



Об авторе

З.М. Слепак – геолог-геофизик. Известный ученый в России и в зарубежных странах. После окончания Казанского государственного университета и работы начальником полевых геофизических партий треста «Татнефтегеофизика» (1956–1965 гг.) стал заниматься преподавательской и научно-исследовательской деятельностью в Казанском университете.

Его научные исследования посвящены применению геофизических методов при решении задач нефтяной геологии, развитию нового научного направления в инженерной геологии – геофизическому мониторингу с целью сохранения строений на урбанизированных территориях и археологии. По результатам проведенных исследований им опубликовано 11 монографий, включая данную, (1980, 1989, 1999, 2005, 2007, 2010, 2015, 2019, 2020, 2022, 2022) и более трехсот статей в отечественных и зарубежных изданиях.

Ежегодно выступает с докладами на многих Международных геофизических конференциях, ассамблеях, семинарах: в Вене (1996, 2016), Ницце (1998), Рио-де-Жанейро (2000), Париже (2004), Утрехте (2004), в Москве, Санкт-Петербурге (1992–2009) и во многих других городах России (1972–2022).

З.М. Слепак доктор геол.-мин. наук, профессор, профессор кафедры геофизики Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ. Заслуженный деятель науки Республики Татарстан, Заслуженный профессор Казанского университета, Академик РАЕН. Вице-президент Казанского локального отделения EAGE (Europe-association geoscientists & engineers), участник создания и один из постоянных участников ЕАГО (Евро-Азиатского геофизического общества), член SEG, ISAP.

About the author

Zakhar M. Slepak is a geologist and geophysicist well known in Russia and internationally. He is Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of Geophysical Department of the Institute of Geology and Oil and Gas Technologies at Kazan Federal University, Honoured Scientist of the Republic of Tatarstan, Honoured Professor of Kazan University, Member of Russian Academy of Natural Sciences, Vice President of Kazan Branch of European Association of Geo-scientists and Engineers (EAGE), and one of the founders of the Eurasian Geophysical Society (EAGO).

Zakhar Slepak graduated from Kazan State University and became its lecturer and research scientist after heading geophysical crews at TatNefteGeofizika from 1956 to 1965. His research activity is dedicated to geophysical techniques in petroleum geology, archeology and geophysical monitoring as a new method in engineering geology to preserve urban buildings. He is the author of eleven monographs, including this one, (1980, 1989, 1999, 2005, 2007, 2010, 2015, 2019, 2020, 2022, 2022) and more than 300 scientific articles published in Russia and abroad.

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

З.М. СЛЕПАК

ГРАВИРАЗВЕДКА

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В НЕФТЯНОЙ ГЕОЛОГИИ**



КАЗАНЬ

2022

УДК 550.3:553.9
ББК 26.21:26.343.1
С47

*Печатается по рекомендации Ученого совета
Института геологии и нефтегазовых технологий
Казанского федерального университета*

Рецензенты:

член-корреспондент РАН, Институт геофизики УрО РАН,
доктор физико-математических наук,
зав. лабораторией математической геофизики **П.С. Мартышко**;
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой геофизики
Пермского государственного национального исследовательского
университета, заслуженный работник высшей школы
Российской Федерации **В.И. Костицын**;
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор Томского государственного университета,
профессор Политехнического университета **В.К. Исаев**

Слепак З.М.

С47 Гравиразведка. Методика измерений и интерпретация гравитационного поля в нефтяной геологии / З.М. Слепак. – Казань: Издательство Казанского ун-та, 2022. – 176 с.

В монографии излагаются физико-геологические основы гравиметрического метода, рассматриваются его возможности при решении задач нефтяной геологии. Приводится разработанный автором метод геолого-геофизического моделирования, направленный на выявление нефтеносных структур по аномалиям Буге с одновременным созданием их плотностных 2D и 3D моделей. Приведены результаты изучения блокового строения кристаллического фундамента гравиметрическим методом. Рассмотрено взаимодействие Земли с Луной и перспективы ее геологического освоения в ближайшем будущем.

УДК 550.3:553.9
ББК 26.21:26.343.1

© Слепак З.М., 2022
© Издательство Казанского университета, 2022

KAZAN FEDERAL UNIVERSITY

Z.M. SLEPAK

GRAVITY PROSPECTING

**GRAVITY METHOD FOR GRAVITY MEASUREMENT
AND INTERPRETATION IN PETROLEUM GEOLOGY**



KAZAN

2022

UDC 550.3:553.9
LBC 26.21:26.343.1
S67

Reviewers:

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member
of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geophysics,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

P.S. Martyshko;

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of the Higher School
of the Russian Federation, Perm State National Research University

V.I. Kostitsyn;

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor
of Tomsk State University, Professor of the Polytechnic University

V.C. Isaev

Slepak Z.M.

**S67 Gravity prospecting. Gravity measurement and Interpretation in
Petroleum Geology / Z.M. Slepak. – Kazan: Publishing house of Kazan
university, 2022. – 176 p.**

The monograph outlines the physical and geological foundations of the gravimetric method, considers its capabilities in solving problems of petroleum geology. A method of geological and geophysical modeling developed by the author is presented, aimed at identifying oil-bearing structures by Bouguer anomalies with the simultaneous creation of their density 2D and 3D models. The results of studying the block structure of the crystalline basement by the gravimetric method are presented. The interaction of the Earth with the Moon and the prospects for its geological development in the near future are considered.

UDC 550.3:553.9
LBC 26.21:26.343.1

© Slepak Z.M., 2022
© Publishing house of Kazan University, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Об авторе.....	2
Введение	11
Глава 1. Методика полевых гравиметрических работ при прогнозировании нефтеносных структур и изучении блокового строения кристаллического фундамента.....	13
Глава 2. Геологическое строение Волго-Уральского региона.....	17
Глава 3. Методика изучения плотностных неоднородностей пород на участках нефтеносных структур.....	21
3.1. Изучение плотностей по лабораторным измерениям.....	21
3.2. Изучение плотностей пород по результатам ГИС	23
3.3. Определение плотностей по гравиметрическим измерениям	26
Глава 4. Плотностные неоднородности пород кристаллического фундамента по керну глубоких скважин на примере Южно-Татарского свода.....	29
Глава 5. Теоретические расчеты гравитационных аномалий, создаваемых нефтегазоносными структурами осадочного комплекса	32
5.1. Расчеты аномалий, создаваемых латеральным разуплотнением пород на участках локальных структур осадочного комплекса	33
5.2. Расчеты гравитационных аномалий, создаваемых плотностными границами на участках структур	36
Глава 6. Теоретические расчеты гравитационных аномалий, создаваемых изменчивостью плотностей пород кристаллического фундамента.....	40
Глава 7. Метод геолого-геофизического моделирования для выявления нефтеносных структур и изучения блокового строения кристаллического фундамента	46
Глава 8. Результаты выявления нефтеносных структур методом геолого-геофизического моделирования.....	51

Глава 9. Результаты прогнозирования нефтеносных пластов на длительно эксплуатируемых месторождениях.....	67
Глава 10. Комплексование гравиметрического и сейсмического методов при прогнозировании нефтеносных структур.....	75
Глава 11. Теоретические расчеты гравитационных аномалий, создаваемых блоковым строением кристаллического фундамента.....	83
Глава 12. Результаты изучения блокового строения кристаллического фундамента методом ГГМ.....	87
Глава 13. Развитие и внедрение новых нефтегазовых технологий в Казанском федеральном университете	96
Глава 14. Галактика Млечный Путь и модельные представления о строении Земли	99
Глава 15. Спутник Земли Луна и ее взаимодействие с нашей планетой	106
15.1. Происхождение и эволюция Луны	106
15.3. Атмосфера Луны.....	110
15.4. Внутреннее строение Луны	112
15.5. Полезные ископаемые на Луне.....	113
15.6. Стратегии научного и геологического освоения Луны	115
15.7. Перспективы геологического освоения Луны	117
Глава 16. Северный Ледовитый океан и Северный морской путь	122
16.1. Геологическое строение и рельеф дна Северного Ледовитого океана	124
Глава 17. Заключение и рекомендации по дальнейшему применению гравиметрического метода в нефтяной геологии	134
Приложения	138
Литература	158
Благодарности	175

ВВЕДЕНИЕ

Основным содержанием геофизических исследований является решение геологических задач.

Рассматриваются результаты геологической интерпретации, выполненной по данным высокоточных гравиметрических измерений на участках изученных и прогнозируемых структур, представленные в вариантах 2D и 3D.

Разработанный автором метод геолого-геофизического моделирования был применен на многих известных и прогнозируемых нефтеносных структурах Урало-Поволжья и в других регионах с иными особенностями геологического строения, показал высокую геологическую достоверность получаемых решений. Важное внимание уделяется гравиметрическому методу, который характеризуется большим преимуществом по сравнению с другими геофизическими методами, поскольку гравитационное поле зависит от изменчивости только одного физического параметра пород в земной коре – плотности. Это позволяет однозначно решать прямые задачи для любых сложных моделей геологической среды, независимо от числа отображающих ее параметров, что является недоступным при интерпретации геофизических данных другими геофизическими методами, уменьшает их возможности и геологическую достоверность получаемых решений.

В монографии излагаются теоретические и физико-геологические основы гравиметрического метода. Рассматриваются установленные особенности латеральной изменчивости плотностей на участках нефтеносных структур Волго-Уральского и других регионов. Приводятся результаты прогнозирования нефтеносных структур, проявляемых в гравитационном поле, основанные на установленном закономерно проявляемом в осадочном комплексе разуплотнения пород. Приводит-

ся разработанный автором метод геолого-геофизического моделирования (МГГМ), заключающийся в решении обратных задач по аномалиям Буге на количественном уровне с одновременным созданием плотностных 2D и 3D моделей структур. Рассматривается блоковое строение кристаллического фундамента и влияние на осадочный комплекс динамики его блокового строения.

Монография может использоваться как методическое пособие для геофизиков, геологов, нефтяников и проявляющих интерес к нефтяной геологии.

Глава 1

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР И ИЗУЧЕНИИ БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

Качество полевых работ имеет решающее значение в гравиразведке.

Поскольку гравитационное поле является естественным физическим полем Земли и в нем отражено суммарное гравитационное влияние всех аномальных масс земной коры, то выявление локальных изменений поля, создаваемых объектами поисков, неизбежно связано с достоверностью полевых измерений. При решении различных геологических задач является чрезвычайно важным соблюдение всех требований, предъявляемых к методике полевых гравиметрических работ. Немаловажно также обеспечение требований измерений гравиметрических и топографо-геодезических работ в полевой период, поскольку от них зависит результативность решения задач нефтяной геологии.

Существенные погрешности поля возникают во время обработки полевых данных и вычислении аномалий Буге. Они неизбежно связаны с введением поправок за «промежуточный слой» и за влияние земного рельефа. Эти поправки вычисляются с учетом стандартной постоянной плотности пород верхней части геологического разреза (ВЧР), которая может существенно от нее отличаться на различных площадях. Особенно значительные погрешности возникают на участках с резко изменяющимся рельефом земной поверхности. Для получения наиболее достоверных данных об аномалиях, создаваемых объектами прогнозирования, следует отдавать предпочтение участкам с относительно пологими формами земного рельефа.

Разработанный автором метод гравитационного моделирования (МГМ) направлен на решение двух задач нефтяной геологии: 1) прогнозирование потенциально нефтеносных структур в осадочном комплексе и 2) изучение блокового строения и структуры кристаллического фундамента.

К методике полевых измерений, обработке, интерпретации и представлению результатов, получаемых при решении каждой из этих задач, должны предъявляться различные требования.

Для эффективного применения метода ГГМ при изучении геологического строения нефтяных месторождений является необходимым учет априорной физико-геологической информации при проектировании полевых работ, применение оптимальной системы гравиметрических измерений, обеспечение требуемой точности измерений, ориентации профилей в крест простирания прогнозируемых объектов с целью выявления наиболее интенсивного их проявления в гравитационном поле.

Успешное применение метода ГГМ при прогнозировании нефтеносных структур в значительной степени зависит от качества полевых работ. Поскольку потенциально нефтеносные структуры в осадочных комплексах платформенных областей характеризуются пологими формами, излишняя густота сети измерений, к которой часто прибегают на практике, не несет необходимой информации и приводит к дополнительным затратам. Поэтому густота сети пунктов гравиметрических измерений в зависимости от размеров структур и особенностей их возможного отображения в гравитационном поле (по геологическим данным и результатам решения прямых задач) должна позволять осуществлять надежное их прогнозирование.

Для изучения геологического строения и прогнозирования нефтеносных структур является необходимым проведение высокоточных гравиметрических измерений. При их выполне-

нии целесообразно применять современные гравиметры типа Scintrex, использование которых повышает качество работ и значительно ускоряет процесс измерений, одновременно уменьшая экономические затраты.

При изучении блокового строения и структуры кристаллического фундамента к методике полевых измерений должны предъявляться менее строгие требования. Поскольку аномальные массы фундамента находятся на глубинах, измеряемых единицами и первыми десятками километров, создаваемые ими изменения гравитационного поля достигают первых десятков мГал. Для их выявления гравиметрические измерения должны проводиться вдоль профилей, протяженность которых может составлять сотни километров. Простирание профилей должно быть близким к прямолинейным, что на практике из-за наличия речной системы, лесных массивов, болот, населенных пунктов и др. часто бывает практически невозможным. При протяженности профилей порядка десятков километров целесообразно проведение гравиметрических измерений с расстоянием между пунктами 1–2 км. Погрешность гравиметрических наблюдений вдоль профилей порядка ± 0.1 мГала является удовлетворительной.

При проведении измерений гравиметрами типа Scintrex может применяться оперативная методика однократных наблюдений относительно одного-двух исходных пунктов. Для измерений также могут использоваться гравиметры типа ГАК, требующие создания опорной сети и более трудоемкой методики наблюдений. Для определения высот и плановой привязки гравиметрических пунктов к местности могут применяться техническое нивелирование и GPS.

На начальном этапе решения задач нефтяной геологии могут быть использованы ранее построенные по данным предшествовавших гравиметрических съемок карты аномалий Буге

масштабов 1:50 000 – 1:100 000. По ним могут быть определены значения поля вдоль проектируемых региональных профилей. Решение обратных задач методом ГГМ по таким профилям позволяет создавать физико-геологические интерпретационные модели и схематические глубинные разрезы, содержащие информацию о блоковом строении кристаллического фундамента и зон разломов, отражающихся в осадочном комплексе, с которыми могут быть связаны нефтеносные структуры.

Результаты геологической интерпретации аномального гравитационного поля вдоль региональных профилей должны быть использованы при выборе площадей для последующего проведения детальных профильно-площадных высокоточных гравиметрических работ, направленных на изучение геологического строения нефтяных месторождений и прогнозирования скоплений углеводородов. Эти результаты также должны представлять несомненный интерес для изучения динамики поступления углеводородов из его глубин в вышележащий осадочный комплекс и прогнозирования возможного их скопления в самом фундаменте [29, 30].

Для выбора мест заложения глубоких скважин с целью выявления возможных скоплений углеводородов в самом кристаллическом фундаменте целесообразно проводить совместные высокоточные гравиметрические и сейсмические измерения с совмещением пунктов обоими методами. Обработка данных полевых измерений создаст возможности для построения сейсмо-гравиметрических 2D и 3D моделей, использование которых будет способствовать повышению надежности выбора участков для постановки бурения.

Глава 2

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВОЛГО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Волго-Уральский регион, находящийся в восточной части Русской плиты, является основным объектом исследований. Осадочные отложения здесь принято разделять на четыре литолого-фациальных комплекса: верхний терригенный (ВТК), сульфатно-карбонатный (СКК), нижний терригенный (НТК) и маломощный средний терригенный комплекс (СТК). Отложения представлены преимущественно карбонатными породами. СКК занимает более 80 % всей его мощности. В направлении на восток, в сторону Предуральского прогиба, комплекс испытывает интенсивное погружение (особенно во впадинах), увеличивается мощность ВТК, и изменяется соотношение терригенных и карбонатных пород в геологическом разрезе, что отражается на плотностных особенностях пород и локальных структурных формах, с которыми связаны нефтяные месторождения.

На схематической региональной геологической модели осадочного комплекса (рис. 1) отображены литолого-фациальные комплексы: ВТК – между границами I и II; СКК – между границами II и IV; СТК – граница III; НТК (между границами IV и V) – поверхности кристаллического фундамента. В различных частях региона могут значительно изменяться мощности комплексов и их плотностные особенности.

В зависимости от соотношения структурных планов по различным горизонтам геологического разреза в пределах Волго-Уральского региона выделяют различные типы платформенных структур. Среди них сквозные (в их числе усиливающиеся и выполаживающиеся с глубиной), погребенные (выявленные

по нижним и отсутствующие в верхних горизонтах), дисгармоничные (с резким несоответствием в строении разных горизонтов). Для них характерны округлые, овальные, удлиненные формы в плане, различающиеся симметричным и асимметричным строением, а также расположенные на участках линейных дислокаций [91].

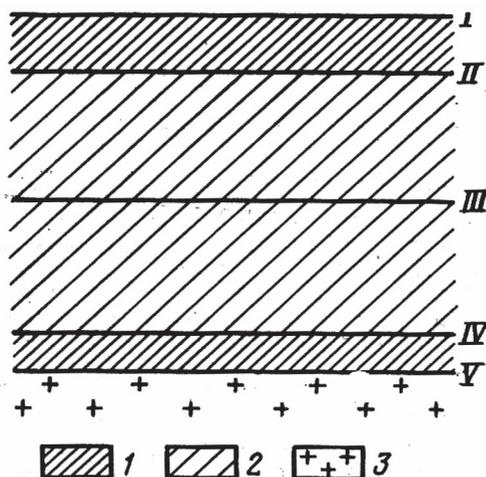


Рис. 1. Схематическая геологическая модель осадочного комплекса центральной части Волго-Уральского региона

Поверхности: I – земная, II – сульфатно-карбонатного комплекса,
 III – кровля и подошва среднего терригенного комплекса,
 IV – нижнего терригенного комплекса, V – кристаллического фундамента;
 породы: 1 – терригенные, 2 – карбонатные,
 3 – кристаллического фундамента

На востоке Русской плиты (Тимано-Печорская и Волго-Уральская нефтегазоносные провинции) из более 2 000 выявленных локальных структур (куполов и брахиантиклиналей) 54 % составляют «мелкие» (площадь менее 20 км²), 30 % – «средние» (площадью от 20 до 70 км² и 16 % – «крупные» (пло-

щадью до 200 км² и более), которые сопоставимы по размерам со структурами II порядка.

Особая роль в формировании локальных структур Л.Н. Розановым отводится дислокациям типа флексур над разломами кристаллического фундамента. К крыльям подобных флексур бывают приурочены наиболее крупные локальные поднятия, характеризующиеся резко асимметричным строением. Они часто группируются вдоль разломов, образуя валы и валоподобные зоны поднятий [38].

Разломно-блоковое строение земной коры признается многими геологами и геофизиками. Существование глубинных разломов, вертикальных и наклонных разрывных нарушений установлено на основании многочисленных геофизических исследований. Образование структур различными исследователями трактуется по-разному: связывается только с вертикальными движениями блоков кристаллического фундамента, только с горизонтальными движениями или теми и другими одновременно.

Ряд исследователей отрицают ведущую роль вертикальных движений в формировании антиклинальных структур и считают, что горизонтальными движениями земной коры можно объяснить все важнейшие геологические процессы и явления, происходящие в земной коре. По В.Е. Хаину, вертикальные движения земной коры могут сочетаться с горизонтальными.

При изучении происхождения и развития локальных структур осадочного комплекса особое внимание уделяется грабенообразным прогибам и депрессиям.

Таким образом, можно считать, что возникновение и развитие перспективных на нефть и газ локальных структур происходило на фоне волнообразно-колебательных движений зем-

ной коры под воздействием подвижек блоков кристаллического фундамента в условиях периодически сменяющихся горизонтального растяжения и сжатия осадочного комплекса. Очевидно, что в зависимости от геологической обстановки преобладающее влияние на возникновение и развитие структур могли оказывать либо вертикальные, либо горизонтальные движения, проявляемые с различной интенсивностью в различных структурных этажах.

Глава 3

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОРОД НА УЧАСТКАХ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР

Результативность гравиметрического метода при прогнозировании структур во многом зависит от наличия априорной информации о плотностных особенностях пород, являющейся физико-геологической основой интерпретации аномального гравитационного поля. Выработка модельных представлений об объектах поисков и данные об изменчивости плотностей в их пределах позволяют решать прямые задачи и создавать эффективные методы решения обратных задач. Поскольку обратные задачи гравиметрического, как и других геофизических методов, не имеют однозначного решения, то только при наличии достаточной априорной информации о плотностных неоднородностях изучаемых геологических объектов и вмещающих сред можно рассчитывать на успех.

Для получения наиболее достоверных данных о плотностных особенностях пород Волго-Уральского региона на участках нефтеносных структур автором проводилось изучение плотностей по лабораторным измерениям, диаграммам ГИС и гравиметрическим наблюдениям на неровном земном рельефе.

3.1. Изучение плотностей по лабораторным измерениям

Для установления особенностей изменчивости плотностей пород в пределах структур изучение плотностей пород нами проводилось по большому количеству керна, промыслово-геофизическим данным и гравиметрическим наблюдениям на участках неровного земного рельефа.

Как известно, основным методом определения плотностей является лабораторный метод гидростатического взвешивания образцов пород на аналитических весах и денситометрический способ, позволяющий проводить измерения с требуемой погрешностью, не превышающей $\pm 0,01 - \pm 0,02 \text{ г/см}^3$ [38, 39].

Метод характеризуется рядом существенных недостатков. Основным из них является то, что керн в процессе бурения скважин отбирается лишь из отдельных маломощных, преимущественно нефтеносных горизонтов. Большая же часть разреза практически остается неизученной, поскольку стометровые толщи отложений бывают охарактеризованы измерениями лишь по одиночным образцам. Помимо этого, определяемые по керну значения плотностей оказываются несколько завышенными, так как в процессе бурения наиболее слабые породы часто разрушаются. Поэтому используемые на практике данные о средних значениях плотностей отдельных горизонтов и разреза в целом содержат лишь приближенные сведения о плотностных особенностях изучаемых отложений.

С целью получения достоверных данных об изменчивости плотностей пород в пределах осадочного комплекса образцы керна нами отбирались из значительных по мощности горизонтов осадочного чехла, охарактеризованных большим процентом выноса керна. Был установлен оптимальный интервал отбора керна вдоль разрезов скважин, который составил 1–2 м. При таком интервале была достигнута погрешность измерений средних значений плотностей изучаемых горизонтов, близкая к погрешности единичного наблюдения на денситометре, и отпала необходимость вычислений средневзвешенных значений параметра. Выполнено более 6 тысяч измерений плотностей по образцам керна, отобранного из отдельных горизонтов через оптимальный интервал, что позволило получить наиболее объективные данные об изменчивости плотностей пород осадочного комплекса [72, 73].

3.2. Изучение плотностей пород по результатам ГИС

С целью изучения плотностных неоднородностей пород сульфатно-карбонатного комплекса осадочного чехла (СКК), составляющего более 80 % его мощности, применялся разработанный автором способ определений параметра по величинам коэффициента общей пористости K_{Π} , определяемым по диаграммам НГК и ГК.

Сопоставление средних значений коэффициентов общей пористости, определенных в одноименных пластах по 350 образцам керна и диаграммам НГК ряда скважин, показало, что их расхождения не превышают 2 %. Это явилось обоснованием для обработки диаграмм с целью изучения плотностных неоднородностей карбонатных отложений осадочного комплекса.

Методика определения значений коэффициента общей пористости K_{Π} по диаграммам НГК и последующий их перевод в величины плотностей влажных пород $\sigma_{\text{вл}}$ (соответствующих естественным условиям залегания) заключается в следующем. Значения K_{Π} определяются по стандартной методике с использованием двух пластов, характеризующихся наименьшими значениями K_{Π} , и учетом глинистости по ГК. Величины коэффициента общей пористости определяются по каротажным диаграммам через интервал 1 м и вычисляются их средние значения в 5-ти метровых интервалах, установленных опытным путем для наилучшего отображения изменчивости параметра. Полученные значения представляются в виде точечных диаграмм вдоль разрезов скважин. По ним выделяются пласты с аномальными изменениями параметра, вычисляются характеризующие их средние величины и средневзвешенные по мощностям значения параметра для изучаемых скважин. Это позволяет извлекать новую достаточно достоверную информацию о плотностных особенностях пород для значительных

по мощности интервалов геологического разреза, устанавливать закономерности изменчивости плотностей в латеральном направлении, на плотностных границах, с глубиной и использовать эти данные в процессе интерпретации аномального гравитационного поля.

По результатам обработки более 300 скважин было установлено, что метод позволяет по значениям K_{Π} получать достаточно достоверную информацию о латеральной изменчивости плотностей в пределах отдельных пластов и пачек пород, которые могут быть использованы при геологической интерпретации гравиметрических данных [72, 73, 76].

$$\Delta\sigma_{\text{вл}} = \Delta\bar{k}_{\Pi}(\delta - 1). \quad (1)$$

В этом выражении $\Delta\bar{k}_{\Pi}$ – разность средних значений коэффициента общей пористости между двумя пластами, определенная по НГК, в долях единицы; δ – значение минеральной плотности в г/см³, характерное для рассматриваемого пласта.

Из выражения (1) следует, что при изменении коэффициента общей пористости на 10 %, который для карбонатных пород часто близок к максимальному значению, и погрешности определения δ в $\pm 0,1 - \pm 0,2$ г/см³ погрешность вычисления $\Delta\sigma$ не превышает $\pm 0,02$ г/см³ и практически соответствует погрешности измерений плотностей по керну на денситометре.

Переход от средних величин K_{Π} , определяемых для изучаемого разреза в целом, к значениям $\sigma_{\text{вл}}$ осуществлялся с помощью выражения:

$$\sigma_{\text{вл}} = \bar{\delta} - \bar{k}_{\Pi}(\bar{\delta} - 1), \quad (2)$$

где $\bar{\delta}$ – среднее значение минеральной плотности, характерное для разреза, г/см³; \bar{k}_{Π} – среднее значение пористости в долях единицы.

Латеральное изменение плотностей пород с помощью выражения (1) определялось по средним значениям коэффициента общей пористости, полученным для отдельных пластов по НГК в различных скважинах, а латеральное изменение плотностей пород в пластах вычислялось по выражению (2).

Значения плотностей отдельных стратиграфических толщ, комплексов и разреза в целом определялись как средневзвешенные величины по их мощностям. Было установлено, что по значениям коэффициента общей пористости, определяемым по НГК и ГК, могут быть выделены пласты и пачки пород, различающиеся по геологическому возрасту, границам между которыми соответствуют довольно значительные (до 7–10 %) изменения параметра.

Примененная методика определения физических параметров пород по данным ГИС, в отличие от лабораторных измерений, практически характеризующих лишь маломощные нефтеносные пласты, позволила изучать плотностные неоднородности пород в значительных по мощности интервалах разреза, составляющих 200–600 и более метров, повышая их достоверность при одновременном снижении затрат на измерения по керну [77].

Полученные данные обработки НГК и ГК позволили получить новую важную информацию о латеральной изменчивости плотностей в пределах прогнозируемых нефтеносных структур, необходимую для оценки достоверности геологической интерпретации результатов высокоточных гравиметрических измерений.

3.3. Определение плотностей по гравиметрическим измерениям

Источником информации о плотностных особенностях ВЧР послужили результаты лабораторных измерений по образцам керна из скважин, образцам пород, отобранным с обнажений, и результаты гравиметрических измерений на участках неровного земного рельефа.

Поскольку при измерениях использовались наиболее плотные образцы (слабые в процессе бурения разрушаются), результаты лабораторных измерений позволили охарактеризовать среднее значение пород ВЧР величиной $2,14 \text{ г/см}^3$.

Известным способом определения плотностей пород, расположенных на участке измерений выше самой низкой точки земного рельефа, является способ профиля Неттльтона. Он заключается в проведении гравиметрических измерений вдоль прямолинейных профилей, пересекающих земной рельеф в виде оврагов или холмов, характеризующихся значительными амплитудами, в построении графиков аномалий Буге с произвольно выбираемыми значениями плотностей промежуточного слоя ($1.5, 1.6, 1.7 \dots 2.3, 2.4, 2.5 \text{ г/см}^3$) и качественном их анализе. Считается, что наиболее достоверные значения плотностей изучаемого массива пород демонстрируются графиками аномалий Буге, в наименьшей степени отображающимися формами земного рельефа. Способ профиля и другие известные способы определения плотностей пород по гравиметрическим измерениям и значениям аномалий Буге, снимаемым с гравиметрических карт, содержат большие погрешности. При их применении является необходимым введение поправок за влияние земного рельефа, достоверность которых зависит от достоверности плотностей изучаемых массивов пород, являющихся предметом решения задачи определений самих плотностей [69, 70].

Способ определения плотностей пород по гравиметрическим наблюдениям, разработанный автором, позволяет не учитывать влияния земного рельефа. Он отличается простотой и используется на участках земного рельефа типа гравитационной ступени. В природе часто встречается земной рельеф в виде двух близких к горизонтальным поверхностям (верхней и нижней), разделенных склоном (террасы, речные долины с крутым и пологим берегами и др.). Способ заключается в выполнении гравиметрических измерений и определении разности высот в двух точках, расположенных на верхней и нижней гранях «ступени». Это позволяет определять значение средней плотности массива пород, расположенного выше точки у его основания. В этих точках поправки за влияние земного рельефа являются практически одинаковыми. Поэтому необходимость их учета отпадает.

Плотность пород σ массива земного рельефа выше нижней точки измерений, определяется по разностям измеренных значений силы тяжести Δg и высот ΔH . Она вычисляется по простой формуле:

$$\sigma = 7,365 - 23,867 \frac{|\Delta g|}{\Delta H} \quad (3)$$

Способ отличается высокой производительностью, в несколько раз превышающей процесс измерений способом профиля Неттльтона.

Результаты проведенных гравиметрических измерений на различных участках позволили установить, что плотность варьирует в пределах от 2.03 до 2.20 г/см³. Поэтому ее средняя величина при введении поправки «за промежуточный слой» была принята равной 2.10 г/см³. Построение автором гравиметрических карт аномалий в редукции Буге с таким значением плотности позволило исключить погрешности, возникающие

при введении поправок за промежуточный слой со стандартными плотностями 2.3 и 2.67 г/см³, принимаемыми при их построении согласно инструкции. При этом, как оказалось, погрешности в пунктах измерений, расположенных на холмах и в прогибах земного рельефа, достигали 1-го мГала и более. Такие пункты при плотности 2.3 г/см³ ошибочно относились к «браку» и исключались при построении карт. Построение карт со значением плотности промежуточного слоя 2.1 г/см³ позволило избавиться от брака и способствовало повышению достоверности геологической интерпретации аномального гравитационного поля при решении задач нефтяной геологии [72, 73, 76, 77].

Глава 4

ПЛОТНОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОРОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА ПО КЕРНУ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН НА ПРИМЕРЕ ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА

Для изучения плотностей пород кристаллического фундамента обычно проводились измерения по керну из скважин, пробуренных из его коры выветривания до глубины 5–10 метров, что является явно недостаточным. Нами использованы образцы пород из глубоких скважин, пробуренных до глубин в сотни и первые тысячи метров, исключая породы коры выветривания. Из таких скважин были выполнены измерения по 637 образцам керна, что позволило получить новые достаточно объективные данные о средних величинах плотностей пород отдельных блоков и кристаллического фундамента в целом [81, 84].

В изучаемом регионе он представлен преимущественно архейскими образованиями, перекрытыми на отдельных площадях раннепротерозойскими вулканогенно-осадочными толщами.

Образцы керна из глубоких скважин были подразделены на три типа: основного, кислого состава и высокоглиноземистые [13, 34, 35]. С некоторыми допущениями было установлено [43], что, как и в пределах осадочного комплекса, в одних случаях плотность пород с глубиной может испытывать тенденцию к возрастанию, убыванию или изменяться более сложным образом.

Результаты измерений позволили определить средневзвешенные по количеству образцов выделенных типов, которые, соответственно, составили 2.86, 2.71 и 2.76 г/см³.

Было установлено, что наибольшей средневзвешенной плотностью (2.86 г/см³) характеризуются породы основного состава, наименьшей – породы кислого состава (2.71 г/см³). Ниж-

ний предел величин плотностей у пород всех типов составляет 2.63–2.67 г/см³.

Восемьдесят процентов всего количества измеренных образцов характеризуется величиной плотностей от 2.62 до 2.87 г/см³.

Сравнительный анализ средневзвешенных значений плотностей пород кристаллического фундамента по Приказанской, Тлянчи-Тамакской, Ульяновской и Сулинской площадям, значительно удаленным друг от друга, свидетельствует, что их величины изменяются в относительно небольших пределах: от 2.74 до 2.77 г/см³.

