РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК • УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

# С.Г. Бычков

# МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ

ЕКАТЕРИНБУРГ, 2010

#### УДК 550.831

### Бычков С.Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. - 187 с.

В работе систематизирован и обобщен опыт проведения высокоточных гравиметрических съемок с использованием современной аппаратурной базы и представлена единая технологическая цепочка гравиметрических исследований от получения исходных гравиметрических данных до содержательной геологической интерпретации аномалий силы тяжести.

Показано, что использование высокоточного гравиметрического и топографогеодезического оборудования требует пересмотра стандартных процедур редуцирования наблюденных значений силы тяжести. Для определения поправок за влияние рельефа разработана технология, базирующаяся на прогрессивных методах подготовки первичной картографической информации и на современном математическом аппарате, которая позволяет с априори заданной точностью вычислять поправки. Учет влияния неоднородностей верхней части разреза предлагается рассматривать как поправку в аномалии Буге за переменную плотность промежуточного слоя, аналогичную поправке за влияние рельефа. Современные способы интерпретации гравитационных аномалий, позволяющие локализовывать источники аномалий в пространстве и давать их количественную оценку, существенно расширяют возможности использования гравиразведки и повышают ее геологическую эффективность на различных стадиях изучения нефтегазоперспективных объектов.

Для геофизиков и геологов производственных и научно-исследовательских организаций, преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов геофизической и геологической специальностей.

Ил. 66. Табл. 5. Библиогр. 383 назв.

#### Ответственный редактор

доктор технических наук, профессор В.И.Костицын (Пермский госуниверситет)

#### Рецензенты:

член-корреспондент РАН П.С.Мартышко (Институт геофизики УрО РАН), доктор технических наук В.Н.Конешов (Институт Физики Земли РАН)

ISBN 978-5-7691-2127-2

 © Бычков С.Г., 2010 г.
 © Горный институт УрО РАН, 2010 г.

# оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЭВОЛЮЦИЯ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ	9
<ol> <li>ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ .</li> <li>2.1. Современная гравиметрическая и топографо-геодезическая аппаратура</li></ol>	. 16
2.1.1. Гравиметр AUTOGRAV CG-3M / CG-5	. 16
2.1.2. Современная аппаратура для производства топографо- геодезических работ	. 17
2.1.3. Точность съемки и производительность работ	. 19
2.2. Обработка гравиметрических материалов	.21
2.2.1. Вычисление аномалий Буге	. 21
2.2.2. Система высот	. 22
2.2.3. Вертикальный градиент силы тяжести	. 24
2.2.4. Промежуточный слой	. 27
3. СОВРЕМЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОК ЗА ВЛИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ.	НИЕ .29
3.1. Способы вычисления поправок за влияние рельефа	. 29
3.2. Аппроксимационный подход к вычислению поправок за влияние рел	ьефа
местности	.31
3.3. Исходная информация о рельефе местности	. 32
3.3.1. Построение цифровых моделей рельефа	. 32
3.3.2. Оценка различий между картографическими и топографическим высотами	и . 36
3.3.3. Глобальные цифровые модели рельефа GTOPO30 и SRTM	. 39
3.4. Компьютерная технология определения поправок	. 43
3.4.1. Полиэдральная аппроксимация рельефа	. 43
3.4.2. Аналитические аппроксимации «локального» рельефа	. 44
3.4.3. Определение поправок за влияние удаленных областей рельефа	. 46
3.5. Оценка точности вычисления поправок	. 47
3.6. Пример вычисления поправки за влияние рельефа	. 48
4. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА	56
4.1. Величина поправки за промежуточный слой	. 36
4.2. Спосооы учета влияния неоднородностеи промежуточного слоя	38
4.3. Исключение локальных аномалии, обусловленных верхней частью	(0
	. 00
4.4. подавление влияния приповерхностных неоднородностей с помощьн	U

	64
4.5. пример учета влияния неоднородностей верхней части разреза при	
площадных гравиметрических работах	71
5. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ	
ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ	79
5.1. Методологические вопросы интерпретации	79
5.2. Векторное сканирование	82
5.2.1. Сущность векторного сканирования	82
5.2.2. Определение глубины аномалиеобразующих источников	85
5.3. Гравитационное моделирование	89
5.4. Интерпретация аномалий силы тяжести сочетанием методов вектор	юго
сканирования и гравитационного моделирования	92
6. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДО	В
НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИЗУЧЕНИЯ	
НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ	99
6.1. Гравиразведка при региональных геолого-геофизических работах	99
6.1.1. Методические аспекты региональных геолого-геофизических	
работ	. 99
-	
6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси	кой
6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенск депрессии	кой 102
<ul><li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li><li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных</li></ul>	кой 102
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур.</li> </ul>	кой 102 109
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур.</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет</li> </ul>	кой 102 109 с с
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет использованием современного программного обеспечения</li> </ul>	кой 102 109 сс 110
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li></ul>	сой 102 109 с 110 я113
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур.</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет использованием современного программного обеспечения</li> <li>6.2.2. Построение трехмерной геоплотностной модели месторождения</li> <li>6.3. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 3D</li> </ul>	сой 102 109 с 110 я113 124
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур.</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет использованием современного программного обеспечения</li> <li>6.2.2. Построение трехмерной геоплотностной модели месторождения</li> <li>6.3.1. Изучение глубинного строения площади съемки</li> </ul>	сой 102 109 с 110 4113 124
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет использованием современного программного обеспечения</li> <li>6.2.2. Построение трехмерной геоплотностной модели месторождения</li> <li>6.3. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 3D</li></ul>	сой 102 109 с 110 113 124 124
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li></ul>	сой 102 109 с 110 я113 124 124
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур.</li> <li>6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет использованием современного программного обеспечения</li> <li>6.2.2. Построение трехмерной геоплотностной модели месторождения</li> <li>6.3. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 3D</li></ul>	сой 102 109 с 110 я113 124 124 132
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li></ul>	сой 102 109 с 110 113 124 124 132 140
<ul> <li>6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенси депрессии</li> <li>6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур</li></ul>	сой 102 109 с 110 я113 124 124

Памяти Александра Кирилловича Маловичко посвящается

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В 1960-1980 годы благодаря работам Б.А.Андреева, В.М.Березкина, А.К.Маловичко, Е.А.Мудрецовой, Л.Д.Немцова, В.З.Слепака и многих других оформилось направление гравиразведки, получившее название «высокоточная» или «детальная» гравиразведка [4, 18, 123, 146, 147, 174, 175, 200, 265, 268 и др.]. Если ранее [9, 157, 169 и др.] возможности гравиметрического метода ограничивались тектоническим районированием территорий, картированием крупных структур и соляных куполов, созданием геофизической основы при геологическом картировании, то детальная гравиразведка стала претендовать на решение принципиально новых геологических задач, связанных с выделением и интерпретацией малоинтенсивных аномалий.

Данное направление возникло благодаря созданию и внедрению в производство новой отечественной гравиметрической аппаратуры – прежде всего, гравиметров ГАК-4М, ГАК-7Т и позднее - ГНУ-КС, ГНУ-КВ [75, 296]. Повышение точности и производительности новых гравиметров потребовало пересмотра существующих методик полевых работ, способов обработки и интерпретации гравиметрических данных. Основные задачи детальной или высокоточной гравиразведки сводились к разработке следующих основных направлений [174, 175, 200]:

1) рациональной методики полевых работ с высокоточными гравиметрами, обеспечивающей максимальную точность результатов съемки, при высокой производительности наблюдений;

2) специализированных приемов обработки и способов редукций наблюденного гравитационного поля;

3) специализированных приемов интерпретации аномального гравитационного поля, характерной особенностью которых является весьма незначительная интенсивность полезного сигнала.

При решении указанных задач детально исследовались технические характеристики гравиметров и возможные ошибки наблюдений [74, 146, 147, 174, 175, 179, 180]. С целью подавления ошибок наблюдений было создано большое количество методик измерений на опорной и рядовой гравиметрических сетях: повторных наблюдений в различных модификациях, разностного нуль-пункта, узловой съемки, секущих рейсов, отдельных приращений в различных модификациях и др. [98]. Типичная гравиметрическая сеть при полевых работах состоит из каркасной и заполняющей опорных сетей, создаваемых по центральной системе, и однократных наблюдений на рядовой сети [120]. Среднеквадратическая погрешность определения аномалий силы тяжести в редукции Буге составляла от  $\pm 0,07$ -0,08 мГал до  $\pm 0,10$ -0,15 мГал.

При обработке наблюденных значений силы тяжести очень большое внимание уделялось определению поправок за влияние рельефа и промежуточного слоя. Трудоемкость вычисления данных поправок стимулировала поиски наиболее оптимальных способов и приемов, как подготовки исходной информации, так и самих вычислительных процедур. Создано большое количество способов вычисления поправок, отличающихся различным моделями аппроксимации рельефа местности и, соответственно, различными алгоритмами вычислений.

Весьма существенный прогресс достигнут в области интерпретации гравитационных аномалий. В.Н.Страхов [283, 284, 285, 286, 287, 288] выделяет следующие периоды в теории интерпретации гравитационных и магнитных данных:

- первый (1890-1919 гг.) «до парадигмальный период»;
- второй (1920-1939 гг.) период «формирования парадигмы ручного счета»;
- третий (1940-1959 гг.) период «господства парадигмы ручного счета»;
- четвертый (1960-1985 гг.) период «формирования парадигмы ранней компьютерной эпохи»;
- пятый (1985-2000 гг.) период «господства парадигмы ранней компьютерной эпохи»;
- шестой (после 2000 гг.) период «формирования парадигмы зрелой компьютерной эпохи».

В частности, как отмечает В.Н.Страхов [285, 286, 287], вторая парадигма формировалась под влиянием четырех основных факторов: расширения геолого-разведочных работ, качественного изменения измерительной аппаратуры, качественного изменения вычислительных возможностей и процесса математизации – освоения достижений современной математики. За короткий срок (15-20 лет) «практически все разделы теории интерпретации потенциальных полей были радикальным образом переработаны и созданы принципиально новые компьютерные технологии решения задач гравиметрии и магнитометрии» [287]. Весьма существенную роль в становлении второй парадигмы сыграл ежегодный семинар им. Д.Г.Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» [279].

Успешное решение указанных задач позволило значительно повысить геологическую эффективность гравиразведки при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых в различных регионах. Гравиразведка стала широко применяться при поисках и разведке антиклинальных и рифогенных структур и при оценке перспектив их нефтеносности и газоносности, изучении зон разуплотнения, определения формы и положения соляных куполов.

В настоящее время также произошли принципиальные изменения в аппаратурном оснащении гравиметрических исследований [333, 336, 343, 350]. Геофизические организации используют высокоточные гравиметры, со смещением нуль-пункта несколько микрогал в день и автоматической записью результатов. Топографо-геодезическое обеспечение гравиметрических работ осуществляется с применением систем спутниковой навигации, электронных тахеометров и другого оборудования, позволяющего получить плановое и высотное положение гравиметрических пунктов с погрешностью несколько миллиметров.

Качественно новый этап в области интерпретации геолого-геофизических данных обусловлен созданием достаточно большое количество компьютерных систем и технологий по комплексному анализу геолого-геофизических данных [67]. К наиболее развитым современным технологиям, использующим методы математической статистики, корреляционно-регрессионного и факторного анализа, байесовского подхода в распознавании образов и безэталонной классификации, относятся компьютерные системы КОМР [318], КОСКАД-3D [234], ПАНГЕЯ [230], MultAlt [90] и др. Достаточно много компьютерных технологий создано для интерпретации потенциальных полей в комплексе с результатами других геофизических методов. Наиболее разработанными являются технология GCIS [236, 237], позволяющая строить согласованные сейсмогравиметрические модели; пакет программ СИГМА-3D [10, 12], предназначенный для интерпретации аэромагнитных данных; система VECTOR [203, 219] для трехмерной интерпретации полей; технология RELGRV-RELMAG [110], основанная на аппроксимационном подходе; программа решения структурных обратных задач гравиметрии [182] и другие. За рубежом, а в последние годы и в нашей стране, широкое распространение получило программное обеспечение Oasis Montaj компании GeoSoft (Канада), которое является лидером в мире геофизических программ обработки данных (в том числе гравиметрических) и построения карт [368]. На базе геоинформационных технологий создаются системы хранения, обработки и анализа гравиметрических данных [69, 262]. Для интегрирования разноуровневых и разнометодных покоординатно привязанных геологогеофизических данных создана геоинформационная система ИНТЕГРО [78, 310].

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время наступил новый этап развития гравиразведки, требующий переосмысления методик полевых работ, совершенствования стандартов редуцирования аномалий силы тяжести и обобщения опыта интерпретации гравиметрических данных.

В данной монографии систематизирован и обобщен опыт проведения вы-

сокоточных гравиметрических съемок с использованием современной аппаратурной базы и представлена единая технологическая цепочка гравиметрических исследований, включающая в себя высокоточные измерения поля силы тяжести, эффективные способы вычисления необходимых редукций, современные способы интерпретации гравитационных аномалий, содержательный геологический анализ результатов. Современное состояние гравиметрических исследований изложено в следующей последовательности:

- особенности современной гравиметрической съемки, включая анализ гравиметрической и топографо-геодезической аппаратуры, методику полевых наблюдений, обеспечивающую максимальную точность и производительность работ;

- вопросы обработки полевых гравиметрических материалов, при этом особенное внимание уделено новым технологиям введения поправок за влияние рельефа и промежуточного слоя;

- современные технологии извлечения информации из гравиметрических данных, прежде всего способы трансформации аномалий силы тяжести, позволяющие локализовать источники аномалий в пространстве, и гравитационное моделирование, которое дает количественную оценку параметров источников аномалий, а также совместное их применение при решении различных геологических задач.

Изложенные современные технологии ориентированы, прежде всего, на изучение месторождений нефти и газа. Данными исследованиями автор занимается более 30 лет в качестве исполнителя и руководителя работ, проводимых на территории Пермского края, в Свердловской, Оренбургской, Кировской, Тюменской, Волгоградской, в Ханты-Мансийском национальном округе, в Республиках Удмуртия, Коми, Татарстан и других регионах.

Автор благодарен всем сотрудникам, с которыми ему посчастливилось вместе работать, особенно коллективу геологов и геофизиков ОАО «Пермнефтегеофизика», сотрудникам лаборатории геопотенциальных полей и Научнопроизводственной геофизической экспедиции Горного института УрО РАН.

# 1. ЭВОЛЮЦИЯ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Совершенствование разведочной гравиметрии при исследованиях на нефть и газ, расширение круга решаемых задач и основные ее достижения в изучении геологического строения недр, рассмотрим на примере эволюции гравиметрических исследований на территории Пермского Прикамья [216].

Открытие богатейших залежей калийных солей в Предуральском прогибе послужило началом целенаправленного изучения глубинного строения прилегающих территорий методами геологии и геофизики. Уже в 1926 – 1927 гг. была поставлена вариометрическая съемка в районе г. Соликамск. В результате интерпретации ее материалов Б.В.Нумеров установил места подъемов соляной толщи.

Обнаружение П.А.Преображенским в 1929 г. промышленной нефти в артинском рифовом массиве вблизи Верхнечусовских городков дало новые перспективы геологическим и геофизическим исследованиям. В первое время все работы велись в районе Верхнечусовских городков. Геофизический комплекс состоял из вариометрии, маятниковой съемки, наземной магнитометрии, а также небольших объемов сейсморазведки и электроразведки.

Нефтепроявления в г. Краснокамск, выявленные при поисках воды, стимулировали геолого-геофизические работы на восточной окраине Восточно-Европейской платформы, которые ознаменовались открытием ряда крупных месторождений нефти. Одновременно, вплоть до 1945 г., продолжались исследования в Предуральском прогибе. Видное место в геофизическом комплексе здесь занимала, по-прежнему, вариометрия.

В связи с возросшим объемом геофизических работ в 1950 г. была организована контора «Пермнефтегеофизика». С этого времени развернулось планомерное изучение территории Прикамья геофизическими методами. Среди этих методов видное место принадлежало гравиразведке масштаба 1: 200 000. За два десятка лет огромные площади были покрыты гравиметрической съемкой, в основном, пешеходными маршрутами. Г.И.Каратаевым и С.А.Шиховым под руководством А.И.Гершанока и И.А.Любимцевой выполнено согласование и систематизация результатов полевых измерений, полученных различными партиями, и оформлено в виде Государственных гравиметрических карт масштаба 1:200 000 первого поколения.

Однако из-за труднодоступности некоторых районов Пермского края большие участки остались без наблюдений. Кроме того, низкие аппаратурные возможности (высокие погрешности измерений) тех лет и редкая сеть гравиметрических пунктов не позволяли решать конкретные геологические задачи. До настоящего момента гравиметрические карты этого масштаба северного, западного и южного районов Пермского края содержат все вышеизложенные негативные факты [35, 235].

