

На правах рукописи



Огнев Игорь Николаевич

**СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ  
И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО СЕГМЕНТА  
ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОГО КРАТОНА**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Казань – 2023

Работа выполнена на кафедре геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

**Научный руководитель:** **Нургалиев Данис Карлович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», директор Института геологии и нефтегазовых технологий

**Официальные  
оппоненты:**

**Исаев Валерий Иванович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов

**Долгаль Александр Сергеевич**

доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории геопотенциальных полей

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва)

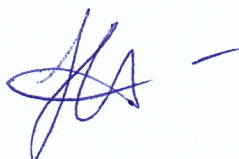
Защита состоится 04 «мая» 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета КФУ.016.2 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (г. Казань, ул. Кремлевская, д. 35). Сведения о защите, электронные версии диссертации и автореферата доступны на официальных сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>) и Казанского (Приволжского) федерального университета (<http://kpfu.ru/>).

Отзыв на автореферат просим направлять по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18, Казанский (Приволжский) федеральный университет, отдел аттестации научно-педагогических кадров.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Крылов Павел Сергеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

Изучение строения земной коры, ее теплового режима и их влияния на нефтегазоносность является актуальной задачей современной геологии и геофизики. Прежде всего, это связано с развитием современных геофизических методов изучения строения земной коры и верхней мантии. Одним из ключевых методов, развитие которого претерпело качественный скачок в последние два десятилетия, является спутниковая гравиметрия. Преимуществом данного метода является полное и равномерное покрытие земного шара спутниковыми измерениями поля силы тяжести с разрешением, достаточным для проведения региональной оценки структуры земной коры. При этом строение земной коры и верхней мантии взаимосвязано с характером теплового поля [Artemieva, 2019; Lösing, Ebbing, Szwillus, 2020], от которого зависят процессы созревания нефтематеринских пород и, как следствие, нефтегазоносность осадочных бассейнов [Beardsmore, Cull, 2001; Hantschel, Kauerauf, 2009], что обуславливает применение данных спутниковой гравиметрии при региональном прогнозе нефтегазоносности.

Задача построения региональных моделей земной коры при помощи инверсии спутникового гравитационного поля имеет достаточно большое значение для Российской Федерации по двум основным причинам. Во-первых, на настоящий момент в России исследования строения земной коры с использованием данных спутниковой гравиметрии проводятся не так часто. Во-вторых, Россия все еще богата территориями, углеводородный потенциал которых недостаточно раскрыт, как, например, зона арктического шельфа. При недостаточной степени геофизической изученности разведываемых территорий анализ данных спутниковой гравиметрической съемки может служить первым шагом к более детальному изучению их строения.

Одним из перспективных регионов Российской Федерации для пилотного исследования строения земной коры по спутниковым гравиметрическим данным, а также изучения теплового режима и их влияния на нефтегазоносность является Волго-Уральская нефтегазоносная провинция (НГП), охватывающая восточную часть Русской плиты и Предуральский краевой прогиб [Лозин, 2002]. Данный регион обладает достаточно высокой степенью геолого-геофизической изученности, выражающейся в том числе в наличии сейсмических данных о глубинном строении земной коры, а также в большой истории скважинных геотермических измерений. Вместе с тем, до сих пор активна дискуссия о процессах созревания и миграции нефти во многих крупных нефтегазовых месторождениях данного региона. Таким образом, изучение строения земной коры Волго-Уралии и последующее геотермическое моделирование является важной задачей, способной пролить свет на взаимосвязь пространственного распределения нефтегазоносности на данной территории со строением земной коры и неоднородностями ее теплофизических параметров.

### **Степень разработанности темы исследования.**

На настоящий момент времени была показана возможность применения спутниковой гравиметрии для изучения строения земной коры как в глобальном, так и в региональном масштабах. Примером глобальной модели структуры границы Мохо является модель GEMMA, построенная на основании данных спутника GOCE [Reguzzoni, Sampietro, 2015]. Примерами региональных моделей земной коры, полученных в результате инверсии спутниковых гравитационных данных, могут служить модели земной коры Египта [Sobh et al., 2019], Гренландии [Steffen, Strykowski, Lund, 2017], Австралии [Aitken, Salmon, Kennett, 2013], Ирана [Eshagh, Ebadi, Tenzer, 2017], Южной Америки [Meijde van der, Julià, Assumpção, 2013], Азиатского орогенного пояса [Guy, Holzrichter, Ebbing, 2017] и многих других областей [Braitenberg, Ebbing, 2009; Haas, Ebbing, Szwillus, 2020; Jiang, Jin, McNutt, 2004; Singh, Rao, 2021; Welford et al., 2010].

Строение земной коры Волго-Уральского региона до настоящего времени изучалось при помощи полевых потенциальных и сейсмических методов. Так, Г.Е. Кузнецов внес

существенный вклад в изучение структуры границы Мохо Русской плиты в целом и Татарстана в частности по данным гравиметрических исследований [Кузнецов, 2002; Кузнецов, Боровский, 2000]. М.В. Минц и др. разработали модель Восточно-Европейского кратона (ВЕК), включающую в себя подробное описание строения его Волго-Уральского сегмента, базируясь на данных глубинного сейсмического профиля ТАТСЕЙС-2003 [Минц и др., 2010]. И.М. Артемьева и Г. Тьюбо создали модель Европы, Гренландии и Североатлантического региона EUNaseis. Данная модель также включает в себя Волго-Уральский регион и построена исключительно по сейсмическим данным [Artemieva, Thybo, 2013]. Отдельно необходимо выделить фундаментальные работы С.В. Богдановой и А.В. Постникова по изучению вещественного состава земной коры Волго-Уралии [Богданова, 1986; Постников, 2002].

Работы по изучению теплового режима Волго-Уралии активно проводились, начиная со второй половины XX века [Булашевич, Щапов, 1978; Непримеров, 1971; Синявский, Непримеров, Николаев, 1978], когда осуществлялась масштабная программа по измерению теплового потока. В результате было опубликовано более 800 измерений поверхностного теплового потока на территории европейской части СССР [Любимова и др., 1973; Глубинный тепловой поток европейской части СССР, 1974]. Одни из первых моделей распределения температуры внутри осадочного чехла Урало-Поволжья и кристаллического фундамента Татарстана были опубликованы в работах Н.Н. Христофоровой на основании многолетней работы [Христофорова, 2002; Христофорова и др., 2004; Христофорова, Христофоров, Бергеманн, 2008]. При этом, не до конца раскрыт вопрос латеральных вариаций теплофизических параметров Волго-Уралии, за исключением работы А.А. Липаева и др. по теплопроводности [Липаев, Гуревич, Липаев, 2001] и работ Н.С. Боганика, В.Н. Глазнева и др. и Е.А. Любимовой и др. по радиогенному теплообразованию (РТО) [Боганик, 1975; Глазнев и др., 2021; Любимова, Любошиц, Парфенюк, 1983].

Предыдущие исследования связи нефтегазоносности Волго-Уралии со строением земной коры уделяют большое значение разломам земной коры как фактору, влияющему на размещение нефтяных и газовых месторождений [Постников, 2002; Трофимов, Горюнов, Сабиров, 2017]. Часто ведется дискуссия о возможной роли разломов земной коры в качестве зон восполнения углеводородов (УВ) путем дегазации кристаллического фундамента [Муслимов, Плотникова, 2019; Plotnikova, 2008]. Тем не менее, влияние строения земной коры на нефтегазоносность через тепловое поле литосферы практически не рассмотрено, несмотря на значительную работу по изучению распределения температур в скважинах Поволжья [Христофорова, 2002; Христофорова и др., 2004; Христофорова, Христофоров, Бергеманн, 2008].

Таким образом, на данный момент отсутствуют исследования строения земной коры Волго-Уральского региона на основании современных данных спутниковой гравиметрии. Также не проводилось работ по геотермическому моделированию с учетом структуры земной коры и латеральных вариаций теплофизических параметров. Неизученным остается вопрос и о связи строения земной коры с нефтегазоносностью Волго-Уралии, проявляющейся через тепловой режим литосферы.

#### **Цель и задачи исследования.**

Основной целью диссертационного исследования является определение структуры земной коры, теплового режима и их влияния на нефтегазоносность Волго-Уральского сегмента ВЕК посредством анализа данных спутниковой гравиметрии и геотермических исследований в скважинах.

Для достижения поставленной цели предусмотрено решение следующих задач:

1. Изучить тектоническое строение Волго-Уральского сегмента ВЕК.
2. Собрать необходимые геолого-геофизические данные для построения модели земной коры региона и последующего геотермического моделирования.
3. Провести инверсию спутникового поля градиента силы тяжести с предварительной оценкой глубины Мохо на изучаемой территории.

4. Создать трехмерную плотностную модель земной коры и верхней мантии Волго-Уралии в результате решения прямой задачи гравиметрии.

5. Провести статистический анализ геотермической структуры Волго-Уралии, используя полученную ранее модель земной коры и имеющиеся данные о тепловом поле исследуемого региона.

6. Выделить основные закономерности связи нефтегазоносности Волго-Уральской НГП с вариациями структурных и теплофизических параметров земной коры и верхней мантии региона.