Величина средневзвешенной по числу образцов плотности, определенной по всем скважинам, составила 2.74 г/см³ и была принята за значение средней плотности пород кристаллического фундамента при изучении его блокового строения [84].

Установлено, что значения плотностей, средневзвешенные по числу образцов пород отдельных блоков фундамента, различаются лишь на сотые доли г/см³. Эта новая важная информация, впервые полученная по глубоким скважинам, была использована для решения задачи изучения его блокового строения методом гравитационного моделирования и прогнозирования возможного скопления углеводородов в самом фундаменте [30, 40].

Анализ изменчивости плотностей пород кристаллического фундамента по построенным диаграммам вдоль изученных скважин показал, что какой-либо четкой зависимости изменчивости плотностей с глубиной в его пределах так же, как и в осадочном комплексе, не наблюдается [42].

Анализ диаграмм изменчивости плотностей пород, несмотря на довольно редкие интервалы отбора образцов керна, позволил определить довольно значительные особенности их изменений в отдельных интервалах рассмотренных скважин с глубиной.

Эта новая важная информация об особенностях изменчивости плотностей пород в пределах кристаллического фундамента, впервые полученная по глубоким скважинам, была использована для решения задачи об его блоковом строении методом гравитационного моделирования и прогнозирования возможного скопления в нем углеводородов [30].

Полученные данные позволяют констатировать, что латеральная изменчивость плотностей в пределах кристаллического фундамента проявляется в его блоковой структуре, разуплотнении и уплотнении пород внутри блоков и разделяющих зонах разломов. Различия средних значений плотностей, определенных по керну глубоких скважин для отдельных блоков фундамента, составляют сотые доли г/см³.

Закономерного возрастания плотностей пород с глубиной в осадочных толщах и в кристаллическом фундаменте не наблюдается: плотности могут возрастать, уменьшаться, сохранять относительное постоянство или изменяться более сложным образом.

Так, проведенные измерения плотностей свидетельствуют о широкой их дифференциации в пределах кристаллического фундамента (консолидированной земной коре).

Результаты измерений позволяют считать установленным, что средневзвешенные по числу образцов керна значения плотностей пород отдельных блоков кристаллического фундамента, как и на участках нефтеносных структур, различаются лишь на сотые доли г/см³. Эта новая важная информация об особенностях изменчивости плотностей пород в пределах кристаллического фундамента, впервые полученная по глубоким скважинам, была использована для решения задачи изучения его блокового строения методом гравитационного моделирования и прогнозирования возможного скопления углеводородов [40, 44].

Глава 5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫМИ СТРУКТУРАМИ ОСАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА

Поскольку при прогнозировании нефтяных месторождений ведущую роль играют локальные структурные формы, для определения их гравитационного влияния, создаваемого латеральной изменчивостью плотностей, плотностными границами и нефтегазовыми залежами в их пределах, нами рассматриваются их возможные гравитационные влияния путем решений прямых задач. Это позволит определить их суммарное гравитационное влияние, поисковые признаки структур в аномальном гравитационном поле и разработать эффективные технологии решения обратных задач.

На основе установленного закономерного латерального разуплотнения плотностей в пределах нефтеносных структур в осадочном комплексе проведены теоретические расчеты создаваемого им гравитационного влияния в двухмерном варианте. Зоны латеральной изменчивости плотностей аппроксимировались системой прямоугольных призм, верхние и нижние грани которых соответствовали кровле и подошве СКК. Параллельность боковых граней призм отображала наблюдающееся в геологическом разрезе латеральное изменение плотностей пород на участках сквозных структур, а дискретные значения плотностей в призмах, сравнительно плавно уменьшающиеся от центра к периферии зон, – характер самой латеральной изменчивости. В объемном варианте модели зон аппроксимированы системой прямоугольных параллелепипедов.

Для упрощения расчетов зоны аппроксимированы призмами равной величины, различающимися по плотности

от -0.05 в центре до $-0,01$ г/см³ в их периферийных частях. Минимальные значения плотностей, соответствующие центральным частям моделей (структур), выбирались в соответствии с фактически наблюдаемыми данными (гл. 3). При расчетах предполагалось, что размеры моделей по горизонтали примерно в 1,5–2,0 раза меньше поперечных размеров структур, поскольку разуплотнение плотностей наблюдается преимущественно в их сводовых и присводовых частях.

5.1. Расчеты аномалий, создаваемых латеральным разуплотнением пород на участках локальных структур осадочного комплекса

Выполнены расчеты аномалий для трех моделей структур двухмерного простираения, отображающих латеральное разуплотнение пород в осадочном чехле от поверхности СКК до его подошвы. Ширина моделей зон разуплотнения, в зависимости от реально наблюдаемых размеров структур, принята равной 0,8, 2,0, и 5,0 км, а латерального изменения плотностей, согласно априорным данным, – от -0.01 до -0.05 г/см³. Верхняя кромка зон принята равной средней глубине ВТК 0,3 км, а их глубина (нижняя кромка СКК) рассмотрена в восьми вариантах: 1,2, 2,0, 2,5, 3,0, 4,0, 6,0, 8,0 и 10,0 км (рис. 2).

Для моделей с шириной зоны 2,0 км с уменьшением плотности на 0,05 г/см³ в центральной части, как и следовало ожидать, при увеличении их мощностей с глубиной отмечается возрастание интенсивности аномалий (локальных минимумов). Одновременно отмечается, что характер локальных аномалий при увеличении глубин нижней кромки зон остается практически неизменным.

Поскольку краевые части рассчитанных кривых для глубин 3,0 км становятся горизонтальными, то они, несомненно, могут

быть отнесены к фоновой части поля при сохранении неизменной формы локальных минимумов. Это позволяет ограничить гравитационное влияние зон разуплотнения глубиной в 2.0 км, поскольку при дальнейшем увеличении их глубин гравитационное влияние отражается лишь на фоновой составляющей поля. Для зоны шириной в 2.0 км локальная аномалия интенсивностью в 1.0 мГал, соответствующая зоне глубиной в 2.0 км (кривая 2), практически повторяет локальную аномалию интенсивностью в 2.0 мГала, соответствующую зоне глубиной в 8.0 км (кривая 7).

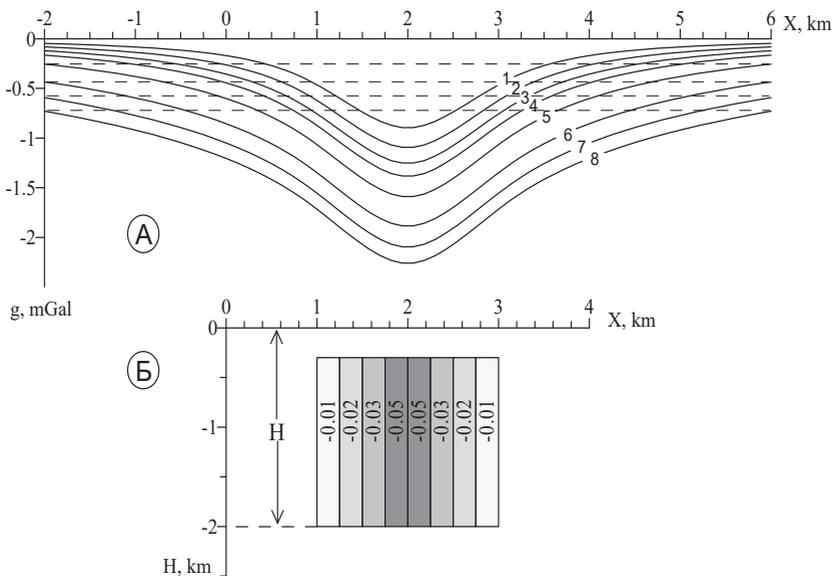


Рис. 2. Теоретические кривые гравитационных аномалий над моделями зон разуплотнения пород на участках нефтеносных структур осадочного комплекса:

А – кривые аномалий гравитационного поля при различных глубинах зон разуплотнения: 1 – 1,5; 2 – 2,0; 3 – 2,5; 4 – 3,0; 5 – 4,0; 6 – 6,0; 7 – 8,0 и 8 – 10,0 км. Б – модель зон латеральной изменчивости плотностей; Н – глубины зон разуплотнения

Результаты модельных вычислений (рис. 2) позволяют считать, что гравитационное влияние зон разуплотнения на глубине более 2.0 км сливается с фоновой составляющей поля, и в локальном поле они практически не отображаются. Для моделей зон шириной 0.8 и 4.0 км при увеличении глубин их нижних границ отмечается аналогичный характер изменчивости аномалий, и их «глубинность» также может считаться не превышающей 2 км [41]. Гравитационное влияние зон разуплотнения пород для наиболее типичных структур изучаемого региона интенсивность локальных аномалий, создаваемых зонами разуплотнения пород, простирающихся до глубин 1.5–2.5 км, может составлять 1.0–2.0 мГал, что практически соответствует мощности осадочного комплекса и самой верхней части кристаллического основания.

Выделение гравитационного влияния более глубоких частей зон является достаточно проблематичным. Оно может оказаться успешным лишь при большей ширине зон и возрастании величин разуплотнения пород, что не согласуется с реальными данными.

Оценка возможного гравитационного влияния зон разуплотнения пород на участках локальных структур в трехмерном варианте показала, что интенсивность и размеры создаваемых ими локальных аномалий уменьшаются. Поэтому достоверность их выделения по картам аномалий Буге и трансформированным по ним картам содержат значительные погрешности [39].

Теоретические аномалии, представленные на рисунке 2, подобны аномалиям над исследованными нами многими реальными структурами. Это позволяет считать, что наблюдаемые на практике локальные аномалии обусловлены латеральной изменчивостью плотностей в осадочном комплексе и могут служить поисковым признаком нефтеносных структур.

5.2. Расчеты гравитационных аномалий, создаваемых плотностными границами на участках структур

Как отмечалось (гл. 2), на территории Волго-Уральского региона прослеживаются верхний терригенный (ВТК), сульфатно-карбонатный (СТК) и нижний терригенный (НТК) комплексы.

Согласно данным проведенных нами лабораторных измерений (гл. 4, 5), можно считать, что средние значения избытка плотности на границе между ВТК и СКК составляют $0,23 \text{ г/см}^3$, между СКК и НТК – $0,08 \text{ г/см}^3$, между подошвой НТК и поверхностью кристаллического фундамента – $0,18 \text{ г/см}^3$. Помимо этого, внутри рассматриваемых комплексов выделяют ряд других поверхностей раздела, находящихся на различных глубинах, с небольшими аномальными величинами плотностей.

Результаты проведенных исследований показали, что в ряде случаев аномальные значения плотностей на границах могут значительно отличаться от принимаемых на практике средних величин. Гравитационное влияние даже наиболее близко расположенной к земной поверхности границы между ВТК и СКК может быть скомпенсировано влиянием нижележащих границ с дефицитом плотностей, а в отдельных случаях она может отсутствовать вовсе из-за ее частого размыва.

Приводимые ниже теоретические расчеты следует относить лишь к идеализированным границам, сохраняющим постоянно аномальных значений плотностей на всем их протяжении.

Для изучения возможных особенностей гравитационных аномалий, создаваемых плотностными границами на участках нефтеносных структур в исследуемом регионе, проведено решение прямых задач на некоторых модельных примерах. Расчеты выполнены для моделей типовых асимметричных локальных поднятий в виде треугольных призм двухмерного простирания,

аппроксимированных набором равных по ширине прямоугольных призм, нижняя грань которых являлась горизонтальной, совпадающей с основанием моделей, а вершина треугольника соответствовала амплитуде поднятий. Рассмотрены модели поднятий размерами 2.0–4.0 км, состоящих из набора равных по ширине 0.1 км призм, что позволяло получать достаточно достоверные решения. Аномальные плотности на границах принимались в соответствии с априорными данными. Глубины плотностных границ на рассматриваемых моделях приняты в соответствии с реальным геологическим разрезом изучаемого региона (гл. 3, рис. 1), а значения аномальных плотностей на границах приняты соответствующими средним значениям, определенным по лабораторным данным. Мощность ВТК принята соответствующей реально наблюдаемой в регионе.

Теоретические расчеты гравитационных аномалий, создаваемых влиянием плотностных границ на участках структур, приведены на рисунке 3.

Из анализа проведенных вычислений следует, что суммарное гравитационное влияние всех плотностных границ в зависимости от амплитуд поднятий могут составлять 0.5–2.0 мГал, а влияние первой плотностной границы (поверхности СКК) лишь незначительно отличается от влияния, создаваемого всеми границами.

Влияние нижерасположенных границ, в силу их значительного удаления от земной поверхности и различающихся по знаку аномальных плотностей, невелико и может взаимно компенсироваться и сливаться с фоновой составляющей поля.

При наличии латерального разуплотнения пород на участках структур гравитационное влияние плотностных границ также должно уменьшаться, а создаваемые ими аномалии, независимо от амплитуд поднятий, должны сливаться с фоновой составляющей поля.

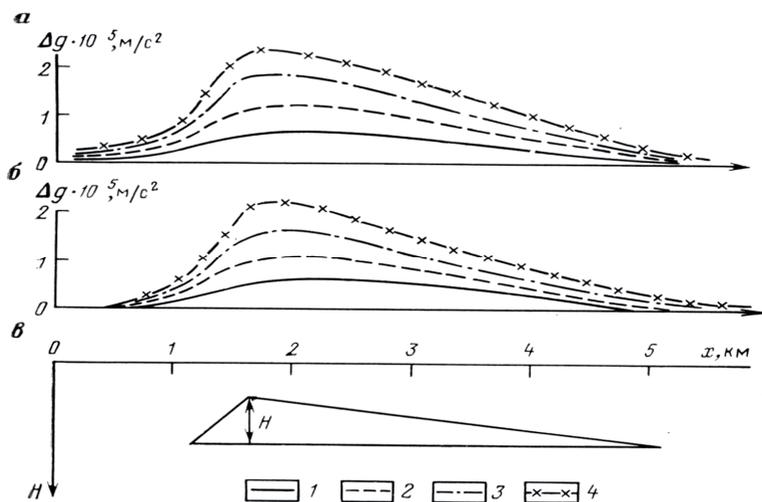


Рис. 3. Теоретические кривые гравитационных аномалий, создаваемых влиянием плотностных моделей структур с амплитудами 50, 100, 150, и 200 м:

- а – суммарное гравитационное влияние всех плотностных границ;
 б – гравитационное влияние первой плотностной границы;
 в – контур моделей структур при амплитудах:
 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200 м.

Это свидетельствует о том, что гравитационное влияние глубоко залегающих границ чрезвычайно мало и прогнозирование даже высокоамплитудных поднятий, обоснованное выявлением суммарного влияния плотностных границ, является проблематичным.

В соответствии с рисунком 3, основное гравитационное влияние над структурами создается первой плотностной границей – поверхностью сульфатно-карбонатного комплекса (СКК) – и может приближаться к 100% от суммарного влияния всех границ. Влияние границ, расположенных ниже поверхности СКК, характеризующихся знакопеременными аномальными плотностями, вследствие значительной глубины их залега-

ния и взаимно компенсирующихся эффектов должно сливаться с фоновой составляющей гравитационного поля. Отсюда становится очевидным, что положительные локальные аномалии над структурами даже при постоянных аномальных плотностях на границах, независимо от амплитуд поднятий, могут быть обусловлены гравитационным влиянием лишь первой плотностной границы – поверхности СКК. В реальных геологических условиях при наличии изменчивости аномальной плотности на границах, создаваемое ими гравитационное влияние может существенно уменьшаться или при часто наблюдаемом размыве первой плотностной границы – отсутствовать полностью.

Судя по рассмотренным моделям структур, гравитационное влияние, создаваемое поверхностью СКК, может быть выделено при ее погружении до глубин 1,0–1,2 км [69, 70].

Прогнозирование структур путем выявления гравитационного влияния, создаваемого плотностными границами, может быть сведено лишь к выявлению влияния поверхности СКК, которая часто бывает размывтой. Поэтому изучение геологического строения нефтяных месторождений по выявлению гравитационного влияния, создаваемого плотностными границами в изучаемом регионе, является проблематичным.

Глава 6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ ПЛОТНОСТЕЙ ПОРОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

Проведение теоретических расчетов с целью выяснения возможного характера аномалий, создаваемых плотностными неоднородностями консолидированной земной коры, – задача чрезвычайно сложная. Это связано с тем, что породы в ее пределах отличаются большим разнообразием по петрографическим, плотностным и другим физическим свойствам, а формы и размеры аномальных масс, расположенных на различных глубинах, неопределенны.

Верхнюю часть кристаллического фундамента Русской плиты принято характеризовать блоковым строением. Ширина отдельных блоков, судя по данным бурения, может составлять десятки километров [29, 30].

Об особенностях блокового строения более глубоких частей фундамента сведения отсутствуют. Поэтому простираение блоков на значительные глубины может рассматриваться лишь с определенной степенью достоверности.

Петрографические особенности и физические свойства пород фундамента принято изучать по керну, поднимаемому в процессе бурения лишь из самой его верхней (5–15 м) части. Но и в этом незначительном по мощности интервале во многих скважинах одновременно вскрываются метаморфические, интрузивные и эффузивные породы различного состава, значительно измененные метасоматическими процессами. Нередки случаи, когда породы кислого состава могут характеризоваться относительно повышенной плотностью по сравнению с более плотными основными породами, и, наоборот, основные породы

могут характеризоваться пониженными значениями параметра. Это затрудняет задачу изучения аномальных масс и делает ее практически невыполнимой из-за отсутствия данных о более глубоких частях фундамента. Результаты измерений плотностей пород кристаллического фундамента РТ по керну глубоких скважин, прошедших по фундаменту на глубины до первых километров, позволили нам установить, что различия средних значений параметра, характеризующих отдельные блоки, составляют сотые доли г/см^3 .

На основе этих и геологических данных выполнены теоретические расчеты аномального гравитационного поля по схематизированным плотностным моделям вдоль региональных профилей, пересекающих в крест простирания блоки фундамента Южно-Татарского свода.

Модели построены с целью определения возможной интенсивности и характера гравитационных аномалий, создаваемых изменчивостью масс в земной коре. Качественная интерпретация моделей также позволила определить «глубинность» метода и оценивать достоверность решений обратных задач при сопоставлении с результатами высокоточных гравиметрических измерений на участках объектов поисков [44].

Расчеты выполнены для определения возможного гравитационного влияния, создаваемого блоками различной мощности по вертикали путем увеличения глубин их нижних кромок (подшвы) при постоянной близкой к реальной глубине поверхности блоков в изучаемом регионе.

На модели с постоянными значениями аномальных плотностей ширина блоков принята равной 20 км (рис. 4).

Анализ графиков аномалий вдоль профиля свидетельствует о том, что локальные изменения поля, создаваемые массами в интервалах глубин от 20 до 40 км, практически мало отличаются по форме друг от друга. Изменяется лишь их фоновая

составляющая. Отсюда появляется возможность приближенно оценивать относительную глубинность гравиметрического метода в изучаемом регионе: она, вероятно, составляет 15.0–20.0 км. Влияние локальных масс пород, расположенных на больших глубинах, должно сказываться лишь на фоновой составляющей поля.

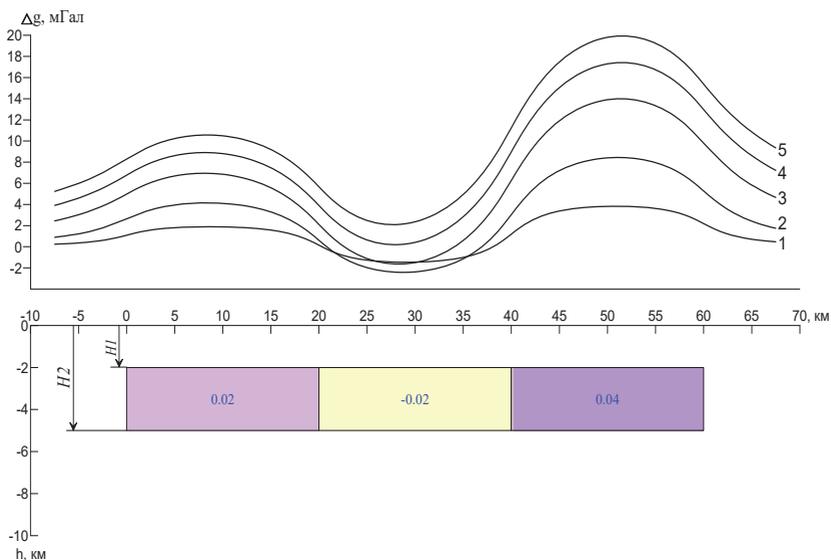


Рис. 4. Теоретические кривые гравитационных аномалий, создаваемых породами кристаллического фундамента при различных глубинах нижних границ блоков модели.
(№№ графиков при глубинах: 1 – 5.0; 2 – 10.0; 3 – 20.0; 4 – 30.0; 5 – 40.0 км кривые 1 – 5, соответственно)

Выполненные расчеты позволили приближенно оценить интенсивность и характер гравитационных аномалий, создаваемых блоковой структурой кристаллического фундамента при средних величинах плотностей каждого из них, определенных по керну глубоких скважин. Можно предположить, что изменчивость плотностей пород внутри отдельных блоков фундамен-

та не должна вносить значительных изменений в гравитационное поле, создаваемое блоками в целом, и их влияние может отражаться лишь в его фоновой составляющей.

Анализ графиков аномалий вдоль профиля свидетельствует о том, что локальные изменения поля, создаваемые массами в интервалах глубин от 20 до 40 км, практически мало различаются по форме друг от друга. Изменяется лишь их фоновая составляющая.

Аналогичная картина наблюдается и при переменной латеральной изменчивости плотностей внутри блоков (рис. 5). Здесь прослеживается относительное изменение поля в 5–7 мГал при глубине нижней границы блоков 5 км, близкое по интенсивности к его изменениям на рис. 5, а при глубине 40 км изменения интенсивности составляют 4–19 мГал.

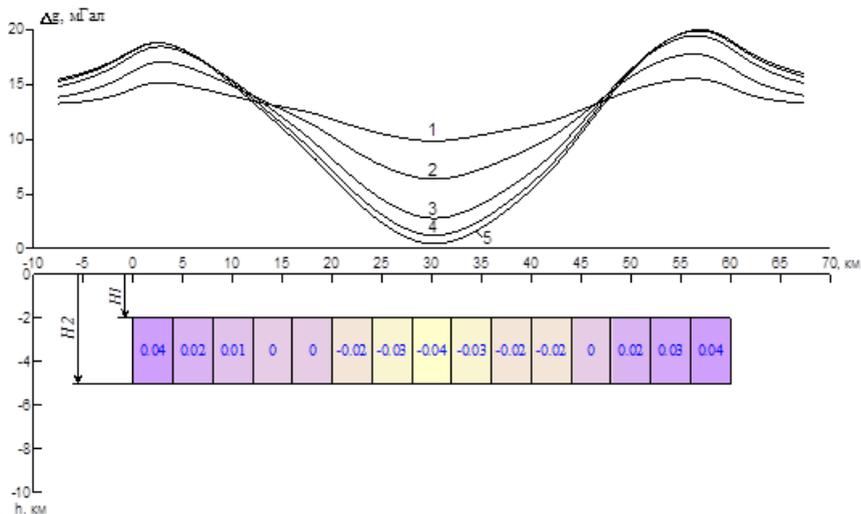


Рис. 5. Теоретические кривые гравитационных аномалий, создаваемых породами кристаллического фундамента при различных глубинах нижних границ блоков модели:
1 – 5.0; 2 – 10.0; 3 – 20.0; 4 – 30.0; 5 – 40.0 км

Анализ графиков аномалий вдоль профилей также свидетельствует о том, что локальные изменения поля, создаваемые массами в интервалах глубин от 20 до 40 км, практически мало различаются по форме друг от друга. Изменяется лишь их фоновая составляющая.

Что же касается фактически наблюдаемой интенсивности гравитационных аномалий на рассматриваемой территории и относительных их изменений вдоль региональных профилей, то они практически соответствуют теоретически рассчитанным изменениям поля на модели (рис. 4, 5).

Аналогичная картина наблюдается и при переменной латеральной изменчивости плотностей внутри блоков (рис. 5). Здесь прослеживается относительное изменение поля в 5–7 мГал при глубине нижней границы блоков 5 км, близкое по интенсивности к его изменениям на рис. 5, а при глубине 40 км изменения интенсивности составляют 4–19 мГал.

Анализ графиков аномалий вдоль профилей также свидетельствует о том, что локальные изменения поля, создаваемые массами в интервалах глубин от 20 до 40 км, практически мало различаются по форме друг от друга. Изменяется лишь их фоновая составляющая.

Приведенные расчеты позволили приближённо оценить интенсивность и характер гравитационных аномалий, создаваемых блоковой структурой кристаллического фундамента при средних величинах плотностей каждого из них, определённых по керну глубоких скважин. Можно предположить, что в гравитационном поле, создаваемом блоками, их влияние может различаться лишь по его фоновой составляющей.

Фактически наблюдаемая интенсивность гравитационных аномалий на рассматриваемой территории и их изменения вдоль региональных профилей практически соответствуют те-

оретически рассчитанным изменениям поля, приведенным на рисунках 4 и 5.

Формы и размеры аномальных масс в более глубоких частях земной коры практически неизвестны. Проведение каких-либо расчетов может позволить получить лишь приближенные данные об их возможных вариантах решений, влияние которых может отобразиться лишь на фоновой составляющей гравитационного поля.

Интенсивность латеральной изменчивости плотностей, создаваемая блоковым строением кристаллического фундамента, на порядок превышает влияние ее изменения на участках нефтеносных структур. Расчёты возможного отображения блокового строения фундамента в гравитационном поле, основанные на данных о его плотностных неоднородностях, позволяют прийти к заключению, что латеральная изменчивость масс в земной коре, отображаемой в гравитационном поле, в основном создается блоковым строением фундамента.

Решения прямых задач, основанные на установленных плотностных неоднородностях пород на участках нефтеносных структур и блоковом строении кристаллического фундамента, позволили выявлять особенности их отображения в аномальном гравитационном поле и разработать эффективную методику решения обратных задач.

Глава 7

МЕТОД ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР И ИЗУЧЕНИЯ БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

Разработанный автором метод геолого-геофизического моделирования (ГГМ) основан на результатах изучения плотностных особенностей земной коры и решении прямых задач, нацелен на прогнозирование потенциально нефтеносных структур и изучение блокового строения кристаллического фундамента.

Метод ГГМ заключается в решении обратной линейной задачи гравиразведки [86, 87] и, исключая применение используемых на практике трансформаций поля, позволяет непосредственно по аномалиям Буге одновременно с подбором полей создавать физико-геологические интерпретационные модели геологических сред и оценивать их геологическую достоверность. Понятие «геолого-геофизическое» состоит во включении в процесс решения априорных сведений о геологическом строении конкретных площадей, установленных закономерностях изменчивости физических параметров пород, генезисе и динамике формирования отдельных структур.

Нацеленность метода на установленную закономерную латеральную изменчивость плотностей разуплотнения пород на участках нефтеносных структур создает возможности для их успешного выявления.

Основываясь на выработанных модельных представлениях об объектах прогнозирования и установленных закономерностях изменчивости плотностей в их пределах, автором рассматривается горизонтально-слоистая двухслойная модель земной коры, состоящая из осадочного чехла и кристалличе-

ского фундамента с изменяющейся в латеральном направлении плотностью. Такая модель сравнительно просто отображается двухслойной математической моделью. Верхний слой модели аппроксимирует латеральную изменчивость плотностей в осадочном комплексе, нижний – в подстилающем его кристаллическом фундаменте. В процессе интерпретации при наличии априорной физико-геологической информации об объектах прогнозирования возможно увеличение числа слоев и детализация моделей. Для двухслойных моделей геологических сред неоднозначность и неустойчивость решения обратных задач являются минимальными, а при увеличении количества слоев моделей могут многократно возрастать.

В задаче поисков нефтеносных структур объектом исследований является верхний слой, а нижний практически используется лишь для компенсации фоновой составляющей поля на участках их прогнозирования.

Поскольку основным физико-геологическим аномальным фактором в пределах потенциально нефтеносных структур осадочного комплекса является латеральная изменчивость плотностей, то решение обратных задач должно быть нацелено на выявление локальных изменений гравитационного поля, создаваемых такой изменчивостью. Применение метода ГГМ позволяет извлекать достаточно надежные сведения об изменчивости плотностей, достоверность которых может быть проконтролирована по лабораторным измерениям и данным ГИС.

При изучении блокового строения пород кристаллического фундамента объектом исследований является нижний слой. Латеральную изменчивость плотностей в его пределах принято определять по различию средних величин параметра, характеризующих отдельные блоки. Несмотря на то, что такие различия составляют сотые доли г/см^3 , их влияние отражается в до-

статочны интенсивных изменениях гравитационного поля, на порядок превышающих его изменения, создаваемые латеральной изменчивостью плотностей в пределах верхнего слоя (осадочного комплекса). Аномальные изменения поля в верхнем слое могут быть учтены при наличии априорных данных, но при их малой интенсивности по сравнению с изменчивостью поля, создаваемой блоковой структурой кристаллического фундамента, такая необходимость часто отпадает.

На начальном этапе интерпретации осуществляется построение достаточно упрощенной двухслойной плотностной модели геологического разреза на основе априорных геолого-геофизических данных. Создаются геометрическая и математическая модели геологических сред. Глубина поверхности зоны латеральной изменчивости плотностей H_1 (поверхности СКК) определяется с требуемой точностью по данным бурения или других геофизических методов. Согласно теоретическим расчетам определение нижней кромки зоны H_2 (подошвы СКК) не требует высокой точности и может быть определено достаточно приближенно.

Поскольку решается обратная линейная задача, задается геометрия геологической среды, которая аппроксимируется набором одинаковых по размерам прямоугольных призм с равномерно распределенной в них плотностью. При заданных значениях H_1 и H_2 и мощности верхнего слоя $\Delta H = H_2 - H_1$ и H_1^1 и H_2^1 (поверхности фундамента и глубины его нижней границы в кристаллическом фундаменте) решение обратной задачи сводится к нахождению плотностей в призмах обоих слоев одновременно для локальных (в осадочном чехле) и региональных масс (в фундаменте).

При определении латеральной изменчивости плотностей в осадочном комплексе (на участках локальных структур) нижний слой задается призмами более крупного размера для учета

гравитационного влияния масс «вмещающих» пород, позволяющих исключать фоновую составляющую поля.

Для изучения блокового строения фундамента по значениям H_1^1 и H_2^1 , заданным размерам призм по высоте $\Delta H = H_1^1 - H_2^1$ и данным получаемых распределений плотностей в результате решения обратной задачи создаются интерпретационные физико-геологические модели вдоль региональных профилей. Согласно результатам решения прямых задач величина H_2^1 может составлять 15–20 и более километров в зависимости от интенсивности изменчивости аномального поля на участке исследований.

В процессе решения обратных задач метод ГГМ позволяет осуществлять подбор теоретического поля, соответствующего аномалиям Буге, с любой заданной точностью. Это является чрезвычайно важным, поскольку в измеренное поле часто вносятся большие погрешности за счет приближенного и даже не обоснованного ошибочного введения различных поправок.

Математические модели, используемые при решении обратной задачи, по существу, представляются двумя плоскопараллельными слоями, состоящими из набора прямоугольных призм с аномальными значениями плотностей. Для определения аномальных величин плотностей в призмах (искомых параметров моделей) применяются устойчивые численные методы решения линейных уравнений [86, 87].

На основании плотностных моделей, построенных в результате решения обратных задач, создаются физико-геологические интерпретационные модели сред и структур с так называемыми кажущимися аномальными изменениями плотностей (полученными по гравиметрическим данным). Они могут быть приведены к средним величинам, получаемым по лабораторным измерениям для пород осадочного чехла и кристаллического фундамента (в исследуемом регионе 2.56 и 2.73 г/см³, соответ-

ственно). Это позволяет проводить сопоставление плотностей на моделях, полученных в результате решения обратной задачи, с априорными данными на конкретных площадях и контролировать достоверность результатов моделирования.

При прогнозировании нефтегазоносных структур небольших размеров (первые километры) достаточно наглядной является призматическая аппроксимация геологического разреза. При поисках структур второго порядка и изучении блокового строения кристаллического фундамента более информативными являются модели 2D вдоль профилей (в плоскости XOZ), представляемые в изолиниях плотностей.

Геологическая интерпретация карт аномалий Буге показала значительное возрастание неоднозначности решения обратных задач.

Разработанные компьютерные технологии обработки геофизических данных позволяют эффективно применять метод ГГМ в варианте 2D, а при профильно-площадных измерениях по результатам моделирования, выполняемого вдоль профилей, создавать 3D-модели изучаемых геологических сред и структур.

