистической обработке петрофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. 2009. № 2. С. 150-154.

37. Муравина О.М. Метод группового учёта аргументов при анализе геофизических данных // Геофизика. 2012. № 6. С. 16-20.

38. Муравина О.М. Плотностная модель земной коры Воронежского кристаллического массива // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 108–114.

39. Муравина О.М., Глазнев В.Н. Структурно-параметрические модели петрофизических параметров осадочного чехла Воронежской антеклизы // Известия СО РАН. 2014. Т. 44. № 1. С. 81-87.

40. Муравина О.М., Долгаль А.С., Аузин А.А., Пономаренко И.А., Груздев В.Н. Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 4. С. 79-84. DOI: [10.17308/geology.2019.4/2699](https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2699).

41. Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Петрофизическая характеристика осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2013, № 1. С. 189-196.

42. Муравина О.М., Лошаков Г.Г. Принципы решения прямых задач потенциала при моделировании строения литосферы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2015. № 3. С. 97-100.

43. Муравина О.М., Пономоренко И.А. Программная реализация метода группового учёта аргументов при идентификационном моделировании

геолого-геофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 2. С. 107-110.

44. Муравина О.М., Пономаренко И.А., Минц М.В. Применение метода группового учёта аргументов для анализа петрофизических данных // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2021. № 3 (51). С. 5-15. DOI: [10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-3-51-5-15).

45. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации / М.: Недра. 1988. 337 с.

46. Пахомов В.И., Перевозчиков Л.Ф., Федоткин А.Ф. Аэрогеофизические исследования при поисках месторождений урана // Разведка и охрана недр. 2006. №5. С. 27-31.

47. Романов А.М. Физико-геологические особенности рудных зон экзогенных месторождений урана // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10548> (дата обращения: 19.03.2022).

48. Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира // Минеральное сырье. № 27. М.: ВИМС. 2012. 118 с.

49. Трусов А.А. Особенности современной аэроэлектроразведки // Разведка и охрана недр. 2011. № 7. С. 31-36.

50. Туараев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана / М.: ЦНИИАТОМНИНФОРМ. 2005. 407 с.

51. Шипилов Э.В., Тюремнов В.А., Глазнев В.Н., Голубев В.А. Палеогеографические обстановки и тектонические деформации Баренцевоморской континентальной окраины в кайнозое // Доклады РАН. 2006. Т. 407. № 3. С. 378-383.

52. Шувалов Ю.М. (Ред.) Промышленные типы урановых месторождений и методика их поисков / Л.: Недра. 1984. 289 с.

53. Язиков В.Г., Легавко А.В. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (водородных) месторождений урана / Томск: Изд-во ТПУ. 2012. 95 с.

54. 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.

55. Якуба И.А. Геологическая и петрофизическая характеристика урановых месторождений песчаникового типа Республики Нигер / Студенческая наука как ресурс инновационного потенциала развития. VIII международная студенческая научная конференция: Материалы и доклады. Часть II. Отв. ред. Л.П. Земскова. Воронеж: Воронежский гос. ун-т. 2019б. С. 3–11.

56. Якуба И.А. Методы комплексных аэрогеофизических исследований при поисках месторождений урана на территории Республики Нигер / Результаты геофизических исследований: методика и интерпретация: Материалы ежегодной молодежной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. В.И. Жаворонкина, О.М. Муравиной. Воронеж: «Научная книга». 2020. С. 76–82.

57. Якуба И.А., Глазнев В.Н., Минц М.В. Плотностная модель земной коры территории Республики Нигер / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова. СПб.: Изд. ВСЕГЕИ. 2022. С. 301–304.