7. Определить направления дальнейшей работы для решения задач уточнения строения земной коры Волго-Уралии, вариаций ее теплофизических свойств и оценки нефтегазоносности Волго-Уральского сегмента ВЕК.

#### **Научная новизна исследования.**

1. Впервые использованы спутниковые гравитационные данные для моделирования строения земной коры Волго-Уральского сегмента ВЕК.

2. Построена новая модель земной коры Волго-Уралии с использованием спутниковых гравитационных и глубинных сейсмических данных на изучаемой территории.

3. Произведено моделирование геотермической структуры Волго-Уральского сегмента ВЕК с использованием статистического байесовского подхода методом Монте-Карло по схеме марковских цепей (MCMC) на основе ранее созданной структурной модели.

4. Впервые рассчитаны латеральные вариации таких теплофизических параметров Волго-Уралии, как теплопроводность и радиогенное теплообразование земной коры, теплопроводность верхней мантии и мантийный тепловой поток.

5. Выявлены закономерности связи строения земной коры и верхней мантии с тепловым полем, а также строения земной коры, верхней мантии и теплового поля с нефтегазоносностью Волго-Уральского региона.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

В ходе работы была построена карта глубины поверхности Мохоровичича, согласующаяся с гравитационным полем и сейсмическими данными о строении земной коры на территории Волго-Уралии. В процессе гравитационного моделирования подтвердилась гипотеза о наличии уплотненного материала в нижней коре центральной Волго-Уралии, соответствующей так называемой «Ветлужской синформе» [Минц и др., 2010; Artemieva, Thybo, 2013].

Моделирование геотермической структуры Волго-Уралии позволило оценить пространственные вариации теплофизических параметров земной коры и верхней мантии. Выявлена пространственная связь между радиогенным теплообразованием и распространением архейских комплексов метаосадочных горных пород Волго-Уралии, которые, как было показано А.В. Постниковым, также коррелируют с распределением нефтяных месторождений на территории Волго-Уральской НГП [Постников, 2002]. По результатам моделирования выдвинута гипотеза о повышенном радиогенном теплообразовании метаосадочных пород Волго-Уральской кристаллической коры как ключевом факторе, влияющем на неоднородности теплового поля Волго-Уралии, которое также потенциально влияет и на созревание нефтематеринских пород.

С практической точки зрения, полученные модели строения земной коры и структуры теплового поля Волго-Уралии могут быть использованы при определении реологического состояния литосферы, а также для бассейнового анализа и моделирования нефтегазоносных систем с целью оценки степени зрелости нефтематеринских толщ и поиска месторождений углеводородов (МУВ).

#### **Методология и методы исследования.**

Для достижения цели диссертационного исследования и решения поставленных задач использовались следующие методы:

1. Сбор и оцифровка необходимых данных о строении земной коры и структуре теплового поля Волго-Уралии.

2. Расчет гравитационного эффекта осадочного чехла с учетом кривизны Земли при помощи модели тессероидов и исключение данного эффекта из поля градиента силы тяжести с введенной поправкой за рельеф [Uieda, Barbosa, Braitenberg, 2016].

3. Решение обратной задачи гравиметрии с использованием методики П. Хааса и др. для учета латерально-изменяющегося контраста плотностей земная кора – мантия [Haas, Ebbing, Szwillus, 2020].

4. Решение прямой задачи гравиметрии в программном обеспечении IGMAS+ с одновременным учетом гравиметрических измерений и сейсмических данных о структуре земной коры [Götze, Lahmeyer, 1988; Schmidt et al., 2020].

5. Численное моделирование распределения тепловых параметров земной коры и верхней мантии на основе байесовского подхода МСМС по аналогии с исследованием [Lösing, Ebbing, Szwillus, 2020].

6. Проверка статистических гипотез: о нормальности распределения по критерию Шапиро-Уилка [Shapiro, Wilk, 1965], об однородности дисперсий по критерию Левене [Brown, Forsythe, 1974; Levene, 1960], о различии средних по Т-критерию Стьюдента [Гмурман, 2004; Кример, 2010] для статистической оценки полученных в процессе моделирования структурных и тепловых параметров земной коры и верхней мантии внутри и вне существующих МУВ.

Вся работа по моделированию и визуализации строения земной коры производилась с использованием следующего программного обеспечения: ArcGIS Pro, Surfer, IGMAS+, язык программирования Python с дополнительным модулем для расчета гравитационного эффекта тессероидов «Tesseroids» [Uieda, Barbosa, Braitenberg, 2016], модулем для визуализации пространственных данных PyGMT [Uieda, Leonardo et al., 2021] и модулем для визуализации математических графиков Matplotlib [Hunter, 2007]. Инверсия спутникового поля градиента силы тяжести для определения глубины Мохо проводилась с помощью кода П. Хааса и др. [Haas, Ebbing, Szwillus, 2020]. Для байесовского анализа теплового поля и визуализации результатов использовался язык программирования Python с дополнительным модулем для визуализации статистической графики Seaborn [Waskom, 2021], а также модули PyGMT и Matplotlib. В качестве основы для байесовского анализа использовался код М. Лезинг и др. [Lösing, Ebbing, Szwillus, 2020]. Для статистического анализа различия значений полученных структурных и теплофизических параметров земной коры и верхней мантии внутри и за пределами МУВ Волго-Уральской НПП был использован модуль SciPy [Virtanen et al., 2020].

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. В центральной части Волго-Уралии выделен слой уплотненной нижней коры, подтверждающий гипотезу о магматическом подслаивании в области «Ветлужской синформы», что было показано по результатам построения 3-D модели земной коры Волго-Уральского региона на основании данных спутниковой гравиметрии.

2. Установлено, что использование модели однослойной земной коры с вертикально постоянными радиогенным теплообразованием и теплопроводностью является достаточным приближением для региональных исследований геотермической структуры архейских кратонов, что было показано по результатам моделирования теплового поля Волго-Уралии.

3. Выделен главный фактор, отвечающий за пространственные неоднородности поверхностного теплового потока Волго-Уралии, – радиогенное теплообразование земной коры. Наблюдается пространственная взаимосвязь областей повышенного радиогенного теплообразования с районами распространения высокоглиноземистых метаосадочных пород большечеремшанской и других серий, с которыми, в свою очередь, связано расположение крупных МУВ региона.

#### **Степень достоверности и апробация результатов исследования.**

Достоверность предлагаемых автором моделей и выводов основывается на контроле полученных моделей по имеющимся априорным данным и другим аналогичным моделям. Для контроля достоверности полученной в результате решения прямой и обратной задач гравиметрии литосферной модели Волго-Уралии использовались как имеющиеся глобальные и региональные

модели земной коры, так и данные глубинных сейсмических исследований. Для контроля достоверности полученной геотермической модели использовались данные температурных измерений в девяти глубоких скважинах [Христофорова, 2002; Христофорова и др., 2004], а также карта температур на глубине 1000 м на территории Поволжья [Христофорова и др., 2004].

Основные положения и результаты исследования докладывались на Международных и Всероссийских конференциях: 73-я Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ 2019» (Москва, 2019 г.), 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель 2019» (Геленджик, 2019 г.), Международная междисциплинарная научная геоконференция SGEM (International Multidisciplinary Scientific GeoConference: «SGEM») (Вена, Австрия, 2020 г.), 81-я конференция Немецкого геофизического сообщества (Annual meeting of the German Geophysical Society) (Киль, Германия, 2021 г.), Генеральная Ассамблея Европейского геофизического союза (EGU General Assembly) (Вена, Австрия, 2021 г.), Международная научно-практическая конференция «Решение Европейского союза о декарбонизации и новая парадигма развития топливно-энергетического комплекса России» (Казань, 2021), IV Всероссийская с международным участием школа-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» (Казань, 2021 г.), 82-я конференция Немецкого геофизического сообщества (Мюнхен, Германия, 2022 г.).

Материалы диссертации опубликованы в 7 научных работах: из них 5 статей в рецензируемых научных изданиях и рекомендованных в диссертационном совете КФУ по специальности 1.6.9 «Геофизика». Среди опубликованных работ индексируются в Scopus – 6, в WoS – 4, опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования – 2.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 270 наименований, иллюстрирована 45 рисунками и содержит 11 таблиц. Общий объем работы составляет 146 страниц.

#### **Личный вклад автора в решение поставленных задач.**

Диссертация основана на самостоятельных исследованиях автора и заключалась в сборе, оцифровке, анализе, моделировании, интерпретации и визуализации данных. В процессе работы над диссертационным исследованием автором проведена следующая работа:

1. Проанализирована общая научная литература по текущим представлениям о строении земной коры и верхней мантии и методам его изучения, спутниковой гравиметрии, тепловому потоку, бассейновому анализу и особенностям строения земной коры на нефтегазоносных территориях. Дополнительно проанализирована научная литература по тепловому потоку, тектоническому строению и эволюции Волго-Уральского сегмента ВЕК и истории геотермических исследований на данном регионе.