Высокая геологическая достоверность результатов интерпретации гравитационных аномалий методом ГГМ в Урало-Поволжье и его опробование на участках разбуренных структур в регионах с иным геологическим строением очевидна. Раскрытию возможностей метода при решении обратных задач и результатам прогнозирования нефтеносных структур посвящена последующая глава.

Глава 8

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод геолого-геофизического моделирования успешно применен при выявлении многих нефтяных структур Урало-Поволжья и некоторых регионов с иными особенностями геологического строения. Он показал высокую геологическую достоверность получаемых решений. Ниже рассматриваются результаты геологической интерпретации, выполненной по данным высокоточных гравиметрических измерений на участках изученных и прогнозируемых структур, представленные в вариантах 2D и 3D.

Ярейюсская структура (Республика Коми) расположена на севере Тимано-Печорской провинции в пределах Колвинского вала. В геологическом отношении структура изучена недостаточно.

Гравитационное поле над структурой, наблюдаемое вдоль профиля, пересекающего ее в крест простирания, можно рассматривать как положительную аномалию, осложненную локальным минимумом силы притяжения интенсивностью в 0,9 мГал (рис. 6). Наблюденная аномалия Буге и подобранная (теоретическая) аномалия хорошо совпадают. Физико-геологическая интерпретационная модель структуры, созданная в результате решения обратной задачи методом ГГМ, представлена в виде призматической аппроксимации геологического разреза и в предположении, что латеральная изменчивость плотностей прослеживается по всему осадочному комплексу. Значения плотностей, обозначенные в призмах, характеризуют величини-

ны средних плотностей в г/см^3 , равномерно распределенных в каждой из них. Нижний слой служит для компенсации фоновой составляющей поля.

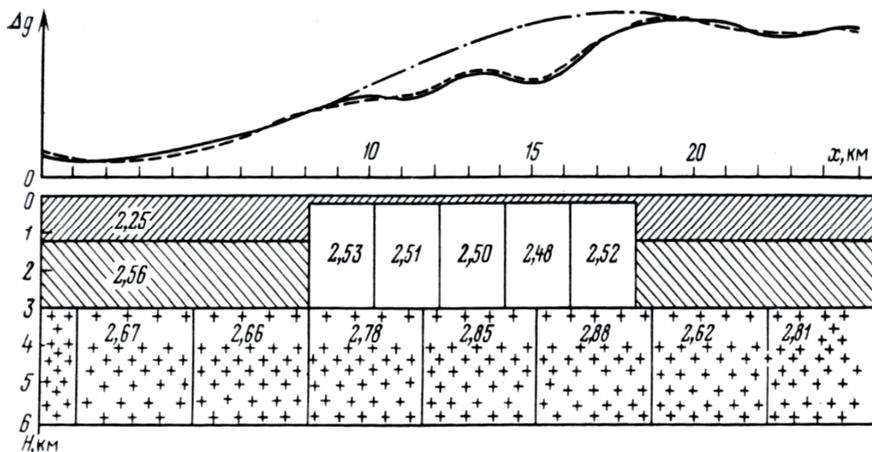


Рис. 6. Физико-геологическая интерпретационная модель Ярейюсской структуры

Как видно на рисунке 5, участку локального минимума соответствует латеральное уменьшение плотностей пород осадочного комплекса в $0,05 \text{ г/см}^3$, наблюдаемое в пределах многих локальных структур. Значения плотностей пород в призмах нижнего слоя, аппроксимирующих их изменчивость в пределах кристаллического фундамента, играют роль фоновой составляющей поля и практического интереса не представляют.

Арланская структура является структурой второго порядка и по поверхности кристаллического фундамента приурочена к юго-западному борту Камско-Бельского авлакогена (рис. 7).

Как видно, над структурой прослеживается достаточно протяженный пологий локальный минимум. Плотностной модели участку минимума соответствует уменьшение плотностей по-

род на 0.03 г/см^3 , а в начале профиля на западном склоне структуры наблюдается их возрастание, вероятно, связанное с особенностями ее геологического строения и недоучетом влияния фоновой составляющей поля. Поскольку подобное их изменение характерно для многих структур, можно утверждать, что локальный минимум обусловлен разуплотнением пород в ее сводовой части.

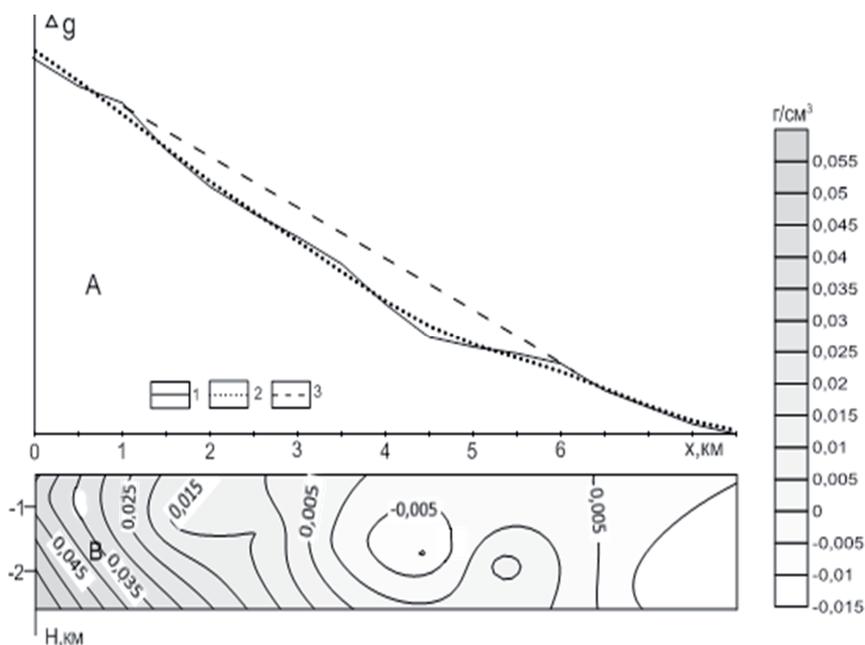


Рис. 7. Физико-геологическая интерпретационная модель Арланской структуры по профилю 1

A – аномальное гравитационное поле; B – плотностная модель разреза;
 1 – наблюдаемое поле; 2 – теоритическое поле;
 3 – фоновая составляющая локального минимума

Бондюжская структура (Республика Татарстан) находится на северо-восточном склоне Южно-Татарского свода в пределах одноименного вала, прослеживаемого по всему осадочному комплексу. Структура относится к приразломным унаследованным (сквозным) поднятиям тектонического типа и характеризуется почти полным совпадением структурных планов по отложениям перми, карбона и девона. По поверхности кристаллического фундамента, вскрытого здесь на глубине 1,517 км, вырисовывается выступ северо-северо-восточного простирания амплитудой 0,070 км на восточном погружении и 0,043 км – на западном. По кровле турнейского яруса поднятие представляет собой брахиантиклиналь северо-северо-восточного простирания с крутым восточным и относительно пологим западным крыльями, амплитуда которых, соответственно, составляет 0,067 и 0,029 км. Вверх по разрезу поднятие сохраняет свои очертания. Основные промышленные скопления нефти приурочены к образованиям пашийского и кыновского горизонтов верхнего девона, суммарная мощность которых составляет 0,04–0,05 км.

При решении обратной задачи проведена призматическая аппроксимация геологического разреза вдоль профиля. По профилю, пересекающему структуру в крест простирания, выявлен локальный минимум гравитационного поля на фоне более обширного максимума (рис.8).

Как видно, на построенной физико-геологической модели отмечается хорошее соответствие измеренной и теоретической кривых. Четко прослеживается локальный минимум, создаваемый разуплотнением пород в осадочных отложениях, подобный минимумам, выделяемым над другими структурами. Распределение плотностей в кристаллическом фундаменте плотностной модели играет роль фоновой составляющей гравитационного поля.

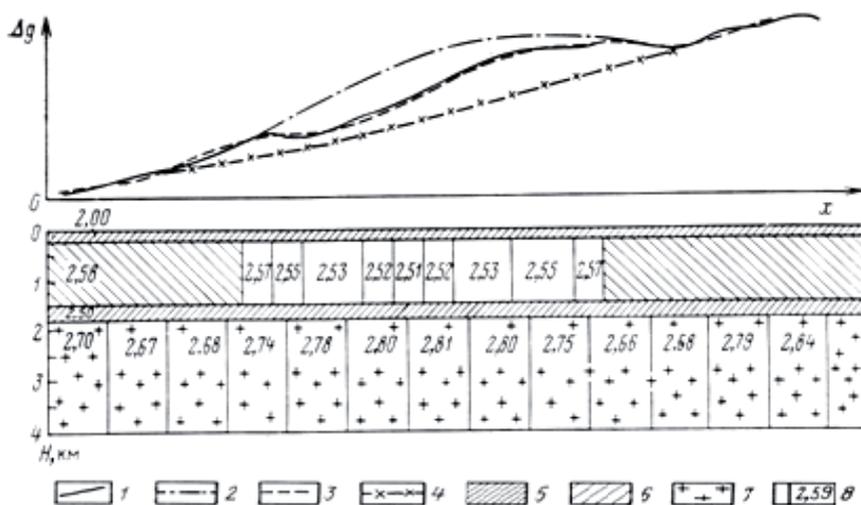


Рис. 8. Физико-геологическая интерпретационная модель Бондюжской структуры (РТ)

1 – наблюдаемая аномалия гравитационного поля; 2 – восстановленный локальный максимум; 3 – теоретическая аномалия; 4 – региональный фон;
 5 – терригенные породы; 6 – карбонатные породы; 7 – породы кристаллического фундамента; 8 – модель зоны латеральной изменчивости плотности (цифры на модели – величины кажущихся плотностей, приведенные к абсолютным значениям в $г/см^3$)

Степновская структура (Саратовская обл.) относится к приразломным унаследованным поднятиям тектонического типа и представляет собой брахиантиклинальную коробчатую складку с широким плоским сводом. Согласно геофизическим данным, кристаллический фундамент здесь залегает на глубине около 3,0 км. По поверхности отложений девона амплитуда поднятия составляет 0,35 км и характеризуется большой крутизной крыльев. Вверх по разрезу амплитуда поднятия уменьшается до 0,050 км. Структура является промышленно нефтегазоносным месторождением, связанным в основном с отложениями дево-

на и карбона. Суммарная мощность нефтегазоносных пластов превышает 0.10 км.

Результаты гравитационного моделирования вдоль профиля, пересекающего структуру в крест простирания, приведены на рисунке 9.

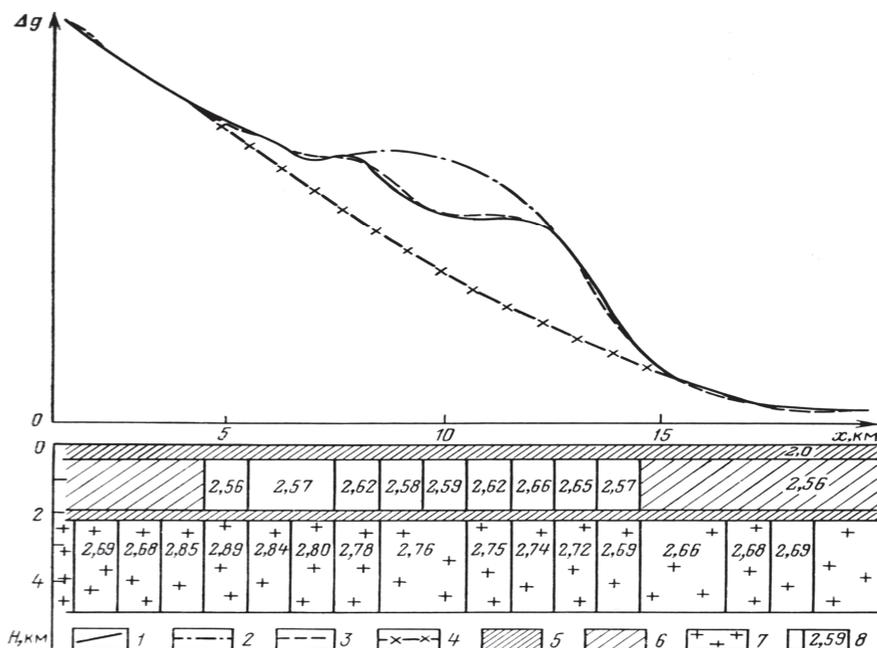
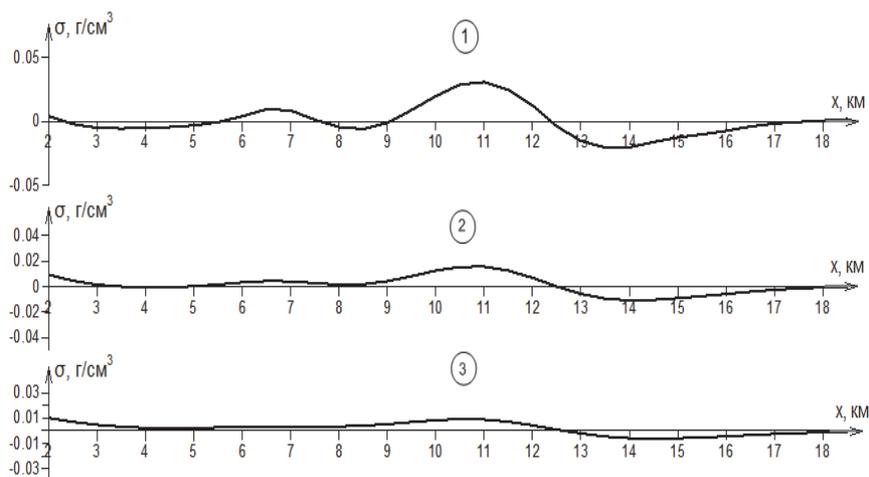


Рис. 9. Физико-геологическая интерпретационная модель Степановской структуры при призматической аппроксимации геологического разреза

- 1 – наблюдаемая гравитационная аномалия; 2 – восстановленный локальный максимум; 3 – теоретическая (подобранная) аномалия; 4 – региональный фон; 5 – терригенные породы; 6 – карбонатные породы; 7 – породы кристаллического фундамента; 8 – модель зоны латеральной изменчивости плотности (цифры на модели обозначают средние значения плотностей в призмах в г/см³, полученные в результате решения обратной линейной задачи

Как видно, отмечается полное соответствие наблюдаемого и подобранного полей, локальный минимум гравитационного поля, создаваемого разуплотнением пород, прослеживаемого на фоне интенсивного локального максимума, создаваемого суммарным гравитационным влиянием плотностных границ структуры. Латеральное изменение поля на участке локального минимума, создаваемого разуплотнением пород в трехслойных осадочных отложениях модели, показано в цифровом виде.

Особенности изменчивости плотностей пород также хорошо прослеживаются по графикам изменчивости параметра в слоях модели (рис. 10).



**Рис. 10. Плотностная интерпретационная модель
Степновской структуры**

Величина разуплотнения пород, прослеживаемого по трехслойному осадочному комплексу, полученная по результатам решения обратной задачи, характеризуется убыванием с глу-

биной: в верхнем слое является наиболее близкой к реальному значению и составляет -0.07 , в среднем – -0.03 , в нижнем – -0.01 г/см³, что можно объяснить их удалением от земной поверхности.

Ямашинская структура (Республика Татарстан) относится к локальным поднятиям второго порядка и располагается на западном склоне Южно-Татарского свода. Начиная с отложений турнейского яруса нижнего карбона, она характеризуется амплитудой около 40 м. Структура имеет вид брахиантиклинали с крутыми юго-восточным и северо-западным крыльями, вытянутой в северо-восточном направлении. Она разделена на три поднятия более высокого порядка с амплитудами около 20 м.

На участке структуры проведены профилно-площадные высокоточные гравиметрические измерения. Результаты решения обратной задачи представлены в изолиниях изменчивости плотностей в вертикальной плоскости. Приведены результаты гравитационного моделирования методом ГГМ, выполненные вдоль профиля, пересекающего структуру в крест простирания (рис. 11). Как видно, наблюдаемое и теоретическое поля практически совпадают. Вдоль профиля прослеживается локальный минимум гравитационного поля интенсивностью около 1 мГала, являющийся поисковым признаком структуры. На плотностной модели отобразилось относительное разуплотнение пород, которое практически совпадает со значением, определенным по данным ГИС, что свидетельствует о высокой достоверности решения обратной задачи.

Вдоль других профилей, пересекающих структуру, также прослеживается локальное уменьшение гравитационного поля аналогичной интенсивности и подобное латеральное изменение плотностей, создаваемое разуплотнением пород.

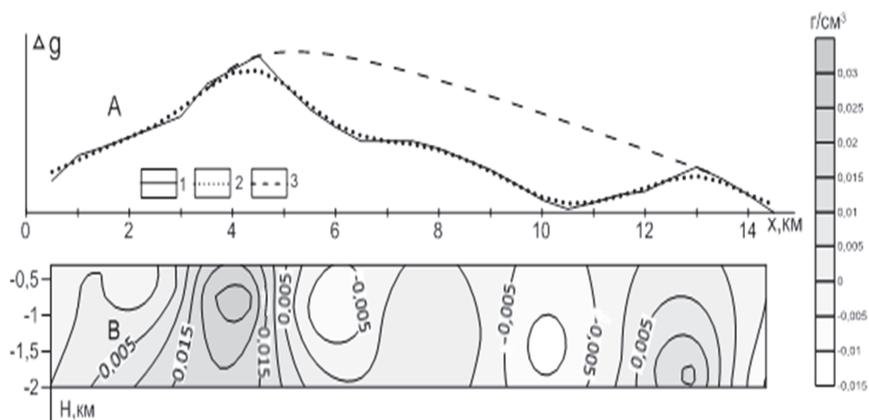


Рис. 11. Физико-геологическая интерпретационная модель Ямашинской структуры по профилю 3

A – аномальное гравитационное поле; B – плотностная модель разреза; 1 – наблюдаемое поле; 2 – теоретическое (рассчитанное) поле; 3 – фоновая составляющая локального минимума

По результатам интерпретации, выполненной вдоль профилей, пересекающих структуру в крест простирания, показана возможность создания 3D-моделей по результатам профильно-площадных высокоточных гравиметрических измерений (рис. 12).

Как видно, в пределах модели выделяются дополнительные детали латеральной изменчивости плотностей: просматриваются участки разуплотнения пород, соответствующие в плане локальным поднятиям более высокого порядка.

Важно отметить, что в западной части одного из профилей, продолжающегося за пределы структуры, автором также был выделен локальный минимум, предположительно связываемый с другой структурой. При последующем бурении было выявлено Тавельское нефтяное месторождение, разрабатываемое и в наше время.

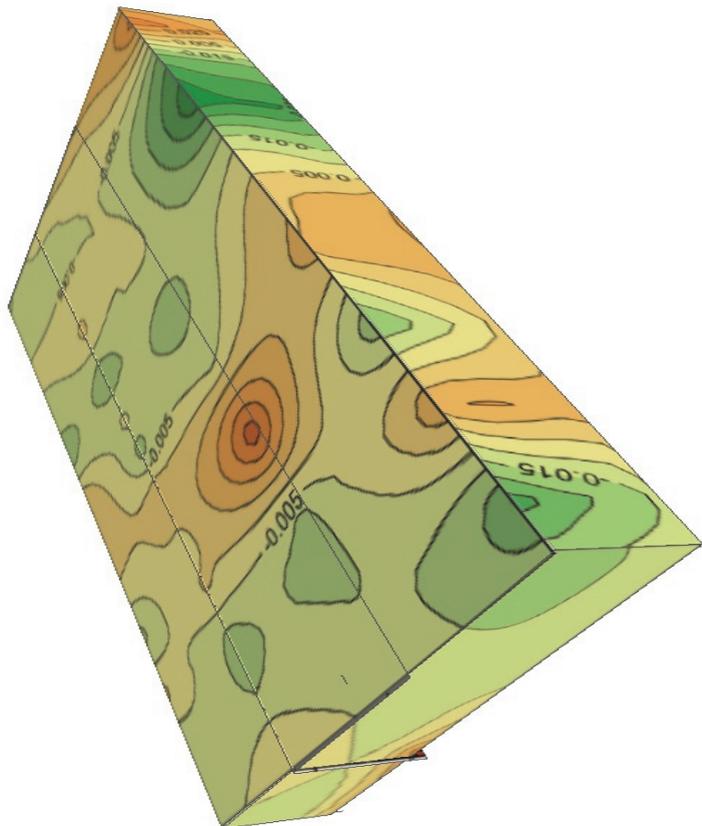


Рис. 12. Плотностная 3D-модель осадочного комплекса на участке Ямашинской нефтеносной структуры (изолинии плотностей в г/см³)

Актанышская структура (Республика Татарстан), прогнозируемая по одной скважине № 22, также может служить примером создания 3D-моделей по 2D-моделям методом ГГМ. По пермскому структурному плану ее месторасположение предполагалось в пределах валоподобной зоны поднятий северо-западного простирания, выделенной на востоке Актаныш-Чишминского прогиба. По поверхности кристаллического фундамента она приурочена к северо-восточному склону Южно-Татарского свода, перекрытому отложениями юго-западного борта Камско-Бельского авлакогена.

Структура выявлена автором по результатам профильно-площадных высокоточных гравиметрических измерений. Вдоль четырех профилей были выделены локальные минимумы силы тяжести интенсивностью около 1 мГала, подобные минимумам, наблюдаемым на нефтеносных структурах и связываемым с латеральной изменчивостью плотностей. Структура была околтурена при последующем бурении.

Результаты решения обратной задачи методом ГГМ приведены в варианте 2D по одному из профилей (рис. 11) и в варианте 3D по четырем профилям (рис. 12).

Как следует из рисунка 12, измеренное и подобранное (теоретическое) поля практически полностью совпадают. Вдоль профиля прослеживается локальный минимум силы тяжести интенсивностью около 1 мГала, подобный выявленным минимумам на других структурах. Очевидно, что его природа обусловлена латеральным разуплотнением пород, как и на других структурах изучаемого региона.

По результатам высокоточных гравиметрических измерений и решения обратной задачи методом ГГМ, выполненным по пяти профилям, пересекающим прогнозируемую структуру, построена 3D-модель осадочного комплекса на участке Актанышской структуры (рис. 14).

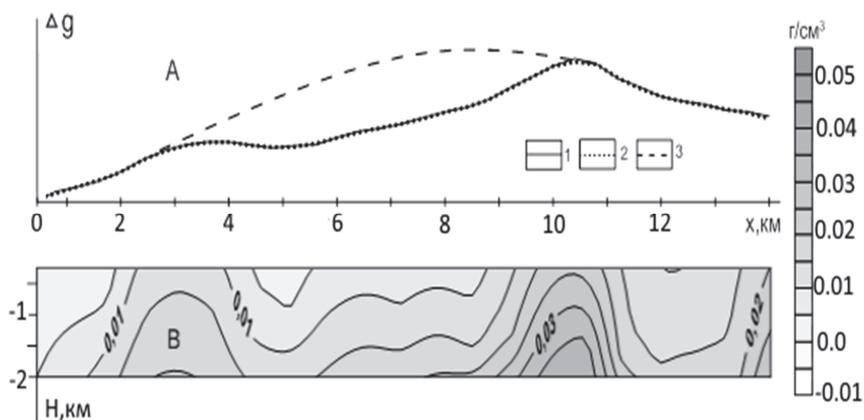


Рис. 13. Физико-геологическая интерпретационная модель Актанышской структуры по профилю 1

A – аномальное гравитационное поле; B – плотностная модель разреза;
 1 – наблюдаемое поле; 2 – теоритическое поле;
 3 – фоновая составляющая локального минимума

На модели выявляются некоторые дополнительные детали о латеральной изменчивости плотностей, представляющие несомненный интерес для постановки бурения. В ее центральной части выделяется участок разуплотнения пород, ограниченный с северо-восточной и юго-западной сторон «зонами» уплотнения.

Результаты создания 3D-моделей методом гравитационного моделирования по данным профильно-площадных высокоточных гравиметрических измерений, показанные на примерах Ямашинской и Актанышской структур, свидетельствуют о высокой геологической информативности примененных технологий интерпретации аномального гравитационного поля. Они позволяют выявлять детали физико-геологических неоднородностей изучаемых геологических сред и могут служить обоснованием для применения метода ГГМ с целью прогнозирования нефтяных месторождений.

Таким образом, применение разработанных автором компьютерных технологий, направленных на прогнозирование нефтяных месторождений, позволяет создавать плотностные 3D-модели геологических сред и прогнозируемых объектов по 2D-моделям структур. В таких моделях, в отличие от результатов, получаемых при качественном истолковании гравиметрических карт, уточняются на количественном уровне детали латеральной изменчивости плотностей изучаемых объектов, отображающие особенности их геологического строения и представляющие несомненный интерес для постановки бурения.

Характерным примером решения обратной задачи методом ГГМ на участке с геологическим строением, значительно отличающимся по строению от Волго-Уральского региона, являются результаты интерпретации по двум профилям в Узбекистане на участке структуры со сложным геологическим строением (рис. 15).

На профиле наблюдается полное совпадение измеренного поля (аномалии Буге) с полученным решением обратной задачи методом ГГМ, и выделение, как и над структурами Урало-Поволжья, локального минимума гравитационного поля, несмотря на чрезвычайно сложное геологическое строение структуры. Плотностная модель, построенная в результате решения обратной задачи, характеризуется чередованием терригенных, карбонатных пород и каменной соли с изменяющейся плотностью по латерали.

Приведенные результаты применения метода ГГМ при геологическом истолковании установленных особенностей гравитационных аномалий, наблюдаемых над структурами различных типов, убедительно свидетельствуют о том, что наличие латерального разуплотнения плотностей пород над нефтега-

зовыми залежами является основным физико-геологическим фактором, отображающим особенности строения нефтяных месторождений.

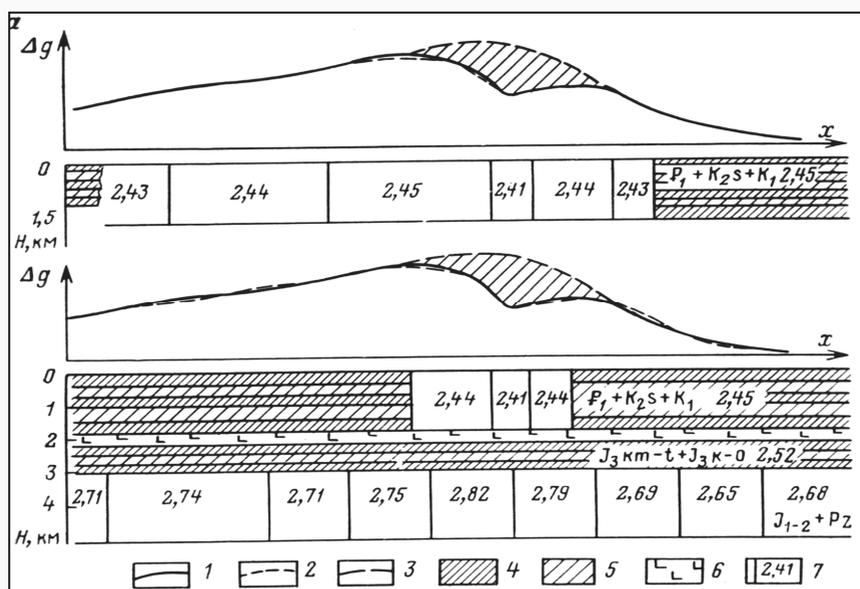


Рис. 15. Физико-геологическая интерпретационная модель для структуры Уртабулак

(измеренное поле по А. Орловскому и др.)

- 1 – измеренное поле; 2 – подобранное методом ГГМ поле;
- 3 – восстановленный локальный минимум; 4 – терригенные породы;
- 5 – карбонатные породы; 6 – каменная соль; 7 – модель зоны латеральной изменчивости плотности (цифры на модели приведены в г/см³)

Необходимым условием для эффективного применения метода ГГМ является проведение целенаправленных высокоточных гравиметрических измерений и включение в процесс решения обратных задач априорных данных о физико-геологических особенностях изучаемых регионов.

Установленное наличие разуплотнения пород в сводовых и присводовых частях нефтеносных структур подтверждается данными лабораторных определений плотностей для отдельных горизонтов осадочного комплекса и может быть использовано на неразведанных площадях для выявления структур по особенностям локальных изменений гравитационного поля.

Приведенные результаты применения метода ГГМ при решении обратных задач гравиразведки и геологическое истолкование природы гравитационных аномалий, наблюдаемых над структурами различных типов, убедительно свидетельствуют, что наличие латерального разуплотнения плотностей пород над нефтегазовыми залежами является основным физико-геологическим фактором, отображающим особенности строения нефтяных месторождений.

Выделение отдельных пластов с пониженной плотностью (увеличенной пористостью) при повторном детальном решении обратных задач с учетом данных ГИС представляют несомненный интерес для выбора направлений бурения наклонных и горизонтальных скважин и прогнозирования потенциально нефтеносных пластов.

Глава 9

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ ПЛАСТОВ НА ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Многие ранее открытые крупные нефтяные месторождения РТ (Ромашкино и другие) в настоящее время находятся на завершающей поздней стадии разработки с устоявшимся уровнем добычи. Задача его сохранения и возможное увеличение связана с разработкой и внедрением новых методов освоения нефти старых месторождений. Темпы добычи нефти в центральной части исследуемого региона разделяют на четыре стадии (рис. 16). Первую и вторую (I и II) объединяют в ранний период, а третью и четвертую (III и IV) – в поздний период разработки. В четвертой, поздней, стадии разработки (IV) темпы добычи нефти составляют примерно 2 % по сравнению со второй (II) максимальной стадией, при которой они приближались к 9 % [29, 30].

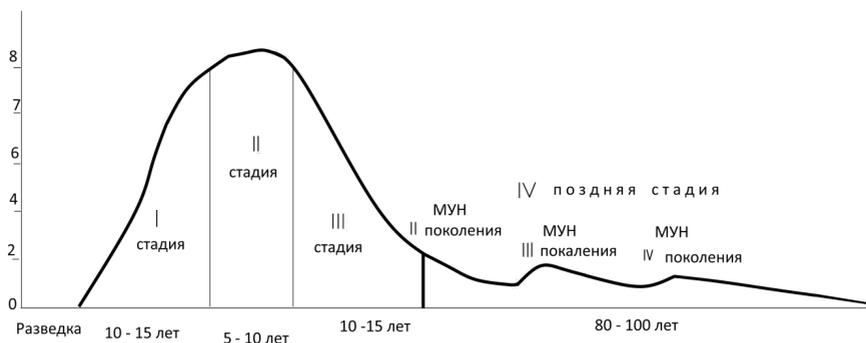


Рис. 16. Новое представление о стадийности разработки нефтяных месторождений (по Р.Х. Муслимову)

Чрезвычайно актуальной является задача выявления месторождений природных битумов, решение которой несколько условно можно отнести к объектам «неструктурного» типа и периоду поздней стадии разработки.

Основными битумосодержащими комплексами пород, на которые проводятся поисково-разведочные работы в РТ, являются отложения уфимского и казанского ярусов верхнепермских образований. Месторождения битумов в уфимских отложениях выявлены на востоке Мелекесской впадины в обширной зоне 50x125 км, простирающейся с юго-востока на северо-запад, и располагаются на глубинах 0.02–0.20 км [90, 92].

Поскольку плотность битумов близка к плотности грунтовых вод, выделение их гравитационного влияния практически невозможно. В то же время плотность песчаных линз в уфимских отложениях, являющихся коллекторами битумов, может значительно отличаться от плотности вмещающих их пород. Поэтому гравитационные аномалии, создаваемые подобными линзами, могут являться поисковыми признаками скопления залежей битумов.

По данным высокоточных гравиметрических измерений и теоретических расчетов гравитационного влияния разведанного Ашальчинского месторождения, характеризующегося высоким коэффициентом пористости 22–46 %, соответствующими изменениям плотностей в 1.6–1.9 г/см³ при плотности вмещающих пород 2.2–2.3 г/см³ установлено, что гравитационное влияние песчаной линзы на Ашальчинском месторождении (рис. 17) составляет 0.5 мГал [75, 84].

Как показано на рисунке 16, вдоль профиля уверенно прослеживается уменьшение гравитационного поля над песчаной линзой, создаваемое дефицитом ее средней плотности относительно вмещающих отложений.