58. Ahmed K.S., Liu K., Paterne M.A., Kra K.L., Kuttin A.A.-A., Malquaire K.P.R., Ngum K.M.M.-A. Anatomy of Eastern Niger Rift Basin with Specific References of Its Petroleum Systems // International Journal of Geosciences. 2020. V. 11. N. 5. P. 305-324. DOI: [10.4236/ijg.2020.115016](https://doi.org/10.4236/ijg.2020.115016)

59. 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. DOI: [10.7289/V5C8276M](https://doi.org/10.7289/V5C8276M)

60. Amara M., Hamoudi M., Djemaï S., Bendaoud A., Dufrécho G., Jessell W.M., Boubekri H., Ouzegane K. Guemmama M. Machane D. New insight of the geological structures and tectonic framework of Ahnet and northwestern part of Tin Zaouatine terranes (western Hoggar, Algeria) constraints from aeromagnetic, gamma ray, and remote sensing data // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. V. 10. N. 18. 396. DOI: [10.1007/s12517-017-3060-7](https://doi.org/10.1007/s12517-017-3060-7)

61. ArcGIS 9. Spatial Analyst user guide / ESRI. Redlands. USA. 2001. 216 p.

62. Avbovbo A., Ayoola E., Osahon G. Depositional and Structural Styles in Chad Basin of Northeastern Nigeria // *AAPG Bulletin*. 1986. V. 70. P. 1787-1798. DOI: [10.1306/94886D21-1704-11D7-8645000102C1865D](https://doi.org/10.1306/94886D21-1704-11D7-8645000102C1865D)

63. Bagherbandi M., Sjoberg L.E. Modelling the density contrast and depth of the Moho discontinuity by seismic and gravimetric–isostatic methods with an application to Africa // *Journal of African Earth Sciences*. 2012. V. 68. P. 111–120. DOI: [10.1016/j.jafrearsci.2012.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2012.04.003)

64. Bassin C., Laske G., Masters G. The current limits of resolution for surface wave tomography in North America // *Eos Transaction AGU*. 2000. V. 81. F897. DOI: [10.1007/s11589-007-0359-6](https://doi.org/10.1007/s11589-007-0359-6)

65. Begg G. C., Griffin W. L., Natapov L. M., O'Reilly S. Y., Grand S. P., O'Neill C. J., Hronsky J.M.A., Djomani Y. P., Swain C. J., Deen T., Bowden P. The lithospheric architecture of Africa: seismic tomography, mantle petrology and tectonic evolution // *Geosphere*. 2009. V. 5. No 1. P. 23–50. DOI: [10.1130/GES00179.1](https://doi.org/10.1130/GES00179.1)

66. Billon S. Minéraux argileux dans le gisement uranifère d Imouraren (Bassin de Tim Mersoï, Niger): implications sur la genèse du gisement et sur la optimisation des processus de traitement du minerai / Thèse Terre solide et enveloppes superficielles. Poitiers: Université de Poitiers. 2014. 341 p.

67. Billon S., Patrier P. Diagenetic and hydrothermal history of the host rock of the Imouraren uranium deposit (Tchirezrine 2 Formation - Tim Mersoï Basin, Niger) // *Journal of African Earth Sciences*. 2019. V. 160. 103637. DOI: [10.1016/j.jafrearsci.2019.103637](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103637)

68. Bisset A., Hanly A., Marlatt J., Martin P., Matolin M., Slezak J. Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration / IAEA Nuclear Energy Series. No. NF-T-1.5. Vienna : IAEA. 2013. 60 p.

69. Black R., Liégeois J.P. Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: The Pan-African testimony // *Geological Society of London Journal*. 1993. V. 150. P. 89–98. DOI: [10.1144/gsjgs.150.1.0088](https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0088)

70. Bohari A.D., Harouna M., Mossad A. Geochemistry of Sandstone Type Uranium Deposit in Tarat Formation from Tim-Mersoï Basin in Northern Niger (West Africa): Implication on Provenance, Paleo-Redox and Tectonic Setting // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2018. V. 6. No 8. P. 185-225. DOI: [10.4236/gep.2018.68014](https://doi.org/10.4236/gep.2018.68014)