Несмотря на отмеченные недостатки, съемки масштаба 1:200 000 совместно с материалами аэромагнитных съемок использовались многими исследователями для тектонического районирования территории, составления схем строения кристаллического фундамента и осадочного чехла [207, 215, 245, 306]. Цель работ – определение перспективных направлений региональных и поисковых геологоразведочных работ.

После проведения общей съемки уже детальная гравиразведка успешно применялась для оконтуривания и прослеживания бортов Камско-Кинельской системы прогибов [315]. Применение кварцевых астазированных гравиметров и совершенствование методов обработки и интерпретации полевых наблюдений позволило существенно повысить геологическую эффективность гравиразведки. Обоснованием гравиметрических исследований в этом направлении послужили обобщения, выполненные кафедрой геофизических методов поисков и разведки Пермского университета под руководством профессора А.К.Маловичко.

По гравиметрическим данным выявлена возможность решения новых задач, например, обнаружение зон распространения рифовых сооружений пермского возраста, протягивающихся вдоль границы платформы и Предуральского прогиба, отдельных рифов в прогибе, картирование передовых складок Урала и прогнозирование поднятий по маркирующим горизонтам в осадочном чехле на основе выделения в гравитационном поле небольших положительных аномалий. На рекомендованных гравиметрией участках [207] к настоящему времени усилиями сейсморазведки и бурения открыто 29 месторождений нефти, из которых 18 эксплуатируется.

С каждым годом круг поисково-разведочных задач, решаемых методами детальной гравиразведки, расширяется. Совершенствуется методика полевых работ и интерпретация. Все шире в процессе камеральной обработки используются быстродействующие электронные вычислительные машины.

С конца 1970 годов гравиметрические исследования в ОАО «Пермнефтегеофизика» проводятся по линиям сейсмических профилей. Такая перестройка преследовала цели увеличения взаимной информативности комплексируемых методов, повышения надежности и достоверности геологической интерпретации. Основной объем работ сосредотачивается в районах со сложным геологическим строением: в Соликамской впадине, на Передовых складках Урала, в Предтиманском прогибе и некоторых других.

Основой комплексной интерпретации при изучении сложнодислоцированных объектов в этот период времени является составление согласованных сейсмо-гравиметрических моделей. Такое моделирование выполнялось преимущественно на Передовых складках Урала для изучения поднадвиговых структур, для уточнения формы и амплитуды тектонических нарушений фундамента и осадочного чехла, выделенных ранее по качественным признакам гравитационного и магнитного полей, для картирования предполагаемых интрузивных тел и т.д. [43].

В северной и восточной частях Пермского Прикамья гравиразведка успешно использовалась для картирования соляной толщи, изучения позднекаменноугольных и раннепермских рифов, выявления положительных структур, перспективных на нефть и газ [181]. Основными методами интерпретации являлись осреднение поля в скользящих окнах, вычисление высших производных, вариаций Саксова-Ниггарда и другие, а также гравитационное моделирование [67].

В ОАО «Пермнефтегеофизика» получены положительные результаты изучения верхней части разреза (ВЧР) для целей сейсморазведки с привлечением гравиметрических данных [3]. Разработанный метод основывается на построении согласованной сейсмогравиметрической модели верхней части разреза на основе комплексной интерпретации результатов сейсмической и гравиметрической съемок с учетом данных бурения, сейсмокаротажа и других геофизических методов [193].

Необходимо также отметить, что в Прикамье высокоточная гравиразведка успешно применялась для детального изучения алмазоносных площадей, золотоносных и других рудных месторождений. Благодаря работам по картированию поверхности солей на Верхнекамском месторождении калийных солей, были определены широкие возможности гравиметрии в изучении неоднородностей надсоляной толщи и подсолевых горизонтов [217]. Площадная детальная гравиразведка входит в геофизический комплекс обеспечения безопасной отработки калийных залежей. На этом же месторождении реализована методика наземно-подземной гравиметрии.

Несмотря на большие объемы ранее проведенных гравиразведочных работ, в целом, на сегодняшний день гравиметрическими съемками, пригодными для использования при производстве поисково-разведочных геологических работ на различные полезные ископаемые, Пермских край обеспечен лишь на 25-27% [35].

В настоящее время на нефтегазоперспективных участках Пермского края площадные гравиметрические съемки масштабов 1:50 000 и 1:25 00 выполняются Научно-производственной геофизической экспедицией Горного института УрО РАН. Полевыми работами охвачены территории Соликамской, Юрюзано-Сылвенской и Верхнепечорской депрессий, Передовых складок Урала, Косьвинско-Чусовской седловины, Камского свода и другие регионы (рис.1.1). Одновременно производятся гравиметрические наблюдения по региональным

профилям в комплексе с сейсморазведкой, геохимическими и аэрокосмогеологическими исследованиями с целью выявления площадей для постановки детальных поисково-разведочных работ.



Рис. 1.1. Гравиметрические исследования на территории Пермского края по состоянию на 1.01.09 г.

К основным направлениям гравиметрических работ, проводимым в последние годы на территории Прикамья и в ряде других регионов, можно отнести следующие [57, 204, 210, 253].

1. Проведение профильных и площадных региональных гравиметрических работ в комплексе с сейсморазведкой и переинтерпретация на основе полученных результатов имеющихся геолого-геофизических материалов с целью тектонического районирования, создания моделей геологического строения и прогнозирования нефтегазоносности. Результаты комплексной интерпретации представляются в виде объемной геолого-геофизической модели строения осадочного чехла и кристаллического фундамента и используются для оценки ресурсной базы и локализации участков для постановки поисковых работ.

2. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет по новым технологиям и алгоритмам на отдельных площадях и в пределах крупных территорий для обоснования дальнейших направлений геолого-разведочных работ. В результате этих исследований получены новые данные о геологическом и об объемном плотностном строении изучаемых территорий, выявлены и локализованы в пространстве источники аномалий силы тяжести. Намечены участки, перспективные на выявление локальных ловушек нефти и газа.

3. Постановка опережающей гравиметрической съемки на слабо изученных площадях с целью выделения перспективных участков на поиски месторождений углеводородов. Такие работы выполнялись в Верхне-Печорской депрессии, на востоке Соликамской депрессии. Результатом исследований явились рекомендации постановки сейсморазведочных работ на конкретных участках.

4. Постановка детальных гравиметрических работ на известных месторождениях с целью уточнения геологического строения и генезиса нефтеперспективных структур, выделения зон разуплотнения в различных интервалах разреза, для изучения нижнепермских отложений.

5. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 3D для детализации геологического строения месторождений нефти, особенно верхней части разреза, включая надсоляную, соляную толщи и нижнепермские отложения в Соликамской депрессии, выделения зон разуплотнения продуктивных интервалов разреза.

Обработка и интерпретация данных гравиметрических съемок осуществляется комплексом программ, позволяющим вычислять аномалии Буге, определять плотность промежуточного слоя, вычислять стандартные профильные и площадные трансформации полей, включая определение интегральных характеристик и особых точек полей различными методами, решать прямые и обратные задачи в двух и трехмерном варианте. Использование аппроксимационного, вейвлетного, фрактального подхода к интерпретации гравитационного и магнитного полей в сочетании с программами распознавания образов и решения обратных задач позволяет разделить соответствующие поля на составляющие, обусловленные различными интервалами геологического разреза, и получать трехмерную модель структурно-тектонического строения изучаемых площадей.

Учитывая большие объемы проводимых работ и необходимость централизованного хранения и обработки разнородных геолого-геофизических данных, в Горном институте УрО РАН разрабатывается и постоянно совершенствуется информационно-аналитическая система ГРАВИС [259, 262], созданная на основе ArcGIS 9.0. Система ГРАВИС осуществляет следующие функции [262]:

- сбор геолого-геофизической информации (первичные материалы геофизических съемок, результаты тематических обобщений в виде текстовых отчетов и графических приложений, данные по отдельным видам исследований, данные об изученности территории и т.д.);
- первичную обработку гравиметрических данных, включая вычисление поправки за влияние рельефа;
- эффективный доступ и управление большими объемами данных, выполнение многоцелевого информационного поиска и выборки в объектах баз данных;
- многоэтапную обработку и анализ данных, ориентированных на решение конкретных геолого-геофизических задач, оформление и вывод готовой информации (карты, графики, документация и т.п.) конечному пользователю.

Основным средством интерпретации данных гравиметрической и магнитометрической съемок является созданная в Горном институте Уральского отделения РАН под руководством В.М.Новоселицкого уникальная компьютеризированная система VECTOR, не имеющая аналога в мировой и отечественной гравиметрии. Система позволяет получать трехмерную плотностную картину строения недр, локализовывать источники плотностных аномалий с определением их глубин, выявлять в пространстве плотностные и магнитные неоднородности.

Компьютерная технология, реализованная в системе VECTOR, является результатом многолетних научных исследований коллектива лаборатории геопотенциальных полей Горного института. Система представлялась на Международных и Всероссийских выставках и конференциях, имеет положительные отзывы от различных организаций, включая Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Эффективность системы подтверждена многочисленными результатами ее практического использования для решения задач нефтегазовой и горнодобывающей промышленности в различных регионах России. Результатом гравиметрических исследований Горного института УрО РАН стало выделение поисковые объектов, перспективные на выявление залежей нефти и газа в осадочном чехле, рекомендации по дальнейшим поисковоразведочным работам, уточнение контуров месторождений и обнаружение ранее не выявленных объектов вблизи известных месторождений; трехмерные плотностные модели отдельных нефтегазоносных территорий и объектов.

# 2. ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

# 2.1. Современная гравиметрическая и топографо-геодезическая аппаратура

#### 2.1.1. Гравиметр AUTOGRAV CG-3M / CG-5

Важным этапом гравиметрических исследований являются полевые работы. Очевидно, что от того, насколько точно будут получены исходные гравиметрические данные, зависит геологическая эффективность и достоверность выводов о геологическом строении территорий.

Одним из существенных недостатков отечественных гравиметров ГНУ-КС / КВ, которыми оснащены практически все гравиметрические предприятия, является нелинейное смещение нуль-пункта. Поскольку этот процесс является неуправляемым и непредсказуемым, для минимизации соответствующих погрешностей разработано большое количество технологий проведения полевых работ [98, 147, 174 и др.], включающих и создание густой многоуровенной сети опорных пунктов, и специальные методики рейсов, что, естественно, приводит к уменьшению производительности работ.

Появление в 1990-е годы на отечественном рынке качественно новых гравиметров, технические характеристики которых по данным [194, 327, 328, 330, 334, 335, 337, 338, 371] приведены в табл.2.1, позволило по-новому взглянуть на методику полевых работ [49, 272]. Учитывая, что современные гравиметры имеют очень малое линейное смещение нуль-пункта, позволяют автоматически вводить поправки за приливные притяжения, наклон прибора, температуру, в них включены фильтры шумоподавления, длительность рядового рейса может быть достаточно большой.

Таблица 2.1

технические характеристики современных гравиметров				
Гравиметр	Изготовитель	Диапазон, мГал	Погрешность еди- ничного измере- ния, мкГал	Смещение нуль-пункта
ГНУ-КВ	ОАО «Нефте-	80-500	30	
	КИП»			
ГНУ-КВК	ОАО «Нефте-	6000	20	0,2
	кип»			мГал/сутки
CG-3M /	Scintrex Ltd.	8000	5	0,02
CG-5				мГал/сутки
G-meter	LaCoste &	7000	40	<1,0
	Romberg Grav-			мГал/месяц
	ity Meters, Inc.			

Taximuacena vanaetanuetuen connamini in rnanimetro

Гравиметр	Изготовитель	Диапазон, мГал	Погрешность еди- ничного измере- ния, мкГал	Смещение нуль-пункта
G-meter	LaCoste &	100	10	0,001
Aliod 100x	Romberg Grav-			мГал/1000
	ity Meters, Inc.			час
GRAVITON-	LaCoste &	в любой	3	<1,0
EG	Romberg Grav-	точке мира		мГал/месяц
	ity Meters, Inc			

Примечание: в 2001 году LaCoste & Romberg (Техас, США), Scintrex (Канада), Micro-g Solutions (Денвер, США) и Auslog Pty (Австралия), объединились в новую компанию LaCoste & Romberg - Scintrex, Inc.

Гравиметры Autograv CG-3 и CG-5 - микропроцессорные, автоматические гравиметры с множеством принципиально новых характеристик [335, 352, 374]. Они работают в диапазоне 8000 мГал, благодаря чему могут использоваться в любой точке мира без переустановок. Автоматическое считывание, в сочетании с усилением сигнала в реальном времени и статистическим анализом, уменьшает ошибки оператора и увеличивает надежность и производительность.

Задокументированные полевые тесты гравиметра Autograv [337, 338] показывают, что разница между отдельными измерениями и средним по станции не превышает 0,001 мГал. Благодаря возможности полной автоматизации, исключаются погрешности визуального снятия отсчетов, обычные в старых гравиметрах, происходящие из-за ошибок оператора, оптического параллакса и механической конструкции. Показания датчика в системе Autograv получаются путем постоянного усреднения серии замеров, взятых в течение определенного времени. Результаты измерения отражаются на дисплее непосредственно в мГал и сохраняются во флэш-памяти для последующей передачи в компьютер. Основываясь на введенных оператором данных о географическом положении и временном поясе, Autograv автоматически вычисляет поправку за приливные притяжения к каждому измерению в реальном времени. Гравиметр Autograv CG-5, кроме того, может вычислять поправку за влияние рельефа местности вблизи гравиметрического пункта, используя введенные оператором углы превышений.

# 2.1.2. Современная аппаратура для производства топографо-геодезических работ

Геодезические измерения при высокоточной гравиметрической съемке решают следующие основные задачи [121, 243]: вынос в натуру пунктов гравиметрических наблюдений, определение их координат и высот, по возможности, в едином технологическом цикле полевых работ, а также закрепление на местности опорных гравиметрических пунктов.

Каждый из этих видов работ имеет свою специфику и применяется то оборудование и методики, которые наиболее целесообразны в данных условиях [263]. В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные методы проведения топографо-геодезических работ, основанные на использовании спутникового и наземного электронного геодезического оборудования и последующей компьютерной обработки полевых измерений. Эти геодезические средства можно условно разделить на следующие группы: оптикоэлектронное и GPS-оборудование. Обзор характеристик и производительности основных геодезических приборов, используемых при производстве гравиметрической съемки, представлен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

	Точность				
Аппаратура	Плано-	по высо-	производительность,		
	вая	те	ilyiikiob b iae		
Оптико-электронное оборудование:					
Цифровые нивелиры		1-5 см	15		
Электронные теодолиты	2-5 см		8-10		
Электронные тахеометры	2-5 см	2-5 см	тахеометрический		
			ход: 10		
			высотный ход: 20		
Спутниковая аппаратура:					
Навигационные приемники	5-7 м	Около	Около 30		
		30 м			
Двухчастотная аппаратура	0,5-5 см	0,5-5 см	Быстрая статика: 7		
			Кинематика: 25		

Обзор основных характеристик современного геодезического оборудования

Наиболее перспективной в настоящее время, безусловно, является технология спутникового геодезического и навигационного обеспечения гравиметрических работ из-за преимуществ в точности, производительности, универсальности и экономии. Однако применяемые при этом методы существенно отличаются от тех, которые используются при классических геодезических съемках [49, 269, 331, 345, 348, 356, 376, 383]. При соблюдении основных правил GPS съемка оказывается сравнительно простой и обеспечивает хорошие результаты. Одними из наиболее распространенных геодезических спутниковых приемников являются приемники фирмы Trimble. Современной разработкой фазовой GPS аппаратуры компании Trimble являются двухчастотные GPS приемники Trimble Total Station пятого поколения. Кроме того, в настоящее время на рынке все больше появляется оборудование, принимающее одновременно сигналы GPS и GLONAS.

Снижение стоимости спутниковых приемников, повышение точности геодезических определений, достижения в области геоинформационных технологий, реализация бескабельной многоканальной связи, включая пересылку данных с помощью Интернет, и высокотехнологичных интегрированных систем делает применение спутниковых технологий в геофизической отрасли эффективным и экономически привлекательным. Пожалуй, единственным недостатком использования систем GPS при производстве гравиметрических работ является низкая точность определения высот в залесенной местности.

Для производства топографо-геодезических работ существует большой парк оптико-электронного оборудования, включая нивелиры, теодолиты, тахеометры. По опыту работ эффективным представляется использование электронных тахеометров. Преимущество их заключается в том, что можно производить любые угломерные измерения одновременно с измерением расстояний и по полученным данным проводить вычисления, сохраняя всю полученную информацию на магнитных носителях. Электронные тахеометры одинаково удобны для выполнения рутинной съемки и для разбивки пунктов. Эволюция электронного тахеометра продолжается с внедрением сервоприводов, автоматического слежения и безотражательной технологии.

Таким образом, современная технология топографо-геодезических работ при высокоточных гравиметрических съемках вполне обеспечена прогрессивными методами и современным геодезическим оборудованием.