2. Собраны необходимые геолого-геофизические данные для построения модели земной коры региона, куда входят спутниковое поле силы тяжести и градиента силы тяжести, рельеф местности, мощность осадочного чехла, глубинные сейсмические данные о положении границы Мохо. Часть глубинных сейсмических профилей была оцифрована с соответствующих публикаций.

3. Рассчитан гравитационный эффект осадочного чехла на вертикальный градиент поля силы тяжести путем аппроксимации осадочного чехла набором тессероидов и решения прямой задачи гравиметрии. Данный эффект был исключен из вертикального поля градиента силы тяжести с введенной поправкой за рельеф.

4. Проведена инверсия спутникового поля градиента силы тяжести, по результатам которой произведена предварительная оценка глубины Мохо на изучаемой территории по методике П. Хааса и др. [Haas, Ebbing, Szwillus, 2020].

5. Построена трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Волго-Уралии в процессе решения прямой задачи гравиметрии в программном обеспечении IGMAS+.

6. Собраны необходимые данные для геотермического моделирования, куда входят температура и тепловой поток на земной поверхности, температура на границе литосфера – астеносфера (LAB).

7. Дополнен программный код для байесовской инверсии геотермических параметров [Lösing, Ebbing, Szwillus, 2020] с добавлением возможности расчёта геотермических параметров для многослойной модели земной коры.

8. Проведен статистический анализ геотермической структуры Волго-Уралии с использованием полученной ранее модели литосферы и имеющихся данных о тепловом поле исследуемого региона.

9. Рассмотрены статистические различия строения земной коры и верхней мантии и значений теплофизических параметров в пределах Волго-Уральской НГП для нефтегазоносных регионов и регионов без открытых МУВ.

10. Определены направления дальнейшей работы по изучению теплофизических свойств земной коры и анализу нефтегазоносности Волго-Уральского сегмента ВЕК.

#### **Благодарности.**

Автор выражает сердечную благодарность научному руководителю и идейному вдохновителю исследования – профессору, доктору геол.-минерал. наук Данису Карловичу Нургалиеву за полезные дискуссии по теме диссертации и всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах работы.

Особую благодарность автор выражает профессору, доктору Йоргу Эббингу и его коллегам – Питеру Хаасу и Марин Лезинг из Кильского университета имени Кристиана Альбрехта за совместную работу, ценные комментарии и рекомендации как в процессе выполнения самой работы, так и в процессе публикации результатов исследования.

Отдельная благодарность Г.С. Хамидуллиной, Н.Н. Равиловой, З.М. Слепаку, Д.И. Хасанову, Э.В. Утемову, Е.А. Ячmeneвой, Э.Р. Зиганшину, П.С. Крылову и всему коллективу кафедры геофизики и геоинформационных технологий института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета за поддержку в написании, оформлении и коррективке диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются его цель и задачи, а также научная новизна и практическая значимость его результатов, приводятся сведения об апробации работы и публикациях. Здесь же представлены защищаемые положения и кратко охарактеризована структура работы.

### **Глава 1. Современные представления о строении земной коры и верхней мантии и его связь с тепловым режимом и нефтегазоносностью**

В разделе 1.1 описываются текущие представления о строении земной коры и верхней мантии и методы его изучения. Даются определения понятиям термальной литосферы и кратона. Рассматриваются сейсмические и несейсмические методы изучения строения земной коры и верхней мантии. Подробно рассмотрен метод гравиметрии для изучения строения земной коры и верхней мантии. Приведены примеры моделей земной коры, построенные с использованием различных подходов к работе с гравитационным полем.

В разделе 1.2 рассмотрен вопрос связи строения земной коры с нефтегазоносностью. Выделен тепловой режим как главный фактор, посредством которого строение земной коры влияет на нефтегазоносность региона. Показан расчет распределения температуры в земной коре и перечислены факторы, приводящие к вариациям теплового потока на земной поверхности. Рассмотрена взаимосвязь эволюции строения земной коры и палеотеплового потока в процессе геологической истории формирования осадочных бассейнов. Приведены примеры анализа термической истории осадочных бассейнов и рассмотрены индикаторы термической зрелости, позволяющие восстановить термическую историю.

Также затронут вопрос непосредственного влияния строения земной коры на нефтегазоносность осадочного чехла – через разломно-блоковое строение кристаллического фундамента.

### **Глава 2. Объект исследования – Волго-Уралия**

В разделе 2.1 описывается тектоническое строение и эволюция Волго-Уралии как части Восточно-Европейского кратона. Описывается строение ее кристаллического фундамента и осадочного чехла. Рассмотрена эволюция земной коры Волго-Уралии в докембрии и формирование структуры ее осадочного чехла с палеозоя до настоящего времени.

В разделе 2.2 приведены современные данные о структуре земной коры Волго-Уралии, полученные преимущественно при помощи сейсмических исследований.

В разделе 2.3 рассмотрены геотермические исследования, проведенные на территории Волго-Уралии за всю историю ее изучения. Показано современное понимание вариаций теплофизических параметров региона.

### **Глава 3. Методика исследования строения земной коры и теплового режима Волго-Уралии**

В разделе 3.1 приводятся входные данные и описывается методика гравитационного моделирования для построения модели земной коры и верхней мантии Волго-Уральского субкратона. Суть метода заключается в двух основных этапах:

1. Инверсия поля градиента силы тяжести с латерально изменяющимся контрастом плотности земная кора-мантия с помощью алгоритма Гаусса – Ньютона с тихоновской регуляризацией второго порядка на основании данных спутника GOCE с целью предварительной оценки глубины границы Мохо в пределах изучаемого региона. Перед инверсией в поле градиента силы тяжести были внесены поправки за рельеф и осадочный чехол. В процессе

инверсии значение контраста плотности могло изменяться только между заданными тектоническими регионами. В пределах самих тектонических регионов контрасты плотности оставались неизменными. Для анализа было выбрано 4 тектонических региона: (1) архейские кратоны, к которым относились Волго-Уралия, Сарматия и Фенноскандия, (2) протерозойские рифтовые пояса, к которым относились Центрально-Русская рифтовая система, Пачелмский рифт, Мезенский рифт и Камско-Бельский рифт, (3) Уралиды и (4) Прикаспийский бассейн. Был определен возможный диапазон изменения контраста плотности: от 350 до 550 кг/м<sup>3</sup>.

2. Решение прямой задачи гравиметрии с построением 3-D плотностной модели литосферы Волго-Уралии в программном обеспечении IGMAS+. Здесь в качестве заготовки была использована карта глубины границы Мохо, полученная по результатам инверсии гравитационного поля. Были также добавлены границы подошвы осадочного чехла, подошвы верхней земной коры и кровли астеносферы. Наряду со структурной информацией были импортированы измеренное поле вертикального градиента силы тяжести на высоте полета спутника GOCE с поправкой за рельеф, поле силы тяжести в редукции Буге по модели XGM2019e на поверхности Земли и сейсмические данные о глубине границы Мохо. Далее модель земной коры Волго-Уралии настраивалась таким образом, чтобы её геометрия и создаваемые ею поля силы тяжести и градиента силы тяжести имели минимальное расхождение с имеющимися сейсмическими и гравитационными измерениями.

В разделе 3.2 приводятся входные данные и описывается методика моделирования теплового поля земной коры и верхней мантии Волго-Уральского субкратона. Суть метода заключается в байесовской инверсии МСМС на основании данных о поверхностных тепловом потоке и температуре, а также информации о строении земной коры и верхней мантии Волго-Уралии, полученной в процессе гравитационного моделирования.

Рассмотрены две модели: (1) однослойная земная кора с вертикально постоянными радиогенным теплообразованием и теплопроводностью и (2) многослойная земная кора, состоящая из трех слоев, осадочного чехла, верхней и нижней кристаллической коры, также обладающих вертикально постоянными радиогенным теплообразованием и теплопроводностью. Выведены уравнения для расчета геотерм земной коры и верхней мантии в стабильных кратонных областях для однослойной многослойной моделей земной коры. Приведены возможные диапазоны изменения анализируемых термических параметров для однослойной и многослойной моделей земной коры.

## **Глава 4. Результаты исследования строения земной коры и теплового режима Волго-Уралии и их связи с нефтегазоносностью**

Раздел 4.1 посвящен результатам гравитационного моделирования строения земной коры Волго-Уралии, к которым относятся результаты гравитационной инверсии и результаты решения прямой задачи гравиметрии.

В результате инверсии поля градиента силы тяжести были получены карты распределения контраста плотности земная-кора мантия и карта предварительной оценки глубины Мохо в пределах изучаемого региона (Рисунок 1). При этом опорная глубина Мохо при инверсии составила 45 км. Контраст плотности между земной корой и верхней мантией архейской кратонной коры и Уральского орогена был принят за 550 кг/м<sup>3</sup>, тогда как для палеопротерозойских рифтовых систем и Прикаспийского бассейна он был принят за 500 и 350 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Такие значения соответствуют результатам исследования предполагаемого контраста плотности земная кора-мантия по данным спутника GOCE М. Эшаха и др., которое показывает, что на территории Евразии он должен находиться в диапазоне 400–600 кг/м<sup>3</sup> [Eshagh et al., 2016]. Полученная в результате гравитационной инверсии карта глубины Мохо в целом согласуется с известными структурными особенностями земной коры региона: земная кора утолщается в кратонах и в области Уральских гор и утоняется вдоль палеопротерозойских рифтов, Предуральского прогиба и Прикаспийского осадочного бассейна.