71. Bournas N., Galdeano A., Hamoudi M., Baker H. Interpretation of the aeromagnetic map of Eastern Hoggar (Algeria) using the Euler deconvolution, analytic signal and local wavenumber methods // *Journal of African Earth Sciences*. 2003. V. 37. N 3–4. P. 191–205. DOI: [10.1016/j.jafrearsci.2002.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2002.12.001)

72. Bournas N., Hamoudi M., Galdeano A., Ouzegane K., Kienast J. The aeromagnetic map of Hoggar (Tuareg Shield, Algeria) - Processing and interpretation / *Conference Proceedings, 66th EAGE Conference & Exhibition*. Paris. 2004. CP-3-00118. DOI: [10.3997/2214-4609-pdb.3.E030](https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.3.E030)

73. Bournas N., Plastow G., Han Z., Latrous A., Mokubung K., Pitcher D., Toure A., Ouedraogo A., Kam S. Airborne geophysical survey of northeastern Burkina Faso: New insights into the mineral potential of the Birimian basement / *SEG Extended Abstracts*. 2016. P. 2223-2227.

74. Bowden P., Bennett J.N., Kinnaird J.A. Whitley J.E., Abaa S.I., Hadzigeorgiou-Stavrakis P.K. Uranium in the Niger-Nigeria younger Granite

Province // Mineralogical Magazine. 1981. V. 44 (4). P. 379-389. DOI: [10.1180/minmag.1981.044.336.03](https://doi.org/10.1180/minmag.1981.044.336.03)

75. Bowell R.J. An updated integrated development plan for the Madaouela project, Niger / SRK Consulting (UK) Limited. 2015. 628 p.

76. Brownfield M.E. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Chad Basin Province, north-central Africa / In Brownfield M.E. (Ed.) Geologic assessment of undiscovered hydrocarbon resources of Sub-Saharan Africa. 2016. U.S. Geological Survey Digital Data Series 69–GG. Chap. 6. 9 p. DOI: [10.3133/ds69GG](https://doi.org/10.3133/ds69GG)

77. Carranza E.J.M. Geologically-Constrained Mineral Potential Mapping. Examples from the Philippines / International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. ITC Publication No. 86. The Netherlands. 2002. 497 p.

78. Cazoulat M. Geology environment of the Uranium deposits in the Carboniferous and Jurassic sandstones of the Western margin of the Air mountains in the Republic of Niger / Geological environments of sandstone-type uranium deposits. 1985. IEAE-TECDOC-328. P. 247-263.

79. Clermonté J., Yahaya M., Lang J., Oumarou J. Un bassin paléozoïque et mésozoïque en décrochement : le Tim Mersoï dans la région d'Arlit, à l'Ouest de l'Aïr (Niger) // Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. 1991. T. 312. P. 1189-1195.

80. Croisy P. The Akouta underground uranium mine, Niger // Shigen-Chishitsu. 2013. 63 (2). P. 81-90. DOI: [10.11456/shigenchishitsu.63.81](https://doi.org/10.11456/shigenchishitsu.63.81)

81. Dahlkamp F.J. Uranium Ore Deposits / Berlin. Springer-Verlag. 1993. 460 p.

82. Davidson L., Beswetherick S., Craig J., Eales M., Fisher A., Himmali A., Jho J., Mejrab B., Smart J. The structure, stratigraphy and petroleum geology of the Murzuq Basin, southwest Libya / In: D. Worsley, M.A. Sola (Eds.). Geological Exploration in the Murzuq Basin. Elsevier Science. 2000. P. 295-320. DOI: [10.1134/S0016702914060032](https://doi.org/10.1134/S0016702914060032)