#### 2.1.3. Точность съемки и производительность работ

В Горном институте УрО РАН с 2000 г. полевые гравиметрические работы выполняет Научно-производственная геофизическая экспедиция, укомплектованная опытными высококвалифицированными кадрами, оснащенная высокоточной гравиметрической (гравиметры Autograv CG-3M и CG-5) и геодезической (системы GPS Trimble 5700, электронные тахеометры Trimble, Nikon, Topcon) аппаратурой, зимней и летней вездеходной техникой. Ежегодно отрабатывается более 3000 км съемки в различных регионах России, отличающихся орогидрографическими и климатическими условиями. Выполняются профильные региональные и площадные работы масштабов от 1:10 000 до 1:50 000. В процессе работ созданы и опробованы методики полевых наблюдений с использованием как автоматизированных гравиметров, так и совместное их применение с отечественными ГНУ-КВ.

Как видно из рис. 2.1, постепенное перевооружение полевых подразделений современной гравиметрической и геодезической аппаратурой привело к резкому повышению точности работ и производительности работ. Если при работе с гравиметрами ГНУ-КВ и отечественными нивелирами среднеквадратическая погрешность аномалий Буге составляла ±0,06-0,10 мГал, то с гравиметрами Autograv CG-3M, CG-5, системой GPS и электронными тахеометрами погрешность составила ±0,02-0,04 мГал. Точность съемки вне зависимости от масштаба существенно выше допускаемой «Инструкцией по гравиразведке» [120] погрешности определения аномалий.



Рис. 2.1. Производительность(а) и точность (б) гравиметрических работ при использовании современной аппаратуры (ГНУ – съемка гравиметрами ГНУ-КВ; CG – Autograv CG-3M, CG-5)

Производительность работ зависит не только от применяемой аппаратуры, но и от условий работ: времени года, удаленности, залесенности, заболоченности площади и др. Тем не менее, вне зависимости от условий, наглядно виден рост производительности работ от 1000 км в месяц в 1999-2001 гг. до 3000-4000 км в месяц в 2006-2008 гг. При этом следует учесть, что точность съемки и сроки выполнения полевых работ, как правило, определяет заказчик, поэтому при проектировании методики полевых работ находится оптимальное соотношение между производительностью и точностью съемки.

#### 2.2. Обработка гравиметрических материалов

#### 2.2.1. Вычисление аномалий Буге

В гравиразведке основными исходными данными для получения информации о геологическом строении территорий являются аномалии силы тяжести в редукции Буге. Очевидно, что они должны быть свободны от всех помех негеологического характера и не должны изменяться в процессе интерпретации. Процедуры редуцирования стандартизированы и обязательны для всех организаций, проводящих гравиметрические работы. Субъективизм и неоднозначность должны быть только на этапе интерпретации аномалий.

Принятые процедуры обработки гравиметрических данных и вычисления аномалий Буге, описанные в учебниках по геофизике, формализовались в 1920- $1930^{x}$  годах [5, 9, 157, 270], когда происходило становление гравиразведки, использовались маятниковые гравиметры и вариометры Этвеша при нефтепоисковых исследованиях в Америке, изучении солянокупольных структур в Германии, Курской магнитной аномалии в СССР и др. Съемки имели локальный характер, разрешая многочисленные допущения и упрощения в процедурах обработки, которые опирались на известные в то время сведения о форме Земли, абсолютном значении силы тяжести и минимизировали вычислительные требования. Несмотря на допущения и упрощения, эти процедуры с минимальным изменением продолжают использоваться и поныне для решения большого круга геолого-геофизических задач, включены в учебники по гравиразведке, Инструкции и ГОСТы [74, 75, 83, 96, 98, 99, 100, 101, 120, 173, 180, 191, 258, 293, 301, 304, 323]. Хотя в большинстве перечисленных учебников упомянуто о наличии «косвенного эффекта», о необходимости учета эллипсоидольности Земли, но в действующей «Инструкции по гравиразведке» [120] и Государственном стандарте [96] об этом нет ни слова.

Как показано выше, в настоящее время произошли принципиальные изменения в аппаратурном оснащении гравиметрических исследований, соответственно резко возросла точность съемки. Существенным образом возросли наши знания о форме Земли, создана мировая опорная гравиметрическая сеть, в открытом доступе имеются детальные базы данных о фигуре геоида и рельефе Земли и, учитывая современные вычислительные мощности, нет никаких причин для применения упрощенных формул при вычислении поправок и редукций в гравиметрические наблюдения [40, 48, 49].

Если в отечественной геофизической практике, как уже упомянуто выше, все допущения и упрощения закреплены «Инструкцией по гравиразведке» [120] и Государственным стандартом [96], то за рубежом погрешности поправки Буге активно обсуждаются в литературе [329, 339, 342, 346, 355, 358, 359, 360, 377]. Более того, в Северной Америке рабочая группа из 21 геофизика и геодезиста из четырех стран, представляющих правительственные агентства и промышленность, разработала новые стандарты для редуцирования гравиметрических данных и вычисления аномалий Буге [367].

Самое существенное изменение в пересмотренных стандартах касается выбора вертикального датума. Традиционно, высоты гравиметрических пунктов определяются относительно геоида или уровня моря, а теоретическое значение силы тяжести вычисляется на земном эллипсоиде. Новый стандарт устраняет необходимость в вычислении косвенного эффекта, который минимизирует погрешность, обусловленную разностью высот. Кроме того, поскольку положение пунктов гравиметрических наблюдений теперь обычно получают с помощью GPS относительно эллипсоида, использование эллипсоидальных высот гораздо удобнее.

Напомним основную формулу вычисления аномалий силы тяжести в редукции Буге [98, 120]

$$\Delta g_{\rm B} = g_{\rm Hadon} - \gamma_0 + 0.3086H - 0.0419\sigma H + \delta g_{\rm p\phi}, \tag{2.1}$$

где  $g_{\text{набл}}$  – наблюденное значение силы тяжести в гравиметрическом пункте на высоте H;  $\gamma_0$  – нормальное значение силы тяжести, вычисляемое по формуле Гельмерта (1901-1909 гг.); 0,3086H – поправка за свободный воздух (Фая); 0,0419 $\sigma H$  – поправка за промежуточный слой с плотностью  $\sigma$ ;  $\delta g_{p\phi}$  – поправка за влияние окружающего рельефа.

Все слагаемые формулы (2.1) получены при различных условиях и ограничениях и вносят определенные погрешности в аномалии силы тяжести [47, 48, 358, 377].

#### 2.2.2. Система высот

Высоты гравиметрических пунктов определяются в России в Балтийской системе высот [120], т.е. как превышение относительно поверхности геоида или уровня моря, в то время как нормальное поле определяется на уровенном эллипсоиде [119, 293]. Поскольку пункты с измеренными и нормальными значениями относятся к разным поверхностям, то вычисленные аномалии называются смешанными. Если в ранних работах [4, 74, 99, 180] это положение отмечалось, то в настоящее время [98, 120, 191] различием систем высот пренебрегают. Исторически это связано с отсутствием детальных карт геоида на территорию суши, а методологически обосновывается представлением, что ундуляции высот геоида имеют длиннопериодный характер, создающий фоновый эффект, легко устраняемый при интерпретации аномалий.

Как показали Г.С.Левин и С.А.Тихоцкий [162], пренебрежение указанными особенностями системы высот и связанные с ними погрешности в определении аномалий силы тяжести «способно свести к нулю возможности высокоточной гравиразведки» (с.57), поскольку погрешность, связанная с косвенным эффектом может превышать необходимую для решения поисковых задач точность определения аномалий силы тяжести. В настоящее время благодаря специальным спутниковым наблюдениям и обобщению наземных, морских и аэрогравиметрических съемок аномалии геоида определены с достаточно высокой точностью [345]. Кроме того, применение систем спутниковой навигации GPS позволяет определять превышения пунктов наблюдений относительно базовой станции в геодезической системе высот. Поэтому необходимы методические рекомендации и инструкции по применению GPS при высокоточной гравиметрической съемке [162].

На рис. 2.2 представлены разности аномалий в свободном воздухе, вычисленные с высотами относительно геоида и эллипсоида, для одной из площадей гравиметрической съемки, выполненной на востоке Пермского края. Среднеквадратическая погрешность определения наблюденных значений силы тяжести на данной площади составила  $\pm 0,033$  мГал; высот –  $\pm 0,07$  м. Как видно из рисунка, в целом ошибки вычисления аномалий могут быть исключены при интерпретации вместе с региональным фоном, однако явно видна нелинейность разности поправок: отмечается сгущение изолиний к северо-западу площади. Остаточная аномалия после снятия линейного фона в пределах площади исследований достигает 0,05-0,06 мГал, т.е. почти в два раза превышает точность съемки.

В североамериканском стандарте редуцирования [367] высоты гравиметрических пунктов предлагается определять относительно эллипсоида GRS80 (Geodetic Reference System), отличия которого от эллипсоида WGS84, обычно используемого в системе GPS, не превышают 10 см. Использование эллипсоидальных высот автоматически снимает вопрос о необходимости учета косвенного эффекта.



Рис. 2.2. Разность поправок в свободном воздухе, вычисленных с высотами относительно геоида и эллипсоида (точками показаны пункты гравиметрических наблюдений)

#### 2.2.3. Вертикальный градиент силы тяжести

Формула поправки за высоту пункта наблюдения (поправки в свободном воздухе или поправки Фая) имеет вид [180]

$$\delta g_{\phi a \pi} = (0,3088 - 0,0004 \sin^2 B)H - 7.2 \times 10^{-8} H^2, \qquad (2.2)$$

где *В* - широта пункта и *Н* – высота. В практике гравиразведки [98, 120], предполагая, что Земля является шаром с радиусом 6371 км и значением нормального поля 980 Гал [191], используется формула

$$\delta g_{\phi a \pi} = 0,3086H. \tag{2.3}$$

На рис. 2.3 приведен график разности поправок в свободном воздухе по

формулам (2.2) и (2.3) для широт, на которых расположен Пермский край. Как видно из графика, неучет эллипсоидальности Земли для данного региона приводит к перекосу поля более чем на 0,4 мГал.



Рис. 2.3. Зависимости погрешности поправки в свободном воздухе от широты и высоты пункта наблюдения

Разумеется, при крупномасштабных гравиметрических работах ошибка использования формулы (2.3) значительно меньше. Однако, при площади съемки 500 - 1000 км<sup>2</sup> и относительном перепаде высот 200 – 500 м, т.е. типичных съемках, проводимых для нефтепоисковых целей, ошибки вычисления аномалий в свободном воздухе могут быть соизмеримы с погрешностями определения наблюденных значений силы тяжести. На рис. 2.4 представлена разность поправок в свободном воздухе для той же площади, что и на рис. 2.2. Разности поправок по модулю достигают 0,02-0,04 мГал.

Следует отметить, что здесь так же, как и с системой высот, в ранних работах [4, 74, 99, 180 и др.] приводится формула (2.2) и указываются условия, при которых она сводится к формуле (2.3), то в более поздних работах [98, 120, 191] приводится только формула (2.3).



Рис. 2.4. Разность поправок в свободном воздухе, вычисленных по формулам (2.2) и (2.3) (цветом заливки показан рельеф местности)

В североамериканском стандарте редуцирования [367] предлагается следующая формула

$$\delta g_{\text{pag}} = (0,3087691 - 0,0004398 \sin^2 B)H - 7.2125 \times 10^{-8} H^2, \tag{2.4}$$

которая незначительно отличается от (2.2). Кроме того, предлагается вводить поправку за массу атмосферы, зависящую от высоты пункта.

Предлагаемые стандарты редуцирования изменяют, прежде всего, гравитационное поле в региональном плане, но и относительные изменения аномалий на небольших площадях могут достигать значительных величин. На рис. 2.5 представлены карты аномалий силы тяжести в редукции Буге при плотности промежуточного слоя 2.67 г/см<sup>3</sup>, вычисленные по стандартам, принятым в России и в Северной Америке, для одной из площадей гравиметрической съемки, выполненной на востоке Пермского края. Размеры площади примерно 18×27 км; перепад высот рельефа от 140 м до 500 м. Среднеквадратическая погрешность определения наблюденных значений силы тяжести на данной площади составила  $\pm 0.033$  мГал. Как видно из рисунка, разность аномалий, вычисленных различным способом, достигает ±0.10 мГал, т.е. в три раза превосходит точность полевой съемки.



Рис. 2.5. Сравнение аномалий Буге, вычисленных различным способом: a) принятым в России; б) по североамериканскому стандарту; в) разность аномалий

Таким образом, не вызывает сомнений, что возможности гравиразведки на современном этапе вступают в противоречие с существующими инструктивными требованиями к ее проведению. Поправки, вводимые нами в наблюденные аномалии силы тяжести, в значительной степени загрубляют точность съемки. Повышение геологической эффективности гравиметрических исследований невозможно на основе прежних методик наблюдений и технологий обработки.

#### 2.2.4. Промежуточный слой

Дискуссия о необходимости введения поправки за промежуточный слой и параметрах этого слоя в гравиметрической литературе имеет длительную историю. При введении этой поправки предполагается, что промежуточный слой представляет собой плоскопараллельную горизонтальную пластину с постоянной плотностью 2,30 г/см<sup>3</sup>, 2,67 г/см<sup>3</sup> или некоторой средней для конкретной площади исследований. Влияние отклонений физической поверхности Земли от плоскости учитывается введением специальной поправки – поправки за влияние рельефа.

Выбор и методы определения плотности промежуточного слоя (постоянной или переменной) и уровня приведения, учет сферичности Земли, определение методики и радиуса учета поправки за влияние рельефа активно обсуждается в гравиметрической литературе [19, 68, 93, 127, 357, 377 и др.]. Заметим, что в североамериканском стандарте [367] уравнение плоскопараллельной горизонтальной пластины заменено формулой для сферического сегмента радиуса 166,7 км. Разумеется, поправки за влияние рельефа вычисляются также с учетом кривизны Земли.

Вопросы высокоточного вычисления поправок за влияние рельефа и промежуточный слой рассмотрены в следующих разделах.

# 3. СОВРЕМЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОК ЗА ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

#### 3.1. Способы вычисления поправок за влияние рельефа

Определение поправок за влияние рельефа местности  $\delta g_p$  является необходимой процедурой при обработке материалов гравиметрических съемок. Вычисление топографических поправок  $\delta g_p$  сводится к интегрированию по объему V, заключенному между поверхностью рельефа и некоторой «нормальной» поверхностью (плоскостью, сферой, эллипсоидом) [98], проходящей через гравиметрический пункт. Решение прямой задачи гравиразведки, определяющее величину поправки за рельеф в случае, когда «нормальной» поверхностью является горизонтальная плоскость z = const, записывается в виде

$$\delta g_p(x, y, z) = \lambda \sigma \iiint_V \frac{(\zeta - z)d\xi d\eta d\zeta}{R^3} , \qquad (3.1)$$

где *x*, *y*, *z* – прямоугольные координаты гравиметрического пункта,  $\lambda$  – гравитационная постоянная,  $\sigma$  – плотность приповерхностных пород,  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$  – координаты учитываемого элемента массы,  $R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2}$  – расстояние между элементом массы и гравиметрическим пунктом.

Разработаны различные способы расчета  $\delta g_p$ , реализуемые с помощью палеток, номограмм и компьютерных программ [19, 93, 98, 105, 127, 170, 174, 175, 354, 357, 381 и др.]. Существующие способы отличаются различными методами численного решения (3.1), т.е. прежде всего различной аппроксимацией рельефа набором элементарных тел, гравитационный эффект которых выражается в аналитическом виде.

Специфика выражения (3.1) такова, что требует для высокоточного вычисления поправки  $\delta g_p$  задания весьма густой сети высотных отметок вблизи точки расчета и допускает разряжение этой сети по мере удаления от нее. Поэтому область учитываемого влияния рельефа подразделяется на несколько непересекающихся областей (обычно их называют зонами), для которых с различной детальностью проводится описание рельефа местности. Обычно предлагается [98] область учитываемого влияния рельефа D разбиваеть на внутреннюю ( $D_1$ ) и внешнюю ( $D_2$ ) подобласти. Внутренняя подобласть  $D_1$  (центральная зона) охватывает пункт гравиметрических наблюдений и его ближайшие окрестности (радиус зоны обычно составляет 0,4-0,5 см в масштабе карты) [174]. Внешняя подобласть  $D_2$  обычно подразделяется на три зоны (ближнюю, среднюю и дальнюю), характеризующиеся различной детальностью задания высотных отметок рельефа.