Моделирование строения земной коры и верхней мантии параллельно с решением прямой задачи гравиметрии в IGMAS+ привело к построению 3-D плотностной модели земной коры (Рисунок 2). При этом, построенная в IGMAS+ модель имеет стандартное отклонение измеренного и рассчитанного полей силы тяжести, равное 8.0 мГал и коэффициент корреляции между ними, равный 0.91. Для вертикального градиента силы тяжести стандартное отклонение составило 0.13 этвеш, а коэффициент корреляции – 0.81. В процессе настройки модели была обнаружена область в центральной части Волго-Уралии со значительным расхождением измеренного и рассчитанного полей силы тяжести, достигающим 95 мГал. Данная область была проинтерпретирована и смоделирована как уплотненное тело в основании «Ветлужской синформы», что подтверждают проведенные изостатические расчеты. Такой вывод согласуется с ранее выдвинутой гипотезой об андерплейтинге в центральной части Волго-Уралии [Thybo, Artemieva, 2013].

Построенная модель земной коры Волго-Уралии (Рисунок 3) показывает утолщение земной коры в кратонных областях до 44–46 км по сравнению с 40–42 км в рассекающих кратоны палеопротерозойских рифтовых поясах. При этом в области андерплейтинга в центре Волго-Уралии мощность земной коры превышает 50 км, что соразмерно таковой в области Уральских гор (Рисунок 4). Значительное утонение земной коры до 32 км наблюдается в Прикаспийском бассейне и до 34–36 км в Предуральском краевом прогибе, что изостатически связано с мощными осадочными толщами. Сравнение построенной модели с существующими моделями земной коры показало, что разработанная модель более близка к моделям, созданным с использованием в том числе сейсмических данных (CRUST 1.0 и EUNaseis), чем к исключительно гравитационной модели GEMMA. Данный факт говорит в пользу использования сейсмической информации о глубине границы Мохо для контроля модели земной коры, построенной с использованием спутниковых гравитационных данных.

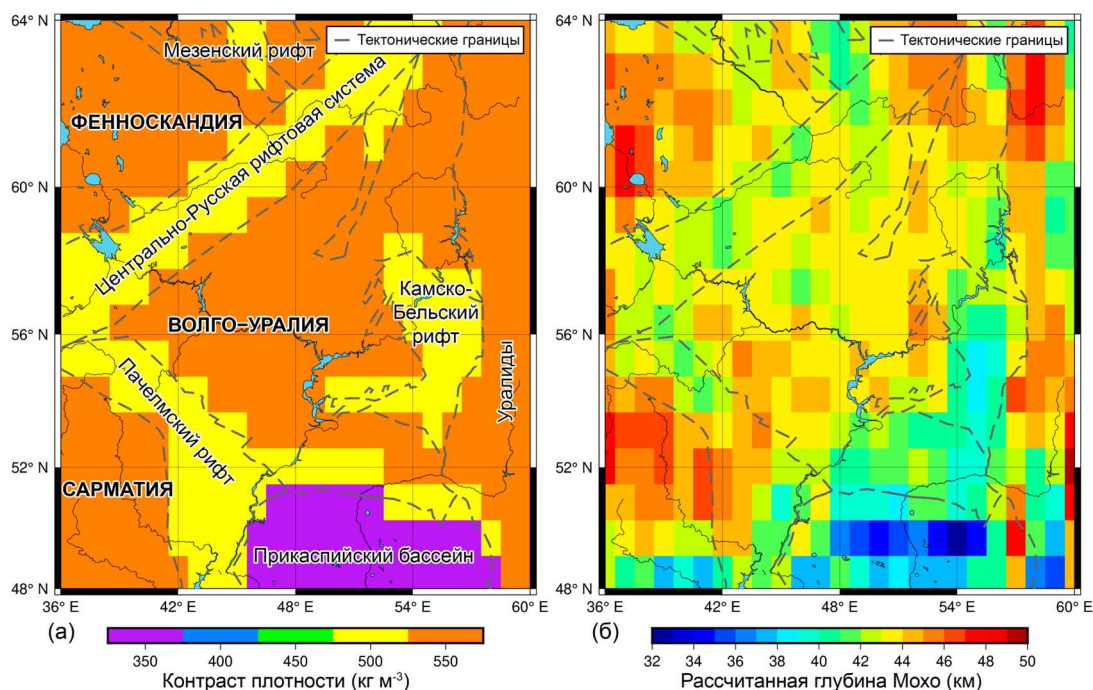


Рисунок 1. (а) Контраст плотности, определенный с использованием алгоритма Хааса и др. [Haas, Ebbing, Szwillus, 2020] и (б) глубина Мохо, полученная с помощью инверсии поля градиента силы тяжести

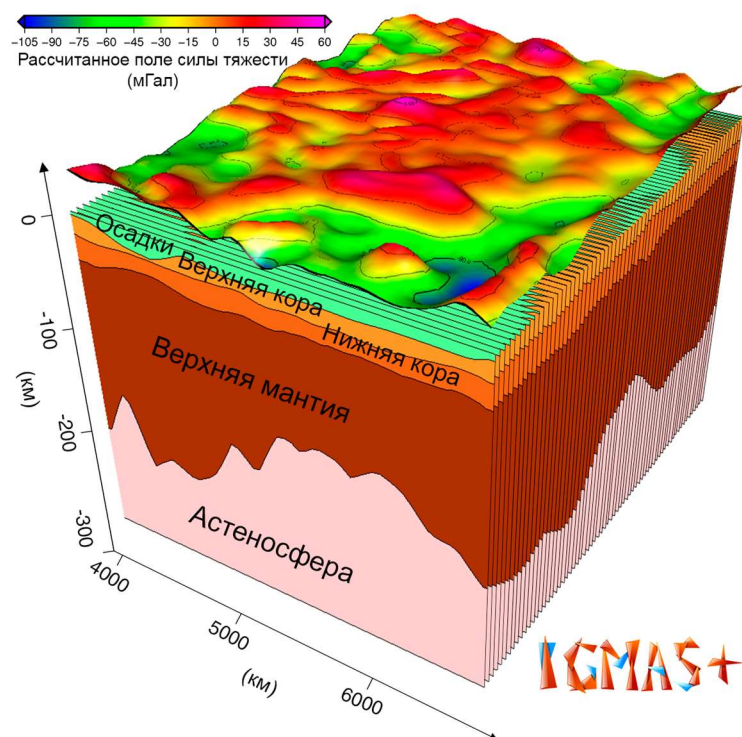


Рисунок 2. Трехмерная модель литосферы Волго-Уралии, построенная в программе IGMAS+

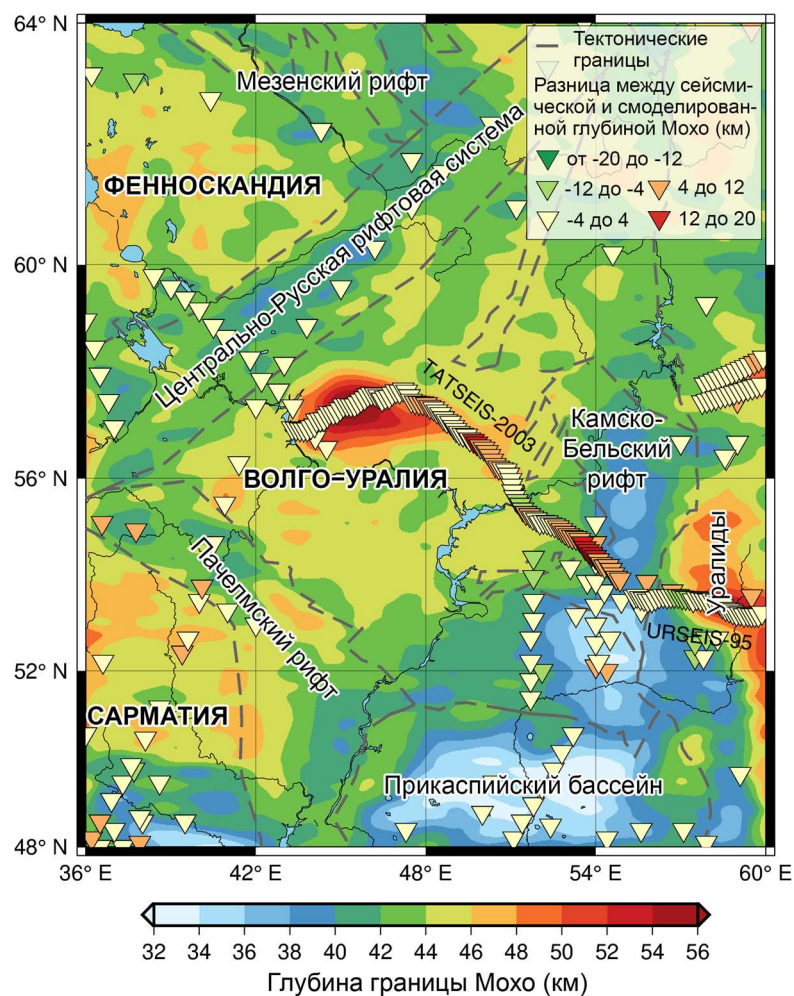


Рисунок 3. Модель Мохо Волго-Уральского субкратона, полученная в результате гравитационной инверсии и последующего 3-D гравитационного моделирования с решением прямой задачи гравиметрии в IGMAS+