83. De Marsily G. Hydrogéologie: comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants / Cours de l'école des Mines de Paris. France, Paris. 1994. 243 p.
84. Diallo A.A.-A. Contribution à l'exploration du secteur grand Artois par détermination de la variabilité spatiale de la minéralisation à l'aide des diagraphies / Stage professionnel. Diagraphie en Domaine Minier. Paris. 2013. 46 p.
85. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. V. 25. P.297-356. DOI: [10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
86. Fairhead J.D. Geophysical Controls on Sedimentation within the African Rift Systems / In: Frostick L.E., Renaut R.W. (Eds.). Sedimentation in the African Rifts. Geological Society, London, Special Publications. 1986. V. 25. P. 19-27. DOI: [10.1144/GSL.SP.1986.025.01.03](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.025.01.03)
87. Faure R. Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post paléozoïques du Niger oriental / Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. 1966. V. 47. 629 p.
88. Franconi A., Joo J., Zibo I. Etude spécifique des principales substances minérales et leur contexte géologique / Plan minéral de la République du Niger. 2003. V. IV. 725 p.
89. Galitchanina L.D., Glaznev V.N., Mitrofanov F.P., Olesen O., Henkel H. Surface density characteristics of the Baltic Shield and adjacent territories // Norges Geologiske Undersøkelse. 1995. Special Publ. V. 7. P. 349-354.
90. Gaoh D.A. Etude des nappes aquifères du Continental Terminal entre les Dallols Bosso et Maouri, département de Dosso, République du Niger / Université de Liège, Belgique. Thèse sciences. 1993. 258 p.
91. 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. DOI: [10.1016/0040-1951\(92\)90257-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90257-7)

92. Genik G.J. Petroleum Geology of Rift Basins in Niger, Chad, and Central African Republic // AAPG Bulletin. 1993. V. 77. P. 1405-1434. DOI: [10.1306/BDF8EAC-1718-11D7-8645000102C1865D](https://doi.org/10.1306/BDF8EAC-1718-11D7-8645000102C1865D)

93. Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M., Raevsky A.B., Osipenko L.G. Complex geological–geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and crust–mantle boundary // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. No 2. P. 133–170. DOI: [10.5800/GT-2015-6-2-0176](https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-2-0176)

94. 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. No 1–4. P. 15–33. DOI: [10.1016/0040-1951\(95\)00147-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00147-6)

95. Glaznev V.N., Raevsky A.B., Sharov N.V. 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 // Tectonophysics. 1989. V. 162. No 1–2. P. 151–164. DOI: [10.1016/0040-1951\(89\)90361-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90361-2)

96. Globig J., Fernandez M., Torne M., Verges J., Robert A., Faccenna C. 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. DOI: [10.1002/2016JB012972](https://doi.org/10.1002/2016JB012972)

97. Greigert J. Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale) / Ministère des Travaux publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme de la république du Niger. Direction des Mines et de la Géologie, 2. Paris, France. BRGM. 1966. 229 p.

98. Greigert J. Les eaux souterraines de la république du Niger / Ministère des Travaux Publics, des Transports, des Mines et de l'Urbanisme de la république du Niger. Rapport BRGM. Niamey, Niger. 1968. ABI 006 NIA. 2 vol., 407 p.

99. Grema M. The Imouraren deposits, Niger / Report of the Ministry of Mines and Energy. Niger. 2008.

100. Guiraud M., Ajakaiye D.E., Ugodulunwa F.X.O. Characterisation of late Cretaceous NESW sinistral wrench faults in the Upper Benue Trough (Nigeria) using microtectonic and aeromagnetic data // *Journal of African Earth Sciences*. 1989. V. 9, No 1. P. 9-21. DOI: [10.1016/0899-5362\(89\)90003-1](https://doi.org/10.1016/0899-5362(89)90003-1)

101. Guiraud R., Bellion Y., Benkhelil J., Moreau C. Post Hercynian tectonics in northern and western Africa // *Geological Journal*. 1987. V. 22. P. 433–466. DOI: [10.1002/gj.3350220628](https://doi.org/10.1002/gj.3350220628)

102. Guiraud R., Maurin J.C. Early Cretaceous rifts of Western and Central Africa: an overview // *Tectonophysics*. 1992. V. 213. P. 153-168. DOI: [10.1016/0040-1951\(92\)90256-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90256-6)