Установлено [127], что влияние рельефа в подобласти  $D_2$  можно рассматривать как сумму двух составляющих  $\delta g_p = \delta g'_p + \delta g''_p$ , первая из которых ( $\delta g'_p$ ) зависит от изрезанности рельефа местности, а вторая ( $\delta g''_p$ ) определяется высотой гравиметрического пункта. По мере увеличения расстояния от гравиметрического пункта амплитуда составляющей  $\delta g'_p$  уменьшается и начинает преобладать составляющая  $\delta g''_p$  [98]. Это позволяет в ряде случаев использовать при вычислении топопоправки регрессионные зависимости вида  $\delta g_p = f(z)$ . Функция f(z) в большинстве случаев имеет вид f(z) = az+b или  $f(z)=az^2+bz+cz$ , где *a*, *b*, *c* – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов [170]. Разработаны также подходы для учета влияния удаленных областей рельефа (средней и дальней зон) на основе расчета значений  $\delta g_p$  по редкой сети точек и последующей интерполяции имеющихся данных в пункты гравиметрической сети, что значительно уменьшает число сложных вычислительных операций [93, 98, 132].

Широко применяющиеся на практике способы учета влияния рельефа местности созданы в период формирования «парадигмы ранней компьютерной эпохи» [287]. Ограниченные вычислительные возможности и высокая стоимость машинного времени использующихся в этот период ЭВМ, а также сложности технического характера, связанные с формированием цифровых моделей рельефа местности (ЦМР) на машинных носителях, наложили свой отпечаток на имеющиеся технологии определения поправок за влияние рельефа. В частности ЦМР формировались вручную: как правило, значения высот снимались по сети 1×1 см или 0,5×0,5 см в масштабе используемой топографической карты. Из-за необходимости ввода в компьютер большого массива высотных отметок, при вычислении поправок, особенно в центральной зоне радиусом 100-300 м от пункта, признано нецелесообразным использование вычислительных средств и обычно они вычисляются вручную [98, 127] или выполняется нивелирование вокруг пунктов (метод «звездочек»).

Заслуживает внимания подход к вычислению поправок за влияние рельефа, принятый в североамериканском стандарте редуцирования [367]. Предлагается трехуровенная процедура вычисления: первая часть поправки, которая является ответственностью исполнителя работ, использует топографическую информацию, измеренную инструментально в полевых условиях в радиусе 100 м от пункта; вторая часть использует локальные данные о высотах с высоким разрешением (крупномасштабные топографические карты) до расстояния 895 м; последняя часть использует цифровые модели рельефа от 895 м до 166.7 км основанные на 15", 1' или 3' сетках и учитывающие кривизну Земли вне 14 км. Для первых двух зон рельеф аппроксимируется сегментированными кольцами (аналог палеток П.И.Лукавченко, 3.Хаммера), для третьей – вертикальными призмами. Такое унифицированное разделение области вычисления поправок на три зоны позволит пользователям заменить любую часть поправки, используя более точные и детальные исходные данные или другие процедуры вычисления.

## 3.2. Аппроксимационный подход к вычислению поправок за влияние рельефа местности

Развитие вычислительной и периферийной техники, а также современное программное обеспечение, создание электронных версий карт и детальных матриц рельефа, распространяемых, в том числе, в сети Internet, позволяют осуществить принципиально новый подход к учету влияния рельефа и подготовке ЦМР с использованием всей имеющейся информации о рельефе местности. Применение современных геоинформационных технологий позволяет создавать «большие ЦМР», отвечающие по детальности крупномасштабным топографическим картам.

Предлагается [109, 112, 113, 114, 115, 116, 144, 225] проводить разбиение области учитываемого влияния рельефа на две подобласти: внутреннюю  $D_1$  («локальный рельеф») и внешнюю  $D_2$  («региональный рельеф») без разделения их на зоны. Для каждой из выделенных подобластей используются разные исходные данные и различные алгоритмы расчета поправки  $\delta g_p$ .

Для подобласти  $D_1$ , охватывающей центральную и ближнюю зоны, поправки  $\delta g_p$  целесообразно вычислять с использованием аналитических аппроксимаций рельефа поверхности Земли  $\zeta = \Psi(\xi, \eta)$ , как предложено академиком В.Н. Страховым [281]. Отмечено, что значения  $\Psi(\xi, \eta)$  могут рассматриваться как предельные значения функции, гармонической во внешности «нормальной» поверхности, т.е. для построения  $\Psi(\xi, \eta)$  могут применяться методы, разработанные для аналитической аппроксимации гравитационного поля.

В условиях сложного рельефа, например, при наличии в подобласти  $D_1$  вертикальных склонов, поправки  $\delta g_p$  целесообразно вычислять с использованием полиэдральной аппроксимации рельефа, т.е. представлением его системой плоских неравносторонних наклонных треугольников, поскольку «негармоничность» рельефа будет существенным образом сказываться на точности вычисления поправки.

Цифровые модели «локального» рельефа местности подобласти  $D_1$  формируются путем векторизации скан-образов крупномасштабных топографических карт. Площадь подобласти  $D_1$  может составлять от единиц до нескольких сотен квадратных километров в зависимости от требуемой точности вычисления поправок  $\delta g_p$ .

Для подобласти  $D_2$  представляется более рациональным осуществлять истокообразную аппроксимацию значений  $\delta g_p$ , предварительно определенных в узлах сравнительно редкой регулярной сети, а затем проводить 3D-интерполяцию поправок непосредственно в гравиметрические пункты. Особенности «регионального» рельефа местности с достаточной для поставленной задачи точностью отражают матрицы высот GTOPO30 и SRTM, охватывающие практически всю поверхность Земли и свободно распространяемые в сети Ин-

тернет.

Рассмотрим более подробно предлагаемые алгоритмы вычисления поправок за влияние рельефа.

#### 3.3. Исходная информация о рельефе местности

#### 3.3.1. Построение цифровых моделей рельефа

Как известно [103, 156], цифровая модель рельефа – ЦМР (Digital terain model - DTM; digital elevation model - DEM; Digital Terrain Elevation Data - DTED) - средство цифрового представления рельефа местности в виде трехмерных данных как совокупности высот в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот, нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей. Наиболее распространенными способами цифрового представления рельефа является растровое представление и особая модель пространственных данных, основанная на сети TIN и аппроксимирующая рельеф многогранной поверхностью с высотными отметками в узлах треугольной сети. Процесс цифрового моделирования рельефа включает создание ЦМР, их обработку и использование.

Наиболее рациональной методикой подготовки ЦМР, применяющейся в настоящее время во многих организациях, является сканирование топографических карт и векторизация полученных скан-образов с помощью специализированных программ [6, 109, 114, 115]. Это позволяет сравнительно быстро создавать большие массивы информации, сохраняющие в цифровой форме все особенности крупно- и среднемасштабных топографических карт. При этом в результате векторизации карт изогипс рельефа дневной поверхности создаются файлы исходных данных (например: \*.shp файлы ГИС ArcView или \*.dat файлы в формате ASCII), содержащие порядка  $n(10^5 \div 10^6)$ , n = 1, 2, ..., 10 векторов вида  $\vartheta = \{x, y, z\}$ , а средняя плотность сети высотных отметок составляет примерно 200÷300 точек/см<sup>2</sup> в масштабе карты (рис.3.1). Совершенно очевидны существенные различия в степени детальности описания особенностей рельефа местности при ручном и автоматизированном способах создания ЦМР.

Необходимо сразу отметить, что серьезных технических проблем, связанных с использованием больших ЦМР, при вычислении  $\delta g_p$  не возникает, возможности современных компьютеров позволяют хранить в оперативной памяти и обрабатывать массивы данных указанной размерности. При этом повышается точность описания рельефа по сравнению с традиционными технологиями, базирующимися на кодировании топографических карт вручную, и становится возможным автоматизация расчета  $\delta g_p$  в пределах внутренней подобласти  $D_1$ .



Рис.3.1. Результат векторизации топографической карты масштаба 1:25 000

Весьма перспективным методом создания цифровой модели рельефа вблизи гравиметрического пункта является использование лазерного сканирования [373], которое обеспечивает очень точное описание нерегулярных поверхностей, и по сравнению с другими методами, весьма производительно. Однако, использование лазерных сканеров возможно только на открытых территориях.

Для вычисления поправок за влияние рельефа наиболее удобной ЦМР является матрица высот в узлах регулярной сети. Существует множество различных алгоритмов интерполяции двумерных данных: метод ближайшего соседа, метод обратных расстояний, радиальными базовыми функциями, полиномиальная регрессия, кригинг, триангуляция с последующей линейной или нелинейной интерполяцией, диаграммы Вороного, нейронные сети и многие другие [102]. Весьма большой набор методов интерполяции содержит программа GS Surfer (Golden Software Inc.). Такое многообразие методов интерполяции объясняется тем, что для решения различных задач и разных типов данных, как по форме, так и по содержанию, требуются разные алгоритмы интерполяции. Каждый из методов использует различный алгоритм и может приводить к различным результатам. В работе [370] проведено сравнение нескольких часто используемых алгоритмов интерполяции применительно к геофизическим данным.

Известно, что значения высот рельефа в различных точках земной поверхности функционально не связаны между собой и задача интерполяции произвольного набора двумерных данных о высотах в узлы регулярной сети является некорректной. Поэтому теоретически обосновать применение какого-либо способа интерполяции значений высот в узлы регулярной сети при создании матрицы высот, как наиболее оптимального, не представляется возможным. При решении каждой конкретной задачи необходимо использование статистического моделирования для оценки практического применения различных методов интерполяции [73, 189].

С этой целью проведена серия из нескольких вычислительных экспериментов с использованием векторизованных топографических карт. Оценивались погрешности, возникающие за счет интерполяции первичных картографических данных в узлы равномерной сети при формировании ЦМР [114, 115, 116]. Под первичными картографическими данными в данном случае подразумевается dat-файл, полученный при векторизации топографических карт масштаба 1:25 000 – 1:50 000, содержащий горизонтальные координаты и значения высот.

Были выбраны широко применяющиеся на практике алгоритмы интерполяции, реализованные в программе GS Surfer v.8: взвешенные расстояния (inverse distance to a power), кригинг (kriging), триангуляция (triangulation with linear interpolation), локальный полином (local polynomial), ближайший сосед (natural neighbor), минимальная кривизна (minimum curvature), скользящее среднее (moving average).

На рис.3.2 приведены графики зависимости среднеквадратической погрешности от количества использованных точек при различных методах интерполяции и различных размерах сеток. Использованы результаты векторизации и интерполирования высот топографической карты масштаба 1:25 000 с перепадом высот по площади от 185 до 365 м. Средняя плотность точек векторизации 370 точек/км<sup>2</sup> или около 90 точек/см<sup>2</sup> карты. Строились регулярные сетки размерами  $25 \times 25$  м (1 мм в масштабе карты),  $50 \times 50$  м (2 мм),  $100 \times 100$  м (4 мм) и  $200 \times 200$  м (8 мм) различными методами интерполяции.



Рис. 3.2. Зависимости среднеквадратической погрешности от количества использованных точек при различных методах интерполяции: 1 - Inverse Distance to a Power; 2 – Kriging; 3 - Local Polynomial; 4 - Minimum Curvature; 5 - Moving Average; 6 - Natural Neighbor; 7 - Triangulation with Linear Interpolation; 8 – сечение изолиний топографической карты.

Проведенное моделирование подтверждает очевидные факты – с увеличением объема информации и при сгущении плотности сети интерполяции увеличивается точность интерполяции. Полученные количественные оценки точности интерполяции позволяют сделать следующие основные выводы: 1) средняя плотность точек векторизации должна быть не менее 200-300 точек на 1 см<sup>2</sup> площади карты;

2) шаг регулярной сети должен быть не менее 2-5 мм в масштабе карты;

3) наилучшие результаты интерполяции дают Kriging, Triangulation with Linear Interpolation, Natural Neighbor и Minimum Curvature, т.е. методы с минимальным сглаживанием;

4) при любых размерах сетки наихудшие результаты получены методами Local Polynomial и Inverse Distance to a Power (следует заметить, что при расчетах методом Local Polynomial использовался полином второй степени – парабола, которая довольно часто применялась при «ручных» способах вычисления поправок за влияние рельефа [98]);

5) метод Moving Average, который вычисляет среднюю высоту в скользящем окне, (т.е. имитирует процесс «ручного» снятия высот с карты) слабо зависит от плотности точек векторизации, однако применять его не рекомендуется, поскольку при малых размерах скользящего окна в результативной сетке могут быть незаполненные узлы, а при большом размере окна резко возрастают погрешности интерполяции.

# 3.3.2. Оценка различий между картографическими и топографическими высотами

В процессе решения практических задач в различных регионах выявлены значительные расхождения в значениях топографических  $z^*$  (полученных инструментальным путем для пунктов гравиметрических наблюдений) и картографических z (полученных при векторизации топографических карт) высот [114, 115, 116]. Картографическая погрешность появляется как в процессе создания топографических карт [260], так и вследствие их устаревания [308].

На рис.3.3 приведена карта расхождений высот для одной из площадей гравиметрической съемки. Как видно из рисунка, расхождения высот весьма существенны (составляют десятки метров) и каких-либо закономерностей в их распределении не выявляется. Анализ причин расхождения, статистические оценки и некоторые подходы к решению этой проблемы даны в работах [114, 115, 116, 260, 308].

Анализ расхождений высот, полученных с векторизованных топокарт различного масштаба и измеренных при производстве гравиметрической съемки [113, 115], показал, что в целом распределение разностей высот для различных площадей на территории Западного Урала близко к закону Гаусса. Среднеквадратическое отклонение разностей высот для карт масштаба 1:25 000 составляет около ±3 м, для масштаба 1:50 000 – около ±6 м, т.е. примерно 0,5 сечения горизонталей рельефа [261].


Рис.3.3. Карта распределения разностей высот векторизованной топокарты масштаба 1:25 000 и данных нивелировки (черные точки - пункты гравиметрических наблюдений)

Можно предположить, что выявленные высокие значения расхождений  $\Delta z$  обусловлены двумя факторами: погрешностями плановой привязки гравиметрических пунктов  $\delta_l$  и ошибками  $\delta_2$ , связанными с погрешностями значений высот z, представленных на самих топографических картах. Считая оба вышеуказанных фактора независимыми, для определения численных значений погрешностей можно использовать аппарат дисперсионного анализа:  $D(\Delta z) = D(\delta_l) + D(\delta_2)$ , где D – символ, обозначающий дисперсию.

С целью определения вклада составляющей  $\delta_l$  в величину  $\Delta z$  выполнено имитационное моделирование, позволяющее оценить ее амплитуду. При этом предполагалось, что при достаточно густой сети высотных отметок (например,  $50 \times 50$  м) билинейная интерполяция позволяет достаточно точно провести восстановление рельефа земной поверхности между узлами ЦМР. По нашему мнению, при сравнительно пологом рельефе с небольшими градиентами высот данное допущение является вполне оправданным. Процесс имитационного моделирования, выполненный для 2250 пунктов для одной из площадей гравиметрической съемки на Западном Урале, заключался в следующем:

• картографические высоты *z* имеющихся на площади пунктов гравиметрических наблюдений, полученные при выполнении билинейной интерполяции, были приняты за «истинные»; • в значения координат (*x*, *y*) каждого гравиметрического пункта путем генерации псевдослучайных чисел вносилась помеха  $\varepsilon_{xy}$ , равномерно распределенная на интервале  $\pm 20$  м, т.е. каждый пункт мог произвольно перемещаться в плане в пределах квадрата со стороной 40 м, в центре которого находилось его истинное местоположение;

• методом билинейной интерполяции определялись новые значения высот, и вычислялась разность «истинной» высоты и высоты, полученной при наличии помехи *ε*<sub>x</sub>;

• осуществлялось построение гистограммы, и определялись статистические характеристики разности высот  $\delta_l$ .

Полученные результаты (рис. 3.4а) убедительно свидетельствуют о том, что наблюдаемые в пределах данной площади различия топографических и картографических высот не могут полностью объясняться погрешностями планового положения пунктов гравиметрических измерений. Основной вклад в величину  $\Delta z$  вносит картографическая погрешность  $\delta_2$  (рис. 3.4б). Погрешность  $\delta_2 > \delta_1$  характеризуется математическим ожиданием  $M \approx (1 \div 1,5)$  м и среднеквадратическим отклонением  $S \approx \pm 4,1$  м. Следует подчеркнуть, что проведенная оценка характеризует погрешность  $\delta_2$  по минимуму (вероятно, на самом деле она несколько выше, т.к. плановая привязка гравиметрических пунктов проведена более точно).

Наличие картографической погрешности  $\delta_2$ , на порядок превышающей требуемую точность определения высот пунктов гравиметрических наблюдений (а также превышающую погрешности интерполяции первичных картографических данных в узлы регулярной сети), безусловно, увеличивает погрешность определения поправок за влияние рельефа местности.

Топографические значения высот из-за низкой плотности сети их определения и ограниченности информации о рельефе размерами участка гравиметрической съемки не могут быть использованы для создания кондиционных ЦМР. В то же время имеющаяся картографическая информация позволяет получать достаточно достоверные сведения о форме земной поверхности (но не об абсолютных значениях высот). Следовательно, необходимо полностью отказаться от участия топографических высот в процессе вычисления поправок за влияние рельефа, считая при этом достоверными относительные изменения картографических высот в пределах учитываемой области *D* для каждого пункта гравиметрических наблюдений [109, 113, 115, 144].