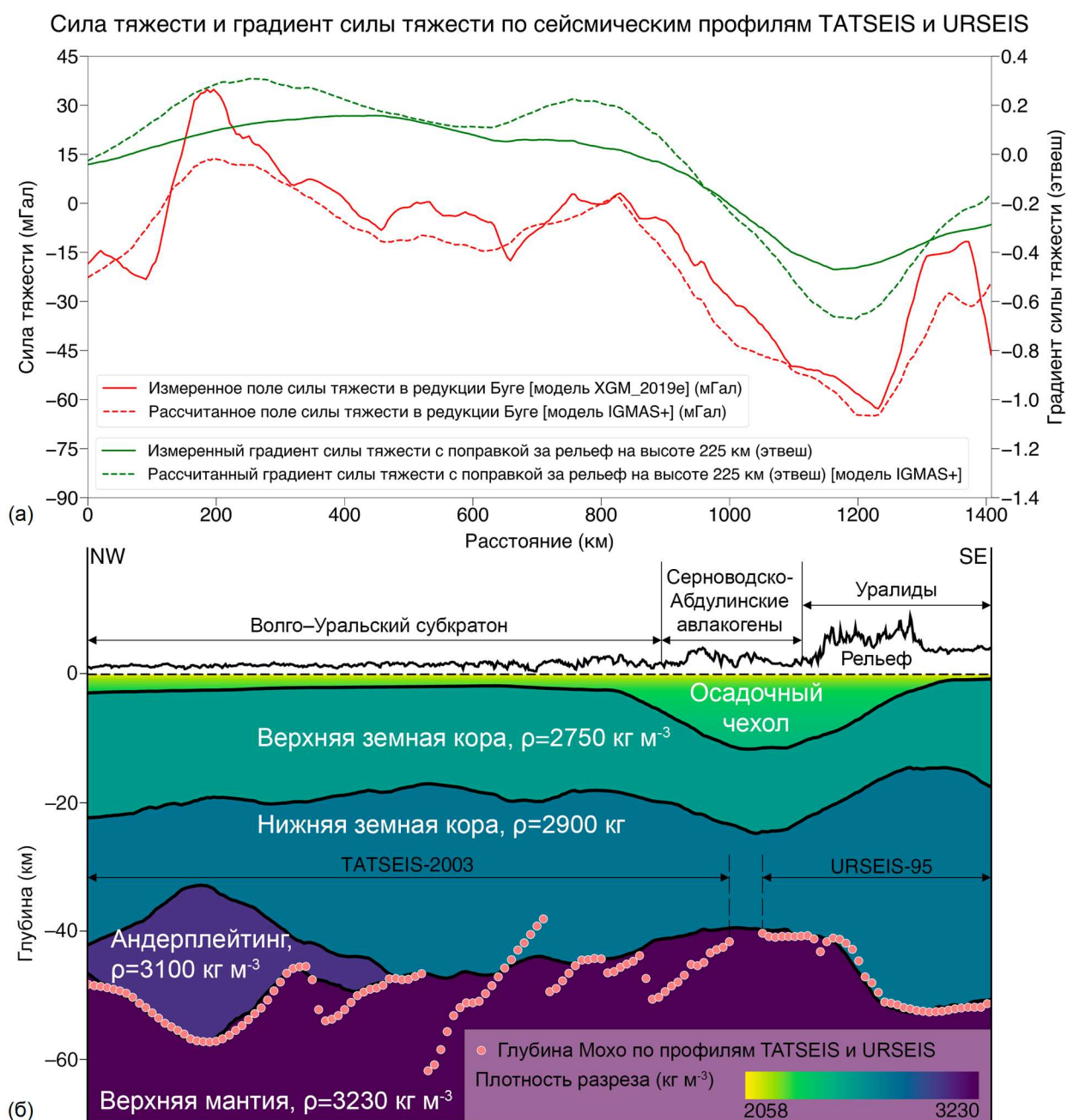


Рисунок 4. (а) Измеренные и рассчитанные аномалии силы тяжести в редукции Буге на поверхности Земли и аномалии вертикального градиента силы тяжести с поправкой за рельеф на высоте полета спутника GOCE. (б) Разрез модели IGMAS+ по глубинным профилям TATSEIS-2003 и URSEIS-95

Раздел 4.2 посвящен результатам геотермического моделирования. Здесь описываются найденные при помощи байесовской инверсии неоднородности тепловых параметров земной коры и верхней мантии Волго-Уралии для однослойной и многослойной моделей земной коры. Полученные карты неоднородностей тепловых параметров для однослойной и многослойной моделей были рассчитаны как среднее арифметическое последних 90 % решений, полученных по методу MCMC. Общее количество решений составляет 100 000.

В результате для однослойной модели земной коры наблюдаются значительные вариации РТО земной коры и мантийного теплового потока. Вариации теплопроводностей земной коры и верхней мантии менее выражены (Рисунок 5). Так, среднее значение теплопроводности земной коры для исследуемого региона составило 2.06 Вт/м/К со стандартным отклонением 0.27 Вт/м/К, в то время как теплопроводность верхней мантии имеет среднее значение в 3.74 Вт/м/К и стандартное отклонение 0.14 Вт/м/К. Такая разница в средних значениях теплопроводностей и

их разбросе обусловлена, прежде всего, различным задаваемым диапазоном изменения данного свойства. В то время как теплопроводность верхней мантии практически однородна с минимальными латеральными вариациями ее значений, на карте теплопроводности земной коры наблюдаются аномалии с низкой теплопроводностью, составляющей  $\sim 1.5\text{--}2.0$  Вт/м/К в области Уральских гор и восточной Фенноскандии, вероятно, связанные с особенностями состава кристаллических пород данных областей.

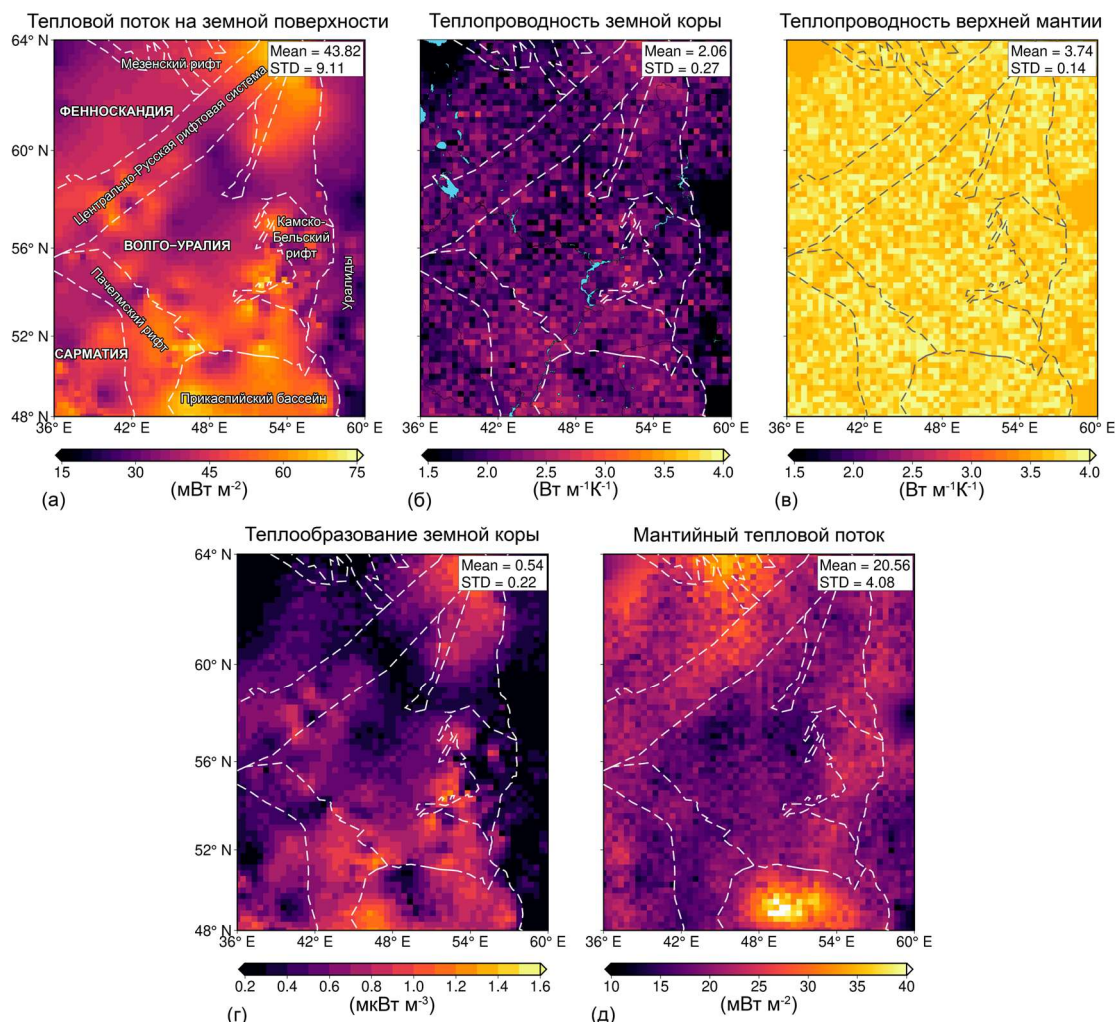


Рисунок 5. Вариации тепловых параметров Волго-Уральского субкратона для однослойной модели земной коры: (а) тепловой поток на земной поверхности, (б) теплопроводность земной коры, (в) теплопроводность мантии, (г) РТО земной коры, (д) мантийный тепловой поток