103. Harland W.B. Tectonic transtension in Caledonian Spitsbergen // *Geological Magazine*. 1971. V. 108. No. 1. P. 27-42. DOI: [10.1017/S0016756800050937](https://doi.org/10.1017/S0016756800050937)

104. Harouna M, Pigott J.D. Philp R.P. Burial history and thermal maturity evolution of the Termit basin, Niger // *Journal of Petroleum Geology*. 2017. 40 (3). P. 277-297. DOI: [10.1111/jpg.12676](https://doi.org/10.1111/jpg.12676)

105. Heckman N., Bosch K., Broda S., Konate M. Geological map of transboundary region of Benin, Niger and Nigeria: Sedimentary basins Iullemmeden, Kandi, Sokoto. Scale 1 : 625 000 / German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Niger Basin Authority. Berlin & Niamey. 2019.

106. Hugot G.A la recherche du Gondwana perdu aux origins du monde / France. Univ. Moutnpellier. 2004. 311 p.

107. Jaireth S., McKay A., Lambert I. The Geology of Uranium deposits in Kazakhstan points to similar deposits in Australia // *AUSGEO News*. 2008. 89. P. 8-13.

108. Jessell M.W., Begg G.C., Miller M.S. The Geophysical Signatures of the West African Craton // *Precambrian Research*. 2016. V. 274. No 3. P. 3–24. DOI: [10.1016/j.precamres.2015.08.010](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.010)

109. Kinnaird J.A., Nex P.A.M. Uranium in Africa // *Episodes*. 2016. V. 39. No 2. P. 335-359. DOI: [10.18814/epiugs/2016/v39i2/95782](https://doi.org/10.18814/epiugs/2016/v39i2/95782)

110. Konate M., Denis M., Yahaya M., Guiraud M. Structuration extensive et transtensive au Devono-Dinantien du bassin de Tim Mersoï (bordure occidentale de l'Aïr, Nord Niger) // Annales de l'Université de Ouagadougou. Série C. 2007. V. 5. P. 1-32.

111. Lai H., Li M., Mao F., Liu J., Xiao H., Tang Y., Shi S. 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. DOI: [10.1177/0144598720915534](https://doi.org/10.1177/0144598720915534)

112. Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust // Abstract EGU2013- 2658 presented at 2013 Geophys. Res. Abstracts. 2013. 15. EGU2013-2658.

113. Li Z., Cheng X., Jiang H., Zheng F. Genetic mechanism of low-resistivity oil zones and comprehensive identification technology for well logging in the Termit Basin, Niger // Science Frontiers. 2018. V. 25 (2). P. 99-111. DOI: [10.13745/j.esf.2018.02.011](https://doi.org/10.13745/j.esf.2018.02.011)

114. Liégeois J.P., Benhallou A., Azzouni-Sekkal A., Yahiaoui R., Bonin B. 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. DOI: [10.1130/0-8137-2388-4.379](https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.379)

115. Liu B., Wan L.K., Mao F.J., Liu, J., Lu M.S., Wang Y. Hydrocarbon Potential of Upper Cretaceous Marine Source Rocks in the Termit Basin, Niger // Journal of Petroleum Geology. 2015. V. 38, P. 157-175. DOI: [10.1111/jpg.12604](https://doi.org/10.1111/jpg.12604)

116. Louis P., Contribution géophysique a la connaissance géologique du bassin du lac Tchad / Paris. ORSTOM. 1970. V. 2 (42). 312 p.

117. Louis P., Rechenmann J. Interpretation géologique de certaines anomalies gravimétriques du Tenere (République du Niger) // Comptes rendus de l'Académie des sciences, Serie D. 1966. T. 263. P. 476–479.