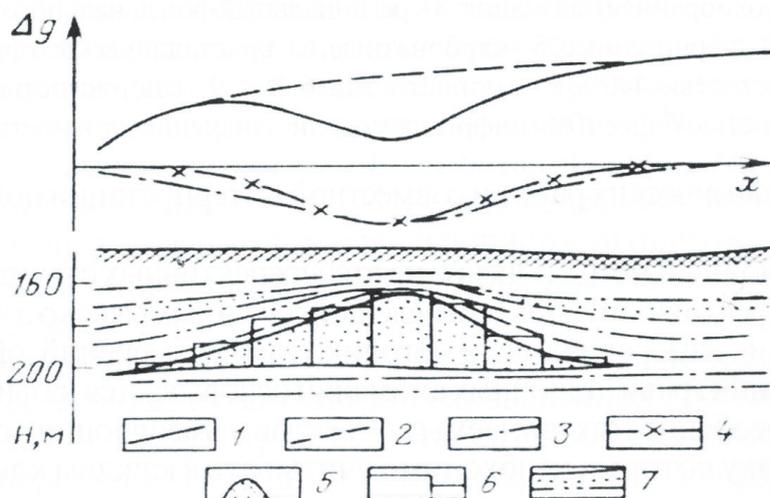


Рис. 17. Геолого-геофизический профиль вдоль профиля, пересекающего Ашалычинское месторождение природных битумов

1 – наблюдаемое гравитационное поле; 2 – фоновая составляющая локального минимума; 3 – локальный минимум; 4 – теоретическая аномалия, создаваемая влиянием песчаной линзы; 5 – модель песчаной линзы; 6 – призматическая аппроксимация контура линзы; 7 – вмещающие отложения песчаной линзы

Метод геолого-геофизического моделирования (ГГМ), применяемый для выявления нефтегазоносных структур и изучения строения кристаллического фундамента гравиразведкой, не позволяет решать задачу выявления скопления самих природных битумов в ограниченных по своим размерам песчаных линзах, а их притяжение практически совпадает с притяжением грунтовых вод.

Исходя из особенностей значительного различия плотностей песчаных линз и вмещающих их отложений на Ашалычинском месторождении до величины $0.6-0.7 \text{ г/см}^3$, автором применен

известный метод пересчета измеренного поля в нижнее полупространство (на глубину). Метод является достаточно эффективным при выявлении рудных месторождений, для которых характерна значительная избыточная плотность по сравнению с вмещающими отложениями. Метод позволяет пересчитывать поле на разные глубины, осуществлять построение карт гравитационного поля в вертикальной плоскости, представляемых в изолиниях плотностей, на которых проявляется «фокусирующее» свойство изолиний по мере приближения к объектам поисков. Тем самым появляется возможность определения глубины их залегания.

Нами был применен метод пересчета для прогнозирования уфимских песчаных линз, характеризующихся значительным дефицитом плотностей по сравнению с вмещающими их отложениями (рис. 18).

Пересчет поля в нижнее полупространство на глубины 0.05, 0.10, 0.15 и 0.20 км оказался достаточно эффективным при геологической интерпретации результатов высокоточных гравиметрических измерений. Особенно показательным является то, что изолинии аномалий силы тяжести, изображенные в вертикальной плоскости (рис. 18), сходятся в центре песчаной линзы, на глубине 0.17 км, практически совпавшей с данными бурения. Это позволяет считать, что гравиразведка является достаточно результативной при прогнозировании песчаных линз в уфимских отложениях, перспективных на скопление природных битумов.

Таким образом, проведение высокоточных гравиметрических измерений и геологическая интерпретация полученных данных показали возможность эффективного прогнозирования участков скоплений природных битумов высокоточной гравиразведкой, что позволяет рекомендовать ее широкое применение для решения этой важной задачи.

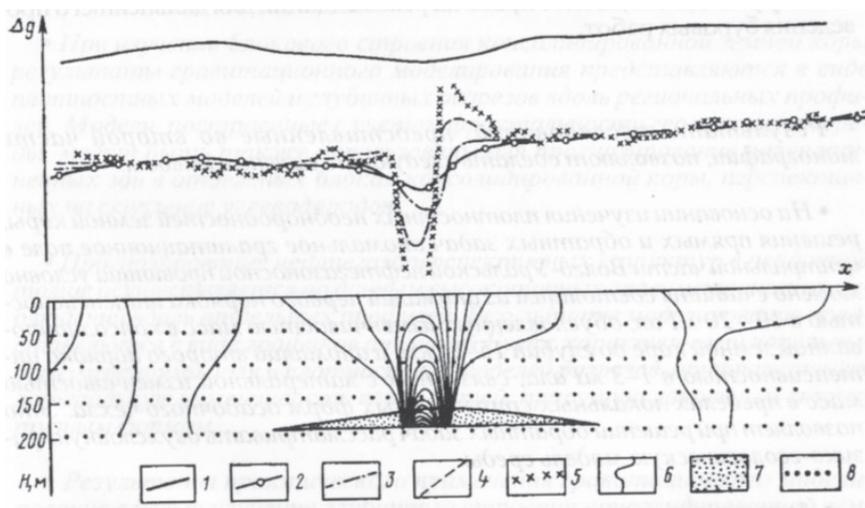


Рис. 18. Геолого-геофизический профиль вдоль профиля, пересекающего Ашалчинское месторождение природных битумов

- 1 – наблюдаемое гравитационное поле; 2 – фоновая составляющая локального минимума; 3 – локальный минимум;
 4 – теоретическая аномалия, создаваемая влиянием песчаной линзы;
 5 – модель песчаной линзы; 6 – призматическая аппроксимация контура линзы; 7 – вмещающие отложения песчаной линзы; 8 – точки пересчета измеренного поля на глубину

Объектами исследований могут являться участки повышенной пористости пород в пределах сульфатно-карбонатного комплекса, прослеживаемые по данным ГИС вдоль геолого-геофизических профилей при наличии значительного количества пробуренных скважин. Сопоставление моделей, создаваемых методом ГГМ, с данными ГИС является особенно эффективным при изучении геологического строения нефтяных месторождений на поздней стадии их разработки. Появляется возможность увеличения информации о пространственной изменчивости по-

ристости и плотности изучаемых площадей и возрастает оценка достоверности геологической интерпретации гравиметрических данных.

В качестве примера приведен профиль протяженностью около 80 км, простирающийся с юго-запада на северо-восток через краевую и прибортовую зоны Усть-Черемшанского прогиба Камско-Кинельской системы и западный склон Южно-Татарского свода (рис. 19). В пределах профиля коэффициент общей пористости турнейско-девонских отложений в среднем составляет 5–7 %, что соответствует изменениям средних значений плотностей 2,53–2,55 г/см³. Средневзвешенные по мощностям величины коэффициента общей пористости K_p в этих отложениях изменяются от 5 (скв. 103) до 12 % (скв. 71, 116), а в отдельных интервалах разреза (скв. 116, 252) достигают 14–15 %.

На участках, выявленных вдоль профиля локальных поднятий (скв. 308, 116-142, 253-248), по всей карбонатной толще отмечается аномальное увеличение K_p на 3–4 %. Особенно значительное его возрастание отмечается в пределах Ямашинского валоподобного поднятия – структуры второго порядка (скв. 231-140). Здесь отчетливо выделяется зона повышенной пористости пород, в которой значения K_p достигают 10–12 %.

Вполне возможно, что поверхность зоны может являться контактом резкого уменьшения K_p на 7–8 %, возникшим под влиянием вторичных процессов (доломитизации, кальцитизации и пр.), являющимся «покрышкой» для скопления нефтяных залежей неструктурного типа. Для их обнаружения целесообразно повторное, более детальное проведение обработки данных ГИС скважин 308, 231, 116, 42, 142, 140, а при подтверждении прогноза может оказаться целесообразной постановка буровых работ.

Зоны повышенной пористости пород, подобные выделенным по данным ГИС в турнейско-девонских отложениях, могут встречаться и на других участках. Об этом свидетельствует наличие локального минимума гравитационного поля интенсивностью около одного миллигала (1 мГал) над Ямашинской структурой (скв. 231-140).

Глава 10

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР

Известно, что сейсморазведка является основным геофизическим методом, применяемым при поисках потенциально нефтеносных локальных поднятий, выявляемых по резкой смене (скачку) скоростей распространения упругих волн на границах раздела литолого-фациальных комплексов и отдельных напластований.

Высокоточная гравиразведка, в отличие от сейсморазведки, позволяет выявлять объекты вертикального и наклонного простирания, каковыми являются зоны разуплотнения пород на участках локальных поднятий, часто прослеживаемые над нефтяными залежами по всему садочному комплексу и отображаемые локальными минимумами гравитационного поля (гл. 6, 7). Для таких зон на ряде структур Урало-Поволжья одновременно с разуплотнением пород выявлено уменьшение скоростей распространения упругих волн: на Крым-Сарайской, Арланской, Урицкой, Первомайской, Падимейской и других [23]. Это свидетельствует о целесообразности использования результатов решения обратных задач методом ГГМ для уточнения сейсмических построений и последующего проведения комплексной интерпретации.

При прогнозировании нефтяных месторождений полевые гравиметрические и сейсмические работы, как правило, проводятся раздельно. Масштабы съемок и размеры изучаемых площадей существенно различаются. Их совмещение в плане, осуществляемое на качественном уровне, проводится приближенно. Результаты гравиразведки, часто представляемые в виде

трансформированных карт, содержат большие погрешности. Поэтому сопоставление данных, получаемых обоими методами, является мало результативным.

Комплексирование методов при прогнозировании нефтяных месторождений по убеждению автора должно заключаться в анализе результатов решения конкретных геологических задач каждым из применяемых методов.

Как было показано в главах 3, 4, физико-геологическим обоснованием прогнозирования локальных структур гравиметрическим методом является отображение в гравитационном поле влияния латеральной изменчивости физических параметров пород. Обоснованием для комплексирования методов также является наличие прямой корреляционной связи между скоростью распространения упругих волн и плотностью. Эти особенности в условиях латеральной неоднородности осадочных толщ должны определять рациональную и наиболее экономичную методику поисково-разведочных работ при прогнозировании нефтяных месторождений.

Сведения о латеральной изменчивости скоростей распространения упругих волн на участках локальных поднятий получены многими исследователями различных регионов.

Значительный объем достаточно достоверных данных об изменчивости скоростей распространения упругих волн на участках локальных структур Южно-Татарского свода получен автором по материалам сейсмического (СК), акустического (АК), нейтронного (НГК) и гамма (ГК) каротажа.

Анализ результатов измерений СК по 120 скважинам позволил определить изменения значений средних интервальных скоростей V пл. ср в пределах 5-ти интервалов осадочного комплекса РТ (сверху вниз), которые составили: 4,37–5,60 (1), 2,73–4,40 (2), 5,10–6,80 (3), 2,40–4,97 (4) и 4,2–6,2 (5) км/с. Столь значительный диапазон изменений скоростей, опре-

деленных в различных скважинах, по мнению автора, может быть обусловлен послойно-латеральной неоднородностью осадочного чехла, а в отдельных случаях и недостаточно высоким качеством измерений. Средние значения V пл. ср, полученные для наиболее значительных по мощности интервалов, соответственно, составили: 4,93, 5,70 и 5,61 км/с, а для сульфатно-карбонатного комплекса (СКК) в целом 5,65 км/с [84].

Для Южно-Татарского свода по результатам обработки диаграмм сейсмического и нейтронного гамма каротажа (СК и НГК) по 134-м скважинам составлены уравнения регрессии, характеризующие зависимости изменений средних пластовых скоростей V пл. ср от средних значений коэффициента общей пористости $K_{\text{п}}$ и плотности σ , определенных по НГК в пластах мощностью от 0,2 до 0,5 км:

$$V \text{ пл. ср} = 6.26 - 0.07 K_{\text{п}} \quad (6)$$

$$V \text{ пл. ср} = 4.75\sigma - 6.30. \quad (7)$$

Коэффициенты корреляции в уравнениях (6) и (7) близки к единице (0,88 и 0,87), а погрешность определения скорости по обоим параметрам составляет $\pm 0,15$ км/с, что свидетельствует о значительной тесноте связей между параметрами. Определение V пл. ср по уравнениям (6) и (7) характеризуется более высокой достоверностью по сравнению с результатами, полученными по лабораторным измерениям, погрешность определений V пл. ср по которым значительно выше и составляет $\pm 0,71$ км/с [84].

Из уравнения (7) следует, что при латеральном уменьшении плотностей пород на $0,03-0,06$ г/см³, характерном для сводов структур, значения V пл. ср могут уменьшаться в их пределах на $0,15-0,30$ км/с (п. 3.1). Отсюда следует, что использование

уравнений регрессии типа 6 и 7 позволяет извлекать дополнительную информацию о латеральной изменчивости скоростей распространения упругих волн в пределах локальных структур.

Насколько существенными могут быть погрешности определения глубин отражающих поверхностей при обработке сейсмических данных без учета латерального разуплотнения пород на сводах локальных поднятий, можно определить по выражению:

$$\Delta H = H(v_{cp} - v'_{cp}) / v'_{cp}, \quad (8)$$

где ΔH – максимальное расхождение с фактической глубиной отражающей поверхности; H – глубина залегания отражающей поверхности; v_{cp} – средняя скорость распространения упругих волн; v'_{cp} – средняя скорость распространения упругих волн при разуплотнении (уплотнении) пород.

Из выражения (8) легко определить, что за счет латерального уменьшения скорости на участке поднятия в 0,3 км/с, при характерных для СКК значениях $v_{cp} = 5,6$ км/с, $v'_{cp} = 5,3$ км/с занижение глубины ΔH на глубине 1,0 км составит 0,057 км. При увеличении глубин отражающих поверхностей эта величина может существенно возрасти и даже в ряде случаев может приводить к выделению прогибов на месте поднятий. Обработка сейсмических данных, проведенная с учетом латеральных изменений скоростей, полученных по результатам гравитационного моделирования, показала, что на отдельных площадях могут прослеживаться локальные поднятия, не выявляемые при сейсмических построениях, проводимых с постоянной скоростью. Если известна глубина хотя бы в одной точке структурной (отражающей) поверхности, то по изменениям пластовых скоростей с помощью корреляционных зависимостей типа (6) и (7) приближенно может быть построена вся поверхность вдоль интерпретационного профиля.

При комплексировании методов необходима постановка целенаправленных профильных и профильно-площадных высокоточных гравиметрических измерений с совмещением гравиметрических пунктов с пунктами приема сейсмического сигнала. При этом геофизические измерения должны выполняться обоими методами одновременно с топографическими работами. Это позволит с высокой достоверностью сопоставлять геофизические данные, и за счет сокращения их объемов может достигаться значительный экономический эффект.

Современные компьютерные технологии обработки геофизической информации открывают новые возможности для применения гравитационного моделирования в варианте 3D (гл. 6, 7). Отсюда становится очевидной целесообразность проведения высокоточных гравиметрических измерений одновременно с выполнением сейсморазведочных работ в варианте 3D. При совместной интерпретации полевых данных появится возможность создания сейсмо-гравиметрических (с учетом сейсмических построений) и гравитационно-сейсмических моделей (с учетом латеральной изменчивости плотностей) в вариантах 2D и 3D. Это должно способствовать более детальному изучению геологического строения прогнозируемых объектов, и повышению эффективности выявления нефтяных месторождений.

Один из возможных вариантов использования результатов высокоточных гравиметрических измерений, выполненных вдоль сейсмических профилей, может заключаться в преобразовании плотностных моделей, создаваемых методом ГГМ, в физико-геологические модели изменчивости скоростей распространения упругих волн и их использовании при обработке сейсмических данных. По плотностным моделям могут быть построены схематические модели распространения скоростей упругих волн. При наиболее характерных для структур вели-

чинах разуплотнения пород в -0.03 – 0.06 г/см³ и отображаемых на плотностных моделях, построенных в результате решения обратных задач (рис. 16, 20, 23, 27, 31), изменения $V_{\text{пл.ср}}$ могут составлять 0.015 – 0.030 км/с и более. При таких их изменениях занижение глубин структурных поверхностей на сводах поднятий, выделяемых по сейсмическим данным, согласно (8), может составлять 0.025 – 0.055 км (на глубине 1 км) и 0.040 – 0.80 км (на глубине 1.5 км).

В качестве примера на рисунке 19 приведены плотностная и схематическая скоростная модели вдоль профиля 1 Актанышской локальной структуры. По плотностной модели (А), полученной в результате решения обратной задачи методом ГГМ (рис. 20), с использованием уравнения регрессии (7) построена скоростная модель структуры (В).

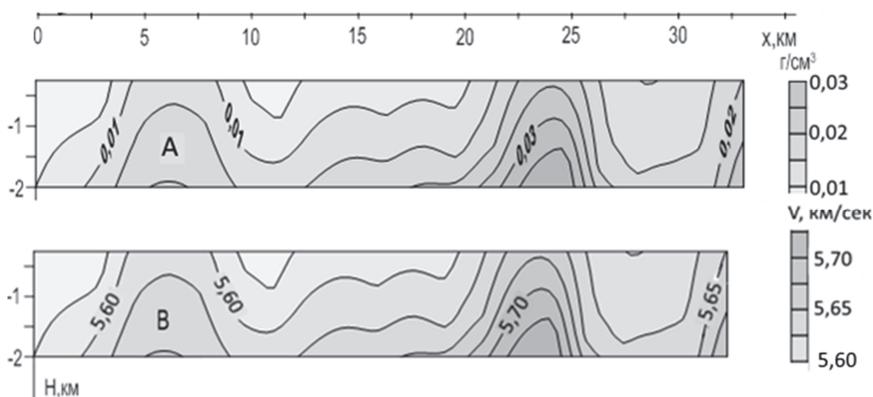


Рис. 20. Плотностная (А) и схематическая скоростная (В) модели латеральной изменчивости физических параметров пород вдоль профиля 1, пересекающего Ямашинскую структуру в крест простираения

Как следует из рисунка, латеральная изменчивость плотностей, определенных по результатам гравитационного моде-

лирования, изменяется от 0.005 до 0.035 г/см³ (модель А), что соответствует изменениям средне интервальных скоростей (модель В) – от 5.550 до 5750 км/с.

Не трудно определить, что при разуплотнении пород над нефтяными залежами в 0.06–0.07 г/см³, выявленных на ряде структур по данным ГИС (гл. 3), изменения скоростей могут составлять 400 км/с и более. Вполне очевидно, что недоучет таких изменений, как упоминалось выше, может приводить к нивелированию локальных поднятий амплитудой в первые десятки метров.

Это свидетельствует о том, что при совместном проведении полевых работ обоими методами и совмещении пунктов измерений появится возможность создания более детальных моделей латеральной изменчивости скоростей распространения упругих волн.

При комплексном проведении гравиметрических и сейсмических работ целесообразно также использовать промыслово-геофизические данные. Поскольку сейсмический каротаж (СК) проводится не во всех скважинах, а НГК проводится при бурении в обязательном порядке (при изучении карбонатного разреза), то на основании заранее составляемых зависимостей типа (6) и (7) может быть получена дополнительная информация об изменчивости скоростей распространения упругих волн.

По глубокому убеждению автора, целесообразность комплексного проведения высокоточных гравиметрических измерений вдоль сейсмических профилей и построения сейсмо-гравиметрических моделей (с учетом сейсмических структурных построений) и гравитационно-сейсмических моделей (с учетом латеральной изменчивости плотностей по данным гравиразведки) в вариантах 2D и 3D является очевидной [42, 43]. Для успешного комплексирования методов необходима постановка профильно-площадных высокоточ-

ных гравиметрических наблюдений с ориентацией профилей в крест простирания прогнозируемых объектов и совмещением пунктов измерений обоими методами. Густота гравиметрических пунктов может быть более редкой, по сравнению с применяемой на практике (50 x 50 м) при сейсмических работах 3D. Нам представляется, что при комплексном проведении работ возможна и более редкая сеть сейсмических наблюдений, в частности, при полосовой центральной системе «типа крест» с расстоянием 250 м между линиями приема и линиями возбуждения сигнала [23].

Оценка геологической достоверности получаемых решений может осуществляться по результатам бурения, ГИС и измерений по керну лабораторных данных (гл. 4, 5).

Глава 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ БЛОКОВЫМ СТРОЕНИЕМ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

Проведение теоретических расчетов с целью выяснения возможного характера аномалий, создаваемых плотностными неоднородностями консолидированной земной коры – задача чрезвычайно сложная. Это связано с тем, что породы в ее пределах отличаются большим разнообразием по петрографическим, плотностным и другим физическим свойствам, а формы и размеры аномальных масс, расположенных на различных глубинах, неопределенны.

Верхнюю часть кристаллического фундамента Русской плиты принято характеризовать блоковым строением. Ширина отдельных блоков, судя по данным бурения, может составлять десятки километров [29, 30, 47, 48, 81, 84]. Об особенностях блокового строения более глубоких частей фундамента сведения отсутствуют. Поэтому простирание блоков на значительные глубины может рассматриваться лишь с определенной степенью достоверности.

Как отмечалось (гл. 6), петрографические особенности и физические свойства пород фундамента принято изучать по керну, поднимаемому в процессе бурения лишь из самой его верхней (5–15 м) части. Но и в этом незначительном по мощности интервале во многих скважинах одновременно вскрываются метаморфические, интрузивные и эффузивные породы различного состава, значительно измененные метасоматическими процессами. Нередки случаи, когда породы кислого состава могут характеризоваться относительно повышенной плотностью по сравнению с более плотными основными породами,

и, наоборот, основные породы могут характеризоваться пониженными значениями параметра. Это затрудняет задачу изучения аномальных масс и делает ее практически невыполнимой из-за отсутствия данных о более глубоких частях фундамента. Результаты измерений плотностей пород кристаллического фундамента РТ по керну глубоких скважин, прошедших по фундаменту на глубины до первых километров, позволили нам установить, что различия средних значений параметра, характеризующих отдельные блоки, составляют сотые доли г/см³ (гл. 6). На основе этих и геологических данных выполнены теоретические расчеты аномального гравитационного поля по схематизированным плотностным моделям вдоль региональных профилей, пересекающих в крест простирания блоки фундамента Южно-Татарского свода.

Модели построены с целью определения возможной интенсивности и характера гравитационных аномалий, создаваемых изменчивостью масс в земной коре. Качественная интерпретация моделей также позволила определить «глубинность» метода и оценивать достоверность решений обратных задач при сопоставлении с результатами высокоточных гравиметрических измерений на участках объектов поисков.

Расчеты выполнены для определения возможного гравитационного влияния, создаваемого блоками различной мощности по вертикали путем увеличения глубин их нижних кромок (подшвы) при постоянной близкой к реальной глубине поверхности блоков в изучаемом регионе.

Модели представлены в двух вариантах: при задании постоянных средних значений плотностей в отдельных блоках и блоках, аппроксимированных увеличенным количеством призм, имитирующих в латеральном направлении изменения параметра. Результаты, полученные на обеих моделях, практически совпадают.

Задача определения модельных форм и гравитационного влияния разломов, разделяющих блоки, часто простирающихся на глубину под локальными структурами осадочного комплекса и одновременно являющихся ослабленными зонами фундамента, является более сложной. Плотностные особенности интрузивных кислых и основных пород в пределах разломов могут значительно различаться большим разнообразием форм и размеров, а наблюдаемое разуплотнение пород на контактах между блоками может компенсироваться их гравитационным влиянием. Проведение теоретических расчетов для определения их возможного гравитационного влияния оказывается практически невозможным из-за отсутствия сведений о размерах, формах, глубинах расположения и плотностных особенностях аномальных масс. Их влияние может взаимно компенсироваться и создаваемое ими суммарное поле, вероятно, является частью его фоновой составляющей.

Формы и размеры аномальных масс в более глубоких частях земной коры практически неизвестны. Проведение каких-либо расчетов может позволить получить лишь приближенные данные об их возможных вариантах притяжения, влияние которых может отобразиться лишь на фоновой составляющей поля.

Интенсивность латеральной изменчивости плотностей, создаваемая блоковым строением кристаллического фундамента, на порядок превышает влияние ее изменения на участках нефтеносных структур. Расчеты возможного отображения блокового строения фундамента в гравитационном поле, основанные на данных о его плотностных неоднородностях (гл. 6), позволяют прийти к заключению, что латеральная изменчивость масс в земной коре, отображаемой в гравитационном поле, в основном создается блоковым строением фундамента.

Примеры изменения плотностей, определенных по керну из глубоких скважин, приведены на рис. 21.

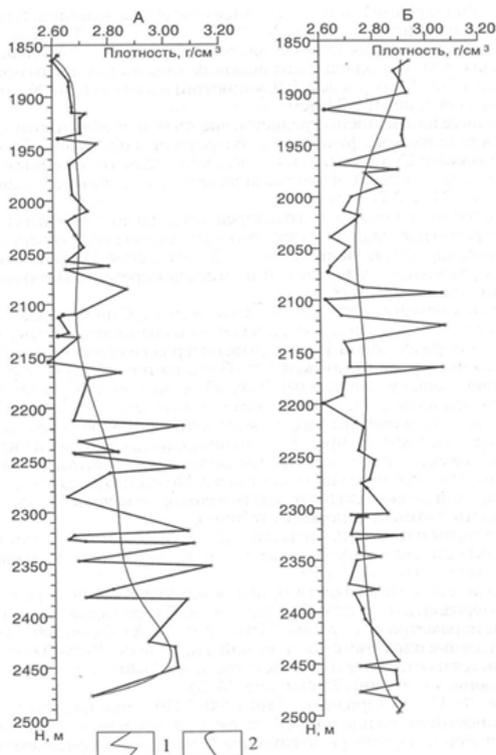


Рис. 21. Диаграммы плотностей пород в скв. 678 (А) и 20015 (Б): 1 – диаграммы значений плотностей; 2 – осредненные диаграммы плотностей

Решения прямых задач (гл. 7, 8), основанные на установленных плотностных неоднородностях пород на участках нефтеносных структур и в кристаллическом фундаменте (гл. 5, 6), позволили выявить особенности их отображения в аномальном гравитационном поле и разработать эффективную методику решения обратных задач.

Глава 12

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА МЕТОДОМ ГГМ

При изучении блокового строения и структуры кристаллического фундамента к методике полевых измерений должны предъявляться другие, менее строгие требования, по сравнению с требованиями к выявлению нефтеносных структур. Поскольку аномальные массы фундамента находятся на глубинах, измеряемых единицами и первыми десятками километров, создаваемые ими изменения гравитационного поля достигают первых десятков мГал. Для выявления масс фундамента гравиметрические измерения должны проводиться вдоль профилей, протяженность которых может составлять сотни километров. Простирание профилей должно быть близким к прямолинейным, что на практике по ряду причин (наличие речной системы, лесных массивов, болот, населенных пунктов и др.) часто бывает практически невозможным. В отдельных случаях (при протяженности профилей первые десятки километров) гравиметрические измерения целесообразно проводить с расстоянием между пунктами 1–2 км.

В отличие от решения задачи прогнозирования нефтеносных структур, здесь нет необходимости выполнения высокоточных измерений, поскольку создаваемые структурами локальные изменения поля на порядок меньше влияния масс фундамента, расположенных на больших глубинах. Такие изменения поля практически могут сливаться с аномалиями, создаваемыми изменчивостью масс фундамента. Поэтому погрешность гравиметрических наблюдений вдоль профилей порядка ± 0.1 мГала является достаточной.

Результаты мониторинга представлены в виде графиков вариаций гравитационного поля, отображающих его изменения, создаваемые геологическими процессами в ВЧР. Изменения поля в течение рассматриваемого периода не превышают 20 мкГал.

При проведении измерений гравиметрами типа Scintrex может применяться оперативная методика однократных наблюдений относительно одного-двух исходных пунктов. Для измерений также могут использоваться гравиметры типа ГАК, требующие создания опорной сети и более трудоемкой методики наблюдений. Для определения высот и плановой привязки заранее устанавливаемых на местности гравиметрических пунктов может применяться техническое нивелирование и GPS.

Помимо этого, на начальном этапе поисково-разведочных работ на нефть и газ могут быть использованы уже построенные по данным предшествовавших съемок гравиметрические карты аномалий Буге масштабов 1:50 000 – 1:100 000. По картам могут быть определены значения поля вдоль проектируемых региональных профилей. Решение обратных задач методом ГГМ по таким профилям позволяет создавать физико-геологические интерпретационные модели и схематические глубинные разрезы, содержащие информацию о блоковом строении кристаллического фундамента и зон разломов, отражающихся в осадочном комплексе.

При изучении блокового строения кристаллического фундамента использовались априорные данные о плотностных особенностях пород, полученные по керну, поднятому из глубоких скважин, прошедшим на глубину до 1–2 км [84].

Результаты измерений плотностей по глубоким скважинам и проведение теоретических расчетов возможного характера

гравитационных аномалий, создаваемых изменчивостью масс в консолидированной земной коре, явились физико-геологической основой для решения обратных задач. Применение метода ГГМ, нацеленного на изучение блокового строения кристаллического фундамента, позволило создавать достаточно достоверные плотностные модели и глубинные разрезы земной коры. Об этом можно судить по результатам решения обратной задачи, представленной в качестве примера по одному из региональных профилей (рис. 22, 23).

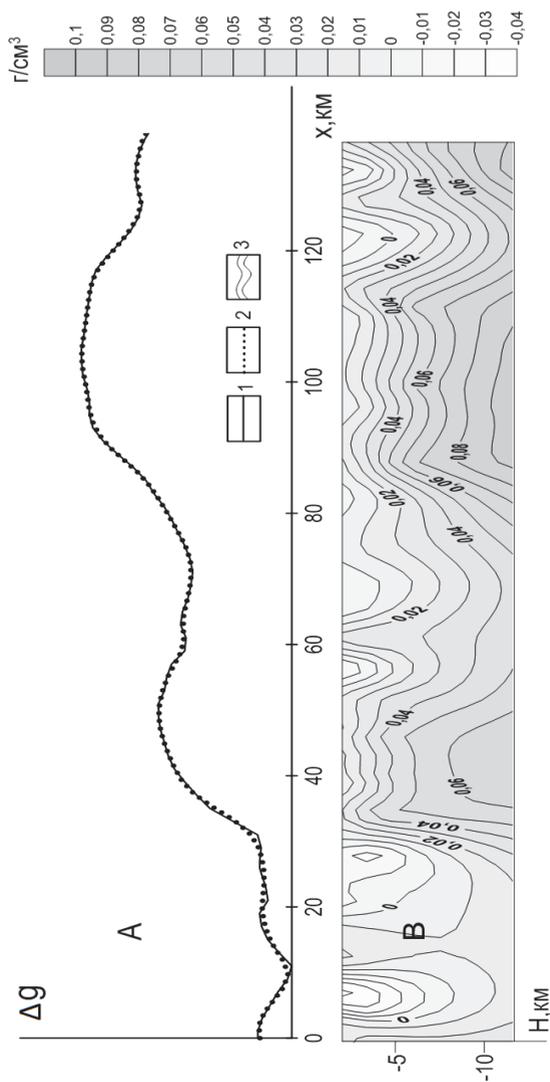
На рисунке 22 приведены результаты применения метода ГГМ вдоль профиля I, пересекающего в широтном направлении Мелекесскую впадину и западный склон Альметьевского макроблока. Протяженность профиля составляет 140 км. В результате решения обратной задачи определена изменчивость аномальных величин плотностей вдоль профиля до глубины 12 км (рис. 22).

Измеренное и подобранное поля совпадают с высокой точностью.

Результаты решения обратной задачи методом ГГМ по региональному профилю 1 также представлены более детально в изолиниях (рис. 24, 25).

В качестве примера приведены результаты геолого-геофизического моделирования методом ГГМ для профиля IV, пересекающего Южно-Татарский свод в северо-восточном направлении.

Как видно, на обоих профилях наблюдается полное совпадение измеренного и подобранного (теоретического) полей, а на плотностных моделях и геолого-геофизических разрезах четко прослеживалось блоковое строение кристаллического фундамента, что свидетельствует о высокой геологической достоверности изучения его строения методом ГГМ.