Рис.3.4. Гистограммы разностей картографических и топографических высот: а) обусловленные отклонениями в плановом положении гравиметрических пунктов, б) обусловленные погрешностями высот на топографических картах

# 3.3.3. Глобальные цифровые модели рельефа GTOPO30 и SRTM

Взрывообразное развитие Интернет в последние годы затронуло и науки о Земле. Цифровые картографические материалы представлены в сети в различных видах. Для целей геологических исследований наибольший интерес представляет формат DEM. Этот формат представляет собой матрицу, каждая точка которой характеризуется горизонтальными координатами (широтой и долготой) и высотой. Наибольший интерес для вычисления поправок за влияние рельефа представляют данные GTOPO30 и SRTM [112, 116, 144, 225].

GTOPO30 – 30 секундная матрица высот, охватывающая всю поверхность суши. Этот продукт представляет собой завершение глобальной работы в U.S. Geological Survey's EROS Data Center (Центр регистрации и обработки данных Американской геологической службы), начинавшейся в 1993 г. и законченной в конце 1996 г. Глобальный набор данных охватывает весь Земной шар с горизонтальным интервалом сетки 30 секунд. Размеры общей матрицы 21 600 строк и 43 200 колонок. Горизонтальные координаты – широта и долгота в системе WGS84. Размер ячейки сетки DEM в прямоугольных координатах зависит от широты и долготы. Например, для территории Пермского края размер сетки составляет примерно 450-500 м по широте и около 900 м по долготе.

С целью оценки точности высот, приведенных в матрице GTOPO30, и возможности их использования для вычисления поправок за влияние рельефа в подобласти  $D_2$ , произведены сравнения высот GTOPO30 с высотами, определенными инструментально (нивелировка и/или GPS наблюдения) при производстве гравиметрических съемок в различных регионах России. Как и следовало ожидать, величина расхождений зависит, прежде всего, от расчлененности рельефа (рис.3.5). Расчлененность определена как среднее превышение между соседними гравиметрическими пунктами. Зависимость среднеквадратической погрешности высот, приведенных в матрице GTOPO30, от средней расчлененность.



Рис.3.5. Зависимость среднеквадратической погрешности высот матриц GTOPO30 и SRTM от расчлененности рельефа (цифрами показано количество пунктов, по которым проводилось сравнение)

Оценивая величину погрешности высот матрицы GTOPO30 для изучаемых площадей, можно легко определить внутренний радиус зоны вычисления поправок за влияние удаленного рельефа, увеличивая или уменьшая его в зависимости от расчлененности рельефа.

В феврале 2000 г. состоялся 11-суточный полет космического корабля «Шаттл», получивший название SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Полет финансировался национальным картографическим управлением (NIMA) США. В грузовом отсеке корабля был установлен радиолокационный комплекс, позволивший впервые в мировой практике осуществить однопроходовую интерферометрическую съемку 80% поверхности суши.

Радарная топографическая съемка проведена на большей части территории Земного шара, за исключением самых северных (> $60^{\circ}$ ) и южных широт (> $54^{\circ}$ ). В результате работ создана цифровая модель рельефа местности объемом более 12 терабайт. Все данные доступны в сети Internet, их обработка может производиться в Arcinfo Workstation, в модуле Arcview Spatial Analyst, ArcGIS и др. Для территории Пермского края цифровая модель рельефа, построенная по данным радиоинтерферометра, представляет собой матрицу размером примерно 7000×5000, с расстояниями между узлами сети высотных отметок около 50 м по широте и 90 м по долготе.

С целью оценки точности высот, приведенных в матрице SRTM, и возможности их использования для вычисления поправок за влияние рельефа аналогично, как и для матрицы GTOPO30, для отдельных площадей из матрицы SRTM сделана выборка в пределах соответствующих координат и средствами программы GS Surfer v.8.0 составлены регулярные сетки с шагом равным шагу матрицы SRTM.

Как показал анализ, выполненный для различных площадей гравиметрических съемок (табл.3.1), высоты в матрице SRTM в 5-10 раз точнее, чем в матрице GTOPO30 (рис.3.5). Кроме того, необходимо отметить, что высоты SRTM обычно больше высот, измеренных инструментально, на 5-10 м, что объясняется, прежде всего, залесенностью территорий. Таким образом, при использовании матрицы SRTM можно значительно уменьшить внутренний радиус дальней зоны до 1-5 км в зависимости от залесенности участков. Анализ гистограмм расхождений топографических высот и матриц GTOPO30 и SRTM (рис.3.6), показал, что характер распределений отклонений высот рельефа близок к нормальному распределению Гаусса и практически не зависит от района работ.

Таблица 3.1

		Характеристика рельефа			Расхождения высот, м				
№ пло-	Кол-во пунк-	Высоты, м		Расчлененность, м/км		SRTM		GTOPO30	
щади	тов	min	max	max	среднее	сред- нее	СКП	сред- нее	СКП
1	2720	137,55	520,07	347,95	34,70	-5,54	±5,51	28,18	±62,79
2	2338	110,91	459,94	235,52	27,08	-2,38	±4,32	12,35	±60,36
3	6295	107,21	217,98	347,08	32,39	-10,18	±3,77	-18,78	±26,94
4	3242	133,78	349,26	281,48	36,88	1,17	±5,85	24,99	±27,48
5	1573	161,26	359,34	443,61	67,53	-4,83	±7,92	9,49	±34,29
6	3631	123,70	246,32	102,46	11,48	-7,21	±4,05	8,34	±23,62
7	2604	142,05	502,90	508,46	66,50	-6,03	±9,20	16,45	±66,55
8	3268	89,40	394,69	168,69	22,44	-2,46	±5,76	4,48	±44,00
9	3159	109,73	253,94	153,36	16,05	-4,09	±4,16	4,44	±0,54
10	5329	173,22	460,88	296,57	39,28	-4,29	±5,30	12,20	±40,03

Сравнение высот матриц GTOPO30 и SRTM с высотами рельефа, определенными инструментально на различных площадях гравиметрических съемок

		Характеристика рельефа				Расхождения высот, м			
№ пло-	Кол-во пунк-	Высоты, м		Расчлененность, м/км		SRTM		GTOPO30	
щади	тов	min	max	max	среднее	сред- нее	СКП	сред- нее	СКП
11	1864	108,77	180,75	64,33	5,58	-6,41	±4,15	-23,04	±13,28
12	1499	122,94	226,75	228,86	35,42	-7,20	±5,61	-13,81	±20,85
13	2062	107,92	202,64	179,03	24,36	-8,11	±5,59	12,22	±22,83
14	2451	116,03	389,06	211,31	23,37	-1,24	±4,64	5,61	±38,54
Среднее						-4,91	±5,42	5,94	±34,44

Примечание: расчлененность рельефа определялась по разнице высот гравиметрических пунктов, расположенных по профилям с шагом 100-250 м.



Аналогичные результаты сравнения векторизованных карт масштаба 25 000 и матрицы SRTM (среднее расхождение высот 1 м, среднеквадратическое – ±27 м) получены в Хораватии [351] на площади с перепадом высот от 1 м до 1796 м.

# 3.4. Компьютерная технология определения поправок

# 3.4.1. Полиэдральная аппроксимация рельефа

Имея в качестве исходной информации для вычисления поправок координаты изолиний рельефа, получаемые после сканирования и векторизации топографических карт необходимого масштаба, или в виде нерегулярной треугольной сети TIN, легко представить поверхность рельефа системой плоских неравносторонних наклонных треугольников, используя триангуляцию Делоне [242] (рис.3.7). Этот способ аппроксимации рельефа основывается на представлении топографической поверхности системой плоскостей вида  $A \times X + B \times Y + C \times H + D = 0$ , каждая из которых проходит через три точки местности с координатами X, Y, H. Такое представление, как известно из геодезии [167], обеспечивает наилучшую аппроксимацию рельефа местности.



Рис.3.7. Триангуляция высотных отметок векторизованной карты методом Делоне

Нерегулярная сеть треугольников представляет ряд преимуществ [6, 114, 373]: она соответствует нерегулярному набору данных, полученных при векторизации карты; позволяет достаточно точно описать рельеф практически любой сложности; создавать регулярную квадратную сетку с характерными высотными отметками и отметками пунктов. Последние редко совпадают с узлами

цифровой модели рельефа, заданной по регулярной сетке, что требует дополнительного анализа для вычисления поправок (разд. 3.3.2). Гравитационный эффект топографических масс может быть вычислен, используя формулу М.А.Быкова [33, 34] для треугольных многогранников.

Метод полиэдральной аппроксимации позволяет создать единую модель рельефа и промежуточного слоя: приповерхностные массы представляются системой треугольных призм, ограниченных сверху земной поверхностью, а снизу – «нормальной» поверхностью (геоид, эллипсоид, уровень приведения, наименьшая отметка рельефа и т.д.). При наличии карт распределения плотности приповерхностных масс, каждая призма может характеризоваться своей плотностью, т.е. любые неоднородности могут быть учтены [6, 44, 114].

Если бы система треугольников давала абсолютно точную аппроксимацию рельефа земной поверхности, то каждый гравиметрический пункт (т.е. точка расчета поправок) лежал бы на верхней грани одной из призм. Однако в реальных условиях он почти всегда будет находиться выше или ниже, что может привести к существенной ошибке при вычислении поправки за влияние рельефа местности. Уточнение модели рельефа в центральной зоне может быть достигнуто заменой треугольника тремя меньшими, с общей вершиной в гравиметрическом пункте используя высоту, определенную инструментально. Однако, как показала практика (разд. 3.3.2), высоты рельефа, представленные на карте и измеренные инструментально в полевых условиях, зачастую значительно различаются между собой, поэтому в программу вставлен блок, анализирующий это расхождение и позволяющий принять решение – использовать высоты гравиметрических пунктов или нет.

Вычисление притяжения треугольной призмы по желанию пользователя может осуществляться либо по точной формуле [33] в условиях сложного рельефа, либо с целью ускорения счета путем разбиения призмы на ряд прямоугольных параллелепипедов по точным [98] или приближенным [183, 251] формулам.

# 3.4.2. Аналитические аппроксимации «локального» рельефа

Академиком В.Н.Страховым [281, 288] предложено осуществлять аналитическую аппроксимацию высот рельефа местности относительно «нормальной» поверхности некоторой функцией  $z = \Psi(x,y)$  и использовать эту функцию при высокоточном определении поправок  $\delta g_p$ . Отмечено, что значения  $\Psi(x,y)$ могут рассматриваться как предельные значения функции, гармонической во внешности «нормальной» поверхности. Таким образом, для построения  $\Psi(x,y)$ могут применяться методы, разработанные для аналитической аппроксимации гравитационного поля, при этом в качестве исходных данных могут использоваться как матрицы высот Z, так и неупорядоченный набор векторов v(x, y, z). Для построения аппроксимаций возможны два подхода: коэффициентная аппроксимация («*F*-аппроксимация») и аппроксимация гармоническими (исто-кообразными) функциями («*S*-аппроксимация») [282]. На практическом примере [113] сопоставим эти способы построения аналитической модели рельефа  $\Psi = \Psi(x,y)$ . Рассматриваемая площадь имеет размер около 4400 км<sup>2</sup> и характеризуется перепадом высот от 120 м до 480 м.

S-аппроксимация рельефа осуществлялась истокоообразными функциями вида

$$\Psi(x, y, z) = \lambda(\zeta - z) / \left[ (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2 \right]^{3/2},$$
(3.2)

где (x, y, z) – координаты точки вычисления функции, ( $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\zeta$ ) - координаты источника,  $\lambda$  - гравитационная постоянная. Множество функций  $\Psi$  представляет собой гравитационный эффект разноглубинных точечных масс. Массы располагаются на различных криволинейных поверхностях, последовательно приближающихся к поверхности наблюдений.

Решение практической задачи потребовало более 37 часов работы компьютера Pentium-III с тактовой частотой процессора 750 мГц. Точность описания рельефа гармоническими функциями  $\Psi$  составила ±1,15 м.

Перед выполнением *F*-аппроксимации тот же набор векторов v(x, y, z) преобразован в матрицу высот методом минимальной кривизны с помощью программы GS Surfer. *F*-аппроксимация осуществлялась путем вычисления коэффициентов двойного ряда Фурье. Вычисление спектра Фурье и восстановление функции  $z = \Psi(x, y)$  в 250 000 точках было проведено за 7 часов работы компьютера. Среднеквадратическая погрешность аппроксимации рельефа составила ±0,16 м (при перепаде высот более 350 м). Для ускорения процесса аппроксимации можно производить усечение ряда Фурье. Число отброшенных коэффициентов выбирают в зависимости от расчлененности рельефа и требуемой точности аппроксимации [259].

Значительный интерес представляет применение дискретного вейвлетпреобразования для аппроксимации рельефа земной поверхности [248, 249, 276]. При этом исходный сигнал (в данном случае высоты рельефа) не обязательно должен иметь близкий к гармоническому характер. Обработка ЦМР с помощью вейвлетов позволяет существенно сжать объем информации, отбросить мелкие детали и выделить наиболее существенные особенности рельефа. На этой основе можно создавать весьма технологичные способы вычисления  $\delta g_p$  [113].

Необходимость аппроксимации рельефа обусловлена, прежде всего, объективно существующими различиями высотных отметок на топографических картах и высот пунктов гравиметрических пунктов, полученных инструментально (разд. 3.3.2). Построение аналитических моделей рельефа позволяет минимизировать эти различия высот путем «проецирования» нерегулярной сети точек измерений поля силы тяжести на поверхность рельефа, а также оптимизировать сам процесс вычислений. Экспериментально установлено [262], что в качестве непрерывной функции, с необходимой точностью описывающей «локальный» рельеф, можно использовать двойной ряд Фурье с ограниченным числом членов. Применение алгоритма быстрого преобразования Фурье и усечение ряда в зависимости от расчлененности рельефа и требуемой точности вычисления поправок существенно ускоряет решение задачи.

Таким образом, имея аппроксимационную конструкцию, вычисленную однократно тем или иным способом, можно в любой точке определить высоту, т.е. для каждого гравиметрического пункта сформировать свой массив высот (палетку) и вычислить поправки решением прямой задачи одновременно для всей области *D* непосредственно в гравиметрическом пункте. При таком подходе к вычислению поправок исчезают понятия центральной, ближней, средней, дальней зоны и отпадает необходимость в интерполяции значений поправок, т.к. для каждого гравиметрического пункта происходит восстановление высот *z* =  $\Psi(x, y)$  в требуемых точках (например – в центрах оснований прямоугольных призм, аппроксимирующих рельеф).

При вычислении  $\delta g_p$  используется прямоугольная система координат, аппроксимация рельефа осуществляется набором вертикальных прямоугольных параллелепипедов с горизонтальными квадратными основаниями. Размер стороны основания параллелепипеда *d* отвечает шагу задания высот, центры оснований тел совпадают с узлами ЦМР. Значение топопоправки в точке ( $x_p$ ,  $y_p$ ,  $z_p$ ) определяется выражением

$$\delta g_p(x_p, y_p, z_p) = \sigma_S \sum_{i=1}^M g_{nap}$$
,

где  $\sigma_{\rm S}$  – плотность промежуточного слоя;  $g_{nap}$  – гравитационный эффект единичного параллелепипеда при плотности  $\delta = 1$  г/см<sup>3</sup>; M – количество параллелепипедов. Существенное сокращение времени вычисления  $g_{nap}$  обеспечивается использованием формулы Г.Г.Ремпеля [251], выведенной путем аппроксимации параллелепипеда сектором цилиндрического кольца:

$$g_{nap} = \frac{\lambda}{dR} \bigg[ \sqrt{(z - z_p)^2 + (R + 0.5d)^2} - \sqrt{(z - z_p)^2 + (R - 0.5d)^2} + d \bigg], \qquad (3.3)$$

где  $R = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 - 0.075d^2}$ ; *x*, *y*, *z* - координаты центра основания параллелепипеда;  $\lambda$  - гравитационная постоянная.

#### 3.4.3. Определение поправок за влияние удаленных областей рельефа

Весьма технологичным является определение сравнительно небольшого числа дискретных значений поправок за влияние рельефа подобласти  $D_2$  в фиксированных точках (например, в узлах равномерной сети) и последующее восстановление значений  $\delta g_p$  в гравиметрических пунктах с использованием того или иного метода интерполяции. Физическими предпосылками для этого служат закономерное поведение составляющей  $\delta g'_p$ , зависящей от высоты пункта, и относительно слабые изменения составляющей  $\delta g'_p$ , определяемой изрезанностью рельефа, в пределах больших площадей [112, 144, 225]. Кроме того, интерполяция, как правило, требует значительно меньшего количества математических операций, чем вычисления на основе формулы (3.1).