РТО земной коры – параметр со значительно большими вариациями, чем теплопроводность, показывает низкое среднее значение для моделируемого региона, равное  $0.54$  мкВт/м<sup>3</sup>, что характерно для регионов земной коры архейского возраста [Jaupart, Mareschal, 2014]. Наблюдаются три региона с повышенным РТО: (1) восточная часть Волго-Уралии, (2) юг Волго-Уралии, Прикаспийский бассейн и Пачелмский рифт, (3) Тимано-Печорский бассейн на севере Волго-Уралии. Также выделяются три региона с пониженным РТО – это (1) Уральские горы, (2) Фенноскандия и (3) центральная Волго-Уралия. Вариации РТО объясняются, прежде всего, вариациями состава кристаллической коры. Мантийный тепловой поток для исследуемого региона также невысок – среднее значение составляет  $20.56$  мВт/м<sup>2</sup>. Повышение мантийного теплового потока до  $30\text{--}40$  мВт/м<sup>2</sup> наблюдается в области Прикаспийского бассейна и Мезенских рифтов, понижение до  $10\text{--}15$  мВт/м<sup>2</sup> – в области центральной Волго-Уралии и Уральских гор. Аномалии мантийного теплового потока главным образом могут быть объяснены вариациями мощности термальной литосферы, что подтверждается проведенным корреляционным анализом

(Рисунок 6). Из данного анализа также следует, что главный параметр, отвечающий за вариации наземного теплового потока, – это РТО земной коры.

Многослойная модель земной коры показывает подобные вариации тепловых параметров с практически идентичными средневзвешенными значениями теплопроводности и РТО земной коры таковым у однослойной модели. Корреляционные связи также практически не меняются. Обе модели были проверены по независимым измерениям температур в скважинах и по карте температуры на глубине 1000 м на территории Поволжья [Христофорова, 2002; Христофорова и др., 2004]. В результате было обнаружено несколько меньшее соответствие с измеренными данными у многослойной модели. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что однослойная модель земной коры с постоянными РТО и теплопроводностью является достаточной аппроксимацией для регионального геотермического моделирования.

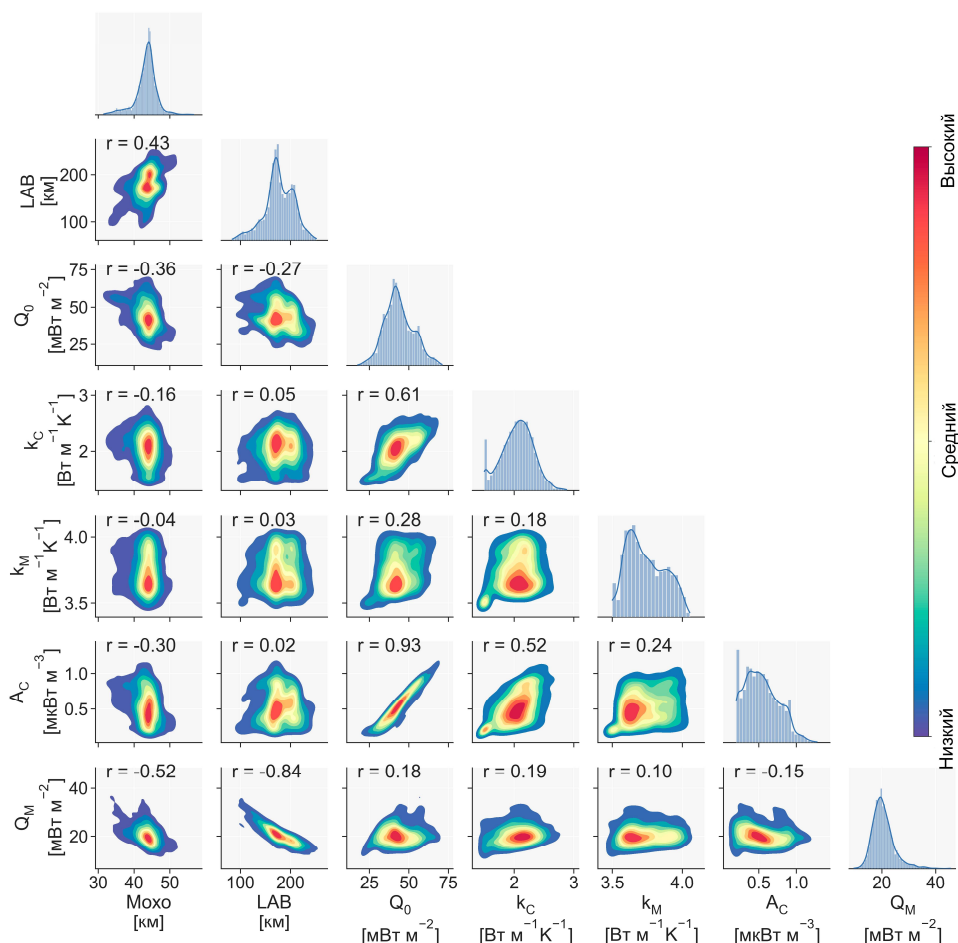


Рисунок 6. Коррелограмма структурных (глубины Мохо и LAB) и тепловых параметров (тепловой поток на земной поверхности  $Q_0$ , РТО ЗК  $A_C$ , теплопроводность ЗК  $k_C$ , мантийная теплопроводность  $k_M$ , мантийный тепловой поток  $Q_M$ ) для однослойной модели земной коры

В разделе 4.3 производится анализ связи строения земной коры с нефтегазоносностью Волго-Уралии. На основании полученных карт вариаций тепловых параметров построена трехмерная геотермическая модель осадочного чехла Волго-Уралии. Как видно на Рисунке 7, тепловое поле осадочного чехла Волго-Уралии достаточно неоднородно. В пределах Волго-Уральского субкратона наблюдается относительное увеличение температур под месторождениями Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Такое увеличение может быть связано с повышенным радиогенным теплообразованием в данной области.

Повышенное РТО ЗК может быть связано с распространением глиноземистых метаосадочных сланцев в данных регионах (Рисунок 8). Смоделированное повышение РТО ЗК в юго-восточной части Волго-Уралии и южной части Пачелмского рифта достигает 1.2–1.4 мВт/м<sup>3</sup> по сравнению с ~0.6 мВт/м<sup>3</sup> кратонной части Волго-Уралии.