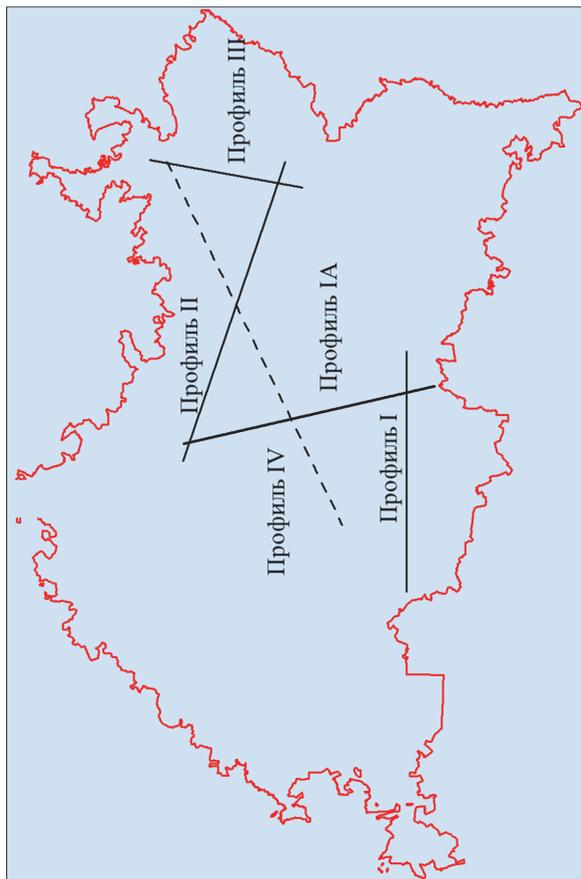


Рис. 23. Схема расположения профилей гравиметрических измерений при изучении глубинного строения в центральной части Южно-Татарского свода РТ

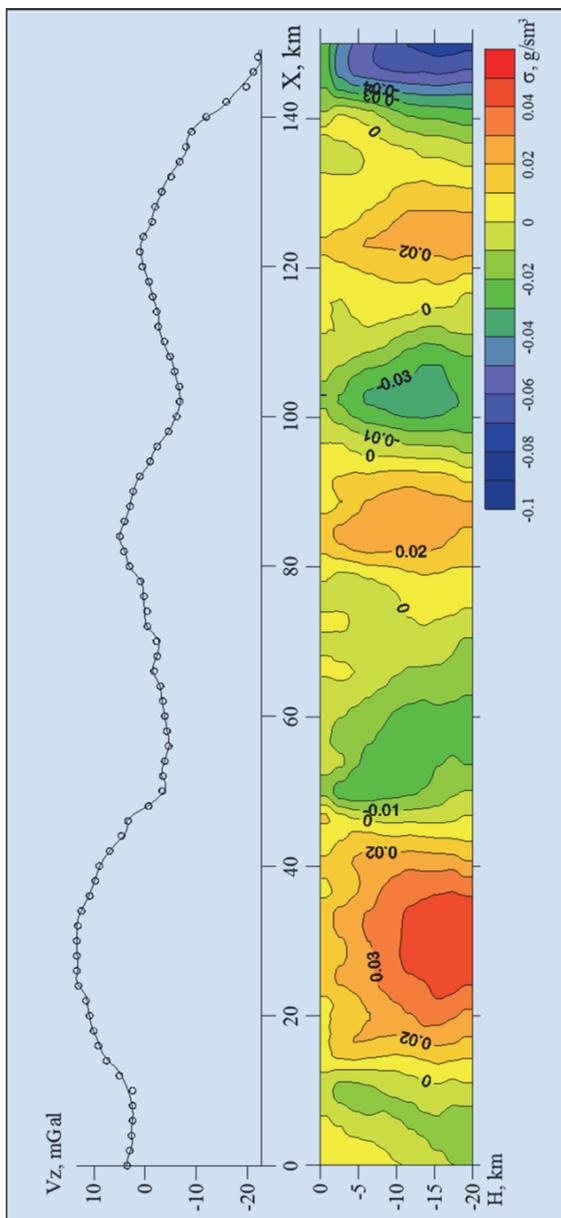


Рис. 24. Результаты решения обратной задачи методом ГМ по профилю IV

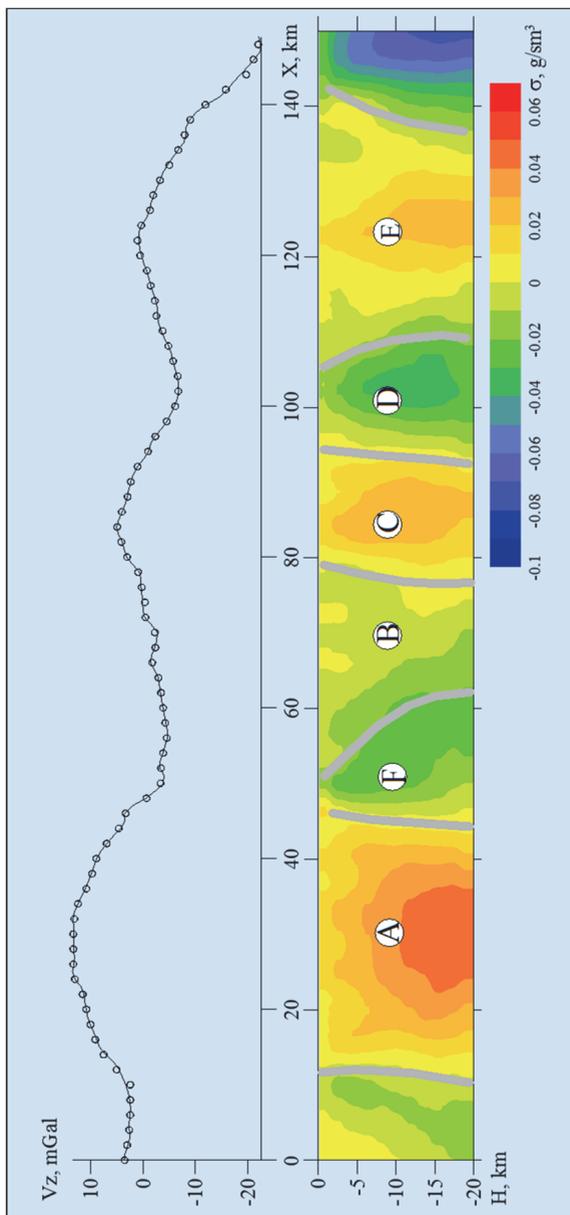


Рис. 25. Схематический геолого-геофизический разрез по профилю IV с отображением блокового строения кристаллического фундамента

Результаты применения метода ГГМ при изучении блокового строения кристаллического фундамента в отличие от результатов, получаемых методами трансформаций поля, характеризуются высокой геологической достоверностью.

Применение метода ГГМ является достаточно эффективным при изучении блокового строения кристаллического фундамента, оказывающего влияние на скопление углеводородов в перекрывающем его осадочном комплексе.

Результаты геологической интерпретации гравитационного поля вдоль региональных профилей целесообразно использовать при выборе площадей для проведения детальных профильно-площадных высокоточных гравиметрических работ, направленных на изучение геологического строения нефтяных месторождений и прогнозирование скоплений углеводородов. Эти результаты также должны представлять несомненный интерес для изучения возможной динамики поступления углеводородов из глубин земной коры в перекрывающий ее осадочный комплекс и прогнозирования их скоплений в самом фундаменте.

Очевидно, что в начальный период поисково-разведочных работ гравиметрические исследования должны быть направлены на изучение блоковой структуры кристаллического фундамента, выделение тектонически-активных зон разломов, отображаемых в осадочном комплексе, и выявление площадей для постановки детальных геолого-геофизических работ.

Результаты геологической интерпретации аномального гравитационного поля вдоль региональных профилей должны быть использованы при выборе площадей для последующего проведения детальных профильно-площадных высокоточных гравиметрических работ, направленных на изучение геологического строения нефтяных месторождений и прогнозирование скоплений углеводородов. Эти результаты также должны

представлять несомненный интерес для изучения динамики поступления углеводородов из его глубин в вышележащий осадочный комплекс и прогнозирования возможного их скопления в самом фундаменте [29, 30, 84].

Для решения задачи прогнозирования возможных скоплений углеводородов в фундаменте на отдельных наиболее перспективных участках профилей целесообразна постановка профильно-площадных высокоточных гравиметрических измерений с последующей их интерпретацией методом ГГМ в варианте 3D.

Таким образом, латеральная плотностная неоднородность осадочных толщ, закономерно проявляемая на участках нефтеносных структур осадочного комплекса и изменчивость плотностей, создаваемая блоковым строением кристаллического фундамента, являются основными физико-геологическими факторами, отображающими изменчивость масс в земной коре. Поэтому нацеленность гравиметрического метода на выявление создаваемых ими аномальных изменений гравитационного поля должна играть решающую роль при решении задач нефтяной геологии.

Глава 13

РАЗВИТИЕ И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КАЗАНСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

В Республике Татарстан под руководством Директора Института геологии и нефтегазовых технологий ИГиНГТ, проректора по направлениям нефтегазовых технологий, природопользования и наук о Земле КФУ Даниса Карловича Нургалиева реализуется проект Научно-образовательного центра мирового уровня НЦМУ. Одной из главных его задач является создание циркулярной экономики для уменьшения выбросов вредных веществ и парниковых газов. «Реализуется проект национального плана адаптации экономики к неблагоприятным изменениям климата и проект создания низкого уровня выбросов парниковых газов» [37].

Данис Карлович Нургалиев принял участие в работе прошедшего в Альметьевске ежегодного Нефтяного саммита Татарстана. Помимо особенностей технологий новых нефтяных месторождений он отметил эффективность разработки гигантского Ромашкинского месторождения с использованием для этого технологий, разработанных в НЦМУ. Это требует развития геолого-геофизических технологий, которые эффективно развиваются, внедрены в производство и применяются в других странах [31–36, 40, 49, 88, 93, 94–97].

Возникает потребность развития и внедрения технологий гравиметрического метода, поскольку аномальное гравитационное поле зависит от изменчивости в земной коре только одного физического параметра пород – плотности. Поэтому прямые задачи гравиразведки имеют однозначные решения для моделей геологической среды любой сложности, что позволяет более достоверно решать обратные задачи. В других геофи-

зических методах изменчивость измеряемых полей зависит от изменений нескольких параметров. Поэтому прямые задачи не имеют однозначных решений, что влияет на достоверность решений обратных задач.

Гравиметрический метод, или гравиразведка, широко применяется в нефтяной геологии. Нами разработан эффективный метод выявления нефтеносных структур, который в отличие от часто применяемых на практике трансформаций аномалий Буге, позволяет решать обратные задачи на количественном уровне. При этом одновременно создаются плотностные модели прогнозируемых структур, и оценивается их геологическая достоверность по априорной информации (гл. 6).

Применяемые в ИГиНГТ методы направлены не только на увеличение нефтеотдачи, но и позволяют существенно уменьшить выбросы грязных веществ, а также двуокиси углерода при добыче высоковязкой нефти.

Ученые ИГиНГТ КФУ создают и развивают и новые «зеленые технологии», направленные на снижение выброса парниковых газов в атмосферу и негативного их воздействия на окружающую среду, сокращение потребляемых ресурсов, уменьшение количества отходов вплоть до полного их возврата в производство путем глубокой переработки с учетом изменений климата.

В созданном под руководством Д.К. Нургалиева Центре мирового уровня НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты» эффективно развивается экологически чистая «ресурсосберегающая энергетика». С февраля 2022 г. в его работе принимают активное участие более 100 российских и зарубежных ученых, разрабатывающих методы получения дешевой, экологичной нефти и решающих задачу увеличения ее запасов.

Центром дополнительного образования, менеджмента качества и маркетинга ИГиНГТ, возглавляемого его директором И.А. Чукмаровым, разработаны десятки программ подготовки, переподготовки и повышения квалификации по геологии и геофизике, моделированию, разработке месторождений нефти и газа, бурению, геодезии и маркшейдерского дела, метрологии, менеджмента. Программы успешно осуществляются не только в КФУ, но и с выездом на места слушателей. Реализуется более 200 уникальных программ повышения квалификации, профессиональной переподготовки. Желающие могут создавать свои дистанционные программы повышения квалификации или профессиональной переподготовки.

Организуются новые курсы в соответствии с уникальными запросами отдельных компаний. При реализации курсов привлекаются ресурсы КФУ (лаборатории, аудитории, профессорско-преподавательский состав), а также ресурсы партнеров КФУ. Обучение проводится с применением ведущих программных продуктов и с участием их разработчиков. В числе заказчиков и партнеров – ведущие компании России и других стран. После успешного завершения обучения выдается удостоверение или диплом установленного образца Казанского федерального университета.

Глава 14

ГАЛАКТИКА МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ И МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗЕМЛИ

Наша планета Земля с огромной скоростью движется по сложной траектории в мировом пространстве. На современном этапе астрономо-космических исследований считается установленным, что масса всех наблюдаемых объектов во Вселенной составляет 5 %, а остальное изучаемое ее пространство состоит из 72 % (68 %) так называемых темной энергии и 23 % темной материи, что позволяет считать Вселенную недостаточно изученной.

На процессы, происходящие на поверхности Земли и в ее глубинах, оказывают значительное гравитационное влияние притяжение Луны, Солнца и других планет.

Поскольку Луна, значительно ближе расположена к Земле по сравнению с Солнцем, при ее вращении вокруг планеты на разных широтах с различной интенсивностью дважды в течение суток происходят приливы и отливы в океанах, морях, крупных озерах и реках.

С воздействиями Солнца и его энергетикой связаны многие процессы на Земле, которые определяются по наблюдениям в различных обсерваториях и на специальных станциях [104, 105].

В нашей Галактике Млечный путь насчитывается от 200 до 400 миллиардов звезд. Солнце – одна из звезд нашей данной Галактики и единственная звезда Солнечной системы. По спектральной классификации Солнце относится к типу желтых карликов. Средняя плотность Солнца составляет $1,4 \text{ г/см}^3$ (в 1,4 раза больше, чем у воды). Солнце состоит из водорода (73 %), гелия (25 %), кислорода, углерода, неона, азота, железа, магния, крем-

ния, серы, аргона, алюминия, никеля, натрия, кальция. Масса Солнца $M = (1,98847 \pm 0,00007) \cdot 10^{30}$ кг и составляет 99,866 % от суммарной массы всей Солнечной системы.

Солнечное излучение поддерживает жизнь на Земле. Солнце вырабатывает энергию путем термоядерного синтеза гелия из водорода.

Солнце – ближайшая к Земле звезда. Средняя удаленность Солнца от Земли – 149,6 млн км, которые приблизительно равны этой астрономической единице. Солнце находится на расстоянии около 26 000 световых лет от центра Млечного Пути и вращается вокруг него по орбите, делая один оборот за 225–250 млн лет. Орбитальная скорость Солнца равна 217 км/с и световой год оно проходит примерно за 1 400 земных лет.

Среди звезд, принадлежащих к 50 самым близким звездным системам в пределах 17 световых лет, известным в настоящее время, Солнце является четвертой по яркости звездой.

Проходя сквозь атмосферу Земли, солнечное излучение теряет в энергии примерно 370 Вт/м², и до земной поверхности доходит только 1 000 Вт/м². В далеком прошлом путем фотосинтеза была получена энергия, запасенная в нефти и в других видах ископаемого топлива.

Приходящий на Землю солнечный ветер в основном состоит из электронов, протонов ядер гелия, других элементов и неионизированных частиц. С солнечным ветром связаны перемещение магнитного полюса на Земле, многовековая смена полюсов, магнитные бури и полярные сияния.

Уменьшение количества солнечных пятен, являющихся основным источником солнечного ветра, негативно влияет на биосферу Земли и других планет. Солнце посылает Земле свое тепло и свет в дневное время суток, под влиянием которых становятся реализованными возможности прогрессивного человечества [108, 119, 121, 122–126].

Магнитное поле Земли принято разделять на внутреннее, источником которого является земное ядро, и внешнее, создаваемое ионизацией атмосферы под воздействием солнечного излучения и электрических токов, возникающих в ионосфере и радиационном поясе Земли.

Магнитное поле солнечного ветра значительно ослабляет приходящие космические лучи из Вселенной. В период возрастания и спада солнечной активности, создаваемой аномальными магнитными полями Солнца, возникают солнечные вспышки по периферии солнечных пятен. Полный цикл изменения направления его намагниченности составляет 22 года. С 11-летней цикличностью солнечной активности связано изменение песчано-глинистых напластований, чередование засух и наводнений, изменение строения годичных колец деревьев и других явлений.

Проведение геолого-геофизических исследований позволило установить, что согласно известной модели К. Буллена Земля (XVIII в.) состоит из верхней твердой оболочки, земной коры и литосферы, верхней, средней, нижней мантии и земного ядра. К. Булленом также рассчитано распределение плотности, давления и изменение силы тяжести в глубинах Земли. Считавшаяся ровной поверхность верхней мантии в модели К. Буллена согласно результатам, полученным в XX столетии, в различных регионах испытывает поднятия и опускания амплитудой более 1 км [40]. Г. Гутенбергом (XVIII в.) по распределению продольных и поперечных волн впервые выделена поверхность ядра и изучены неоднородности его строения.

Земля проявляет свой беспокойный нрав в виде движений срединно-океанических горных хребтов в океанах, извержений вулканов, частых негативных воздействий землетрясений, перемещения оси ее вращения и магнитного полюса под влиянием процессов, происходящих в земном ядре. Извержение вул-

канов, происходящее на различных континентах земного шара с выделением энергии, создаваемое верхней мантией, своими негативными последствиями известно человечеству. Наибольшая сейсмическая активность и выделение внутренней энергии проявляются в Тихоокеанском поясе. В зависимости от глубины очага землетрясений их разделяют на неглубокие (очаг на глубине до 70 км), промежуточные (очаг на глубине от 70 до 300 км), глубокие (очаг на глубине более 300 км). Считается, что большинство землетрясений обусловлены течениями вещества в мантии, погружением океанических плит под континентальные, разрастанием дна океана вдоль Срединно-Атлантического хребта относительно его оси и другими причинами [112].

Наиболее значительные землетрясения в XX столетии, согласно опубликованным данным, произошли в следующих странах (в скобках указано число погибших людей): 1900 г. Индия (1 000); 1960 г. Марокко (12 000); Иран (12 300); 1970 г. Перу (66 794); 1976 г. Китай (242 000); 1978 г. Иран (25 000); 1988 г. Китай (1 000); 1990 г. Иран (50 000); 1995 г. Япония (5 000); 1999 г. Турция (15); 1999 г. Тайвань (3 000).

Подводные землетрясения, или цунами, характеризуются резким поднятием или погружением участков океанического дна. Высокоамплитудные волны высотой в несколько десятков метров у крутых незащищенных берегов с большой скоростью покрывают береговую часть суши на расстоянии более 10 км, производя катастрофические разрушения и уничтожая все живое на своем пути. Около 80 % цунами возникают в береговых частях Тихого океана. Например, цунами, произошедшее после извержения вулкана Кракатау в 1883 г., отобразилось в гаванях всего мира, уничтожив более 5 000 кораблей, и привело к гибели 36 000 человек. Особенно опасными также являются оползни, наиболее частые в Индонезии, где происходит большое осадконакопление в шельфе и часто возникают цунами,

сопровожаемые волнами высотой более 20 м. Мощное подводное землетрясение, подобное наземным, произошло в 130 км от побережья Камчатки: три волны высотой до 15–20 метров уничтожили город Северо-Курильск и ряд других населенных пунктов. Погибло более двух тысяч человек.

Заслуживает внимания изучение влияния подземных артезианских вод, расположенных на равнинах или в крупных тектонических прогибах. Артезианские воды – напорные подземные воды в водоносных пластах, образуемые между водупорными слоями. Они приурочены к артезианским бассейнам типа впадин, флексур и мульды. При вскрытии скважинами они поднимаются выше кровли водоносного пласта и фонтанируют. Для них характерны глубины в интервале от 100 до 1 000 м и могут оказывать заметное влияние на верхнюю часть геологического разреза (ВЧР).

Геологические процессы, происходящие в недрах Земли и на ее поверхности, активно проявляются движениями срединно-океанических горных хребтов в океанах, извержениями вулканов, частыми землетрясениями, перемещением оси планеты под влиянием процессов, происходящих в земном ядре. Извержение вулканов, происходящее на различных континентах земного шара с выделением энергии, создаваемое верхней мантией, с давних пор известно человечеству своими негативными последствиями.

Ураганы – огромный сгусток энергии, которая по своей мощности не уступает землетрясениям. Как бури и смерчи, они уничтожают все по пути их передвижения. Ураганы в Южной и Северной Америке (тропические циклоны) с не меньшей силой проявляют свой разрушительный нрав: ураганы в Атлантическом океане, Тайфуны в Тихом океане.

Бури (штормы), сопровождаемые обильным выпадением осадков и сильным ветром, могут проходить над водными

участками планеты и над сушей, где, наряду с разрушениями могут происходить оползни и селевые потоки. Масштабы бури настолько значительны, что она способна нанести значительный урон сельскохозяйственным угодьям, путям сообщения и другим важным объектам. Часто буря сопровождается поднятием с земли и переносом на дальние расстояния песка, пыли и снега в зимнее время.

Торнадо распространяются с огромной скоростью, выделяя большое количество энергии в атмосфере между земной поверхностью и дождевыми облаками. Остановить торнадо невозможно.

В периоды только некоторых из названных природных катастрофических процессов в XX в. количество жертв (в тысячах человек) составило: Циклон, 1942 г., Бангладеш (61); Тайфун, 1959 г. Япония (5.1); Циклон, 1970 г. Бангладеш (300–1000); Торнадо, 1989 г. Бангладеш (1.3); ураган 1998 г. Флорида (США), Гандурас, Никарагуа (более 10); 1999 г. Индия (более 10); ураган, 2005 г. (1.132). Отсюда можно предположить, как много людей ежегодно погибает по всему земному шару. Очевидно, что катастрофические процессы могут оказывать на нефтеносность лишь негативное влияние [111, 112].

Еще в XVII столетии жители островов Вест-Индии давали имена святым ураганам, приходившихся на день их начала. Это позволило упорядочить процедуру присвоения им имен. Всего существовал список имен ураганов, включавший 84 женских имени, а с 1979 г. тропическим циклонам стали давать и мужские имена. Традиция присваивать циклонам имена людей возникла в начале 1940-х гг. у метеорологов ВВС и ВМС США. Для удобства обмена информацией об ураганах, а также для исключения путаницы и сокращения текста при радио и телеграфных передачах. С 1953 г. Национальная служба погоды США,

а затем и Всемирная метеорологическая организация присваивают женские имена тропическим циклонам в Атлантике.

Воды океанов становятся теплее, от этого стало увеличиваться количество атмосферных вихрей, их интенсивность и мощность. По сравнению с 1970-ми гг. к 2005 г. продолжительность и интенсивность атмосферных бурь в Атлантическом и Тихом океанах возросла примерно на 50 %. В 2004 г. на Японию обрушилось 10 тайфунов, хотя прежний рекорд для Страны восходящего солнца составлял семь. В США в 2005 г. было зафиксировано 27 тропических ураганов. Наиболее часто начало и окончание проявления сезона тропических циклонов приходится на август – октябрь и заканчивается в январе.

Глава 15

СПУТНИК ЗЕМЛИ ЛУНА И ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НАШЕЙ ПЛАНЕТОЙ

Из-за близости к Земле Луна исследуется космическими аппаратами на окололунной орбите и приборами, расположенными на ее лунной поверхности, уже более 60 лет. Знание тонких эффектов вращения, физической либрации и нутаций Луны позволяет убедительно заглянуть во внутреннее строение нашего естественного спутника Земли.

15.1. Происхождение и эволюция Луны

Вопрос о происхождении Луны окончательно не решен. Считается, что возраст лунных пород колеблется в пределах 3,5 – 4,5 млрд лет и близок к возрасту Земли, что свидетельствует об одновременном происхождении системы Земля – Луна.

Эволюция Луны, согласно современным представлениям, включает пять основных этапов.

1. Началом первого этапа считается 4,6 млрд лет, когда, благодаря интенсивной бомбардировке Луны метеоритами из космического пространства, ее интенсивному гравитационному сжатию и нагреву поверхности солнечным ветром, подверглась расплаву вся Луна и достаточно мощный верхний слой.

2 этап – это повторное затверждение Луны с образованием материковой коры габбро-анортозитового состава – около 4,4 млрд лет.

3 этап – образование крупных депрессий поверхности и затухание метеоритной бомбардировки – 4 млрд лет.

4 этап – «Морской» – период 0,3–3,8 млрд лет.

5 этап – Современный «послеморской» этап эволюции – около 3,0 млрд лет. Существенными факторами преобразования поверхности этого этапа стали относительно слабая метеоритная бомбардировка, солнечный ветер и космические лучи, совместное действие которых привело к образованию обломочного поверхностного слоя реголита. В настоящее время начинается новый этап в исследовании Луны, когда на ее поверхности будет создана сеть геофизических и астрономических приборов: сейсмографов, гравиметров, магнитометров, радиотелескопов и др.

Гравитационные силы между Землей и Луной вызывают морские приливы и отливы на Земле. Два раза в течение суток подъем на Земле достигает 78 см, а в узких заливах мирового океана подъем воды достигает 20 и более метров. Земля и Солнце также вызывают на Луне слабые твердотельные приливы: наибольший прилив высотой 10 см происходит с периодом в 27 дней, менее 1 см – раз в полгода, приливы менее 1 мм происходят с периодами 1/3 месяца, 1 год и 6 лет. Это приводит к постоянному увеличению лунной орбиты на 4 см в год. Приливы замедляют вращение Земли примерно на 1,5 м/сек за столетие. Вращение Луны подвержено диссипации в результате приливного воздействия Земли и Солнца, а также вследствие турбулентного трения на границе мантии и жидкого ядра Луны. Через несколько сотен миллионов лет Луна далеко удалится от Земли и не будет наблюдаться полных солнечных затмений.

15.2. Стрoение и динамика лунного ядра

История образования лунного ядра пока неизвестна. Имеющиеся данные позволяют предположить существование твердого внутреннего и жидкого внешнего ядра, перекрытого частично расплавленным пограничным слоем. Судя по относительным размерам внутреннего и внешнего ядра, предпола-

гается, что ядро по объему на 60 % характеризуется жидким строением.

Накопленный объем данных о Луне и результатов исследований методами геофизики способствовал созданию новой научной дисциплины – Физика Луны или Лунная геофизика.

С 1959 г. были успешно осуществлены полеты к Луне более 60 космических аппаратов и космических кораблей серий «Луна», «Зонд» (СССР, 1959–1976), «Рейнджер» (США). С них была проведена фотосъемка видимой и невидимой сторон Луны. Космические станции «Сервейер» (США, 1966–68 гг.) передали данные анализа химического состава и физико-механических свойств лунного грунта на Землю.

Пять космических аппаратов серии «Луна» и пять станций серии «Лунар Орбитер» (США, 1966–67 гг.) стали первыми искусственными спутниками Луны. По их данным была получена информация о ее гравитационном, магнитном полях и результаты крупномасштабного фотографирования поверхности. Космическими кораблями «Аполлон» были выполнены 9 пилотируемых полетов к Луне (1968–72 гг.), включая высадку 5 космонавтов на лунную поверхность. Магнитометрические измерения, выполненные в апреле 1998 года, свидетельствуют о наличии металлического ядра радиусом 250–430 км. Повторный анализ сейсмических данных миссии Аполлон показал наличие двухслойного лунного ядра: внешнее жидкое и внутреннее твердое ядро.

Авторами обзора о Луне и другими исследователями выполнено обобщение имеющихся сведений о внутреннем строении Луны, особенностях энергетики и процессах, происходивших на ее поверхности [126–132]. Проведено моделирование зависимости полученных периодов свободного вращения спутника от радиуса, плотности и химического состава ее ядра.

Предложен геофизический, тепловой, температурный и минеральный разрез Луны и структурная детализация лунного двухслойного ядра на базе последних данных лунных наблюдений, экспериментов и компьютерного моделирования. Установлено, что разница между самой высокой и самой низкой точками на поверхности Луны составляет 19,8 км.

В настоящее время Луна проходит по своей орбите на расстоянии примерно 58 радиусов Земли с периодом в 27 земных суток и удаляется от нее со скоростью 4 см в год.

С 2007 г. активизировались исследования космических агентств по Луне в Японии (Кагуя), впервые обеспечившей за годовой период время пребывания на лунной орбите высокоточное топографическое и гравитационное картирование всей лунной поверхности, включая ранее недоступные области обратной ее стороны, Китая и Индии. С помощью бортового лазерного измерителя «Кагуя» определены высоты 6,8 млн точек на всей поверхности Луны, включая полярные зоны, с погрешностью в пределах 4 метров. Удалось изучить также зоны лунных полюсов, куда не попадает солнечный свет. Наиболее высокая точка Луны находится на краю кратера Дирихле Джексона вблизи экватора и возвышается над ее поверхностью на 11 км. Наиболее глубокая впадина на Луне находится на дне кратера Антониади около южного полюса, погруженного на 9 км от уровня поверхности Луны.

В 2012 г. проведены исследования Луны по американской миссии “GRAIL” (NASA, США), результатом которой явилось построение моделей гравитационного поля до 1 200 порядка. Точность модели гравитационного поля Луны была улучшена вначале на три-четыре порядка по сравнению с предыдущими его моделями. Поверхностное разрешение гравитационного поля характеризуется высокой корреляцией с результатами лунной топографии, определенной зондом LRO.

По результатам проведенных исследований средняя мощность коры на видимой стороне Луны близка к 35 км. Пористость лунной коры на видимой и невидимой ее сторонах изменяется в пределах 5 %–20 %. Перепад температур на поверхности Луны составляет +280 градусов по Цельсию. Днем она достигает плюс +107, а ночью снижается до -173.

Для будущих миссий на южном полюсе Луны рекомендована площадка размерами 2км x 1.5 км.

15.3. Атмосфера Луны

Атмосфера Луны чрезвычайно разрежена до глубокого вакуума. Содержание газов у поверхности в ночное время не превышает 2-х микрочастиц объемом 2 см³ и увеличивается днем на два порядка за счет дегазации лунного грунта. На лунной поверхности выделяются два основных типа геологических и геоморфологических образований – материки и моря. Материки – это светлые области с неровным рельефом, возвышающиеся на 1–2 км над прилегающими равнинами лунных морей и занимающие около 85 % всей поверхности Луны. Поверхность материков покрыта кратерами различных размеров диаметром от десятков метров до сотен км. Наиболее хорошо сохранившиеся кратеры демонстрируют все признаки ударно-взрывного происхождения. Лунные моря представляют собой равнины, заполненные базальтовой лавой. Они в основном сосредоточены на видимой стороне Луны. На ее обратной стороне выделены два «морских» бассейна – Море Восточное и Море Москвы. Моря расположены в депрессиях (прогибах) материковой коры; образование некоторых связывают с падением на Луну крупных небесных тел типа астероидов и комет. Поверхность лунных морей также покрыта метеоритными кратерами, но их число и размеры существенно меньше, чем на материках.

Структура атмосферы Луны изменяется в зависимости от смены ее фаз. Она содержит многочисленные простейшие молекулы очень низкой концентрации. Их пылевая составляющая неоднородна и образуется при падении многочисленных микрометеоритов. Их за время измерений наблюдалось до 10 тысяч.

В декабре 2013 г. успешно совершил посадку на Луну китайский посадочный модуль «Чанг – 3» с луноходом “Yutu”. Данная китайская миссия продолжается в настоящее время и впервые дает богатую научную информацию об обратной стороне Южного полюса Луны, с 3 января 2019 года.

Миссия «Чанъэ – 5» впервые со времен исследований советской «Луны – 24» доставила на Землю относительно молодые лунные базальты. Они были использованы для вычисления возраста пород в месте посадки модуля и уточнения геохронологической модели Луны.

Земля вместе с Луной участвуют в годовом обращении вокруг Солнца. Земля также вращается вокруг своей оси с периодом в одни сутки или 24 часа, а лунные «сутки», полный оборот Луны вокруг своей оси, составляют более 27 земных дней. Орбита системы Земля – Луна представляет собой эллипс, в одном из фокусов которого расположено Солнце. Плоскость земного экватора не совпадает с плоскостью орбиты и наклонена к ней под углом 23,5 градуса. Поэтому на Луне нет смены времен года.

Форма Луны близка к шару с радиусом 1 738,09 км. Средняя плотность Луны – 3,34 г/см³. Ускорение свободного падения на поверхности Луны равно 1,623 м/с² (в 6 раз меньше, чем на Земле). Первая космическая скорость для Луны составляет 1 680 м/с, а вторая космическая скорость – 2 375 м/с.

15.4. Внутреннее строение Луны

Из-за годичного движения Луны вместе с Землей вокруг Солнца лунные сутки составляют 29,53 земных суток и немного превышают период вращения Луны (27,33 суток) вокруг своей оси. Лунный день и лунная ночь длятся около 15 земных суток.

Реголит

В предварительных моделях предполагалось, что Луна покрыта мощным слоем пыли – реголита. Оказалось, что он представляет собой мелкообломочный материал, являющийся смесью мелких обломков горных пород и породообразующих остеклованных агрегатов частиц, возникающих при кратерообразующих процессах, стеклянных частиц и грунтовых брекчий, составляющих около 50 % (сцементированных угловатых до 15 см).

Мощность реголитового слоя в районах морей находится в диапазоне от 4 до 8 м, на материках – 4–12 м. Средний диаметр зерен реголита – менее 1 мм. Он содержит и значительное количество обломков более крупного размера.

Внутреннее строение Луны изучено по записям отдаленных мелкофокусных лунотрясений и ударов метеоритов, зафиксированных на Луне сейсмометрами. Главная особенность внутреннего строения Луны – ее разделение на мощную, жесткую, достаточно холодную литосферу (до 1 000 км), в которой хорошо распространяются продольные и поперечные сейсмические волны, и внутреннюю, центральную область в состоянии полного или частичного расплава, через которую не проходят поперечные сейсмические волны.

Согласно современным моделям, под слоем реголита величиной в 4–12 м располагается материковая кора, мощность которой на видимой стороне Луны составляет в среднем около

35 км, а на невидимой – 65 (60–70) км. Мощность «морских» базальтов, перекрывающих материковую кору, колеблется от 1 до 20 км. В среднем мощность лунной коры оценивается в 45 км. Под корой находится мантия, которая подразделяется на верхнюю (55–220 км), среднюю (220–650 км) и нижнюю (650–1 200 км).