Поскольку функция  $\delta g_p$  является гармонической, удовлетворяющей уравнению Лапласа, то может быть подобрана вспомогательная гармоническая функция U, которая используется вместо  $\delta g_p$  при дальнейших вычислениях. Можно представить функцию U в виде аномальных гравитационных эффектов элементарных точечных источников, т.е. выполнить истокообразную аппроксимацию исходных значений  $\delta g_p$  [8].

Алгоритм вычисления поправок за влияние «регионального» рельефа включает в себя: построение аналитической аппроксимации матрицы поправок и вычисление поправок в гравиметрических пунктах методом *3D*-интерполяции [112, 144]. Построение аналитической аппроксимации выполняются итерационно, критерием завершения процесса решения системы линейных уравнений является выполнение заданного числа итераций или достижение заданной степени совпадения значений исходного и модельного полей. Расчету поправок предшествует проверка принадлежности координат каждого гравиметрического пункта площади, для которой была построена аналитическая аппроксимация. Вычисление поправок осуществляется путем решения прямой задачи по формуле (3.3).

Описанный алгоритм позволяет быстро и с высокой точностью выполнять аналитическую аппроксимацию поправок за влияние рельефа для всего региона проведения гравиметрических исследований (например, для территории Пермского края). Последующее восстановление значений  $\delta g_p$  в пунктах гравиметрической сети не представляет затруднений и выполняется с погрешностью, не превышающей заданной погрешности аппроксимации. Таким образом, созданная для всего региона исследований аналитическая модель поправок за влияние удаленного рельефа может затем многократно использоваться при вычислении поправок на других площадях гравиметрических работ [112].

# 3.5. Оценка точности вычисления поправок

Очевидно, что погрешности определения поправок за влияние рельефа зависят от двух факторов: погрешности значений высот в исходной ЦМР и погрешности планово-высотной привязки гравиметрических пунктов. Достаточно объективную оценку влияния различных возмущающих факторов можно получить с помощью имитационного моделирования вычисления поправки  $\delta g_p$  при реальных технических условиях выполнения съемок [111, 113, 115]. Область учитываемого влияния рельефа *D* при этом представляет собой стохастическую модель, для которой решение прямых задач геофизики имеет вероятностную трактовку и заключается в расчете математических ожиданий, дисперсий или корреляционных функций аномальных эффектов [70]. При этом имитационное моделирование осуществляется для всех гравиметрических пунктов, расположенных в пределах исследуемой площади.

Для оценки погрешности планово-высотной привязки пунктов измерения поля силы тяжести с помощью генерации серий случайных чисел моделируются произвольно ориентированные в пространстве отклонения гравиметрических пунктов в плане от их истинного местоположения. Предполагается, что по каждой из координат Х и У эти смещения происходят независимо, амплитуды смещений распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, задаваемым проектом работ или фактической точностью, достигнутой при производстве полевых наблюдений. Генерация смещения пунктов в плане приводит к появлению соответствующих ошибок высот этих пунктов, т.е. моделируются погрешности вычисления поправок за влияние рельефа, обусловленные отклонениями в планововысотной привязке всех пунктов измерений поля силы тяжести.

Аналогично, для определения погрешности значений высот исходных ЦМР с помощью генерации серий случайных чисел матрица рельефа осложняется помехой ΔΖ. Амплитуды отклонений высот задаются по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равным половине сечения изолиний рельефа на векторизованной топографической карте или фактической точности использованных матриц (GTOPO30 или SRTM).

Погрешности расчета топографических поправок определяются по разности поправок, вычисленных при первоначальном положении гравиметрических пунктов с исходной ЦМР и при смещенном положении с ЦМР, осложненной помехой  $\Delta Z$ . Поскольку оба эти фактора являются независимыми, то окончательная оценка точности определения поправок за влияние рельефа вычисляется как среднеквадратическая.

# 3.6. Пример вычисления поправки за влияние рельефа

Рассмотрим пример вычисления поправок за влияние рельефа местности на одном из участков гравиметрической съемки, выполненной на востоке Пермского края в зоне Передовых складок Урала. Гравиметрическая съемка масштаба 1:50 000 выполнена на площади 500 км<sup>2</sup> по 28 широтным профилям и 3 магистралям с шагом 200 м. Съемка выполнялась гравиметрами AUTOGRAV CG-3M. Для проведения топографо-геодезической съемки использовалась ап-

паратура Trimble GPS-4700 и электронные тахеометры. Среднеквадратическая погрешность определения аномалии Буге с учетом погрешности наблюденных значений силы тяжести, определения высот и координат пунктов составила ±0,063 мГал. Местность полностью залесенная, перепад высот рельефа в пределах площади съемки составляет от 140 м до 500 м.

Для вычисления поправок за влияние рельефа использованы векторизованные топографические карты масштаба 1:25 000, матрицы высот SRTM и GTOPO30 (рис.3.8). Плотность промежуточного слоя принималась равной 2,67 г/см<sup>3</sup>.



Рис.3.8. Исходная информация о рельефе (а – рельеф местности, б – фрагмент карты): 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – узловые точки векторизованной топокарты, 3 – узлы матрицы высот SRTM, 4 – узлы матрицы высот GTOPO30

Характер расчлененности рельефа наглядно виден на рис. 3.8. Максимальные отметки рельефа находятся на востоке площади (рис. 3.8а), здесь же отмечается сильная изрезанность его речными долинами. В западной части площади рельеф относительно спокойный. На фрагменте карты размером примерно 1 км<sup>2</sup> (рис.3.8б) показан объем исходной информации о рельефе, полученный из различных источников. На данном фрагменте имеется более 800 точек векторизованной топокарты масштаба 1:25 000, 400 узлов матрицы высот SRTM и только 2 узла матрицы GTOPO30.

Первым этапом процесса вычисления поправки является оценка точности исходной информации о рельефе. С этой целью произведено сравнение высот рельефа, представленных на топокартах (H<sub>map</sub>) и SRTM (H<sub>SRTM</sub>), с высотами, полученными инструментально (H) в процессе проведения полевых работ (табл.3.2).

Таблица 3.2

Помолототи	Разница высот, м			
Показатели	Топокарты (H-H <sub>map</sub> )	SRTM (H-H <sub>srtm</sub> )		
Максимальное отклонение	36,26	57,05		
Минимальное отклонение	-47,48	-58,15		
Среднее отклонение	0,62	-5,16		
Среднеквадратическая погрешность	±6,36	±10,39		

Сравнение высот рельефа, полученных из различных источников

Анализируя таблицу, нельзя не отметить большой разброс отклонений инструментальных и топографических высот как для топокарты, превышающей 40 м, так и для матрицы SRTM. Среднее отклонение высот матрицы SRTM около 5 м соответствует, очевидно, средней высоте леса на данной площади. Какой-либо закономерности расхождениях высот не наблюдается.

Проведенные исследования подтверждают ранее сделанные выводы о применимости данной информации о рельефе для вычисления поправок. Однако в данном случае нас интересуют не сами величины расхождений отметок рельефа, полученных из различных источников, а расстояния от пункта наблюдений, на которых этими расхождениями можно пренебречь при вычислении поправки, и максимально использовать матрицу SRTM, уменьшив трудоемкие работы по векторизации топокарт.

Для оценки величины этого расстояния сформированы палетки с увеличивающимся размером ближней зоны, в которой исходными данными служили высоты рельефа с топокарты. В дальней зоне использовалась матрица высот SRTM. Вычисленные поправки сравнивались с поправками, полученными с использованием высот рельефа векторизованной топокарты для обеих зон (рис.3.9). Как видно из рисунка, где по оси X отложена величина ближней зоны, на расстояниях порядка 4-5 км от гравиметрического пункта значения поправок практически одинаковы. Среднеквадратическое расхождение поправок составляет около  $\pm 0,01$  мГал. На практике это означает, что для данной площади матрица высот SRTM может быть использована на расстояниях более 4 км от гравиметрических пунктов.



Рис.3.9. Среднеквадратическое расхождение поправок за влияние рельефа, вычисленных по высотам с топокарты масштаба 1:25 000 и по матрице SRTM

Поправки вычислялись в модуле «Поправки за рельеф», входящем в информационно-аналитическую систему ГРАВИС [259, 262], позволяющем решать следующие задачи:

- построение аналитической модели рельефа на основе исходной цифровой модели рельефа с использованием быстрого преобразования Фурье;
- вычисление и суммирование топографических поправок  $\delta g_p$ ;
- выполнение оценки точности определения топографических поправок.

При вычислении поправок использована прямоугольная система координат, аппроксимация рельефа осуществляна набором вертикальных прямоугольных параллелепипедов с горизонтальными квадратными основаниями. Размер стороны основания параллелепипеда *L* отвечает шагу задания высот, центры оснований тел совпадают с узлами ЦМР. Время счета для 2391 пункта гравиметрической съемки при задании рельефа на расстоянии 20 км от каждого пункта составило примерно 3,5 минуты на компьютере с процессором Intel Core2 Duo и тактовой частотой 2,666 Ггц.

Поправка за влияние удаленных областей рельефа вычислялась с использованием матрицы высот ТОР30 для территории Пермского края и прилегающих районов. Вычисление поправок осуществлялось в три этапа:

- вычисление поправок в узлах квадратной сети,

- аналитическая аппроксимация поправок полем точечных источников,
- восстановление значений в гравиметрических пунктах изучаемой площади.

На первом этапе для территории Пермского края и прилегающих регионов до расстояния 200 км от границ края по данным GTOPO30 создана регулярная сеть высот рельефа с шагом 1 км. Размер общей матрицы высот составил 1812 строк и 1236 колонок. Внешний размер области учитываемого рельефа составил 200 км, внутренний – 20 км. Таким образом, поправки вычислялись в 246715 узлах этой сетки (рис. 3.10) по программе «Поправки за рельеф» [259]. Время счета составило около 1,5 часов.



Рис.3.10. Рельеф Пермского края по данным GTOPO30 (а) и поправки за влияние рельефа в зоне от 20 км до 200 км (б) (красным квадратом показана исследуемая площадь)

Максимальные величины поправок (до 4,6 мГал) получены для северовостока территории, где высотные отметки достигают 1500 м. Для равнинной

части величины поправок за удаленные области рельефа не превышают 0,05 мГал.

Второй этап вычислений заключался в построении аналитической аппроксимации полученных поправок. Параметры элементарных источников вычисляются итерационно путем решения системы линейных уравнений. Критерием завершения процесса решения является выполнение заданного числа итераций или достижение заданной степени совпадения исходного и модельного полей. В результате работы программы АррТрр [112, 113] за 22 итерации в течение порядка 20 минут была построена аппроксимационная конструкция со среднеквадратической погрешностью ±0.0009 мГал, состоящая из 246715 точечных источников.

Единожды построенная аналитическая аппроксимация в дальнейшем может многократно использоваться для вычисления поправок за удаленные области рельефа на других площадях гравиметрических съемок, проводимых на территории Пермского края.

Заключительным этапом вычисления поправок является восстановление поля путем решения прямой задачи от аппроксимационной конструкции непосредственно в гравиметрических пунктах исследуемой площади.

Суммирование поправок, вычисленных для всех зон, дает общую поправку за влияние рельефа. Статистические характеристики каждой из составляющих суммарной поправки приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Разме-	Исходная ин-	Характеристики поправок, мГал					
ры зо <b>-</b>	формация	Среднее	Мини-	Максималь-	Дис-		
ны, км		значение	мальное	ное значение	персия		
			значение				
0-5	Векторизованная	0.449	0.046	4.149	0.123		
	топокарта						
5-20	SRTM	0.092	0.021	0.562	0.004		
20-200	GTOPO30	0.049	0.025	0.241	0.001		
Суммарная поправка		0.591	0.137	4.400	0.142		

#### Характеристики поправок за влияние рельефа

Как видно из таблицы, наибольший вклад в общую поправку вносит рельеф в ближней зоне. Здесь максимальные значения поправок и весьма существенный диапазон из изменения. По мере удаления от гравиметрических пунктов уменьшаются и величины поправок, и их дисперсия.

На рис. 3.11 представлено распределение величин поправок по площади для каждой из зон. Анализ распределения поправок показывает, что для ближней зоны (рис.3.11б) наибольшие значения отмечаются на юго-востоке и в цен-

тре площади, где наибольшая изрезанность рельефа, по мере удаления учитываемой области от гравиметрических пунктов (рис.3.11в, г) максимальные значения смещаются на северо-восток, где наибольшие отметки рельефа. На западе площади (в низменной части территории) дисперсия распределение поправок для различных зон существенно меньше, чем на востоке.



Рис.3.11. Карты поправок за влияние рельефа различных зон: а) рельеф местности, б) поправка, вычисленная в зоне 0-5 км, в) поправка, вычисленная в зоне 5-20 км, г) поправка, вычисленная в зоне 20-200 км (черные точки - гравиметрические пункты)

Оценка точности определения поправок за влияние рельефа местности осуществлялась для всех гравиметрических пунктов, расположенных в пределах исследуемой площади. С помощью генерации серий случайных чисел моделировались произвольно ориентированные в пространстве отклонения гравиметрических пунктов в плане от их истинного местоположения. Амплитуды смещений распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением ±28.3 м. Таким образом, максимальная величина суммарного смещения гравиметрического пункта в плане при вероятности ~68 % не превышала  $(28.3^2 + 28.3^2)^{0.5} \approx \pm 40$  м, предусмотренных "Инструкцией по гравиразведке" для съемки масштаба 1:50 000.

Погрешности расчета топопоправок определялись по разности поправок, вычисленных при первоначальном (указанном в каталоге) и смещенном положении гравиметрических пунктов. Эти погрешности характеризуются математическим ожиданием 0.001 мГал и среднеквадратическим отклонением ±0.043 мГал. Статистическое распределение погрешностей вычисления топопоправок близко к закону Гаусса.

Таким образом, предлагаемая компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа местности при гравиметрических наблюдениях, отличительными особенностями которой являются максимально полное использование цифровых картографических данных о рельефе, построение аналитических аппроксимаций с использованием дискретного преобразования Фурье и истокообразных функций, стохастическое моделирование для оценки точности вычисления, характеризуется полной автоматизацией вычислений для всей области учитываемого влияния рельефа, высокой точностью получаемых результатов и быстротой вычислений.

Разработанная методика вычисления поправок за влияние рельефа может быть с небольшими изменениями использована в случае, когда при введении поправки Буге будет учитываться сферичность Земли.

# 4. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

### 4.1. Величина поправки за промежуточный слой

Дискуссия о необходимости введения поправки за промежуточный слой с переменной плотностью и параметрах этого слоя в гравиметрической литературе имеет длительную историю. При введении этой поправки предполагается, что промежуточный слой – толща горных пород от поверхности Земли до уровня приведения (чаще всего уровня моря) – представляет собой плоскопараллельную горизонтальную пластину с постоянной плотностью [98]. Влияние отклонений физической поверхности Земли от плоскости учитывается введением специальной поправки за влияние рельефа местности [93]. Вариации плотности пород, слагающих верхнюю часть разреза, при этом не принимаются во внимание.

Некоторые типичные примеры отражения влияния локальных нефтегазоносных структур в гравитационном поле в сложных геологических условиях изображены на рис.4.1. График аномалий Буге, вычисленный при постоянной плотности промежуточного слоя 2,30 г/см<sup>3</sup> (рис.4.1а), практически повторяет график изменения плотности пород ВЧР по профилю, а влияние рифогенного массива пермского возраста проявляется в виде незначительного изменения горизонтального градиента аномалий. Надвинутые карбонатные породы повышенной плотности, выходящие на поверхность земли (рис.4.1б), создают гравитационную ступень значительной амплитуды, на фоне которой практически не выделяется эффект поднадвиговой структуры [44].

Таким образом, одним из основных факторов, сдерживающих повышение геологической эффективности гравиметрических исследований, является ограниченный объем информации о физических свойствах верхней части разреза (ВЧР). Отсутствие прямых измерений плотности и современных способов учета соответствующих влияний не позволяют успешно решать многие задачи по интерпретации аномалий от глубинных источников, поскольку гравитационные эффекты от ВЧР зачастую превышают влияние искомых геологических объектов.

Поскольку эта поправка (вместе с поправкой за влияние рельефа) по сути представляет собой гравитационное влияние толщи пород, ограниченной сверху рельефом местности, а снизу – уровнем приведения, то решение задачи казалось бы очень простое: построить детальную плотностную модель слоя, вычислить соответствующий гравитационный эффект и вычесть его из аномалий в свободном воздухе. При этом нижней границей слоя может быть не обязательно уровень приведения, а, например, первая плотностная граница или минимальная отметка рельефа. Однако величина поправки за промежуточный слой может достигать десятков и сотен миллигал. Так, например, ошибка определения плотности  $\pm 0,02$  г/см<sup>3</sup> при высоте рельефа 100 м, внесет погрешность определения поправки за промежуточный слой величиной почти  $\pm 0,10$  мГал при точности современной гравиметрической съемки  $\pm 0,02$ -0,05 мГал [46].