118. Mamadou M.M., Cathelineau M., Deloule E., Schmitt R., Brouand M. Cenozoic oxidation episodes in West Africa at the origin of the in situ supergene mineral redistribution of the primary uranium orebodies (Imouraren deposit, Tim Mersoï Basin, Northern Niger) // *Mineralium Deposita*. 2020. V. 55. P. 1333–1352. DOI: [10.1007/s00126-019-00945-w](https://doi.org/10.1007/s00126-019-00945-w)
119. Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H., Bournas N., Brozena J., Childers V., Dostaler F., Fairhead J.D., Finn C., von Frese R.R.B., Gaina C., Golynsky S., Kucks R., Lühr H., Milligan P., Mogren S., Müller R.D., Olesen O., Pilkington M., Saltus R., Schreckenberger B., Thébault E., Tontini F.C. EMAG2: A 2 arc-min resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2009. 10. Q08005. DOI: [10.1029/2009GC002471](https://doi.org/10.1029/2009GC002471)
120. McHargue, T.R., Heidrick. T.L., Livingstone, J.E. Tectonostratigraphic development of the Interior Sudan Rifts, Central Africa // *Tectonophysics*. 1992. V. 213. (1-2). P. 187-202. DOI: [10.1016/0040-1951\(92\)90258-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90258-8)
121. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2: Earth magnetic anomaly grid (2-arc-minute resolution) Version 3 / NOAA National Centers for Environmental Information. 2016. DOI: <https://doi.org/10.7289/V5H70CVX>
122. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2 Version 3 - Update of a two arc-minute global magnetic anomaly grid / 19th EGU General Assembly. EGU2017. Proceedings from the conference in Vienna. 2017. Austria. P. 10614.
123. Milesi J. P., Frizon de Lamotte D., de Kock G., Toteu F. Tectonic map of Africa, Scale 1:10 000 000. Paris: CCGM-CGMW. 2010.
124. Mints M.V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Yu. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations // *Geoscience Frontiers*. 2020. V. 11. No 3. P. 999-1023. DOI: [10.1016/j.gsf.2019.10.003](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003)
125. Mitrofanov F.P., Sharov N.V., Zagorodny V.G., Glaznev V.N., Korja A. Crustal structure of the Baltic shield along the Pechenga-Kostomuksha-Lovisa

geotraverse// international geology Review, 1998. V.40 No 11. P. 990-997. DOI: [10.1080/0020681980946](https://doi.org/10.1080/0020681980946)

126. Motavalli-Anbaran S. H., Zeyen H., Jamasb A. 3D crustal and lithospheric model of the Arabia – Eurasia collision zone // Journal of Asian Earth Sciences. 2016. V. 122. P. 158–167. DOI: [10.1016/j.jseaes.2016.03.012](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.03.012)

127. Mooney W., Laske G., Masters G. CRUST 5.1 : A global crustal model at 5x5 degrees // Journal Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 727–747. DOI: [10.1029/97JB02122](https://doi.org/10.1029/97JB02122)

128. Muhammad S.Z.M., Lo S.-Z., Abdul G.M.R. Petrophysical Analysis on Radioactive Sands for Koala Field in Termit Basin, Niger // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13, No. 13. P. 5122–5130. DOI: [10.36478/jeasci.2018.5122.5130](https://doi.org/10.36478/jeasci.2018.5122.5130)

129. Muravina O.M., Davudova E.I., Ponomarenko I.A. Possibility of identification of modeling in complex analysis geological and geophysical data / Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. 2019a. P. 157-162. DOI: [10.1007/978-3-319-97670-9_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9_18)

130. Muravina O. M., Glaznev V. N., Zhavoronkin V. I., Mints M. V. Reflection of the Petrophysical Basement Rocks Models in Geophysical Fields / Eds.: Nurgaliev D, Khairullina N.. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences: Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Nature Switzerland AG, 2019b. P. 49–54. DOI: [10.1007/978-3-319-97670-9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97670-9)

131. Nacer J., Khaldi A. Uranium resources of Algeria / Regional Workshop on Application of UNFC-2009 to Uranium Resources. Johannesburg, South Africa. 2014. 46 p.