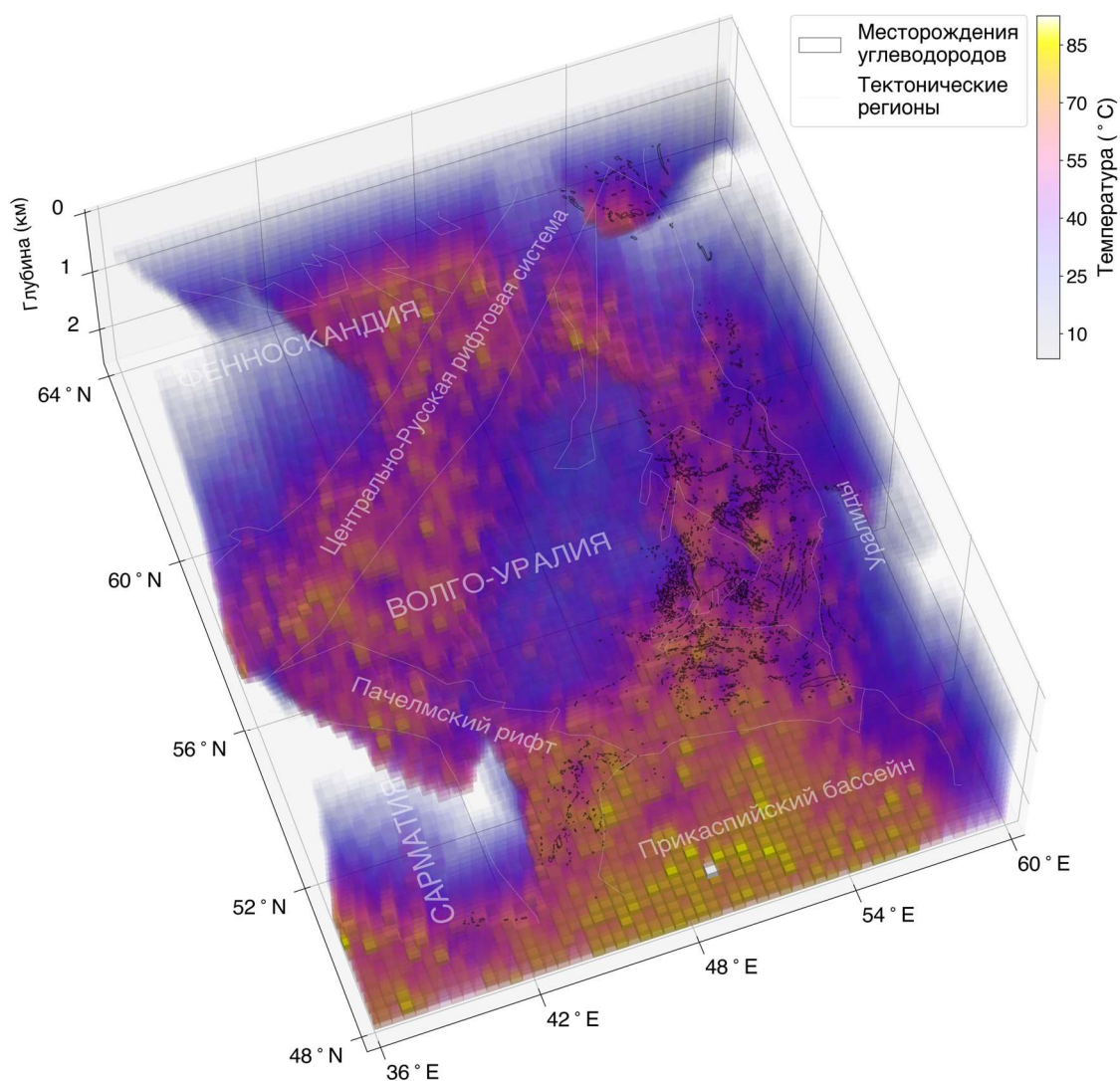


Рисунок 7. Трехмерная геотермическая модель осадочного чехла Волго-Уралии

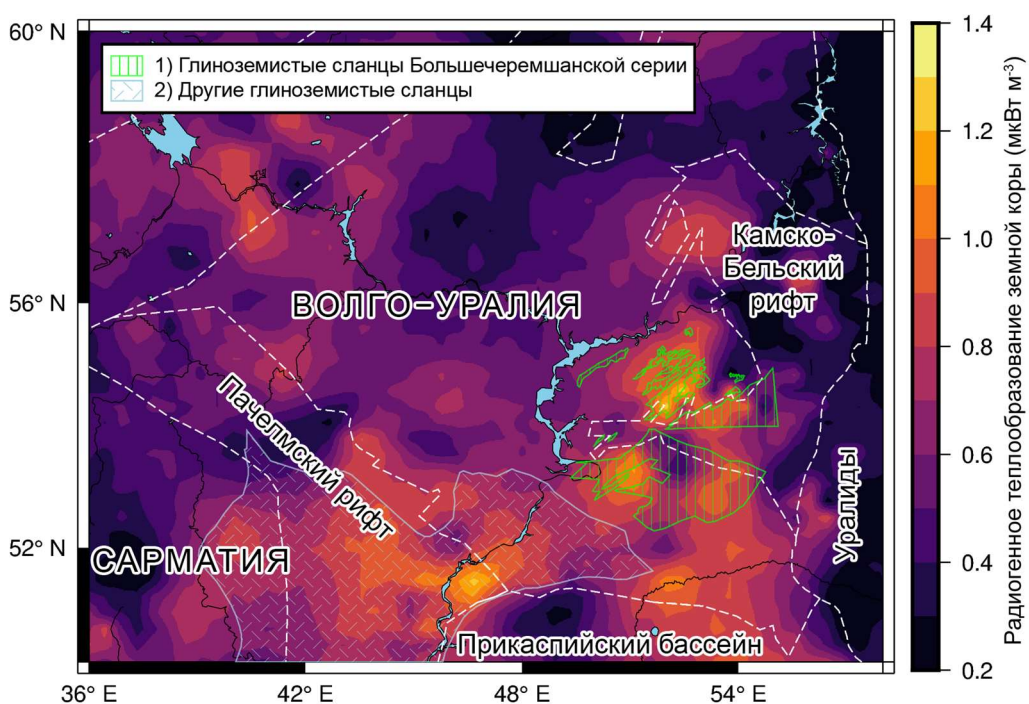


Рисунок 8. Радиогенное теплообразование юго-востока Волго-Уралии и его связь с распространением метаосадочных комплексов

Заключительным этапом была проанализирована статистическая значимость разности средних значений смоделированных структурных и термических параметров Волго-Уралии в пределах и за пределами месторождений углеводородов (МУВ) Волго-Уральской НГП (Таблица 1). Статистический анализ проводился по Т-критерию Стьюдента о разности средних с уровнем значимости 0.1 %. В результате анализа выяснилось, что нулевая гипотеза о равенстве средних значений анализируемых параметров не может быть отвергнута только для теплопроводности верхней мантии. В случае всех остальных анализируемых параметров наблюдается статистически значимая разница их средних значений. Наблюдаемое увеличение РТО, теплопроводности ЗК и теплового потока на земной поверхности вероятно связано с изменяющимся составом кристаллической коры в области Волго-Уральской НГП, содержащей в себе метаосадочные глиноземистые сланцы большечеремшанской серии. Увеличение мощности осадочного чехла, уменьшение мощности кристаллической коры и увеличение мантийного теплового потока в пределах МУВ главным образом связано с уменьшением мощности термальной литосферы.

Таблица 1– Основные статистические характеристики исследуемых параметров внутри и вне месторождений углеводородов Волго-Уральской НГП

| Параметр                     | Отношение к МУВ | Медиана | Среднее | Станд. откл. | Дисперсия |
|------------------------------|-----------------|---------|---------|--------------|-----------|
| $H_1$ (км)                   | Внутри          | 4.55    | 5.68    | 3.15         | 9.88      |
|                              | Вне             | 2.83    | 4.33    | 3.08         | 9.46      |
| $H_2$ (км)                   | Внутри          | 15.79   | 15.56   | 2.58         | 6.65      |
|                              | Вне             | 16.66   | 16.34   | 2.53         | 6.37      |
| $H_3$ (км)                   | Внутри          | 21.66   | 20.46   | 4.59         | 21.01     |
|                              | Вне             | 24.07   | 22.83   | 4.57         | 20.85     |
| $M$ (км)                     | Внутри          | 42.26   | 41.54   | 2.94         | 8.61      |
|                              | Вне             | 43.88   | 43.33   | 2.47         | 6.08      |
| $LAB$ (км)                   | Внутри          | 177.75  | 179.29  | 15.31        | 233.61    |
|                              | Вне             | 183.95  | 190.8   | 24.09        | 579.17    |
| $k_c$ (Вт/м/К)               | Внутри          | 2.15    | 2.12    | 0.25         | 0.06      |
|                              | Вне             | 2.07    | 2.06    | 0.26         | 0.07      |
| $k_m$ (Вт/м/К)               | Внутри          | 3.75    | 3.76    | 0.14         | 0.02      |
|                              | Вне             | 3.71    | 3.73    | 0.13         | 0.02      |
| $A_c$ (мкВт/м <sup>3</sup> ) | Внутри          | 0.66    | 0.62    | 0.25         | 0.06      |
|                              | Вне             | 0.56    | 0.56    | 0.21         | 0.04      |
| $Q_m$ (мВт/м <sup>2</sup> )  | Внутри          | 20.3    | 20.42   | 2.32         | 5.38      |
|                              | Вне             | 19.02   | 19.04   | 2.48         | 6.15      |
| $Q_0$ (мВт/м <sup>2</sup> )  | Внутри          | 46.88   | 46.18   | 9            | 80.72     |
|                              | Вне             | 42.28   | 43.03   | 8.18         | 66.77     |

Примечание: составлено автором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании описано создание и представлены модель структуры земной коры и верхней мантии и геотермическая модель Волго-Уральского субкратона. На основании построенных моделей проведен анализ взаимосвязи нефтегазоносности, строения земной коры и верхней мантии и теплового режима Волго-Уралии.