Рис. 4.1. Отражение нефтеперспективных объектов в гравитационном поле в сложных геологических условиях: 1 – исходный гравитационный эффект при постоянной плотности промежуточного слоя; 2 – влияние искомых геологических объектов; 3 – график изменения плотности ВЧР; 4 – геологические границы и плотности пород; 5 – искомые нефтеперспективные объекты; 6 – скважины

Подбор плотности промежуточного слоя, построение детальной плотностной модели верхней части разреза являются этапами интерпретации гравитационных аномалий. Поэтому представляется целесообразным вычислять аномалии Буге с некоторой средней плотностью промежуточного слоя, а учет влияния неоднородностей ВЧР включать в процесс интерпретации [39, 41, 46, 50, 53, 60, 61, 63, 64, 65, 66].

#### 4.2. Способы учета влияния неоднородностей промежуточного слоя

Закономерности распределения плотности в отложениях ВЧР могут быть получены из следующих основных источников:

1) лабораторные исследования керна и образцов из обнажений с последующей статистической обработкой и построение петрофизических карт [68, 98, 305];

2) гравиметрические измерения на участках с существенным перепадом высот рельефа с последующим вычислением плотности аналитическими (точечные, конечно-разностные и др.), статистическими (Неттлетона, обратных вероятностей, наибольшего правдоподобия и др.) и другими методами [19, 68, 98];

3) гравиметрические измерения в скважинах и шахтах [168, 211];

4) промыслово-геофизические исследования плотностным гамма-гамма каротажем или путем вычисления плотности по эмпирическим зависимостям по скорости, определяемой акустическим и сейсмическим каротажем, или по пористости, определенной с помощью электрического и радиоактивного каротажа [68, 266, 267];

5) по данным других геофизических методов, прежде всего сейсмических [20, 241] и вертикальных электрических зондирований [200, 252];

6) морфометрические и геоморфологические методы [158, 159, 178, 220].

Все эти и многие другие методы позволяют получить весьма приблизительные значения плотностей. С необходимой точностью определение плотности пород даже денситометрическим способом практически невозможно [68], не говоря уже о других, в основном, косвенных способах.

Определенные перспективы могут быть связаны только с проведением гравиметрического каротажа. Опыт использование гравитационного каротажа для изучения плотности пород ВЧР и вычисления аномалий силы тяжести, в том числе и на территории Пермского Прикамья [94, 211], показал его большую перспективность. Точность определения плотности пород по данным гравиметрического каротажа зависит от точности гравиметра, интервала глубин, на котором производятся определения, а также от величины самой плотности. Фактически достигнутая среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения современных скважинных гравиметров составляет  $\pm 0,001-0,003$  мГал [341], что обеспечивает определение средней плотности 10-метрового блока пород с погрешностью порядка ±0,01 г/см<sup>3</sup>, однако дороговизна приборов и необходимого оборудования не позволяют рекомендовать его для широкого применения. Кроме того, учитывая необходимость бурения достаточно большого количества скважин для проведения гравитационного каротажа с целью построения детальной плотностной модели толщи ВЧР, данный метод вряд ли будет применяться в ближайшей перспективе.

Невозможность иметь значения плотности приповерхностных пород с высокой точность для прямых вычислений поправки обусловливает многочисленные варианты определения плотности по гравиметрическим и другим геологогеофизическим данным и способов учета влияния неоднородностей верхней части разреза. Выбор и методы определения плотности промежуточного слоя (постоянной или переменной) и уровня приведения, учет сферичности Земли, определение методики и радиуса учета поправки за влияние рельефа активно обсуждается в гравиметрической литературе [19, 25, 68, 95, 127, 158, 207, 267, 326, 358, 364, 372, 377, 381 и многие другие]. Только в библиографической базе В.М.Гордина и С.А.Тихоцкого [91] насчитывается более 100 публикаций на эту тему.

Кроме того, большое значение имеет выбор метода решения прямой задачи. Например, сравнение аппроксимаций промежуточного слоя призмами, многогранниками, вертикальными линиями и рядами Фурье показало расхождения в вычислениях до нескольких миллигал при достаточно плотной цифровой модели рельефа части баварских Альп с перепадами высот рельефа до 1500 м [380].

Таким образом, поскольку аппроксимация промежуточного слоя однородной плоскопараллельной горизонтальной пластиной не отвечает геологическим условиям, а построение детальной геолого-плотностной модели верхней части разреза с необходимой точностью невозможно, нам представляется, что следует отказаться от введения данной поправки, оставив ее только для создания государственных гравиметрических карт, а при интерпретации аномалий процедуру учета влияния ВЧР включать в процесс решения обратной задачи.

В качестве априорной информации о плотностях пород верхней части разреза необходимо использовать плотности, полученные по геологическим и другим геофизическим данным, корректируя их в процессе интерпретации. Исходными гравиметрическими данными могут являться значения аномалий Буге, вычисленные при постоянной (средней для изучаемой площади) плотности промежуточного слоя, а переменную плотность вычислять как аномальную относительно средней. Таким образом, учет влияния плотностных и структурных неоднородностей верхней части разреза следует рассматривать как поправку в аномалии Буге за переменную плотность промежуточного слоя, аналогичную поправке за влияние рельефа [46].

Аномальные эффекты ВЧР обычно характеризуются высокочастотным составом, обусловленным локальными неоднородностями небольших размеров. Однако в этой толще могут иметь место и градиентные изменения плотности, являющиеся причиной появления низкочастотных компонент. В связи с этим, методы введения поправок можно разделить на две основные группы [54]. 1. Для подавления резколокализованных полей, проявляющихся в значениях аномалий на интервалах небольшой длины, которые могут быть обусловлены также случайными погрешностями наблюдений, разработано большое количество способов [98]. Большинство этих способов, как и обычно применяемое сглаживание скользящим окном перераспределяет соответствующий эффект между соседними точками, т.е. уменьшает локализацию. В связи с этим, целесообразно использовать нелинейные фильтры, позволяющие существенным образом подавить соответствующие влияния.

2. Если гравитационный эффект верхней части разреза характеризуется низкочастотным составом, то как следует из исследований А.К.Маловичко [177], В.Н.Страхова [278], В.М.Новоселицкого [205, 207] и многих других, возможно эквивалентное глубинное распределение масс с постоянной или переменной плотностью. Вследствие этого, никакими формальными способами, в том числе и трансформациями, не удается освободиться от влияния приповерхностных неоднородностей [152]. В этом случае необходимо использовать дополнительную информацию, представленную данными других геофизических методов, бурения и т.д. Этот метод известен как геологическое редуцирование [98] и заключается в последовательном исключении из наблюденного поля эффектов от известных источников. Геологическое редуцирование требует для своего применения полноценной и конкретной геологической информации о распределении плотности в верхней части разреза. В той мере, в какой соблюдено это условие, гарантирован успех применения методики.

# 4.3. Исключение локальных аномалий, обусловленных верхней частью разреза

Рассмотрим построение нелинейного фильтра для подавления высокочастотной составляющей поля, основанного на использовании высших производных потенциала силы тяжести, которые, как известно [13, 172], обладают повышенной чувствительностью к неглубоко залегающим массам. С увеличением глубины залегания масс амплитуды полей вторых производных по сравнению с амплитудами полей аномалий силы притяжения уменьшаются приблизительно пропорционально квадрату глубины. Отсюда вытекает возможность использования вторых производных (V<sub>zxx</sub>) для выделения и исключения влияния плотностных неоднородностей в ВЧР.

В работе [172] показано, что для изометричного источника значения вторых производных соответствуют действительным величинам, если численное дифференцирование производится по конечно-разностной формуле с оптимальным шагом q, отвечающем условию q  $\approx$  0.5h, где h – глубина залегания масс. Если глубина источника существенно меньше q, то при численном дифференцировании его влияние проявится интенсивным всплеском. Таким образом, при обычном для нефтепоисковых целей шаге наблюдений по профилю 200-250 м, источники аномалий, находящиеся на глубинах до 100-150 м, будут фиксироваться аномалиями-выскоками негармонического характера на ограниченном количестве точек. В связи с эти, целесообразно так исправить значения аномалий силы тяжести  $\Delta g$ , чтобы вторые производные (конечные разности второго порядка) не превышали величины  $\varepsilon$ , соизмеримой с ошибками округления [54, 176]. Величина поправки вычисляется по формуле [54]:

$$\delta g_i = \frac{\Delta g_{i-1} - 2\Delta g_i + \Delta g_{i+1}}{2}. \tag{4.1}$$

где *і* – номер гравиметрического пункта.

В общем случае, когда влияние ВЧР фиксируется аномалиями в нескольких точках, вычисления поправок по формуле (4.1) следует повторять до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность, определяемая величиной  $\varepsilon$ .

При интерпретации площадных съемок, вместо формулы (4.2) используется любая конечноразностная формула численного дифференцирования [172].

На рис.4.2а изображено суммарное поле двух горизонтальных круговых цилиндров, один из которых, залегающий на глубине  $h_1 = 0,5$  км, создает аномалию в эпицентре 0,10 мГал; второй цилиндр залегает на глубине  $h_2 = 2,5$  км и создает аномалию 1,00 мГал. Эпицентры их совпадают. Суммарный график осложнен случайной ошибкой с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием, максимальное значение которой составляет 4% эффекта второго цилиндра. Шаг по профилю 0,25 км. В результате вычислений по формуле (4.5) искомое поле (эффект цилиндра  $h_2$ ) восстанавливается с точностью до 2%.

Если глубины цилиндров различаются еще больше, то разделение полей происходит с более высокой точностью. Так, на рис.4.26 глубина второго цилиндра  $h_2 = 5,0$  км, остальные параметры те же, что и на рис.4.2а. Теоретический график, рассчитанный для второго цилиндра, восстанавливается с точностью 1%.

Необходимо заметить, что обычно применяемое сглаживание аномальных графиков, предназначенное для ослабления влияния случайных погрешностей наблюдений [180], не приводит к исключению влияния ВЧР. Так, на рис.4.2 представлены графики  $V_z$ , полученные после трехкратного сглаживания. Дальнейшее сглаживание не приводит к получению новых результатов.



Рис. 4.2. Исключение влияния ВЧР на теоретическом примере: поля V<sub>z</sub> 1 – «исходное», 2 – целевого источника, 3 – исправленное за влияние ВЧР, 4 – обычное сглаживание, 5 - итерационное осреднение

Предлагаемый способ подавления высокочастотной составляющей поля весьма близок к способу итерационного весового осреднения [164, 166], при котором на каждой итерации уменьшается вес аномальных точек с большим отклонением величины осредненного поля от исходного. Как видно из рис.4.2, предлагаемый способ сглаживания и итерационного осреднения дают близкие результаты, однако с уменьшением степени локализации поля предпочтительнее использование предлагаемого способа.

Рассмотрим зависимость погрешности сглаживания от глубины источника на теоретическом примере. Для поля горизонтального кругового цилиндра бесконечной протяженности имеем [180]:

$$V_{zxx} = -4f\mu h \frac{h^2 - 3x^2}{(x^2 + h^2)^3},$$
(4.2)

где f – гравитационная постоянная,  $\mu$  - линейная масса цилиндра, h – глубина залегания, x – расстояние по профилю. В эпицентре поля, при x = 0, где максимальное значение аномалии  $E = 2f\mu/h$ , имеем экстремум производной  $(V_{zxx})_{3\kappa crp} = 2E/h^2$ . Поскольку по условию сглаживания значение  $q^2(V_{zxx})_{3\kappa crp}$  не должно превышать величины  $\varepsilon$ , то

$$\frac{\varepsilon}{E} = 2\frac{q^2}{h^2}.$$
(4.3)

Для поля точечного источника (шара) будем иметь

$$\frac{\varepsilon}{E} = 3\frac{q^2}{h^2}.$$
(4.4)

Из формулы (4.3) следует, что при амплитуде аномалии E=0,5 мГал, при шаге наблюдений q = 200 м и  $\varepsilon = 0,1$  мГал, глубина залегания исключаемых масс получается равной 630 м, т.е. при данных параметрах из гравитационного поля при сглаживании исключаются все аномалии, имеющие глубину источников менее 630 м и сохраняются неизменными поля источников, имеющие большую глубину.

Необходимо учесть, что глубина, определяемая по формулам (4.3) и (4.4), является предельной [177] и в природе (во всяком случае, в задачах структурной гравиразведки) таких тел не существует. Однако существуют эквивалентные распределения аномальных масс [278]. Так, для данного цилиндра эквивалентное распределение с аномальной плотностью 0,2 г/см<sup>3</sup> на глубине 100 м будет иметь максимальную мощность 65 м, что представляется более реальным, чем цилиндрическое тело. Поэтому более геологически содержательным будет представление аномалиеобразующих тел в ВЧР в виде горизонтальных пластинок или параллелепипедов. Так, для поля горизонтальной полосы шириной l = h имеем:

$$\frac{\varepsilon}{E} = \frac{2}{\pi} \frac{q^2}{h^2} \,.$$

Таким образом, в общем случае зависимость погрешности сглаживания от глубины источника выглядит следующим образом:

$$\frac{\varepsilon}{E} = k \frac{q^2}{h^2},\tag{4.5}$$

где k – коэффициент, зависящий от формы масс в ВЧР или от морфологии поля. Для данного тела (например, при l = 2h) при тех же параметрах (E = 0,5 мГал, q = 200 м и  $\varepsilon = 0,1$  мГал) имеем h = 170 м, т.е. глубина получается существенно меньше, чем в случае цилиндра.

Таким образом, имея определенный шаг наблюдений по профилю, амплитуду и протяженность аномалий, подлежащих исключению, оперируя величиной є, можно определять примерную глубину аномалиеобразующих масс, поле которых исключается при сглаживании. И, наоборот, задаваясь глубиной, до которой необходимо исключить влияние ВЧР, можно определять величину *є*, шаг наблюдений по профилю или уровень приведения для вычисления поправки Буге. В основу предлагаемого метода сглаживания наблюденных полей силы тяжести с исключением искажений, вносимых неоднородностями ВЧР, положено условие близости к нулю значений второй горизонтальной производной, вычисленной при соответствующем оптимальном шаге. В отличие от методов линейной фильтрации [84, 257 и др.], этот метод приводит к более полному исключению геологических и инструментальных помех, не представляющих интереса при нефтепоисковых работах.

Таким образом, описанный метод позволяет легко избавляться от помех негармонического характера, обусловленных неоднородностями верхней части разреза и случайными погрешностями наблюдения. Данная методика обеспечивает исключение только высокочастотной компоненты поля, и получение искомого поля аномалий силы тяжести, обусловленного влиянием целевых геологических объектов, с минимальными искажениями возможно, если глубина их в 5-7 раз больше шага наблюдений.

# 4.4. Подавление влияния приповерхностных неоднородностей с помощью сейсмогравитационного моделирования

В случае низкочастотного состава гравитационного эффекта неоднородностей верхней части разреза для разделения полей необходимо привлекать дополнительную геолого-геофизическую информацию. При исследованиях на нефть и газ наиболее перспективным представляется использовать сейсморазведочные данные.

При поисках и разведке месторождений нефти и газа сейсмические работы часто проводят совместно с гравиметрическими. Как известно, между скоростью распространения сейсмических волн и плотностью пород существует тесная корреляционная зависимость [19, 106, 305, 312]. Поэтому неоднородности в ВЧР отражаются как в сейсмическом, так и в гравитационном полях, что создает возможность использования сейсмической информации при интерпретации гравиметрических материалов, и, наоборот, производить расчет статических поправок при сейсмических построениях с использованием данных гравиразведки.

Существующие способы использования данных гравиразведки для расчета статических поправок сводятся к решению линейной обратной задачи, т.е. определению плотности пород ВЧР с последующим пересчетом полученных плотностей в интервальные скорости. В качестве исходной информации для решения обратной задачи используется либо наблюденное гравитационное поле [148], либо его локальная составляющая, полученная тем или иным способом [3, 241]. Однако формальный выбор локальной составляющей гравитационного поля, использование модели ВЧР в виде плоского слоя, а также отсутствие корреляционных зависимостей между скоростью и плотностью для толщи ВЧР в конкретных районах исследований вносят значительные погрешности в статические поправки, вследствие чего широкого распространения эта методика не получила.

В гравиразведке широко применяются методы интерпретации, основанные на итерационном подборе геолого-геофизической (геоплотностной) модели, удовлетворяющей гравитационному полю. При построении исходной модели (первого приближения) часто привлекают сейсмические данные, а плотностной разрез получают, используя известные для данного региона или полученные ранее уравнения регрессии между скоростью упругих волн и плотностью пород. В редких случаях при таком моделировании подвергаются коррекции сейсмические данные [185, 236], т.е. строятся сейсмогравитационные модели, и нам неизвестны работы, где производится минимизация коэффициента корреляции между скоростью и плотностью. В то же время ни у кого не вызывает сомнения тот факт, что эти зависимости существенно отличаются как для разных типов пород, так и для различных, даже близко расположенных районов.