15.5. Полезные ископаемые на Луне

Все большая доступность Луны для космических аппаратов позволила поставить вопрос о поисках и добыче минерального сырья на естественном спутнике Земли. С Луной связаны значительные ресурсы важных полезных ископаемых, которые в лунных породах могут встречаться в содержаниях больших, чем в их земных аналогах. Строение Луны описывается 5-слойной моделью, которая состоит из анортозитовой коры, оливина, пироксен-содержащей трехслойной мантии и железо-сульфидного двухслойного ядра.

В геологическом строении лунной поверхности наиболее распространены породы габбро-анортозитового состава, морские базальты, а также места выхода на поверхность пород промежуточного между мантией и корой слоя, который представляет особый интерес в связи с присутствием в нем многих редких металлов. В связи с развитием электроники они очень востребованы современной промышленностью. Добыча редких земельных элементов в мире неуклонно растет, что ведет к дефициту и росту на них цен. Редкоземельные элементы содержат: скандий, иттрий, лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций. Их запасы на Луне в виде отдельного слоя залегают под анортозитовой корой. Они обогащены калием, фосфором и содержат большое количество

редких и радиоактивных элементов, которые в земных условиях совместно не встречаются.

Характерной особенностью нахождения в редкоземельных элементах является их парагенезис с некоторыми редкими и радиоактивными элементами (U, Th, K40, Rb и др.), не встречающийся в земных условиях. Совместное нахождение в лунных породах широкого спектра ценных металлов может способствовать возрастанию их ценности.

Следует также отметить, что обнаружение в лунных породах гематита, образование которого связано с процессами окисления, позволяет пересмотреть взгляды на геохимию и особенности минералообразования в условиях лунной поверхности. Это дает возможность прогнозировать те полезные ископаемые, которые связаны с оксидными соединениями, что может значительно расширить прогнозируемую минерально-сырьевую базу на Луне.

На Луне имеются различные полезные ископаемые в значительном количестве для коммерческой добычи и транспортировки их на Землю, в том числе и такие редкие и редкоземельные металлы, как платина, никель, кремний, кобальт. Они используются в стратегических областях промышленности землян, таких как микроэлектроника, авиация, ракетостроение. В поверхностном слое лунного грунта (реголит, по мощности залегания достигающий 15 м) также аккумулирован редчайший на Земле изотоп гелия-3, который может существенно укрепить энергетический баланс мировой экономики Земли. Его запасы на Луне оцениваются в несколько миллионов тонн.

Луна, благодаря своим уникальным космическим ландшафтам, является весьма притягательным местом для космического туризма, который может привлечь значительные инвестиции на ее освоение, способствовать популяризации идеи космических

путешествий, обеспечивать мощный приток активных ученых и бизнесменов для освоения Луны.

Космический туризм потребует определенных инфраструктурных новаций и безопасных решений. Развитая инфраструктура, в свою очередь, будет способствовать более масштабному и глубокому проникновению человечества на Луну по всему спектру жизнедеятельности.

15.6. Стратегии научного и геологического освоения Луны

Стратегия включает:

- 1) анализ новых и разнообразных образцов с Луны;
- 2) обнаружение и характеристику полярного водяного льда и других лунных летучих веществ;
- 3) развертывание геофизических инструментов и создание глобальной геофизической сети;
- 4) идентификацию и характеристику потенциальных ресурсов для будущих исследований, разработку эффективного поисково-оценочного комплекса для обнаружения скоплений минеральных ресурсов;
- 5) размещение длинно-волновых радиоастрономических приемников на невидимой стороне Луны;
- 6) изучение динамической пылевой, зарядовой и плазменной среды Луны;
- 7) изучение биологической чувствительности растений к лунной экстремальной среде.

Использование космических ресурсов для исследований станет доступным и возможным благодаря прогрессу в наших знаниях о Луне, астероидах и кометах, более активному участию международного и частного секторов в космической деятельности и появлению новых технологий, которые пред-

ставляют интерес для землян, включая горнодобывающую промышленность, металлургию, материалы, энергетику, робототехнику и автономные системы.

Концепция научного и геологического освоения Луны должна быть основана на образовательных практиках и опробовании лунными аналогами на Земле. Впервые человечество будет использовать космические ресурсы на Луне: воду, водород, кислород, реголит, редкие металлы и другие полезные материалы.

Обучение основам геологических наук и использование специального геофизического оборудования было успешным для программы НАСА «Аполлон». Оно позволило провести несколько геологических и геофизических экспериментов на вулканических аналогичных территориях Луны и на Земле.

Водяной лед был обнаружен на полюсах Луны, но существующие лунные орбитальные данные не позволяют пока определить его горизонтальное и вертикальное распределение в масштабе от метра до ста метров для проведения горных работ.

Предполагаемые результаты должны быть достигнуты (2020–2031 гг.) с использованием мировых достижений, в идеале в виде скоординированных на международном уровне мероприятий, сопровождаемых новыми орбитальными данными. Для оптимизации общего научного подхода: будут привезены на Землю новые лунные образцы как минимум из двух неисследованных мест Луны с последующим анализом в лабораториях мирового уровня; будут проведены натурные измерения, проводимые на полярном водяном льду и на других полярных летучих веществах. Будут получены: наборы измерений хотя бы из одного геофизического пакета данных, проведены геохимические, минералогические и геофизические измерения на неполярных месторождениях, а также измерены составы пыли, плазмы и экзосферы на Луне; установлены новые лазерные от-

ражатели большого размера и долгоживущие радио-световые маяки, размещенные на видимой поверхности Луны.

Чем больше мы узнаем о нашем спутнике, тем больше и лучше мы будем понимать Луну как «планету» с полезными ресурсами, необходимыми для поддержания присутствия человека как на Луне, так и на Земле.

15.7. Перспективы геологического освоения Луны

Летучие компоненты лунного осадочного слоя реголита и гигантские вулканические интрузии с видимой и невидимой сторон Луны, слой чистого анортозита и открытие магний-шпинелевого анортозита и нового типа горных пород в лунных исследованиях за последнее десятилетие можно считать перспективными.

Стремительное развитие лунных программ различных стран и возникающая между ними конкуренция в области добычи полезных ископаемых на ближайшем спутнике Земли ставит вопрос о разработке эффективных дистанционных поисковых комплексов для выявления перспективных полезных ископаемых на лунной поверхности. Очевидно, что наибольшая эффективность поисковых работ может быть достигнута при предварительном зондировании поверхности орбитальными аппаратами с целью обнаружения благоприятных для поисков участков лунной коры. Дальнейшая проверка выявленных участков геологическими (горно-буровыми) методами будет производиться непосредственно на поверхности Луны при помощи спускаемых аппаратов.

Для дистанционного исследования поверхности космических объектов в настоящее время активно используются такие методы, как инфракрасное зондирование, магниторазведка,

электроразведка, которые позволяют выявлять скрытые структуры, благоприятные в том числе для скопления рудного вещества. С учетом наличия в лунных породах радиоактивных элементов эффективным может быть использование гамма-спектрометрии.

Трехмерное моделирование кратеров показывает, что лед не проникает в концентрированные подземные рудные залежи. Основные цели для геологоразведки – это ракетное топливо, вода, водород, кислород, расходные материалы для жизнеобеспечения и минеральное сырье, включая редкие и редкоземельные элементы. Ракетное топливо можно производить из воды местных источников (водяной лед на полюсах Луны), водород и кислород – из воды и лунных минералов. Строительные материалы можно производить из реголита и горных пород, обнаруженных на лунной поверхности. Металлы и материалы могут быть получены из оксидов и силикатов металлов, содержащихся в лунных породах.

Усилия, реализованные в период с 2020–2030 гг., должны обеспечить как минимум перечисленные ниже результаты для решения вышеуказанных приоритетов. Эти результаты должны быть достигнуты с использованием мировых достижений, в идеале в виде скоординированных на международном уровне мероприятий, сопровождаемых новыми орбитальными данными. Будут привезены на Землю новые лунные образцы как минимум из двух неисследованных мест Луны с последующим анализом в лабораториях мирового уровня; будут произведены натурные измерения, проводимые на полярном водяном льду и на других полярных летучих веществах; будут получены наборы измерений по меньшей мере из одного комплекса геофизических данных. Полученные данные о полезных ресурсах Луны смогут поддержать присутствие человека на Земле и на Луне.

Очевидно, что наибольшая эффективность поисковых работ может быть достигнута при предварительном зондировании поверхности с орбитальных аппаратов с целью обнаружения благоприятных для поисков участков лунной коры. Дальнейшая проверка выявленных участков геологическими (горно-буровыми) методами будет производиться непосредственно на поверхности Луны при помощи спускаемых аппаратов.

Таким образом, одной из первоочередных задач является разработка эффективного поисково-оценочного комплекса для обнаружения скоплений минеральных ресурсов и выбора первоочередных объектов для геологической эксплуатации.

По данным Международного астрономического союза, на Луне образовалось более 9 000 видимых кратеров из-за ударов метеоров, астероидов и комет за миллиарды лет. Они неравномерно распределены по лунной поверхности. Невидимая сторона Луны имеет более высокую концентрацию кратеров, по сравнению с видимой.

На видимой стороне Луны меньше прогибов (ям), потому что поверхность покрыта лунными морями – обширными участками твердой лавы, которые мы можем видеть невооруженным глазом с Земли как темные пятна на Луне. Считается, что эти поля лавы покрыли кратеры, которые в противном случае были бы отмечены на ближней стороне Луны. На обратной стороне Луны почти нет лунных морей, поэтому кратеры там не видны.

Предполагается, что лунные моря образовались в результате массивного столкновения около 4,3 млрд лет тому назад. В результате столкновений был создан бассейн Южный полюс – Эйткен – огромный кратер с максимальной шириной около 1 600 миль (2 574 км) и максимальной глубиной 5,1 мили (8,2 км), который является самой большой «ямой» на Луне,

подтверждающей образование ударных кратеров на планетах Солнечной системы.

Считается, что огромный массивный астероид, врезавшийся в Луну около 4,3 млрд лет тому назад, мог оказать негативное влияние на ее мантию.

Одним из потенциальных источников воды на полюсах является вулканическое выделение летучих веществ из недр Луны и последующая конденсация извергнутого водяного пара в виде поверхностного льда. Предполагается, что вулканы, извергавшиеся на Луне миллиарды лет тому назад, могли создать слой льда под лунной поверхностью. При соприкосновении с холодной Луной водяной пар замерзнет, образуя слой льда мощностью в несколько сот метров под лунной поверхностью, который может стать источником воды.

Даже миллиарды лет тому назад на Луне не было атмосферы. Но эти извержения вулканов высвободили значительное количество других газов, включая водяной пар. Этих газов было бы достаточно, чтобы покрыть Луну небольшой временной атмосферой.

Одним из потенциальных источников воды на полюсах также является вулканическое выделение летучих веществ из недр Луны и последующая конденсация извергнутого водяного пара на ее поверхности в виде поверхностного льда.

Создается модель для учета вулканической дегазации, ухода атмосферы в космос и накопления льда на поверхности в период пика лунной вулканической активности за 2–4 млрд лет.

Невидимая сторона Луны, в отличие от ее относительно видимой стороны, покрыта множеством холмов, расселин и кратеров. По данным измерений, видимая сторона Луны существенно тяжелее невидимой, а породы обеих сторон заметно отличаются друг от друга по химическому, изотопному и минеральному составу.

Согласно расчетам планетологов, падение крупного астероида на Луну произошло в последние моменты ее формирования, когда ее недра уже частично застыли. На компьютерной модели показано, что столкновение Луны даже с относительно небольшим астероидом должно было ее повторно расплавить и создать существенные различия в распределении пород в ее мантии, которая должна содержать титан, торий и редкоземельные металлы. Предполагается, что следы «перемешивания» недр Луны должны содержаться в образцах пород из лунного Океана Бурь, доставленных на Землю космическим аппаратом «Чанъэ – 5». Проанализировав образцы пород, доставленные на Землю космическим аппаратом «Чанъэ – 5», китайские планетологи разработали новую геохронологическую модель Луны.

Открытие водяного льда и воды может иметь большое значение для будущих лунных миссий человека.

Глава 16

СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН И СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ

Северный Ледовитый океан – это наименьший по площади и глубине океан Земли, расположенный в северном полушарии между Евразией и Северной Америкой. Площадь океана составляет 14,75 млн км², объем воды – 18,07 млн км³. Средняя глубина – 1225 м, наибольшая глубина – 5527 м в Гренландском море. Океан принято разделять на три обширные акватории: Арктический бассейн, Северо-Европейский бассейн и Канадский бассейн. Благодаря полярному географическому положению ледяной покров в центральной части океана сохраняется в течение всего года, несмотря на то, что находится в подвижном состоянии.

К Северному Ледовитому океану примыкают территории Дании (Гренландия), Исландии, Канады, Норвегии, России и Соединенных Штатов Америки.

Правовой статус океана на международном уровне не регламентирован. Фрагментарно он определяется национальными законодательствами арктических стран и международно-правовыми соглашениями.

В течение большей части года океан используется для морских перевозок, которые осуществляются Россией по Северному морскому пути, США и Канадой.

Климат Северного Ледовитого океана определяется его полярным географическим положением. Существование огромных масс льда усиливает суровость климата, обусловленную недостаточным количеством тепла, получаемого от Солнца полярными регионами.

Главной особенностью радиационного режима арктической зоны является то, что в течение полярной ночи солнечная ради-

ация не поступает. В результате этого в течение 50–150 суток происходит непрерывное похолодание подстилающей поверхности. Летом вследствие длительности полярного дня количество тепла, поступающего за счет солнечной радиации, достаточно большое. Годовая величина радиационного баланса на берегах и островах положительная, а в его центральных районах отрицательная.

В полярных районах количество осадков невелико, в субполярных, где доминируют западные ветры, оно гораздо выше. Значительная часть осадков выпадает над ледяным покровом океана и не оказывает большого влияния на водный баланс. Испарение в океане меньше, чем количество осадков.

В зимний период продолжительностью более 6,5 месяцев над океаном располагается устойчивая область высокого давления во время Арктического антициклона, центр которого смещен относительно полюса в сторону Гренландии. Холодные сухие массы арктического воздуха в зимнее время проникают вглубь окружающих океан материков вплоть до субтропического климатического пояса и вызывают резкое понижение температуры воздуха. Летом в июне – сентябре формируется Исландская депрессия, вызванная летним повышением температуры, а также под влиянием интенсивной циклонической деятельности. В это время сюда приходит тепло с юга за счет проникающего в полярную зону воздуха умеренных широт и за счет речных вод.

Колебание температуры в Арктике связано с распространением температурных аномалий вблизи Атлантического и Тихого океанов. На подходах к океану теплые воды Северо-Атлантического течения отдают в атмосферу более 70 % тепла. Это оказывает большое влияние на динамику воздушных масс. Огромная теплоотдача поступающих в Северный Ледовитый океан атлантических вод является мощным возбудителем ат-

мосферных влияний над обширной акваторией океана. Устойчивый в течение всего года Гренландский антициклон также существенно влияет на местную атмосферную циркуляцию и способствует образованию ветров, по своему направлению усиливающих эффект сброса вод из Северного Ледовитого океана в Атлантический.

Основное влияние оказывают отражательная и изоляционная способности ледяного покрова, которые зависят от сезонных и периодических изменений температур и осадков. На основании результатов наблюдений с начала XX в. за поверхностной температурой воздуха в Арктике выявлены изменения климата.

В период 1990–2000-х гг. к естественным колебаниям температур добавляется дополнительное внешнее воздействие, предположительно антропогенного происхождения, с которыми связаны отклонения температур от среднегодовой.

16.1. Геологическое строение и рельеф дна Северного Ледовитого океана

Большую часть рельефа дна Северного Ледовитого океана занимает шельф (более 45 % дна океана) и подводные окраины материков (до 70 % площади дна), чем объясняется небольшая средняя глубина океана, занимающая около 40 % его площади и характеризующаяся глубинами менее 200 м.

Северный Ледовитый океан окаймляют и частично продолжают под его водами материковые тектонические структуры: Северо-Американская древняя платформа; Исландско-Фарерский выступ каледонской Евразийской платформы; Восточно-Европейская древняя платформа с Балтийским щитом и находящаяся почти полностью под водой Баренцевоморская древняя платформа; Уральско-Новоземельское горное сооружение; За-

падно-Сибирская молодая платформа и Хатангский прогиб; Сибирская древняя платформа; Верхояно-Чукотская складчатая территория.

В российской науке океан принято разделять на 3 обширные акватории: Арктический бассейн, включающий глубоководную центральную часть океана; Северо-Европейский бассейн, включающий материковый склон Баренцева моря до 80-й параллели на отрезке между Шпицбергом и Гренландией; Канадский бассейн, включающий акваторию проливов Канадского архипелага, Гудзонов залив и море Баффина.

Северный морской путь (СМП) или Северный морской коридор (рис. 26, 27) – это кратчайший морской путь между Европейской частью России и Дальним Востоком. Законодательством России он определен, как «исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация России в Арктике.

В монографии автора [102] приведены результаты исследований, содержащие сведения о существовании горячего подземного водного океана на глубинах территории Западно-Сибирской низменности. Он является мощнейшим внутренним источником энергии Земли и оказывает большое влияние на ее нефтеносность. Пластовые и трещинные воды океана находятся под высоким давлением. Внутри него воды нижнего этажа лежат на глубине более километра и могут фонтанировать при вскрытии скважинами водоносных слоев [112, 113]. Для тектонического прогиба Западно-Сибирской низменности считается возможной связь разгрузки подземных вод с нефтеносностью. Считается установленным, что под ним существует «слоистый» горячий океан площадью более 3 млн кв. км, температура воды в котором повышается с глубиной до +150 градусов. Его верхний слой холодный, питающий глубокие колодцы чистой питьевой водой. Под ним на-

ходится теплый минерализованный слой, характеризующийся целебными качествами.

Мощность теплового потока, идущего из недр планеты, превышает общую мощность всех электростанций мира в десятки раз.

Бассейн включает два гидрогеологических этажа, разделенных слоем глинистых осадков, местами превышающих 8 км.

Нефтегазовые запасы Западной Сибири непосредственно связаны с водоносными комплексами нижнего этажа.

Подземный океан характеризуется глубиной относительно земной поверхности от нескольких десятков метров на юге до двух-трех километров на севере Западно-Сибирского бассейна. Температура воды, определяемая в буровых скважинах, на различных глубинах и широтах изменяется по-разному. В районе Тобольска температура воды на глубине 2.5–3.0 км достигает 100–150 градусов по Цельсию, под Бийском – Кустанаем составляет +5 – +10 градусов, на широте Петропавловска и Томска на глубине 0.5–0.6 км – +25 градусов, а вблизи Тюмени на глубине 1,5 км – +75 градусов. Предполагается, что на севере подземный горячий водный океан продолжается даже под дном Карского моря [102, с. 14–15].

По мнению автора, нельзя исключить того, что подземный океан может продолжаться далее на север Арктики и на его глубинах в недалеком будущем могут быть открыты нефтяные месторождения.

На морском дне Арктики выявляются «воронки» большой глубины и ширины. Как установлено, огромные «воронки», одна из которых может поглотить целый городской квартал вместе со строениями, появляются вдоль арктического морского дна по мере того, как затопленная вечная мерзлота тает и приводит к его интенсивному изменению. Также установлено, что изменение климата, связанное с деятельностью челове-

ка, повышает средние температуры в Арктике, а тающая вечная мерзлота, создающая эти воронки, способствует медленному распространению грунтовых вод. Таяние вечной мерзлоты приводит к обрушению части морского дна Арктики.

В связи с этим представляется целесообразным проведение геофизических измерений на многотонажных судах в режиме мониторинга вдоль Северного морского пути (СМП). Это может позволить изучать глубинные изменения, происходящие в Арктике, прогнозировать их возможное негативное влияние на суда и, возможно, корректировать их маршруты прохождения по Северному морскому пути. Может быть использована и спутниковая навигация.

Современные автоматизированные набортные гравиметры используются для комплексных геофизических измерений. Одновременно вдоль профилей определяются глубины дна океана эхолотом, мощности рыхлых осадков сейсмоакустической установкой. Определяется необходимая скорость корабля.

Северный морской путь – расположенная во внутренних морских водах, территориальных водах или экономической зоне РФ, прилегающих к северному побережью РФ и ее национальной транспортной коммуникация, включающая пригодные к ледовой проводке судна.

Существуют правила плавания по трассам северного морского пути. Министерством морского флота СССР в 1990 г. были разработаны и утверждены положения законодательства СССР и норм международного права.

Под проводкой судна по Северному морскому пути подразумевается, что оно в период всего плавания по северному морскому пути находится под постоянным наблюдением Штабов морских операций. Вся информация об изменениях навигационной обстановки на северном морском пути передается Шта-

бами морских операций через радиостанции «Диксон», «Ам-дерма», «Тикси», «Певек» и «Шмидта».

Маршруты кораблей в открытом океане различными странами выбираются самостоятельно и проходят вблизи определенных обозначенных на морских картах, имеющих у капитанов и лоцманов (сопроводителей), для соблюдения прохождения судов вдоль конкретных маршрутов.

Для России их два.

Маршрут 1: Мурманск, Нарьян-Мар, Диксон, Тикси, Певек, Анадырь, Петропавловск-Камчатский, Владивосток.

Маршрут 2: Мурманск, Диксон, Тикси, Проведения, Петропавловск-Камчатский, Владивосток, (Белое море, Карское море, Море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Охотское море, Японское море, соответственно).

Маршрут одной из зарубежных стран: Мурманск, Кандлакша, Онега, Архангельск, Мезень, Нарьян-Мар, Варандей, Ан-дерма, Сабетта, Диксон, Хатанга, Тикси, Певек, Мыс Шмидта, Эгвекино, Анадырь, Провидения, Петропавловск-Камчатский.

Маршруты кораблей других стран могут существенно различаться в зависимости от перевозки и особенностей различных грузов и мест их доставки.

В работе А.Г. Гайнанова и других исследователей приводятся результаты гравиметрических работ о строении земной коры мирового океана [135–144].

С 50-х гг. XIX столетия особое внимание стало уделяться усовершенствованию и разработке морских гравиметров во многих странах. Применение в 1956 г. разработанного К.Е. Веселовым во ВНИИ Геофизике гравиметра СЗ-1 в Антарктиде показало значительные преимущества перед маятниковыми приборами при волнении моря. Были разработаны морские широкодиапазонные автоматизированные набортные гравиметры АНГ с фильтрацией возмущающих ускорений. При

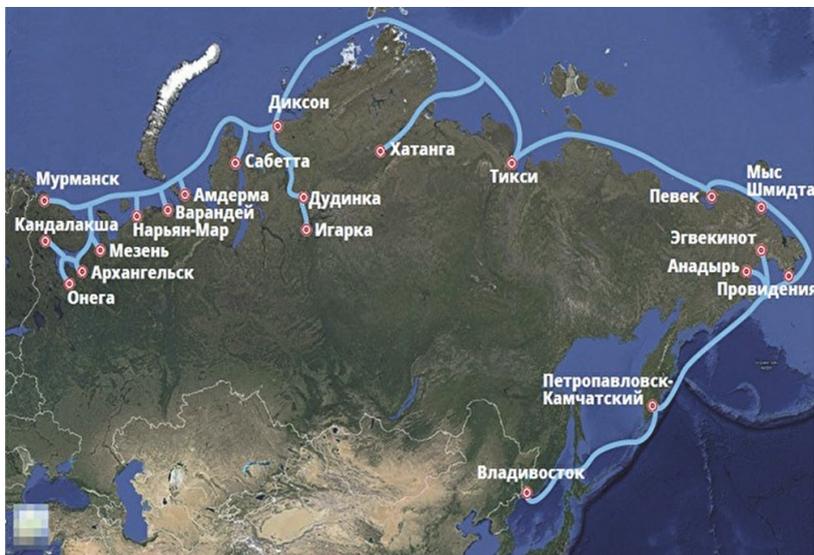


Рис. 26. Северный морской путь



Рис. 27. Северный морской путь

При этом погрешность измерений составляла 5–7 мГал. Морские испытания разработанного в 1967 г. гравиметра ГМПК показали возможность измерений гравитационного поля с погрешностью 1–2 мГала при волнениях моря до 3–4 баллов. На базе этого гравиметра были изготовлены морские гравиметры ГМН-72. Диапазон его измерений составил 700–5 000 мГал.

Наиболее широко применяются зарубежные гравиметры, погрешность измерений которых за 10–15 лет возросла до 1–3 мГал: Граф – Аскания GSS-2 (ФРГ), LCR «Лакоста – Ромберг» (США), TSSG (Япония) и др.

При морских продолжительных гравиметрических рейсах измерения удается выполнять только в портах захода научно-исследовательских судов, но надежные результаты измерений могут быть получены при небольших интервалах времени прохождения между портами.

В шельфовых зонах большое значение приобретает густота сети измерений и расстояние между профилями при проведении площадных гравиметрических съемок. Это позволяет восстанавливать непрерывное изменение гравитационного поля, которое может зависеть от особенностей интенсивности волнений морской поверхности и соблюдения принятых правил перемещения судна вдоль заданных морских маршрутов.

Было установлено, что переходные зоны от материков к океанам характеризуются сравнительно высокой подвижностью, а для морских бассейнов, образующихся на погружениях окраин континентов, характерна изменчивость дислокаций, влияющих на залегание осадочных отложений.

Перспективные на нефтегазоносность бассейны Тихого океана в основном располагаются в пределах одноименного подвижного пояса, а их большинство связано с внутрискладчатыми прогибами, образующимися на стыках зон с глубоковод-

ными котловинами внутренних морей. Всего здесь располагается более 60-ти бассейнов, в 20-ти из которых в морской или континентальных частях обнаружены месторождения нефти или газа.

Из 65-ти нефтегазоносных бассейнов Атлантического океана, в 38-ми доказано наличие нефтегазоносности.

При рассмотрении особенностей прохождения морских кораблей по Северному морскому пути нам казалось, что он может быть использован для проведения гравиметрических измерений морскими гравиметрами. Однако оказалось, что из-за низкой точности гравиметрических измерений, проводимых на морских кораблях, большой длительности морских маршрутов вдоль Северного морского пути, чрезвычайно большой стоимости работ данный способ практически отпадает. Чрезвычайно сложной является задача приобретения высокоточной гравиметрической аппаратуры, позволяющей надежно решать проблемы нефтегазоносности в условиях мирового океана. Поэтому представляется целесообразным выполнение гравиметрических измерений наземными гравиметрами в режиме мониторинга вдоль береговой зоны Карского моря, где, вероятно, продолжается подземный горячий водный бассейн, с которым связана нефтеносность Западно-Сибирской низменности. При ее обнаружении появится возможность постановки в шельфовой части моря гравиметрических измерений донными гравиметрами, а также с использованием специальных гондол с гравиметрами, спускаемыми с маленьких судов в морскую воду для устранения возмущающих ускорений и повышения качества измерений гравитационного поля [117]. Не вызывает особых трудностей проведение измерений в режиме мониторинга, что будет способствовать достоверности обнаружения нефтегазовых месторождений.

Получение положительных результатов позволит перейти к проведению гравиметрических измерений в режиме мониторинга вдоль береговой линии Карского моря, где должен продолжаться горячий подземный водный бассейн, с которым связана нефтеносность Западно-Сибирской нефти. Проведение гравиметрического мониторинга будет способствовать повышению надежности и достоверности выявления нефтегазовых месторождений в Карском море.

По мнению автора, нельзя исключить того, что, подземный океан может продолжаться далее на север Арктики и на его глубинах в недалеком будущем могут быть открыты нефтяные месторождения.

Создание и применение новых технологий в ближайшие годы должно повысить результативность обнаружения нефтегазовых месторождений в Карском и других морях Северного Ледовитого океана.

Новые возможности для науки

Из сообщения по ТВ 14.09.2022 года о начале работы в Арктике научной платформы с полным обеспечением проведения продолжительных исследований в Северном Ледовитом Океане:

«На ледостойкой самодвижущейся платформе «Северный полюс» впервые в мировой практике начали проводиться долговременные всесторонние исследования в Северном Ледовитом океане с целью изучения в сложных условиях арктического региона при полном обеспечении полярников, успешного изучения океанического пространства, высокой достоверности и надежности ожидаемых результатов».

Это позволяет констатировать, что изучению Арктики в нашей стране придается большое значение.

Результаты исследований впервые позволят изучить на больших глубинах строение земной коры под Северным Ледо-

вным Океаном и отображение влияний происходящих в нем процессов на вышележащие образования, изучение которых позволит наиболее достоверно решать задачи, связанные с прогнозированием нефтяных месторождений.

Из сообщения по ТВ 14.09.2022 года стало известно о начале работы в Арктике научной платформы (рис. 28) с полным обеспечением проведения продолжительных исследований в Северном Ледовитом океане. Это позволяет констатировать, какое большое значение придается изучению Арктики в нашей стране.

Результаты исследований впервые позволят изучить на больших глубинах строение земной коры под Северным Ледовитым океаном и отображение влияний происходящих в нем процессов на вышележащие образования, изучение которых позволит наиболее достоверно решать задачи, связанные с прогнозированием нефтяных месторождений.



Рис. 28. Платформа для проведения продолжительных исследований в Северном Ледовитом Океане [145]

Глава 17

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ДАЛЬНЕЙШЕМУ ПРИМЕНЕНИЮ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА В НЕФТЯНОЙ ГЕОЛОГИИ

Гравиразведка широко применялась при поисках нефтяных месторождений. Гравиметрическими съемками различных масштабов (от 1: 200 000 до высокоточных) было покрыто 92,6% бывшей территории СССР (17 млн км²) в XX столетии. При недостаточной точности полевых измерений и практическом отсутствии данных о плотностных особенностях земной коры их результативность оказалась малоэффективной. Некоторые идеи интерпретации полевых данных того периода в последующем получили развитие. Приближенный «палеточный» способ подбора контура прогнозируемого объекта в земной коре постепенно перешел в итерационный компьютерный процесс вычислений, применяемый до настоящего времени.

Многими геофизиками и геологами принято считать, что геофизические работы, проведенные до современных исследований, не заслуживают внимания. В то же время результаты, сохранившиеся в прошлых публикациях и научно-технических отчетах, могут представлять значительный интерес для повторной интерпретации и их дальнейшего продолжения на этапе современных исследований.

Нефтяные месторождения в осадочных комплексах пород в основном связаны с нефтеносными структурами различных морфолого-петрографических типов, различающихся по размерам, глубине залегания, особенностям формирования и протекания в их пределах вторичных процессов.

На современном этапе применения гравиметрического метода исследований при решении задач нефтяной геологии ча-

сто используются мелкомасштабные карты гравиметрических съемок, построенные по редкой сети пунктов измерений, которые позволяют получать лишь приближенные сведения о самом гравитационном поле. На картах фактически не отражены особенности геологического строения изучаемых территорий и отдельных площадей. На них истолкование поля сводится к рассмотрению лишь визуального простираения изолиний, связываемых с предполагаемыми геологическими объектами различных типов. По ним проводится математическая обработка карт (трансформаций), по которым решаемые геологические задачи, связываемые с предполагаемыми объектами, практически не отображаются. Растяжение и сжатие земной коры оказывает влияние на образование нефтеносных структур в осадочном комплексе, вторичные преобразования пород и изменения в подстилающем блоковом строении кристаллического фундамента.

Накопленный опыт решения задач нефтяной геологии гравиметрическим методом в Институте геологии и нефтегазовых технологий ИГиНГТ Казанского федерального университета свидетельствует о разработанной результативной технологии решения задач нефтяной геологии, широко внедренной в практику. Успешно решаются важные задачи выявления нефтеносных структур и изучения блокового строения кристаллического фундамента, оказывающего влияние на их формирование. Это позволяет считать целесообразным создание проекта, способствующего увеличению результативности решения задач нефтяной геологии с применением разработанного автором метода геолого-геофизического моделирования (гл. 6).

Можно выделить следующие основные задачи по проведению исследований:

1. Создание методического руководства по применению оптимальной методики высокоточных полевых измерений и гео-

логической интерпретации аномального гравитационного поля для повышения результативности проводимых исследований.

2. Повышение достоверности полевых гравиметрических и топографо-геодезических измерений путем исключения из практики геологической интерпретации мелкомасштабных трансформированных карт, содержащих большие погрешности.

3. Важной задачей является изучение особенностей изменчивости плотностей и других физических свойств пород на исследуемых площадях по лабораторным данным и результатам измерений ГИС.

4. Решение обратных задач гравиразведки на количественном уровне по разработанным в ИГиНГТ технологиям, оценка достоверности которых по априорным данным позволяет повышать достоверность выявления нефтеносных структур и изучать блоковое строение кристаллического фундамента.