Структурная модель земной коры Волго-Уралии была получена с помощью инверсии поля градиента силы тяжести и детального объектно-ориентированного гравитационного моделирования с решением прямой задачи гравиметрии. Инверсия поля градиента силы тяжести выполнялась с использованием латерально-изменяющихся контрастов плотности земной коры и верхней мантии. Были подобраны три различных контраста плотности:  $350 \text{ кг/м}^3$  для Прикаспийского осадочного бассейна,  $500 \text{ кг/м}^3$  для палеопротерозойских рифтов и  $550 \text{ кг/м}^3$  для архейских кратонов и Уралидов. Опорная глубина Мохо составляла 45 км. В результате инверсии поля градиента силы тяжести была получена предварительная карта глубины Мохо Волго-Уралии. Уже на этапе гравитационной инверсии были выявлены основные закономерности изменения мощности земной коры в исследуемом регионе. Модель границы Мохо, полученная инверсией поля градиента силы тяжести, далее использовалась в качестве одной из плотностных границ в процессе трехмерного моделирования с решением прямой задачи гравиметрии, выполненного в программе IGMAS+. Здесь, помимо границы Мохо, полученной гравитационной инверсией, в модель были добавлены следующие границы: подошва осадочного чехла, граница между верхней и нижней земной корой, LAB. Основными данными для настройки модели служили сейсмические измерения глубины Мохо, аномалия поля силы тяжести в редукции Буге из модели гравитационного поля XGM2019e и поле градиента силы тяжести со спутника GOCE с введенной поправкой за рельеф. Трехмерное гравитационное моделирование выявило значительное несоответствие измеренного и рассчитанного полей силы тяжести в центральной части исследуемой области. Это несоответствие было проинтерпретировано как тело андерплейтинга, что подтверждается изостатическими расчетами и подкрепляет гипотезу об андерплейтинге, расположенном на кровле Мохо под Окским блоком Волго-Уралии [Thybo, Artemieva, 2013].

Итоговая модель земной коры учитывает основные геологические особенности Волго-Уральского субкратона и его окружения с утолщением Мохо в кратоновых областях и под Уральскими горами до  $\sim 50\text{--}55$  км и утонением вдоль палеопротерозойских рифтов, Прикаспийского осадочного бассейна и Предуральского прогиба до  $\sim 32\text{--}42$  км. Полученная модель земной коры послужила основой для дальнейшего геотермического моделирования.

Геотермическое строение Волго-Уралии было исследовано методом байесовской статистической инверсии по методу MCMC для двух моделей земной коры: (1) однослойной коры и (2) многослойной коры. Была использована имеющаяся геотермическая и структурная информация для ограничения возможных решений инверсии, по результатам которой были получены латеральные вариации теплопроводности земной коры и верхней мантии, РТО земной коры и мантийного теплового потока Волго-Уралии. Многослойная модель позволила исследовать распределение теплопроводностей и РТО отдельно в осадочном чехле, верхней и нижней ЗК. Хотя средние значения теплопроводности и РТО земной коры в случае использования однослойной модели отличаются от средних значений отдельных слоев земной коры для многослойной модели, обе модели показывают похожие закономерности латерального изменения тепловых параметров, а также их корреляционные тренды.

Проверка моделей по доступным измерениям температуры не показала значительного улучшения сходимости с данными измерений температуры при использовании многослойной модели по сравнению с однослойной. Поэтому можно констатировать, что однослойная модель земной коры с постоянным теплообразованием является достаточной аппроксимацией для региональных исследований структуры теплового поля.

Согласно однослойной модели, теплопроводность земной коры Волго-Уралии не претерпевает значительных вариаций на большей части исследуемой территории, имеет среднее значение  $\sim 2.0\text{--}2.2$  Вт/м/К с локальными понижениями до  $\sim 1.5\text{--}2.0$  Вт/м/К в области Уральских гор и восточной части Фенноскандии. Теплопроводности осадочного чехла, верхней и нижней земной коры в многослойной модели обладают сходными вариациями, при этом теплопроводность осадков и верхней коры является большей по сравнению с теплопроводностью нижней коры. Теплопроводность верхней мантии остается практически постоянной на всей исследуемой площади со средним значением  $\sim 3.75$  Вт/м/К для однослойной модели земной коры и  $\sim 3.7$  Вт/м/К для многослойной модели.

Радиогенное теплообразование является важнейшим фактором, контролирующим поверхностный тепловой поток на территории Волго-Уралии. Несмотря на то, что РТО осадочных пород и верхней коры многослойной модели в среднем намного выше, чем объемное РТО земной коры однослойной модели, меньшее РТО нижней коры компенсирует этот эффект, давая почти одинаковое суммарное РТО земной коры в обоих моделях. Как показано в представленных моделях, на РТО земной коры приходится более 50 % общих наблюдаемых теплопотерь на исследуемой территории, что согласуется с общепринятым мнением о коровом радиогенном теплообразовании в докембрийских регионах (например, [Artemieva, Mooney, 2001]).

В глобальном масштабе Волго-Урاليا представляет собой регион с низким радиогенным теплообразованием, составляющем в среднем  $\sim 0.6$  мкВт/м<sup>3</sup> в ее кратонной части. Локальные повышения РТО земной коры наблюдаются вблизи высокоглиноземистых метаосадочных комплексов в южной и восточной частях субкратона, где РТО достигает  $\sim 1.2\text{--}1.4$  мкВт/м<sup>3</sup>. Эта взаимосвязь также может быть основной причиной аномально высокого поверхностного теплового потока вблизи нефтеносных комплексов Южно-Татарского свода. Ввиду близких по значениям объемного РТО земной коры в однослойной и многослойной моделях, мантийный тепловой поток остается практически неизменным в обоих случаях. Вариации мантийного теплового потока в основном связаны с мощностью термальной литосферы. Области маломощной термальной литосферы, такие как Мезенские рифты на востоке Фенноскандии и Прикаспийский осадочный бассейн на юге исследуемой области, имеют повышенный мантийный тепловой поток, достигающий здесь значений  $\sim 30\text{--}40$  мВт/м<sup>2</sup>. Центральная Волго-Урاليا характеризуется низким мантийным тепловым потоком со значениями  $\sim 15\text{--}20$  мВт/м<sup>2</sup>.

Проведенный статистический анализ взаимосвязи строения земной коры и верхней мантии и вариаций их теплофизических параметров показал, что мощность осадочного чехла, мощности верхней и нижней ЗК, глубина Мохо, глубина поверхности LAB, теплопроводность и РТО земной коры, мантийный и поверхностный тепловые потоки обладают статистически значимым различием средних значений внутри и вне существующих МУВ в пределах Волго-Уральской НГП. Данные различия объясняются как структурно-тектоническими особенностями строения Волго-Уральской НГП, так и неоднородностями состава ее кристаллического фундамента. Исключение составляет лишь теплопроводность верхней мантии, для которой не было выявлено статистически значимого различия средних.

Полученные структурная и геотермическая модели могут служить основой для дальнейшего бассейнового анализа Волго-Уральского региона, который вкупе с геохимическими данными может более точно раскрыть процессы генерации, миграции и аккумуляции УВ Волго-Уральской НГП. Отдельно можно рекомендовать проведение исследований по изучению радиогенного теплообразования кристаллических пород отрядненской и большечеремшанской серий, а также других метаосадочных пород Волго-Уралии. Такие исследования могут верифицировать полученные в настоящей диссертационной работе выводы о радиогенном теплообразовании как главном факторе, контролирующем поверхностный тепловой поток Волго-Уральского региона.

**ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНЫ В  
СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ АВТОРА:**

1. The thermal state of Volgo-Uralia from Bayesian inversion of surface heat flow and temperature / I. Ognev, J. Ebbing, M. Lösing, D. Nurgaliev // *Geophysical Journal International*. 2023. Vol. 232, Issue 1. P. 322–342. (1,3 / авт. 0,3 п.л.)
2. Ognev I. Crustal structure of the Volgo-Uralian subcraton revealed by inverse and forward gravity modelling / I. Ognev, J. Ebbing, P. Haas // *Solid Earth*. 2022. Vol. 13, Issue 2. P. 431–448. (1,1 / авт. 0,4 п.л.)
3. Ognev I.N. Interrelation between the structure of the earth's crust and upper mantle and the maturity of source rocks / I.N. Ognev, D.K. Nourgaliev // *GEOMODEL 2019 – 21st Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, 2019. Vol. 2019. Code 160681 (P. 1–5). (0,3 / авт. 0,15 п.л.)
4. Ognev I.N. The use of «native» wavelet transform for determining lateral density variation of the Volgo-Uralian subcraton / I.N. Ognev, E.V. Utemov, D.K. Nurgaliev // *SOCAR Proceedings. Oil Gas Scientific Research Project Institute*, 2021. Vol. 2021, Special Issue 2. P. 135–140. (0,4 / авт. 0,1 п.л.)
5. Огнев И.Н. Сейсмичность и разработка Альметьевской площади Ромашкинского месторождения углеводородов / И.Н. Огнев, А.И. Степанов // *Георесурсы / Georesursy*. 2021. Т. 23, № 4. С. 51–57. (0,4 / авт. 0,2 п.л.)
6. Ognev I. Relation of South-East Tatarstan's seismicity to the Almet'yevskaja area's oil field development parameters / I. Ognev, A. Stepanov, S. Novikova // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2020. Vol. 2020-August, Issue 1.2. P. 745–752. (0,5 / авт. 0,2 п.л.)
7. Пример реконструкции процессов накопления карбонатных осадков на основе сеймостратиграфического и палеогеоморфологического анализов / Б.В. Платов, Г.С. Хамидуллина, И.А. Нуриев, И.П. Новиков, И.Н. Огнев // *Нефтяное хозяйство / Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. № 1. С. 18–22. (0,3 / авт. 0,06 п.л.)