132. Nataf H.C., Ricard Y. 3SMAC: An a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1996. V. 95. P. 101–122. DOI: [10.1016/0031-9201\(95\)03105-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03105-7)

133. Nguimbous-Kouoh J.J., Ndougsa-Mbarga T., Njandjock-Nouck P., Eyike A., Campos-Enriquez J.O., Manguelle-Dicoum E. The structure of the Goulfey-Tourba sedimentary basin (Chad-Cameroon): a gravity study // *Geofisica Internacional*. 2010. V. 49. Num. 4. P. 181-193. DOI: [10.22201/igeof.00167169p.2010.49.4.127](https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2010.49.4.127)

134. OECD & NEA. Uranium 1999 / Report by OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency. France. Paris. 2000. 338 p. DOI: [10.1787/9789264189898-en](https://doi.org/10.1787/9789264189898-en)

135. Oha I.A., Onuoha K.M., Nwegbu A.N., Abba A.U. Interpretation of high-resolution aeromagnetic data over southern Benue Trough, southeastern Nigeria // *Journal of Earth System Science*. 2016. 125(2). P. 369–385. DOI: [10.1007/s12040-016-0666-1](https://doi.org/10.1007/s12040-016-0666-1)

136. Pagel M. Uranium deposits in the Arlit area (Niger) / *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, New-York. 2005. P. 303-305. DOI: [10.1007/3-540-27946-6_79](https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_79)

137. Pasyanos M.E., Masters G., Laske G., Ma Z. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth // *Journal Geophysical Research. Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 2153–2173. DOI: [10.1002/2013JB010626](https://doi.org/10.1002/2013JB010626)

138. Pasyanos M.E., Nyblade A.A. A top to bottom lithospheric study of Africa and Arabia // *Tectonophysics*. 2007. V. 444 (1-4). P. 27–44. DOI: [10.1016/j.tecto.2007.07.008](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.07.008)

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

140. Permenter J.P., Oppenheimer C. Volcanoes of the Tibesti massif (Chad, northern Africa) // *Bulletin Volcanology*. 2007. V. 69. P. 609-626. DOI: [10.1007/s00445-006-0098-x](https://doi.org/10.1007/s00445-006-0098-x)

141. Perron P. Architecture and tectonic of Paleozoic intracratonic Basins: impact on the sedimentary record and associated geometries: example of peri-

Hoggar Basins (North Gondwana marge) / Thèse de Doctorat. Université Bourgogne Franche-Comté. 2019. 394 p.

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

143. Rechenmann J. Réseau de bases magnétiques au Niger et au Tchad occidental 1962-1965, en Afrique occidentale 1959-1962. Cahiers ORSTM, Ser. Geophys. 1967. V. 8.

144. Rechenmann J. Cartes gravimétriques du Niger. Notice explicative 36 / Paris : ORSTOM. 1969.

145. Rechenmann J., Louis P. Mesure gravimétriques dans le Niger orient. Années 1963 - 1964 - 1965 / Rapport Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris. 1966. 83 p.

146. Reid A.B., Ebbing J., Webb S.J. Comment on “A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution” by G.E. Tedla, M. van der Meijde, A.A. Nyblade, F.D. van der Meer // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. P. 1217–1222. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2012.05353.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05353.x)

147. Reguzzoni M., Sampietro D., Sanso F. Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data // Geophysical Journal International. 2013. V 195(1). P. 222–237. DOI: [10.1093/gji/ggt247](https://doi.org/10.1093/gji/ggt247)

148. Rigault C. Cristallochimie du fer dans les chlorites de basse température : implications pour la géothermométrie et la détermination des paléoclimats redox dans les gisements d'uranium / Thèse Pour l'obtention du Grade de Docteur de l'Université de Poitiers. Poitiers. 2010. 260 p.