5. Создание коллектива сотрудников гравиметрического направления в ИГиНГТ из числа магистрантов и аспирантов и их подготовка в Центре дополнительного образования, менеджмента и маркетинга. Задачей коллектива должна являться оценка требуемой достоверности выполняемых полевых измерений, геологической достоверности получаемых результатов исследований и выдача рекомендаций для постановки буровых работ.

6. Разработка технологий для учета выявления нефтеносных структур различных размеров и амплитуд гравиметрическим методом на площадях со сложным земным рельефом.

7. Поскольку достоверность решения задач нефтяной геологии гравиметрическим методом может снижаться с увеличением глубин их расположения, следует уделять особое внимание подбору участков исследований.

8. При проведении исследований на длительно эксплуатируемых нефтяных месторождениях является целесообразным вы-

полнение гравиметрических измерений в режиме мониторинга с целью выявления ранее пропущенных нефтеносных пластов.

9. С целью проведения гравиметрических измерений на новых площадях следует выделить средства гравиметрической лаборатории для приобретения высокоточных гравиметров, их эталонирования и проведения необходимого ремонта.

Приведенные рекомендации по дальнейшим исследованиям и применению в нефтяной геологии гравиметрического метода должны являться основой при решении задач нефтяной геологии магистрантами и аспирантами. Рекомендации также могут являться методическим пособием для геофизиков, геологов, нефтяников и для тех, кто проявляет интерес к важности изучения нефтяного потенциала нашей планеты.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Гравиметрический метод при решении задач нефтяной геологии

Гравиметрический метод разведочной геофизики, или гравиразведка, является одним из основных методов разведочной геофизики, широко применяемый для изучения глубинного строения земной коры и решения многих геологических задач. Метод заключается в изучении поля силы тяжести, естественного физического поля Земли (гравитационного поля) и плотности горных пород. Поле силы тяжести определяется путем измерений, проводимых в виде гравиметрических съемок различных масштабов на земной поверхности, в шахтах и скважинах, в морях и океанах, из воздушного пространства. Для изучения плотностей горных пород и их изменчивости в земной коре проводятся лабораторные, промыслово-геофизические и другие исследования.

Метод основан на законе всемирного тяготения И. Ньютона (1687), в соответствии с которым гравитационное поле является суммарным. В нем отражено влияние всех локальных масс, больших и малых, находящихся на различных глубинах в земной коре – комплексе пород от поверхности Земли до границы Мохоровичича (зоны Мохо). Земная кора неоднородна по своему строению. Она создается наличием континентов и океанических впадин, комплексом осадочных пород, подстилаемых кристаллическим фундаментом (консолидированной корой). Ее мощность изменяется от 7–8 км в океанах до 70 и более км в геосинклинальных областях.

Единица измерений силы тяжести называется Гал (1 Гал = 1×10^{-2} м/с²). Результаты гравиметрических съемок представляются в виде карт и графиков аномалий силы тяжести вдоль от-

дельных профилей в миллигалах ($1 \text{ мГал} = 1 \times 10^{-5} \text{ м/с}^2$) и микрогалах ($1 \text{ мкГал} = 1 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2$).

Понятие гравиметрической съемки включает: методику и технику полевых работ, обеспечивающих заданную точность измерений; вид и густоту съемочной сети; методику определения высот и координат гравиметрических пунктов; способов обработки результатов измерений и представляемых результатов (карт, графиков, каталогов, таблиц и пр.). Измерения проводятся в площадном и профильном вариантах. Площадная съемка может быть равномерной (пункты устанавливаются на одинаковом расстоянии), или неравномерной (задается число пунктов на 1 кв. км). Съемка может иметь профильно-площадной характер, при которой расстояние между пунктами измерений вдоль профилей задается постоянным, а расстояния между профилями могут соответствовать расстоянию между пунктами или превышать его в 4–5 раз. Профили должны быть прямолинейными, ориентированными в крест простирания прогнозируемых объектов. По результатам площадных съемок строят карты аномалий силы тяжести.

Профильная съемка проводится по отдельным выборочным профилям, вдоль которых строятся графики аномалий силы тяжести. Гравиметрические измерения выполняются вдоль отдельных профилей для проведения количественной интерпретации на участках отдельных аномалий, выявленных по результатам площадной съемки, а также при региональных исследованиях с целью изучения глубинного строения земной коры.

Гравиметрическая съемка заключается в создании системы опорных (ОП) и рядовых пунктов (РП). Создание опорных пунктов основывается на тех же принципах, по которым создаются геодезические сети. Исходный пункт мировой гравиметрической системы находится в г. Потсдам (исходным пунктом геодезической сети является нулевая отметка на футштоке Бал-

тийского моря). Относительно этого значения на территории СССР (более 16 млн кв. км) было создано 4 исходных пункта в городах Пулково, Полтава, Москва, Казань. Относительно этих пунктов создана сеть гравиметрических пунктов 1-го и 2-го классов, которые являются исходными для создания местных опорных сетей при проведении гравиметрических съемок различных масштабов. При их создании к ним предъявляются различные требования по густоте сети, точности измерений силы тяжести, высот и координат пунктов, сечению изолиний поля на гравиметрических картах. В зависимости от масштабов съемок решаются различные геологические задачи.

Опорные сети – это система пунктов повышенной точности гравиметрических измерений, относительно которых проводятся измерения на рядовых пунктах и выполняется контроль измерений. Погрешность измерений на опорных пунктах достигается применением более точных гравиметров и увеличением кратности измерений, и должна в 1.5–2.0 раза превышать погрешность измерений на рядовых пунктах.

Измерения на местных опорных сетях проводятся относительно исходных пунктов гравиметрической системы по центральной или двухступенчатой системам.

При центральной системе каждый опорный пункт непосредственно связан с исходным пунктом. Двухступенчатая система состоит из каркасной и заполняющей сети, которая создается относительно пунктов каркасной сети.

Измерения в пунктах рядовой сети выполняются относительно опорных пунктов. Методики гравиметрических измерений могут быть однократными с одним или двумя гравиметрами, двукратными с одним гравиметром, способом отдельных приращений и др. Контроль качества рядовой сети осуществляется по сходимости первичных и повторных измерений. Применение современных высокоточных гравиметров типа

Scintrex существенно повышает точности и упрощает методику полевых гравиметрических работ.

Для геологической интерпретации гравитационного поля и успешного решения геологических задач необходимо изучение плотностей горных пород. Их аномальные изменения зависят от изменчивости масс в земной коре (произведения средней плотности объекта на его объем).

Основным методом изучения плотностей горных пород является лабораторный метод измерений по образцам (керну) на аналитических весах или его денситометрический вариант. Результаты определений плотностей осадочных пород по керну скважин позволяют определять: средние значения плотностей отдельных литолого-фациальных комплексов и осадочного комплекса в целом, выявлять плотностные границы в его пределах. По измерениям по керну определяются средние значения плотностей объектов поисков и вмещающих их отложений, создаются сводные плотностные разрезы для изучаемых площадей, строятся диаграммы изменений плотностей вдоль скважин, выявляются закономерности их изменчивости с глубиной и в латеральном направлении. Поскольку количество керна для изучения плотностных неоднородностей осадочного комплекса ограничено, для их определения могут использоваться данные ГИС: НГК, ГК, ГГК-П, гравиметрический каротаж скважин. Также целесообразно проведение определений плотностей пород по значениям коэффициента общей пористости K_p , определяемого по диаграммам НГК и ГК скважин.

Гравиметрические измерения на неровном земном рельефе типа холма, оврага или гравитационной ступени позволяют определять значения плотностей пород в верхней части геологического разреза (ВЧР). Плотности могут определяться по аномалиям гравитационного поля путем решения обратных за-

дач гравиразведки в процессе интерпретации гравитационных аномалий.

Результаты определений плотностей пород кристаллического фундамента по керну представляются в виде средних значений параметра пород различного состава, средних значений плотностей отдельных блоков и их средней величиной, характерной для изучаемых площадей.

Значения плотностей пород изменяются в широких пределах и могут существенно отличаться в различных регионах. Поэтому для повышения достоверности интерпретации гравитационных аномалий следует проводить определения плотностей непосредственно для исследуемых площадей.

По результатам гравиметрических съемок строятся карты и графики аномалий силы тяжести в редукции Буге (аномалии Буге), которые используются для геологической интерпретации измеренного поля при решении различных геологических задач. Аномалии Буге для каждого пункта измерений вычисляются по выражению:

$$\Delta g^{\text{Буге}} = g_{\text{набл}} - Y_0 + 0.3086H - 0.0419\sigma H + \Delta g_{\text{рельеф}} + \Delta g_{\text{л. с.}}$$

Здесь: $g_{\text{набл}}$ – измеренное (наблюденное) значение силы тяжести; Y_0 – теоретическое значение силы тяжести; $0.3086H$ – поправка за нормальный вертикальный градиент; $0.0419\sigma H$ – поправка за промежуточный слой; $\Delta g_{\text{рельеф}}$ – поправка за влияния земного рельефа; $\Delta g_{\text{л. с.}}$ – поправка за притяжение влияния Луны и Солнца. Значение $g_{\text{набл}}$ в каждом пункте определяется по данным полевых измерений; Y_0 – поправка за нормальное поле определяется по таблицам, рассчитанным по нормальной формуле Гельмерта; поправка $0.3086H$ определяется умножением нормального градиента поля, соответствующего 0.3086 мГал/м, умноженного на значение высоты H м над уровнем приведения; $0.0419\sigma H$ – поправка за промежуточный

слой вычисляется умножением величины 0.0419 (притяжения горизонтального пласта бесконечного простирания с единичной плотностью) на его плотность σ и высоту H ; значение поправки за гравитационное влияние земного рельефа $\Delta g_{\text{рельеф}}$ вводится по топографическим картам и номограммам; поправка за притяжение Луны и Солнца $\Delta g_{\text{л. с.}}$ вводится по астрономическим ежегодникам.

Геологическую интерпретацию гравитационного поля принято разделять на качественную и количественную. Задачей качественной интерпретации является определение факта наличия в поле аномалий, создаваемых объектами поисков. При качественном (визуальном) истолковании карт и графиков гравитационного поля в нем прослеживаются аномалии, создаваемые локальными объектами различных размеров и аномалий типа гравитационной ступени, отображающих резкое изменение плотностей пород на различных глубинах, связанных с особенностями геологического строения (границами блоков кристаллического фундамента, разломами, разрывными нарушениями и др.).

Задачей качественной интерпретации является выявление аномалий, создаваемых объектами поисков. Если поле достаточно простое, то визуально выделяются локальные максимумы, минимумы, зоны горизонтальных градиентов силы, направление их простирания и устанавливается возможная связь изменений поля с такими объектами. Если гравитационное поле сложное, то проводится его математическая обработка, заключающаяся в применении различных методов трансформаций (математических преобразований): осреднения поля, пересчета в верхнее и нижнее полупространство, вычисления производных более высокого порядка и др. Для каждого способа разработана своя теория и даны рекомендации для решения геологических задач различных типов. Способы трансформа-

ций позволяют выявлять региональные и локальные изменения поля, отображающие особенности геологического строения изучаемых площадей. Карты трансформированных аномалий позволяют усиливать одни особенности поля и ослабевать другие. Но при этом возможны погрешности и даже выделение ложных локальных аномалий. Поэтому они не могут заменить поля аномалий в редукции Буге и должны рассматриваться в качестве дополнительных данных о его возможной геологической природе.

Карты аномалий Буге принято заменять регулярными квадратными сетками и с них путем интерполяции выписывать значения поля – составлять матрицы чисел, что позволяет оперативно проводить расчеты в каждой точке и по вычисленным значениям строить карты трансформированных аномалий.

При геологической интерпретации гравитационных аномалий осуществляется решение прямых и обратных задач гравиразведки. Прямая задача заключается в теоретических расчетах особенностей возможного отображения в гравитационном поле объектов поисков по создаваемым их моделям. Поскольку гравитационное поле зависит от изменения только одного параметра – плотности, то, в отличие от других геофизических методов, прямые задачи характеризуются однозначным решением для объектов любой сложности. Решение прямых задач позволяет более надежно решать обратные задачи, которые заключаются в создании плотностных моделей объектов поисков и геологических сред по аномалиям Буге. Обратные задачи гравиразведки, как и в других геофизических методах, не имеют однозначных решений. Поэтому для уменьшения их неоднозначности используются априорные данные: результаты бурения, плотностные особенности, результаты других методов и пр. При решении прямых и обратных задач гравиразведки

применяются следующие допущения: объекты поисков имеют правильные геометрические формы, плотность пород в их пределах распределена равномерно, объекты характеризуются двухмерным простиранием: имеют постоянные поперечные сечения и простираются параллельно оси координат Y , что позволяет упрощать решения. В других геофизических методах при решении обратных задач также используются характерные для них допущения.

Задачей количественной интерпретации является определение различных параметров объектов поисков: глубины залегания, направления простирания, угла наклона, размеров, аномальных плотностей. Для их определения разработаны и применяются различные методы (метод характерных точек, интегральный метод, метод гравитационного моделирования и другие). Они могут применяться при решении прямых и обратных задач.

Гравиметрический метод играет важную роль в решении задач нефтяной геологии. Для его эффективного применения при решении задач нефтяной геологии необходима разработка и применение эффективных методов интерпретации гравитационных аномалий, позволяющих выявлять различные потенциально нефтеносные объекты. К ним следует отнести локальные нефтеносные структуры, месторождения природных битумов, зоны повышенной пористости в карбонатных толщах и др. Особое значение представляет задача выделения блоков кристаллического фундамента и разделяющих их разломов, оказывающих значительное влияние на скопление месторождений в перекрывающем их осадочном комплексе. В зависимости от особенностей строения прогнозируемых объектов должна применяться оптимальная методика полевых измерений [69–75].

Начиная с 50-х гг. минувшего столетия гравиметрическими съемками различных масштабов, от 1: 200 000 до высокоточных, было прокрыто 92,6 % бывшей территории Советского Союза (17 млн кв. км). Одной из основных задач метода являлись поиски нефтяных и газовых месторождений. Их результативность при недостаточной точности гравиметрических съемок и практическом отсутствии данных о плотностных особенностях земной коры оказалась мало эффективной.

Геологическая интерпретация аномального гравитационного поля и до настоящего времени часто ограничивается лишь качественным истолкованием карт трансформированных аномалий, содержащих большие погрешности. По ним выдаются рекомендации для проведения поисково-разведочных работ, которые бурением скважин не подтверждаются.

С появлением высокоточной гравиметрической аппаратуры и созданием компьютерных технологий обработки и интерпретации данных полевых измерений появились новые возможности для эффективного применения гравиметрического метода при прогнозировании месторождений нефти, газа и природных битумов. Высокоточные гравиметрические измерения, основанные на изучении поля силы тяжести, естественного физического поля Земли, не оказывающие негативных воздействий на геологическую среду и экологию, по глубокому убеждению автора, должны играть важную роль на всех этапах прогнозирования нефтяных месторождений.

Автором разработан эффективный метод геолого-геофизического моделирования (ГГМ), заключающийся в решении обратной линейной задачи гравиразведки [86, 87] с одновременным созданием плотностных моделей геологических сред и прогнозируемых объектов непосредственно по аномалиям Буге без разделения поля на составляющие. В отличие от

многих методов качественной интерпретации гравитационных аномалий, метод ГГМ позволяет извлекать информацию об особенностях геологического строения нефтяных месторождений. В процессе решений используется априорная информация об объектах прогнозирования и оценивается достоверность получаемых результатов по априорным данным (лабораторным измерениям плотностей и ГИС).

Метод направлен на решение двух наиболее важных задачи нефтяной геологии: 1) прогнозирование потенциально нефтеносных структур осадочного комплекса и 2) изучение блокового строения и структуры кристаллического фундамента. Метод позволяет эффективно решать эти задачи на количественном уровне: осуществляется построение плотностных интерпретационных моделей прогнозируемых объектов [80, 84].

Сила тяжести G является суммой двух составляющих: силы притяжения F , создаваемой притяжением Земли, и центробежной силы C , создаваемой суточным вращением Земли вокруг оси: $G = F + C$. Значение силы тяжести на экваторе составляет 978.000 Гал, на полюсах – 983.200 Гал, т. е. оно возрастает от экватора к полюсам на 5.2 Гала. Среднее значение силы тяжести на поверхности Земли – 979.700 Гал. Центробежная сила C изменяется в зависимости от широты: на экваторе она составляет 3.4 Гала и уменьшается к полюсам до нуля. Она не зависит от притяжения массы Земли, направлена в сторону от оси ее вращения и составляет всего 0.4 % от величины силы притяжения F .

Для решения геологических задач используются карты и графики аномалий силы тяжести в редукции Буге. На континентах их значения в зависимости от мощности земной коры изменяются от десятков до сотен мГал (в геосинклинальных областях значения аномалий могут составлять минус 200–300 мГал).

Гравитационное поле, за исключением приливных изменений силы тяжести, создаваемых притяжением Луны и Солнца, практически не изменяется во времени. Для его измерений проводятся гравиметрические съемки. С 30-х гг. прошлого столетия проводятся наземные гравиметрические съемки различных масштабов, начиная с маятниковых измерений (1932–1939), с последующим повышением их точности. Успешно проводятся морские гравиметрические измерения, включая набортные, подводные, поплавковые, шельфовые, донные, а также подземные, скважинные и измерения из воздушного пространства.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Проблемы решения задач нефтяной геологии и экологии требуют применения геофизических методов исследований для изучения активных геологических процессов в верхней части геологического разреза и подстилающих их отложений. Разработанные нами технологии геофизического мониторинга, впервые проведенные на территории Казанского кремля, позволили определить наиболее результативные методы и успешно решать задачи влияний тектоники, поверхностных, подземных и техногенных вод и их влияний на ВЧР, успешно выявлять объекты археологии и решать другие задачи. Такими методами являются гравиразведка и электромагнитное зондирование становлением поля. Накопленные данные позволили оценить возможности методов при обнаружении возможных скоплений углеводородов в нефтеносных районах на урбанизированных территориях. В частности, можно отметить выявление битумов в уфимских отложениях РТ [90].

Впервые высокоточные гравиметрические измерения в режиме мониторинга были проведены на территории, окружающей Башню Сююмбеки и Губернаторский дворец (ныне резиденция Президента РТ). Они заключались в выполнении двух независимых высокоточных площадных гравиметрических съемок в одних и тех же пунктах по сети 5х5 м, проведенных в мае-июне и октябре-ноябре 1995 года. Погрешность измерений не превышала 10 мкГал. Карты аномалий Буге, построенные по результатам обоих циклов измерений, практически повторяли друг друга. Наблюдались лишь некоторые заметные расхождения простиранья отдельных изоаномал гравитационного поля, произошедшие за период между съемками.

По картам аномалий Буге была построена карта разностных значений гравитационного поля. В ее центральной части про-

слеживается положительная аномалия меридионального прогибания, оконтуренная изоаномалой +10 мкГал, и несколько сравнительно мелких локальных аномалий аналогичной интенсивности (рис. 1).

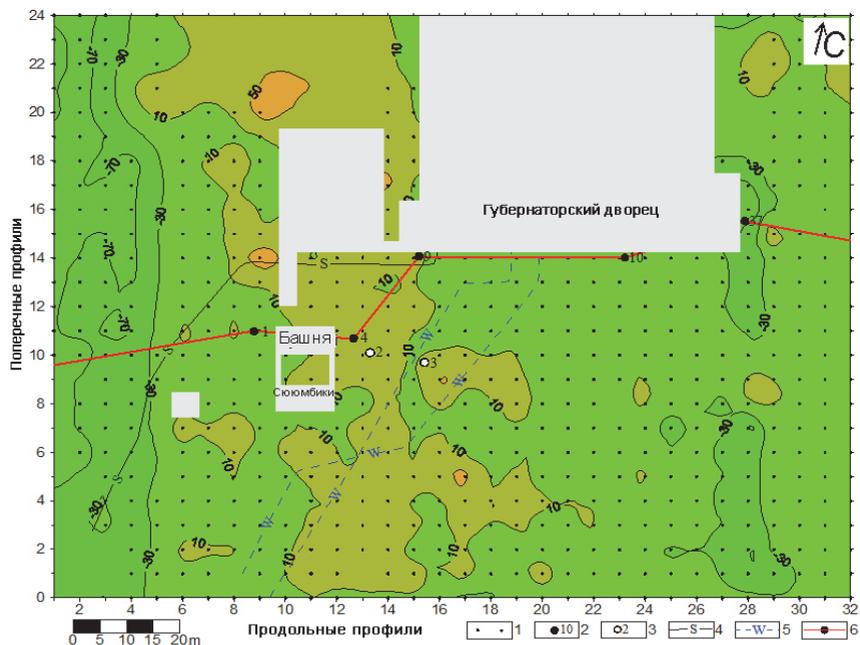


Рис. 1. Карта неприливных изменений силы тяжести на участке Башни Сююмбеки и Губернаторского дворца за период весна – осень 1995 года:

- 1 – пункты измерений; 2 – скважины, пробуренные до проведения измерений; 3 – скважины, подтвердившие наличие резервуара скопления вод; 4 – изолинии силы тяжести (мкГал);
- 5 – линии водопровода; 6 – линии канализации

Также была построена карта неприливных изменений гравитационного поля на участке Башни Сююмбеки и Губернаторского дворца за период с весны 1995 года до лета 1996 года

(рис. 2). На ней видно значительное уменьшение локальной аномалии, выявленной на рис. 1, связанной со скоплением воды на вершине Кремлевского холма.

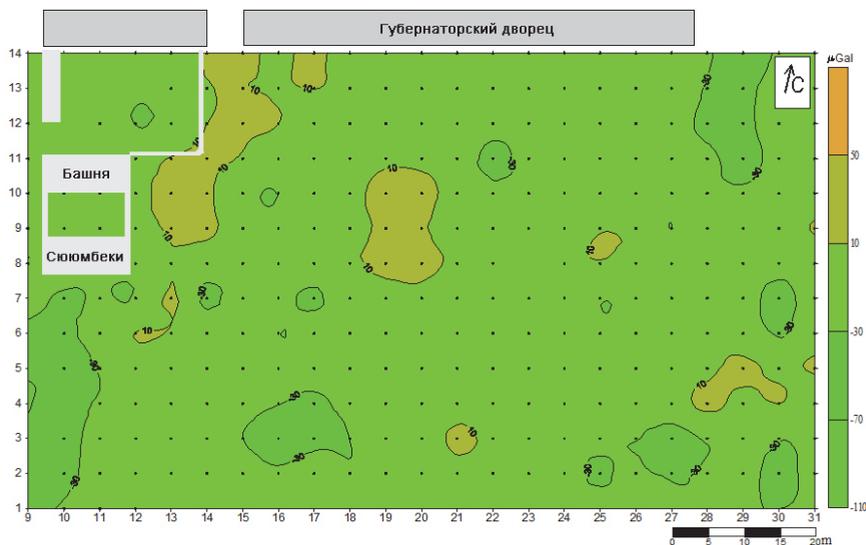


Рис. 2. Карта результатов гравиметрического мониторинга на участке Башни Сююмбеки и Губернаторского дворца: весна 1995 г. – лето 1996 г.
(условные обозначения как на рис. 1)

Анализ обеих карт позволил прийти к заключению, что изменение гравитационного поля обусловлено сезонным скоплением и уходом воды из выявленного по геофизическим данным природного резервуара, расположенного на вершине Кремлевского холма, которое происходит в течение длительного времени, измеряемого десятками, а возможно, и сотнями лет. Очевидно, что скопления талых и дождевых вод в резервуаре возможны и в весенний период. Кратковременные скопления

и уход вод неизбежны во время ливневых дождей и из-за подземных водных коммуникаций.

Исчезновение локальной аномалии отрицательного знака в юго-восточной части участках рисунков 1 и 2 может свидетельствовать о «восстановлении» поля, соответствующего первому циклу наблюдений. «Сохранение» аномалии у восточной стороны Губернаторского дворца, оконтуренной изоманомалой -30 мкГал, возможно, связано со скоплением воды на поверхности природного резервуара с изменяющимся уровнем вод на вершине Кремлевского холма, что оказывает несомненное влияние на основание и фундаменты ближайших строений. Поскольку резервуар находится у восточной стороны Башни Сююмбеки и касается лишь восточной половины ее основания (рис. 3), то периодическое изменение в нем уровня воды оказывает влияние на состояние пород в основании Башни. Частицы пород постепенно вымываются из отложений под ее восточной половиной. Вследствие этого под воздействием давления башни породы уплотняются, что, очевидно, и является причиной ее постепенного наклона в сторону резервуара, который в настоящее время составляет около двух метров.

Результаты гравиметрического мониторинга, проведенного в цокольной части мечети Кул-Шарифа позволили установить изменения ее технического состояния после завершения работ по ее возведению на территории бывшего Юнкерского училища (2005 г.). По результатам высокоточных гравиметрических измерений в режиме мониторинга в цокольной части мечети были выявлены непривлинные изменения гравитационного поля, создаваемые активными геологическими процессами в ее основании. Измерения проводились на бетонном покрытии фундамента вдоль стен строения и у оснований минарета

тов с интервалом в 1 месяц. Они позволили определить увеличение гравитационного поля интенсивностью до 10 мкГал во всех пунктах, создаваемое проседанием строения и скоплением грунтовых вод под фундаментом мечети. Наиболее значительное их влияние проявилось у минарета М1 (минареты отобразились уменьшением поля, создаваемым их притяжением). Это влияние отразилось и на внешнем покрытии минарета М1 падением некоторого количества плит, потребовавшим последующей реставрации.

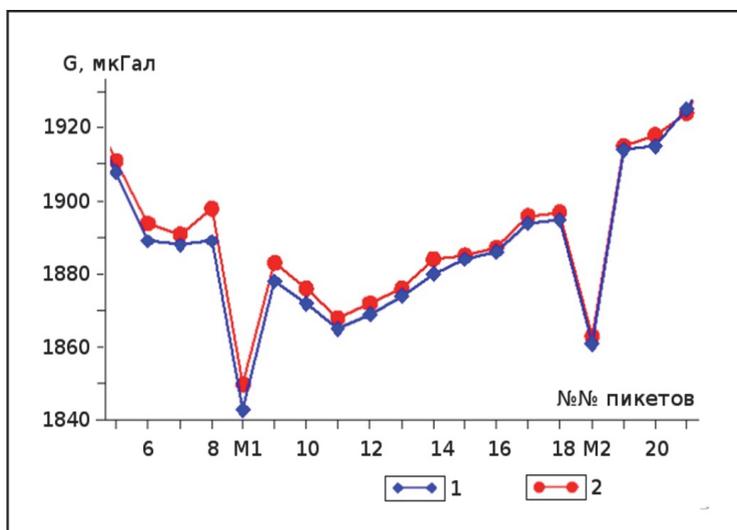


Рис. 3. Результаты гравиметрического мониторинга в цокольной части мечети Кул-Шарифа:

1 – первый цикл измерений; 2 – второй цикл измерений

На рисунке 4 приведены результаты гравиметрического мониторинга на восточной крепостной стене напротив бойниц.

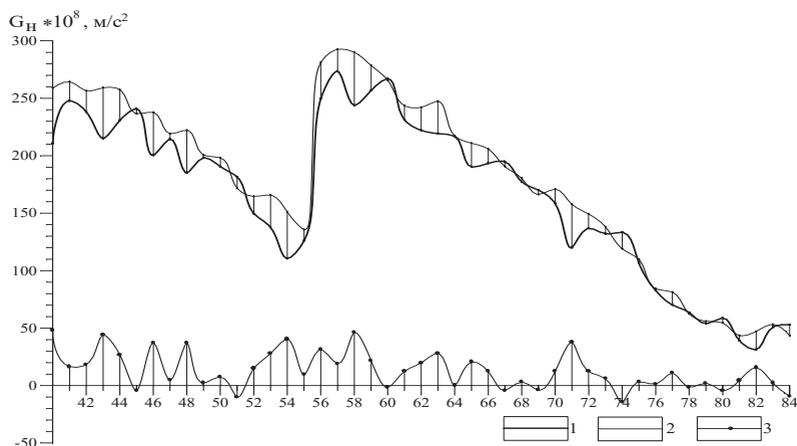


Рис. 4. Графики измеренных значений гравитационного поля на восточной стене Казанского Кремля по профилю 11:

1 – измерения в декабре 1997 г.; 2 – измерения в июне 1998 г.;

3 – графики неприливых изменений силы тяжести в период между циклами измерений

Анализ графиков измеренных значений поля позволяет определить его наиболее значительные вариации неприливых изменений силы тяжести между пикетами 42–46, 51–61 и 69–74, в которых их значения составляют 20–50 мкГал.

Результаты измерений в режиме мониторинга параметра суммарной электрической проводимости $S(H)$, определенного методом электромагнитного зондирования аппаратным комплексом «Импульс-авто М-1/0-20» при исследованиях, проведенных вдоль дамбы, ограничивающей левый берег р. Казанки в центре города, позволили изучить особенности ее внутреннего строения. Проведение таких измерений вдоль дамб может позволить обнаруживать ослабленные участки пород в их пределах и заблаговременно принимать меры по укреплению таких участков [85].

Рассматриваемый участок дамбы расположен в центральной части г. Казани и ограничивает левый берег р. Казанки, впадающей западнее в р. Волгу. Поверхность дамбы заасфальтирована, а ее прибрежная сторона закрыта бетонными плитами. Колебания уровня реки в течение года могут достигать 6–8 м. Особенно сильный подъем наблюдается во время весеннего половодья. Отсюда появляется возможность по изменениям параметра $S(H)$ выявлять участки ослабленных пород путем сопоставления результатов электромагнитного зондирования, выполненного вдоль дамбы в различное время. Вертикальные разрезы суммарной электрической проводимости, построенные по результатам электромагнитного зондирования, проведенного в одних и тех же пикетах вдоль дамбы в июне, октябре 2002 г. и в апреле 2003 г., отображаемые изменениями глубин геологического разреза по параметрам $S(H)$, различаются весьма значительно (рис. 5). В июне 2002 года глубина проникновения электромагнитного сигнала вдоль профиля значительно изменяется, а в его центральной части (пикеты измерений 28–40 и 48–60) проникновение на глубину электромагнитного сигнала (за исключением пикета 35) ограничено каким-то препятствием (нельзя исключить возможного наличия пустот под асфальтовым покрытием). Помимо этого, дамба, наряду с защитной функцией берега от реки, также является своеобразным «фильтром» поверхностных и грунтовых вод, наиболее интенсивно устремляющихся к реке в весенний период. Одновременно с водой в нее попадают в виде растворенных солей, взвесей, строительного мусора и пр. различные отходы города, часть которых «запечатывает» порово-трещинное пространство дамбы и оказывает влияние на изменение параметра $S(H)$.

Можно предположить, что после весеннего разлива и поднятия уровня р. Казанки (апрель–май 2002 г.) и его снижения в июне верхняя часть дамбы существенно освободилась

от воды (рис. 5, А). Затем в летний период при относительно низком уровне реки вода из дамбы постепенно просочилась в нижележащие слои, о чем свидетельствуют очень малые величины параметра $S(H)$, прослеживаемые по глубине вдоль профиля (рис. 5, Б).

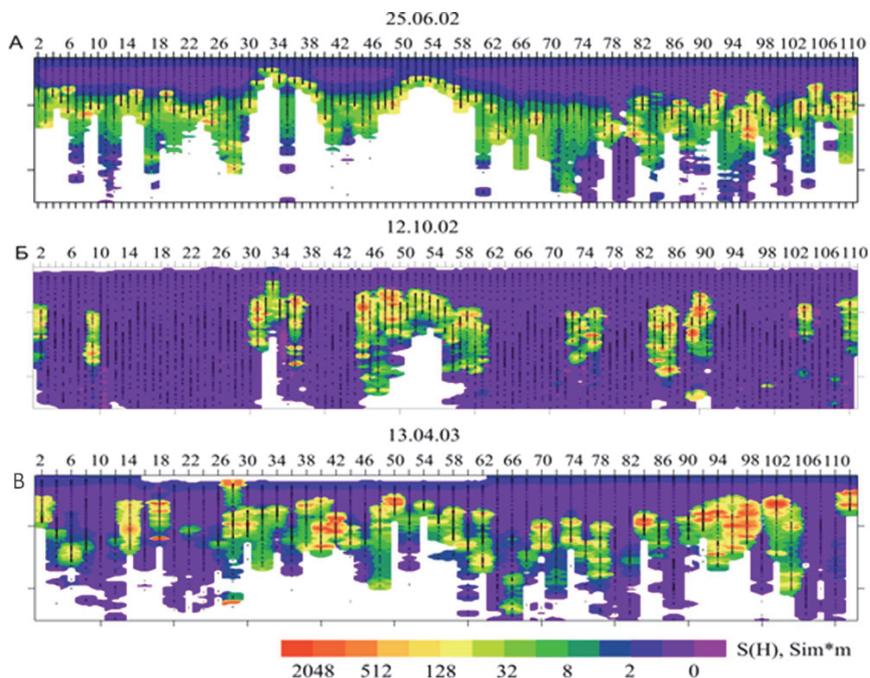


Рис. 5. Результаты исследований вдоль дамбы Казани по данным геофизического мониторинга

Исключением являются участки между пикетами 28–38 и 44–62, где так называемые пустоты, выявленные в июне, могли заполниться принесенными грунтовыми водами мусором. И, наконец, вертикальный разрез суммарной электрической проводимости, построенный по измерениям в апреле 2003 года (рис. 5, В), в общих чертах подобен результатам, полученным

в июне 2002 года, когда также наблюдался подъем уровня реки (рис. 5, А). Это позволяет считать, что на техническое состояние дамбы оказывают влияние как грунтовые и поверхностные воды, так и изменение уровня р. Казанки. Вполне вероятно, что участки дамбы с наиболее резкими изменениями во времени параметра $S(H)$ могут являться ослабленными зонами пород, которые должны изучаться более детально.

Результаты геофизических измерений в режиме мониторинга вдоль дамбы (рис. 5) свидетельствуют о целесообразности их проведения при решении проблемы сохранения 11 дамб Казани общей протяженностью 24 км, входящих в комплекс инженерной защиты города.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев Б.А.* Послойная зональность физических свойств осадочных пород и ее связь со структурами платформенных областей. – Сов. геология, 1957. – № 61. – С. 112–120.

2. Академик В.Н. Страхов. Геофизик и математик. – М.: Наука, 2012. – 159 с.

3. *Алиев Ф.А.* Использование наноразмерных каталитических систем для повышения нефтеотдачи на месторождениях высоковязких нефтей / Ф.А. Алиев, Э.И. Гарифуллина, С.А. Ситнов, И.И. Мухаматдинов и др. // Нефть. Газ. Новации. – 2018. – 1. – С. 45–48.

4. *Березкин В.М.* Применение гравиразведки для поисков месторождений нефти и газа. – М.: Недра, 1973. – 76 с.

5. *Боровский М.Я.* Геофизические методы подготовки и контроля процессов эксплуатации месторождений природных битумов / М.Я. Боровский, Э.К. Швыдкин и др. – М. Изд-во ГЕОС 2000. – 168 с.

6. *Боронин В.П.* Некоторые данные о послойной зональности плотности в карбонатных породах Татарии и ее значение для поисков структур с помощью гравитационной разведки. – Докл. АН СССР, 1959. – 128. – Вып. 1. – С. 136–139.

7. *Брюзгина Н.И.* Изменение плотностных свойств пород и скорости продольных волн по площади Усть-Балыкской структуры / Н.И. Брюзгина, Н.А. Туезова // Поиски нефтяных и газовых залежей геофизическими методами в Западно-Сибирской низменности. – Новосибирск, Труды СНИГИИ и МС. – Вып. 109, 1971. – С. 29–38.

8. *Бычков С.Г.* Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии / С.Г. Бычков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 188 с.

9. *Вахромеев Г.С.* Экологическая геофизика / Г.С. Вахромеев. – Иркутск: Полиграфическая фирма «Улисс», 1995. – 215 с.

10. *Вахромеев Г.С.* Моделирование в разведочной геофизике Г.С. Вахромеев, А.Ю. Давыденко. – М.: Недра, 1987. – 193 с.

11. Геология нефтяных и газовых месторождений Волго-Уральской провинции // под ред. С.П. Максимова и др. – М.: Недра, 1970. – 807 с.

12. Глубинные исследования архейского фундамента востока Русской платформы в Миннибаевской скважине 20 000 / под редакцией Муслимова и др. – Казань: Тат. книжн. изд-во, 1976. – 187 с.

13. Гравиметрия и геодезия / под ред. Б.В. Бровара. – М.: Научный мир, 2010. – 572 с.

14. *Израэль Ю.А.* Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.

15. *Каледа Г.А.* Закономерности размещения карбонатных коллекторов башкирского яруса на тектонических структурах Урало-Поволжья / Г.А. Каледа, Э.Д. Котельникова. – Геология нефти и газа. – 1974. – № 9. – С. 66–72.

16. *Каюкова Г.П.* Свойства тяжелых нефтей и битумов пермских отложений Татарстана в природных и техногенных процессах / Г.П. Каюкова, С.М. Петров, Б.В. Успенский. – Москва, Изд-во ГЕОС, 2015. – 342 с.

17. *Киркинская В.Н.* Карбонатные породы – коллекторы нефти и газа / В.Н. Киркинская, Е.М. Смехов. – Л.: Недра, 1981. – 255 с.

18. *Кобрунов А.И.* Разрешимость и эквивалентность в обратной задаче гравиразведки для нескольких плотностных границ / А.И. Кобрунов // Изв. АН СССР, Физика Земли, 5. – 1983. – С. 67–75.

19. *Костицын В.И.* Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки / В.И. Костицын. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 2002. – 224 с.

20. *Косыгин Ю.А.* Основы тектоники / Ю.А. Косыгин. – М.: Наука, 1974. – 223 с.

21. *Крылов П.С.* Проявление газа в донных отложениях на сейсмических разрезах озера Большое Яровое / П.С. Крылов, Д.К. Нургалиев, П.Г. Ясонов // Ученые записки Казанского университета. – Том 157. – 2015. – С 73–80.

22. *Краюшкин В.А.* Истинное происхождение, структура, размер и размещение мирового нефтегазового потенциала. Казань / В.А. Краюшкин // Георесурсы. – 2000. – 2000. – № 3 (4). – С. 14–18.

23. Латеральная изменчивость состава и физических свойств осадочной толщи в пределах структур и ее отражение в зональности геофизических полей // Труды КО ВНИГНИ. – Вып. 160. – Пермь: Перм. книж. издательство, 1974. – 417 с.

24. *Маловичко А.К.* Детальная гравirazведка на нефть и газ / А.К. Маловичко, В.И. Костицын, О.Л. Тарунина. – М.: Недра, 1979. – 192 с.

25. *Максимович Г.А.* Карст карбонатных нефтегазоносных толщ / Г.А. Максимович, В.Н. Быков. – Пермь: Изд-во ПГУ, 1978. – 90 с.

26. *Милановский Е.Е.* К проблеме происхождения и развития линейных структур платформы / Е.Е. Милановский // Вестник МГУ. – Сер. Геология, 1979. – № 6. – С. 29–58.

27. *Мкртчян О.М.* Закономерности размещения структурных форм на востоке Русской плиты / О.М. Мкртчян. – М.: Наука, 1980. – 134 с.

28. *Мудрецова Е.А.* Интерпретация данных высокоточной гравirazведки на неструктурных месторождениях нефти и газа / Е.А. Мудрецова, А.С. Варламов, В.Г. Филатов и др. – М.: Недра, 1979. – 197 с.

29. *Муслимов Р.Х.* Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее / Р.Х. Муслимов. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2012. – 663 с.

30. *Муслимов Р.Х.* Опыт Республики Татарстан по рациональному освоению нефтяных богатств недр: былое и думы о будущем развитии / Р.Х. Муслимов. – Казань: Изд-во «ФЭН» АН РТ, 2021. – 680 с.

31. *Мухаматдинов И.И.* Влияние катализаторов на внутрисластовое преобразование высоковязких нефтей / И.И. Мухаматдинов, А.В. Вахин, С.А. Ситнов, Д.К. Нургалиев // Сборник международной научно-практической конференции «Инновационные решения эффективного развития нефтегазохимии». Казань, 4–6 сентября. – 2018. – С. 28–31.

32. *Нигаматзянова Г.Р.* Предварительные результаты спорово-пыльцевого анализа донных отложений оз. Рубское (Ивановская область) / Г.Р. Нигаматзянова, Л.А. Фролова, А.Г. Кадыров, Д.К. Нургалиев // XVII Всероссийское микропалеонтологическое совещание. Современная микропалеонтология – проблемы и перспективы. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2018. – С. 46.

33. *Новоселицкий В.М.* Построение горизонтальной слоисто-зональной модели плотностного разреза осадочной толщи / В.М. Новоселицкий, В.М. Гордин // Ученые записки ПГУ. – 1975. – № 312, выпуск 1. – С. 115–122.

34. *Новоселицкий В.М.* Соотношение между переменными значениями пластовой, средней и эффективной плотности в гравиразведке / В.М. Новоселицкий // Прикладная геофизика. – Выпуск 63. – М.: Недра, 1971. – С. 151–159.

35. *Новикова С.П.* Особенности построения геологической модели залежи сверхвязкой нефти при планировании системы разработки методом парогравитационного дренажа / С.П. Новикова, Д.К. Нургалиев, В.А. Судаков, А.Н. Делев и др. // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 4. – Ч. 1. – С. 331–340.

36. *Нургалиев Д.К.* Пространственная изменчивость свойств нефти месторождений Республики Татарстан / Д.К. Нургалиев,

И.Ю. Чернова, Н.Г. Нургалиева, Д.И. Хасанов и др. // Нефтяное Хозяйство, 6. – 2013. – с. 8–11.

37. *Нургалиев Д.К.* Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации / Д.К. Нургалиев, С.Ю. Селивановская, М.В. Кожевникова, П.Ю. Галицкая // Георесурсы, 23. – № 3. – 2021. – С. 8–15.

38. Особенности размещения тектонических структур нефтегазоносных областей СССР / Розанов Л.Н. и др. – Л.: Недра, 1974. – 140 с.

39. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / А.А. Огильви. – М.: Недра, 1990. – 501 с.

40. *Огнев И.Н.* Связь структуры земной коры и верхней мантии со степенью зрелости нефтематеринских толщ / И.Н. Огнев, Д.К. Нургалиев // 73-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2019». 22–25 апреля 2019 г. Москва: тезисы докладов. – Том 1. – Москва, 2019. – С. 76–77.

41. *Онищенко Я.В.* Семейство катализаторов внутрипластового гидрокрекинга тяжелого углеводородного сырья и способ ее применения / С.А. Ситнов, М.С. Петровнина, Я.В. Онищенко, Д.А. Феоктистов, Д.К. Нургалиев. Заявка на патент № 2015117727.

42. Особенности размещения тектонических структур нефтегазоносных областей СССР / Л.Н. Розанов, Е.В. Герман, Л.П. Гришанова и др. – Л.: Недра, 1974. – 140 с.

43. *Маловичко А.К.* Детальная гравиразведка на нефть и газ / А.К. Маловичко, В.И. Костицын, О.Л. Тарунина. – М.: Недра, 1979. – 192 с.

44. *Маловичко А.К.* Основной курс гравиразведки. Ч. 1 / А.К. Маловичко. – Пермь: ПГУ, 1966. – 326 с.

45. *Маловичко А.К.* О зависимости латеральных неоднородностей верхней терригенной толщи от характера рельефа мест-

ности / А.К. Маловичко // Прикладная геофизика. – Вып. 77. – М.: Недра, 1975. – С. 167–170.

46. Высшие производные гравитационного потенциала и их применение при геологической интерпретации аномалий / А.К. Маловичко, О.Л. Тарунина. – М.: Недра, 1972. – 152 с.

47. *Милановский Е.Е.* К проблеме происхождения и развития линейных структур платформы / Е.Е. Милановский. – Вестник МГУ. – Сер. Геология, 1979. – № 6. – С. 29–58.

48. *Мкртчян О.М.* Закономерности размещения структурных форм на востоке Русской плиты / О.М. Мкртчян. – М.: Наука, 1980. – 134 с.

49. *Мухаматдинов И.И.* Влияние катализаторов на внутрипластовое преобразование высоковязких нефтей / И.И. Мухаматдинов, А.В. Вахин, С.А. Ситнов, Д.К. Нургалиев // Сборник международной научно-практической конференции «Инновационные решения эффективного развития нефтегазохимии», Казань, 4–6 сентября. – 2018. – С. 28–31.

50. *Нигаматзянова Г.Р.* Предварительные результаты спорово-пыльцевого анализа донных отложений оз. Рубское (Ивановская область) / Г.Р. Нигаматзянова, Л.А. Фролова, А.Г. Кадыров, Д.К. Нургалиев // XVII Всероссийское микропалеонтологическое совещание. Современная микропалеонтология – проблемы и перспективы. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – С. 46.

51. *Немцов Л.Д.* Высокоточная гравиразведка / Л.Д. Немцов. – М.: Недра, 1967. – 270 с.

52. Новый информационный базис гравиметрии и магнитометрии / В.Н. Страхов, И.А. Керимов, И.Э. Степанова и др. // Геофизика и математика: материалы 2-й Всероссийской конференции – Пермь: ГИ УрО РАН 2001. – С. 274–277.

53. *Никитин А.А.* Теоретические основы обработки геофизической информации / А.А. Никитин. – М.: Недра, 1986. – 342 с.

54. Объемное гравитационное моделирование градиентно-слоистых сред – новые возможности в изучении структуры и вещественного состава \ С.С. Красовский и др. // Геофизика и математика: 11-я Всероссийская конференция, Пермь: ГИ УрО РАН. – 2001. – С. 180–189.

55. Определение поправок за гравитационное влияние рельефа местности земной поверхности при гравиметрических наблюдениях на основе линейных аналитических аппроксимаций / А.С. Долгаль, В.М. Новоселицкий, С.Г. Бычков, В.В. Антипин // Вест. отделения наук о Земле РАН. – 2004. – № 1 (22). – 15 с.

56. Петрофизика (справочник): горные породы и полезные ископаемые / под ред. докт. геол.-минер. наук Н.Б. Дортман. – Книга первая. – М.: Недра, 1992. – 319 с.

57. *Орленок В.В.* Основы геофизики / В.В. Орленок. – Калининград, 2000. – 446 с.

58. Результаты детальной гравиразведки по изучению под-солевого структурного плана в районе Шуртанского газоконденсатного месторождения / А.С. Орловский, М.А. Высоцкий // Геофизические исследования на нефть и газ в Узбекистане. – Ташкент, 1980. – Выпуск 7. – С. 14–22.

59. *Пашкин Е.М.* Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры / Е.М. Пашкин. – М.: Высшая школа, 1998. – 256 с.

60. *Пашкин Е.М.* Геоэкологический подход при сохранении памятников истории и культуры / Е.М. Пашкин // Геоэкология. – № 2. – 1994. – С. 137–143.

61. *Пеньков И.Н.* Петрографическое, геохимическое и петрофизическое изучение кристаллического фундамента и рифей-вендских образований по данным глубокого бурения / И.Н. Пеньков, В.Г. Изотов и др. – Казань, 1983.

62. *Плотникова Н.Н.* Геолого-геофизические и геохимические предпосылки перспектив нефтегазоносности кристаллического фундамента / Н.Н. Плотникова. – СПб.: Недра, 2004. – 172 с.

63. Профессор А.К. Маловичко и пермская школа геофизиков. – Пермь-Екатеринбург: Горный институт УрО РАН, ПГУ, 1998. – 196 с.

64. *Розанов Л.Н.* Тектоника и нефтегазоносность востока Русской платформы / Л.Н. Розанов. – М.: Недра, 1981. – 140 с.

65. Свидетельство № 2018612573 Российская Федерация. Программа обработки данных геохимического мониторинга разработки залежей нефти. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / Д.К. Нургалиев, С.А. Усманов, Р.М. Галимова, А.Н. Ахметов, А.Е. Чемоданов, М.И. Амерханов.

66. *Селивановская С.Ю.* Четвертое совещание ведущих авторов Специального доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата по океанам и криосфере в условиях изменяющегося климата / С.Ю. Селивановская, Ю.П. Переведенцев, Д.К. Нургалиев, С.М. Семенов // Метеорология и гидрология. – 2019.

67. *Ситдигов А.Г.* Казанский кремль: историко-археологическое исследование / А.Г. Ситдигов. – Казань. – ООО «Фолиантъ», 2006. – 287 с.

68. *Ситнов С.А.* Катализатор внутрипластового гидрокрекинга тяжелого углеводородного сырья и способ его применения / С.А. Ситнов, М.С. Петровнина, Я.В. Онищенко, Д.А. Феокистов, Д.К.Нургалиев // Патент № 2613557 от 17.03.2017.

69. *Слепак З.М.* Применение гравirazведки для изучения нефтегазоносных структур / З.М. Слепак. – М.: Недра, 1980. – 152 с.

70. *Слепак З.М.* Применение гравirazведки при поисках нефтеперспективных структур / З.М. Слепак. – М.: Недра, 1989. – 200 с.

71. *Слепак З.М.* Геофизический мониторинг при сохранении памятников архитектуры на примере Казанского кремля / З.М. Слепак. – Издательство Казанского университета, 1999. – 176 с.

72. *Слепак З.М.* Гравиразведка в нефтяной геологии / З.М. Слепак. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2005. – 222 с.

73. *Слепак З.М.* Геофизика для города / З.М. Слепак. – М.: ЕАГО, Изд-во «ГЕРС». – 2007. – 240 с.

74. *Слепак З.М.* Разведочная геофизика в археологии / З.М. Слепак. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2010. – 225 с.

75. *Слепак З.М.* Гравиразведка при прогнозировании природных битумов и высоковязких нефтей / З.М. Слепак // Высоковязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки месторождений: материалы Международной научно-практической конференции. Казань, 5–7 сентября 2012 г. – С. 106–110.

76. *Слепак З.М.* Новые геофизические технологии прогнозирования традиционных и нетрадиционных скоплений углеводородов в зонах разуплотнения пород осадочного комплекса / З.М. Слепак // Трудноизвлекаемые и нетрадиционные запасы углеводородов: опыт и прогнозы: материалы Международной научно-практической конференции. – Казань, 3–4 сентября. – Изд-во «ФЭН», 2014. – С. 338–342.

77. *Слепак З.М.* Определение плотностей пород осадочного комплекса по промыслово-геофизическим данным с целью повышения результативности гравиразведки при поисках нефтяных месторождений / З.М. Слепак // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию кафедры геофизики Пермского университета 21–22 ноября 2014 г. – Пермский государственный национальный исследовательский университет, ЕАГО, Пермь, 2014.

78. Слепак З.М. К вопросу методики гравиметрических измерений при прогнозировании нефтяных месторождений / З.М. Слепак // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы международной научно-практической конференции. – Пермь, 2015. – С. 197–201.

79. Слепак З.М. Новые возможности высокоточной гравиразведки при разработке, прогнозировании нефтяных месторождений и нетрадиционных углеводородов / З.М. Слепак // Материалы Международной научно-практической конференции. – Казань, 2015. – С. 81–84.

80. Слепак З.М. Гравиразведка. Новые технологии прогнозирования нефтяных месторождений / З.М. Слепак. – Казань. Изд-во Казанского университета, 2015. – 168 с.

81. Слепак З.М. Новые технологии гравиразведки для изучения глубинного строения земной коры и прогнозирования залежей углеводородов / З.М. Слепак. – Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 31–33.

82. Слепак З.М. Методология геофизических исследований при решении задач нефтяной геологии и прогнозировании скоплений углеводородов / З.М. Слепак, Э.Р. Зиганшин // Нефтяное хозяйство. – № 9, 2016. – С. 26–29.

83. Слепак З.М. Гравиразведка – новые возможности изучения геологического строения и прогнозирования нефтяных месторождений для повышения эффективности бурения / З.М. Слепак // «Бурение и нефть». – 2019, № 2. – С. 3–9.

84. Слепак З.М. Гравиразведка при прогнозировании нефтяных месторождений / З.М. Слепак. – Казань. Изд-во Казанского университета, 2019. – 204 с.

85. Слепак З.М. Инженерная геофизика для сохранения строений, решения задач археологии и экологии / З.М. Слепак. – Изд-во Казанского университета, 2020. – 126 с.

86. *Старостенко В.И.* Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии / В.И. Старостенко. – Киев: Наукова думка, 1978. – 228 с.

87. *Страхов В.Н.* Основные методы нахождения устойчивых приближенных решений систем линейных алгебраических уравнений, возникающих при решении задач гравиметрии и магнитометрии / В.Н. Страхов, А.В. Страхов. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 52 с.

88. *Судаков В.А.* Геофизический мониторинг паровой камеры при разработке месторождений сверхвязкой нефти на примере месторождения ПАО «Татнефть» / В.А. Судаков, М.И. Амерханов, Д.К. Нургалиев, Д.И. Хасанов, А.В. Степанов, В.Е. Косарев, С.А. Усманов // Инновации в разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений: материалы международной научно-практической конференции. – Казань: Изд-во «Ихлас», 2016. – Т. 2. – С. 220–222.

89. *Утемов Э.В.* «Естественные» вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения / Э.В. Утемов, Д.К. Нургалиев // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 88–95.

90. *Успенский Б.В.* Геология месторождений природных битумов республики Татарстан / Б.В. Успенский, И.Ф. Валеева. – Казань: Изд-во ООО «ПФ ГАРТ», 2008. – 348 с.

91. *Хаин В.Е.* Общая геотектоника. – М.: Недра, 1973. – 511 с.

92. *Хисамов Р.С., Файзуллин И.Н.* Геолого–геофизическое доизучение нефтяных месторождений на поздней стадии разработки / Р.С. Хисамов, И.Н. Файзуллин. – Казань: Издательство ФЭН АН РТ, 2011. – 228 с.

93. *Хасанова Н.М.* Геохимические особенности доманиковых отложений Республики Татарстан по данным ЭПР исследований / Н.М. Хасанова, Л.М. Ситдикова, В.П. Морозов, Н.М. Низамутдинов, Р.А. Хасанов, Д.К. Нургалиев // Сборник материалов 11-й Межрегиональной научно-практической кон-

ференции, посвященной 65-летию Института геологии УНЦ РАН «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий», Уфа, 17–19 мая 2016 г. – ДизайнПресс, 2016. – С. 189–191.

94. Diatoms of sediments of Plescheevo lake (Russia) as indicators of environmental changes in Holocene (Conference Paper) / O. Palagushkina, L. Frolova, E. Zinnatova, L. Kosareva, D. Nurgaliev // Kazan (Volga region) Federal University, Russian Federation. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18(5.1). – P. 283–288.

95. *Vakhin A.V.* Catalytic aquathermolysis of Boca De Jaruco heavy oil in the presence of nickel, cobalt, iron and copper tallates / A.V. Vakhin, F.A. Aliev, S.A. Sitnov, I.I. Mukhamatdinov, S.I. Kudryashov, I.S. Afanasiev, O.V. Petrashov, M.A. Varfolomeev, D.K. Nurgaliev // III Thermal EOR International Workshop “Thermal Methods for Enhanced Oil Recovery: Laboratory Testing, Simulation and Oilfields Applications”, Chengdu, China, 15–18 October 2018. – P. 107.

96. *Varfolomeev M.A.* Contribution of thermal analysis and kinetics of Siberian and Tatarstan regions crude oils for in situ combustion process / M.A. Varfolomeev, R.N. Nagrimanov, A.V. Galukhin, A.V. Vakhin, B.N. Solomonov, D.K. Nurgaliev, M.V. Kok // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2015. – Vol. 122, N 3. – P. 1375–1384.

97. *Varfolomeev M.A.* Thermal Analysis and Calorimetric Study of the Combustion of Hydrolytic Wood Lignin and Products of Its Pyrolysis / M.A. Varfolomeev, A.N. Grachev, A.A. Makarov, S.A. Zabelkin, V.N. Emelyanenko, T.R. Musin, A.V. Gerasimov, D.K. Nurgaliev // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2015. – V. 51, N 1. – P. 140–145.

98. *Slepak Z.M.* New Opportunities of High-Resolution Gravimetry for the Studies of Subsurface Geology and Prediction of Oil Fields / Z.M. Slepak. – 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference on Science and Technologies in Geology Exploration and Mining. – Vol. 1. – Bulgaria, 2014. – P. 743–750.

99. *Slepak Z.M.* Efficiency of High-Precision Gravity Prospecting at Discovery of Oil Fields at Late Stage of Development / Z.M. Slepak // Practical and Theoretical Aspekts of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. – 2019. – P. 293–302.

100. *Slepak Z.M.* Geophysical Monitoring for the Preservation of Architectural Monuments / Z.M. Slepak // Practical and Theoretical Aspekts of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. – 2019. – P. 363–370.

101. *Слепак З.М.* Разведочная геофизика и экологическая электроразведка / З.М. Слепак // Сборник научных трудов «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики». – Выпуск 4(9). – Пермь: Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета, 2021. – С. 157–164.

102. *Слепак З.М.* Планета Земля, строение и энергетика планеты. Нефтяная геология, геофизика, экология. Зеленые технологии / З.М. Слепак. – Издательство Казанского федерального университета, 2022. – 177 с.

103. *Slepak Z.M.* Geophysics in Archeology / Z.M. Slepak, B.V. Platov // Practical and Theoretical Aspekts of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields.

Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. – 2019. – P. 303–311.

Дополнительная литература

104. *Гурвич И.И.* Сейсмическая разведка. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 504 с.

105. *Гарленд Дж.Д.* Форма Земли и сила тяжести. – М.: Издательство «МИР», 1967. – 196 с.

106. *Деменицкая Р.М.* Основные черты строения Земли по геофизическим данным. – Т. 115. – Л.: «Труды НИИГА», 1961. – 223 с.

107. *Деменицкая Р.М.* Кора и мантия Земли. – М., «Недра», 1967. – 280 с.

108. *Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и строение. – ИЛ, 1960.

109. *Дьяков А.Ф.* Малая энергетика России: проблемы и перспективы. – М.: «Энергопрогресс: энергетика», 2003.

110. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. – М.: Научный мир, 2006.

111. *Зверев В.П.* Вода в Земле. Введение в учение о подземных водах. – М.: Научный мир, 2009.

112. *Косминская И.П.* Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхней мантии. – М., «Наука», 1968. – 227 с.

113. *Магницкий В.А.* Внутреннее строение и физика Земли. – М., «Недра», 1965.

114. *Менард Г.У.* Геология дна Тихого океана. – Изд-во «Мир», 1966.

115. *Собакарь Г.Т.* Неприливные изменения силы тяжести. – Киев: Изд-во «Наукова думка», 1982.

116. *Сорокин Л.В.* Гравиметрия и гравиметрическая разведка. – Гостоптехиздат, 1953.
117. *Федынский В.В.* Разведочная геофизика. – Москва: «Недра», 1964. – 672 с.
118. *Федынский В.В.* Гравиметрический метод разведки в нефтяной промышленности // Сб. «Прикладная геофизика». – Выпуск 7. – Гостоптехиздат, 1950.
119. *Крылов П.С.* Сейсмоакустика донных отложений современных озер как основа палеогеофизических и палеоклиматических реконструкций: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – Казань, 2018.
120. *Вульфсон М.* Происхождение и эволюция Солнечной системы. – М., 2000.
121. *Зейлик М.А.* Введение в астрономию и астрофизику (4-е изд.) / М.А. Зейлик, С.А. Грегори. – Издательство Сондерс Колледжа, 1998. – 322 с.
122. *Филлипс К. Дж. Х.* Путеводитель по Солнцу. – Издательство Кембриджского университета. – С. 78–79.
123. *Лэнг, Кеннет Р.* Солнце из космоса. – Springer-Verlag. – С. 75.
124. *Gusev A.* Rotation, physical librations and interior structure of the active and multi-layer Moon / A. Gusev, H. Hanada, N. Petrova, A. Kosov, O. Kuskov, V. Kronrod, E. Kronrod // Kazan University Publishing Corp., Kazan, 2015. – 328 pp. (Russian+English).
125. *Hanada H.* Development of small telescope like PZT and results of Experiments on the Ground / H. Hanada, A. Gusev et al. // 2017. “Gyroscope and Navigation”, Vol. 8, P. 304–319.
126. *Meng Z.G.* Influence of (FeO+ TiO₂) abundance on the microwave thermal emissions of lunar regolith / Z.G. Meng, G.D. Yang, J.S. Ping, Z.C. Cai, A. Gusev, E.M. Osei. – 2016. – *Science China Earth Sciences*. – Vol. 59 (7). – P. 1498–1507.

127. *Petrova N.* Free librations of the two-layer Moon and the possibilities of their detection / N. Petrova, A. Gusev, H. Hanada, N. Kawano // *Advances in Space Research.* – Vol. 42. – 2008. – P. 1398–1404.

128. *Kopeikin S.M.* Prospects in the orbital and rotational dynamics of the Moon with the advent of sub-centimeter lunar laser ranging / S.M. Kopeikin, E. Pavlis, D. Pavlis, V.A. Brumberg, A. Escapa, J. Getino, A. Gusev et al. // *Advances in Space Research.* – Vol. 42 (8). – 2008. – P. 1378–1390.

129. *Hanada H.* Development of small telescope like PZT and results of Experiments on the Ground / H. Hanada, A. Gusev, et al. // 2017. – “Gyroscope and Navigation”. – Vol. 8. – P. 304–319.

130. *Petrova N.* New Trends in the Development of the Lunar Physical Libration Theory / N. Petrova, A. Gusev // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy.* – 2001. – Vol. 80 (3/4). – P. 215–225.

131. *Barkin Y.* The study of the spin-orbit and inner dynamics of the Moon: Lunar mission applications / Y. Barkin, A. Gusev, N. Petrova // *Advances in Space Research.* – Vol. 37 (1). – 2006. – P. 72–79.

132. История открытия и освоения Северного морского пути. В 4 томах / под ред. Я.Я. Гаккеля, А.П. Окладникова, М.Б. Черненко. – М.-Л., 1956–1969.

133. *Козловский С.О.* Русь и Северный морской путь в VI–XIII вв.: внешнеполитические и социально-экономические аспекты // VII Ушаковские чтения: сборник научных статей / науч. ред. Ю.П. Бардилова, Е.Л. Крикун, С.А. Никонов. – Мурманск: МГГУ, 2011. – С. 9–13.

134. *Гайнанов А.Г.* Гравиметрические исследования земной коры океанов. – М: Издательство Московского университета, 1980. – 240 с.

135. Большая Российская энциклопедия. – Т. 2. – М.: Большая 2005. – С. 445.

136. Северный Ледовитый океан // Горная энциклопедия: [в 5 томах] / гл. ред. Е.А. Козловский. – М.: «Советская энциклопедия», 1989. – Т. 4. – 623 с.

137. *Никифоров Е.Г.* Большая советская энциклопедия, Северный Ледовитый океан (ред. А.М. Прохоров). – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

138. *Гайнанов А.Г.* Измерения силы тяжести на море // Справочник геофизика. – Т. V. – М.: «Недра», 1968.

139. *Гайнанов А.Г.* О глубинной структуре земной коры юго-западной части Тихоокеанской переходной зоны // Земная кора островных дуг Далневосточных морей. – М.: «Наука», 1972.

140. *Гайнанов А.Г.* О VI геолого-геофизическом рейсе НИС «Академик Курчатов» в северной Атлантике // Вест. Моск. ун-та. – Сер. Геол. – 1972, № 1.

141. *Гайнанов А.Г.* Интерпретация гравиметрических наблюдений в океане // Методика геофизических исследований океанов. – М.: «Наука», 1974.

142. *Гайнанов А.Г.* и др. Аномальные гравитационные поля дальневосточных окраинных морей и прилегающей части Тихого океана. – Новосибирск: «Наука», 1974. – № 5.

143. *Гайнанов А.Г.* Гравитационное поле и строение земной коры Тихого океана / А.Г. Гайнанов, П.А. Строев, В.В. Федынский // Вестн. Моск. ун-та. – Сер. Геол. – 1974. – № 5.

144. Сообщения по ТВ 14.09.2022 года о начале работы в Арктике научной платформы с полным обеспечением проведения продолжительных исследований в Северном Ледовитом Океане.

БЛАГОДАРНОСТИ

За поддержку исследований, изложенных в монографии, и замечания, сделанные при ознакомлении с ее рукописью, автор выражает глубокую благодарность Данису Карловичу Нургалиеву, директору Института геологии и нефтегазовых технологий ИГиНГТ, проректору по направлениям нефтегазовых технологий, природопользования и наук о Земле Казанского федерального университета, создателю и руководителю Международного научного центра НЦМУ, доктору геол.-мин. наук, профессору; за обзорные статьи о Луне – Гусеву Александру Васильевичу, вице-президенту Казанского регионального отделения Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, академику, приглашенному профессору Национальных астрономических обсерваторий Японии, Цзилинского университета и Академии наук Китая; за техническую помощь при завершении монографии – Зиганшину Эдуарду Ришадовичу, кандидату геол.-мин. наук, руководителю направления Геомеханика, инженеру 1 категории.

Научное издание

Слепак Захар Моисеевич

ГРАВИРАЗВЕДКА

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В НЕФТЯНОЙ ГЕОЛОГИИ**

Корректор

Е.А. Волошина

Верстка

А.И. Галиуллина

Дизайн обложки

Р.М. Абдрахманова

Подписано в печать 31.10.2022.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Формат
60x84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 10,2. Тираж 30 экз.

Заказ 142/11

Отпечатано в типографии

Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужи́на, 1/37
тел. (843) 206-52-14 (доп. 1705), 206-52-14 (доп. 1704)