149. 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. DOI: [10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6)

150. Sani A., Konate M., Wollenberg P., Christophe A. D. Tectono-sédimentaire évolution de la uranium déposé de la DASA graben, northern

Niger // Global Journal of Science Frontier Research. 2021. 21 (1). P. 36-64. DOI: [10.34257/GJSFRHVOL21IS1PG37](https://doi.org/10.34257/GJSFRHVOL21IS1PG37)

151. Schull T.J., Rift basins of interior Sudan, petroleum exploration and discovery // AAPG Bulletin. 1988. 72. No. 10. P. 1128-1142. DOI: [10.1306/703C9965-1707-11D7-8645000102C1865D](https://doi.org/10.1306/703C9965-1707-11D7-8645000102C1865D)

152. Schluter T. Geological Atlas of Africa / Berlin. Springer. 2nd ed., 2008. 318 p.

153. Soumaila A., Henry P., Garba Z., Rossi M. REE patterns, Nd-Sm and U-Pb ages of the metamorphic rocks of the Diaborou-Darbani greenstone belt (Liptako, SW Niger): implication for Birimian (Palaeoproterozoic) crustal genesis // Geological Society London, Special Publications. 2008. V. 297. P. 19–32. DOI: [10.1144/SP297.2](https://doi.org/10.1144/SP297.2)

154. Tedla G. E., van der Meijde M., Nyblade A. A., van der Meer F. D. A crustal thickness map of Africa derived from a global gravity field model using Euler deconvolution // Geophysical Journal International. 2011. V. 18. P. 1-9. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2011.05140.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05140.x)

155. Thiéblemont D., Liégeois J.P., Fernandez-Alonso M., Ouabadi A., Le Gall B., Maury R., Jalludin M., Vidal M., Ouattara-Gbélé C., Tchaméni R., Michard A., Nehlig P., Rossi P., Chêne F., Geological Map of Africa at 1:10M scale / CGMW-BRGM. South Africa. Cape Town. 2016. DOI: [10.14682/2016GEOAFR](https://doi.org/10.14682/2016GEOAFR)

156. Thompson D.T. EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data // Geophysics. 1982. V. 47. P. 31–37. DOI: [10.1190/1.1441278](https://doi.org/10.1190/1.1441278)

157. Tron V., Brun J.P. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems // Tectonophysics. 1991. V. 188. No. 1/2. P. 71-84. DOI: [10.1016/0040-1951\(91\)90315-J](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90315-J)

158. Tugume F., Nyblade A., Julia J., Van der Meijde M. Precambrian crustal structure in Africa and Arabia: Evidence lacking for secular variation // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 250–266. DOI: [10.1016/j.tecto.2013.04.027](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.027)

159. Yacouba I.A. Champs géophysiques et gisements d'uranium de la République du Niger / Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова. Воронеж: «Научная книга» 2020. С. 317–321.

160. Yacouba I.A. Gravity field from the Moho boundary for the territory of the republic of Niger / Современные методы геофизических исследований: методика и интерпретация: Материалы ежегодной молодёжной научной конференции кафедры геофизики Воронежского государственного университета. Под ред. Т.А. Вороновой, О.М. Муравиной. Воронеж: «Научная книга». 2021. С. 54–58.

161. 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., Veikkolainen T., Heinonen S., Karell F., Kozlovskaya E., Luttinen A., Nikkilä K., Nykänen V., Poutanen M., Skyttä P., Tanskanen E. and Tiira T. (Eds.). 2021. Lithosphere 2021 – Eleventh Symposium on the Structure, Composition and Evolution of the Lithosphere in Finland. Programme and Extended Abstracts, January 19-20, 2021. Institute of Seismology, University of Helsinki. Report S-71. P. 157-160

162. Zanguina M., Bruneton A., Gonnard R. An introduction to the petroleum potential of Niger // Journal Petroleum Geology. 1998. V. 21 (1). P. 83-103. DOI: [10.1111/j.1747-5457.1998.tb00647.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1998.tb00647.x)