Рассмотрим способ построения согласованной сейсмогравиметрической модели изучения верхней части разреза, включающей минимизацию не только соответствующих полей, но и корреляционного соотношения между физическими параметрами горных пород. Предлагается следующий итерационный алгоритм решения задачи учета неоднородностей верхней части разреза [39, 41, 50, 53, 64, 66]:

- выделение локальной составляющей гравитационного поля, обусловленной влиянием верхней части разреза,
- решение обратной линейной задачи гравиразведки определение плотности пород ВЧР,
- построение скоростной модели верхней части разреза по временным полям первых волн,
- выявление корреляционной зависимости между скоростными и плотностными параметрами ВЧР.

На выходе интерактивного итерационного процесса имеем значения скоростей сейсмических волн в ВЧР, которые используются для расчета статических поправок, и значения аномалий силы тяжести, вычисленные с переменной плотностью промежуточного слоя. Таким образом, решение задачи сводится к построению детальной сейсмогравиметрической модели ВЧР.

Решение задачи построения такой модели осложняется, прежде всего, практически полным отсутствием сведений о плотностях пород ВЧР. Поэтому первым этапом построения модели является выявление и уточнение корреляционной зависимости между скоростью и плотностью пород ВЧР для конкретной площади исследований. Для этой цели по данным бурения, сейсморазведки, промыслово-геофизической информации, а также с учетом эффективных плотностей, полученных по гравитационным данным (способы Л.Л.Неттлетона, К.В.Гладкого, З.М.Слепака и др.) [98, 174], строится детальная геологогеофизическая (геоплотностная) модель всей изученной части разреза, гравитационное влияние которой в порядке решения прямой задачи исключается из аномалий силы тяжести (рис.4.3).



Рис. 4.3. Решение прямой задачи гравиразведки: 1 – исходное гравитационное поле, 2 – модельное поле при постоянной плотности ВЧР, 3 – модельное поле при переменной плотности ВЧР, 4 – подобранные плотности ВЧР, 5 – средние плотности пород (г/см<sup>3</sup>), 6 – плотностные границы

Считаем, что остаточные аномалии с учетом погрешности модели и регионального фона отражают, прежде всего, влияние неучтенных неоднородностей в ВЧР. Решая линейную обратную задачу по формуле:

$$\sigma(x_i) = \sigma_o(x_i) + \frac{\Delta g_H(x_i) - \Delta g_M(x_i)}{0.0419h(x_i)}, \qquad (4.6)$$

где  $\Delta g_{\rm H}(x)$  и  $\Delta g_{\rm M}(x)$  – исходная вычисленная аномалии,  $\sigma_o(x)$  – плотности пород ВЧР исходной модели, h(x) – глубина до линии приведения или мощность верхнего слоя в зависимости от принятой модели в *i* точке профиля. Погрешности, вносимые в плотности при использовании формулы плоского слоя, компенсируются повторным решением прямой задачи с исправленными плотностями и новой корректировкой плотностей. Итерационный процесс подбора плотностей заканчивается при совпадении наблюденной и вычисленной кривых  $\Delta g$  в пределах заданной точности или погрешности гравиметрической съемки (рис.4.3). Как видно из рисунка, систематическое расхождение наблюденного и модельного полей  $\Delta g$  полностью устраняется увеличением значений плотностей ВЧР к концу профиля.

Таким образом, в результате первого этапа построения модели имеем массив плотностей пород ВЧР по профилю, удовлетворяющий гравиметрическим данным.

На этой же площади по данным сейсморазведки можно рассчитать массив скоростей сейсмических волн. Здесь реализуется итерационный процесс интерпретации волновых полей, зарегистрированных при наземных сейсмических исследованиях. На основании последовательного решения прямой и обратной задач сейсморазведки осуществляется подбор оптимальной модели ВЧР, соответствующей в пределах точности съемки наблюденным сейсмическим данным (рис.4.4). При этом, как показывает практика, в качестве исходной сейсмической информации целесообразно использовать временные поля первых волн, регистрируемые в начальной части сейсмограмм МОГТ [271]. Это позволяет, в частности, для повышения оперативности трансформации волновых полей в скоростные разрезы среды использовать корреляционные зависимости между временными полями первых волн и полями вертикальных времен.



Рис. 4.4. Сопоставление наблюденного (а) и модельного (б) временных полей первых волн

Строя корреляционную зависимость между полученными скоростями и плотностями, вычисляя коэффициенты парной корреляции (R) и уравнения регрессии (рис.4.5а), получаем новый массив плотностей, с которым вновь решаем прямую задачу гравиразведки. Здесь итерационный процесс заканчивается при достижении максимально возможного коэффициента корреляции (рис.4.5б) и совпадении в пределах заданной погрешности исходного и вычисленного гравитационных полей.



для первоначальной (а) и подобранной (б) моделей ВЧР

Следующим этапом построения модели является пересчет значений плотностей по выявленной корреляционной зависимости в скорости сейсмических волн и их уточнение посредством решения прямой задачи сейсморазведки. Полученные значения скоростей вновь проверяются путем решения прямой задачи гравиразведки, т.е. весь итерационный процесс повторяется (рис.4.6), при этом уточняется поведение регионального гравитационного фона, и вносятся коррективы в модель глубинной части разреза. Процедура пересчета плотности пород в скорости и обратно с корректировкой их значений по результатам наблюдений соответствующих методов продолжается до тех пор, пока не будет построена согласованная сейсмогравиметрическая модель, удовлетворяющая данным обоих методов.

На выходе интерактивного итерационного процесса имеем значения скоростей сейсмических волн в ВЧР, которые используются для расчета статических поправок (рис. 4.7), и значения аномалий силы тяжести, вычисленные с переменной плотностью промежуточного слоя. Как видно из рис. 4.7, использование полученных статических поправок существенным образом улучшили качество прослеживаемости практически всех отражающих горизонтов, особенно в средней части профиля (X = 2,3-3,0 км), где по гравиметрическим данным удалось выявить низкоскоростные аномалии ВЧР, не коррелируемые с отметками рельефа поверхности наблюдений. Кроме того, полученная корреляционная зависимость между скоростью и плотностью пород может быть ис-

пользована для построения модели первого приближения в районах со сходным геологическим строением.



Рис. 4.6. Блок-схема алгоритма построения согласованной сейсмогравиметрической модели

Полученные значения плотности пород ВЧР могут быть использованы для вычисления аномалий Буге с переменной плотностью промежуточного слоя [46, 61, 64], что значительно повышает информативность гравиметрических данных. Так, в гравитационном поле, вычисленном при постоянной плотности промежуточного слоя практически не проявляется рифогенный массив повышенной плотности (рис.4.8). Использование сейсмических данных для определения плотностей в ВЧР и вычисление аномалий с переменной плотностью позволяет выделить положительную гравитационную аномалию, обусловленную целевым объектом.



Рис. 4.7. Временные разрезы со статическими поправками, рассчитанными различными способами: а) – графики статических поправок, б)- рельеф местности, в) – временной разрез, полученный со стандартной статикой, г) – временной разрез, полученный со стандартной статикой, г) – временной разрез, полученной при вводе статических поправок с учетом гравитационных аномалий; 1 - график статических поправок, полученный с учетом гравитаным способом, 2 - график статических поправок, полученный с учетом гравитики с и сейсмокаротажем



Рис. 4.8. Графики аномалий силы тяжести, вычисленные при постоянной и переменной плотности промежуточного слоя: 1 – аномалии Буге с постоянной плотностью ВЧР, 2 - аномалии Буге с переменной плотностью ВЧР, 3 – фоновая составляющая, 4 – плотности в ВЧР, 5 –целевой геологический горизонт

Таким образом, поскольку неоднородности в ВЧР отражаются как в сейсмическом, так и в гравитационном полях, это создает возможность использования сейсмической информации при интерпретации гравиметрических материалов, и, наоборот, расчет статических поправок при сейсмических построениях с использованием данных гравиразведки. Задача учета влияния неоднородностей верхней части разреза при гравиметрических и сейсморазведочных работах может быть в той или иной степени решена при комплексировании методов.

# 4.5. Пример учета влияния неоднородностей верхней части разреза при площадных гравиметрических работах

Если при профильных геофизических работах, особенно когда гравиметрические наблюдения проводят по сейсмическим профилям, сравнительно легко может быть построена согласованная сейсмогравиметрическая модель, то при площадных работах такую модель построить достаточно сложно. Обычно площадные гравиметрические работы ставят как опережающие геофизические работы на перспективных участках, где в лучшем случае имеются отдельные разрозненные сейсмические профили и редкая сеть скважин с сейсмокаротажем.

В таких случаях интерпретации гравитационных аномалий процедуру учета влияния верхней части разреза необходимо включать в процесс решения обратной задачи, т.е. как процесс выделения и интерпретации аномалий от разноглубинных источников [46, 61, 63, 65]. В качестве априорной информации о плотностях пород верхней части разреза необходимо использовать плотности, полученные по геологическим и другим геофизическим данным, корректируя их в процессе интерпретации.

Рассмотрим пример такой интерпретации на одной из площадей гравиметрической съемки, выполненной в восточной части Косьвинско-Чусовской седловины (см. рис.1.1), к югу от Ульяновского нефтяного месторождения, на котором одна из залежей связана с нижнепермскими карбонатами.

В пределах площади выявлены несколько рифовых поднятий в артинском ярусе, относящихся к волимской группе рифогенных построек [309]. Отметки залегания их в пределах изучаемой территории изменяются от -400 м до -580 м. Пермские рифы имеют горизонтальные размеры от 0.5 до 1.2 км. Высота их может достигать 100 м и более. В двух скважинах из нижнепермских карбонатов получены притоки нефти и газа. Артинские карбонаты перекрываются толщей терригенных отложений пермских моласс мощностью 200-500 м. Существенный перепад плотности на границе карбонатов и терригенных пород, большая амплитуда рифов и относительно неглубокое их залегание обуславливает выявления поднятий поверхности карбонатов гравиметрическим методом.

Сейсморазведочные работы 2D проводились здесь в 1982-1983 гг. по редкой сети профилей, структурно-поисковые и разведочные скважины по площади расположены весьма неравномерно, в некоторых скважинах имеется сейсмокаротаж и микросейсмокаротаж, выполненный для изучения зоны малых скоростей при проведении сейсморазведочных работ.

Площадные гравиметрические работы масштаба 1:25 000 проведены в 2002 году по сети 500×100 м гравиметрами Autograv CG-3M с привязкой пунктов наблюдений системой GPS Trimble 4700. Погрешность определения значений аномалии силы тяжести, включающая погрешности определения наблюденных значений силы тяжести, планового положения, высот пунктов наблюдения и вычисления поправок за влияние рельефа составила  $\pm 0.042$  мГал. Полученная карта аномалий силы тяжести в редукции Буге при постоянной плотности промежуточного слоя 2.40 г/см<sup>3</sup> приведена на рис. 4.9. В результате интерпретации гравиметрических данных выявлены аномалии силы тяжести, отождествляемые с нижнепермскими рифами, и рекомендовано провести их детализацию площадной сейсморазведкой с целью определения конкретных точек для постановки бурения. Сейсморазведочные работы 3D проведены здесь в


Рис. 4.9. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге при постоянной плотности промежуточного слоя: 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – скважины, 3 – сейсмические профили 1982-1983 гг, 4 – изогипсы отражающего горизонта Ак, приуроченного к кровле карбонатных отложений артинского яруса,м (ОАО «Пермнефтегеофизика», 1983 г.)

Как видно из анализа гравитационного поля (рис. 4.9), отмечается слабое соответствие положительных аномалий силы тяжести имеющимся сейсмическим (2D) и скважинным данным о расположении нижнепермских рифов. Интенсивная положительная аномалия в северной части площади имеет субширотное простирание и, хотя, в целом, совпадает с искомым объектом, в районе вершины рифа имеется относительное понижение поля. Более интенсивные положительные аномалии находятся западнее и восточнее. Очевидно, что это связано с неучетом плотностных неоднородностей в верхней части разреза.

Интерпретация гравиметрических материалов с целью подавления влияния неоднородностей верхней части разреза проводилось в следующей последовательности [46, 65]. 1. По гравиметрическим данным, используя известный метод Неттлетона [98], определена средняя плотность промежуточного слоя на данной площади. На рис. 4.10а представлен рельеф местности, перепад высот на площади составляет от 120 м до 350 м. На рис. 4.10б показаны графики аномалий силы тяжести, вычисленные при различной плотности по двум профилям, отмеченным красными линиями на рис.4.10а. Как видно из рисунка, средняя плотность промежуточного слоя составляет примерно 2,40 г/см<sup>3</sup>. Относительно этой плотности по двум профились дальнейшие вычисления.



Рис. 4.10. Определение плотности промежуточного слоя методом Неттлетона: а) рельеф местности, б) графики аномалий силы тяжести, вычисленные при различной плотности промежуточного слоя

2. По имеющейся структурной карте отражающего горизонта A<sup>k</sup>, приуроченного к кровле карбонатных отложений артинского яруса, построенной в ОАО «Пермнефтегеофизика» по данным сейсморазведки 2D (рис. 4.9), решена прямая задача, и полученный эффект вычтен из исходного гравитационного поля в редукции Буге, вычисленного при постоянной плотности промежуточного

0.01 0.00 0.01 -0.00 0.03 Δσ, Δg, мГал г/см3 0.00 0.05 0.012.00 0.03 1.50 0.011.000.02 -0.01 0.50 -0.03 0.00 0.0 -0.05 -0.50 -0.04 -0.07 -1.00 001 -0.09 -1.50 a) б) 16 Δσ, Δg. г/см3 мГал 0.30 0.12 0.25 0.08 0.20 0.15 0.04 0.10 0.00 0.05 -0.04 0.00 -0.08 -0.05 000 -0.10 -0.12 -0.15 50 -0.16 -0.20 B) г)

слоя. Полученное поле являлась исходным (рис. 4.11а) для решения обратной задачи гравиметрии относительно плотности промежуточного слоя.

-0.98

Рис. 4.11. Определение плотности верхней части разреза решением обратной задачи: а) исходное гравитационное поле, б) исходные плотности, в) разностное поле, г) подобранные плотности

3. Используя скорости продольных волн, определенные по сейсмокаротажным данным, путем пересчета по формуле В.М.Березкина [19]

$$\sigma = 1,75 + 0,266V - 0,015 V^2,$$

где  $\sigma$  - плотность пород в г/см<sup>3</sup>, V – скорость упругих волн в км/с, вычислены плотности пород ВЧР. Выбор той или иной эмпирической зависимости между плотностью пород и скоростью распространения упругих волн принципиального значения не имеет, однако, как известно, чем точнее будет модель начального приближения, тем надежнее решение обратной задачи [152]. На рис. 4.11б приведены аномальные значения плотностей относительно средней плотности 2,40 г/см<sup>3</sup>. Эти значения использовались в качестве первого приближения при решении обратной задачи. Следует отметить, что скважины с сейсмокаротажем сосредоточены в основном на западе площади, поэтому на построенной карте можно видеть лишь региональный тренд увеличения значений плотностей в юго-восточном направлении с небольшой аномалией повышенных значений в северо-западном углу карты.

4. Линейная обратная задача решалась путем подбора плотности в слое, ограниченном сверху рельефом (рис.4.10а), снизу – уровнем моря. Аппроксимация слоя осуществлена набором прямоугольных параллелепипедов, гравитационный эффект которых вычислялся по классической формуле [98] при совпадении параллелепипеда с точкой вычисления и по приближенной формуле (3.3) для остальных параллелепипедов. Это существенно ускоряет процесс вычислений, учитывая, что при нахождении плотности в слое прямую задачу приходится решать многократно. Решение обратной задачи осуществлялось в точках {x<sub>i</sub>, y<sub>j</sub>}, расположенных на земной поверхности по формуле И.Л.Пруткина [247].

$$\sigma_{i\,j}^{n+1} = \sigma_{i\,j}^{n} + (\Delta g_{i\,j}^{\,\mu\delta} - \Delta g_{i\,j}^{\,Mo\partial})\alpha, \qquad (4.7)$$

где n – номер итерации,  $\Delta g^{\text{нб}}$  и  $\Delta g^{\text{мод}}$  – соответственно исходное и модельное поля,  $\alpha$  - параметр регуляризации. При этом параметр  $\alpha$  подбирается экспериментально. Чем он меньше, тем медленнее сходимость итерационного процесса, но выше точность. При больших значениях параметра последовательные приближения могут расходиться. Критерием окончания итерационного процесса является совпадение в пределах заданной точности наблюденного и модельного полей или достижение определенного количества итераций.

Среднеквадратическое расхождение наблюденного и модельного полей составило ±0,019 мГал. Каких-либо закономерностей в распределение невязок между исходным и модельным полями, как видно из рис. 4.11в, не отмечается. Результат вычислений – карта распределения относительных значений плотностей ВЧР, представлен на рис.4.11г. Как видно из анализа карты и сравнения ее с картой аномалий Буге (рис.4.9), сохранился общий тренд увеличения плотностей в западном направлении, где расположены Передовые складки Урала. При этом наблюдается чередование зон повышенных и пониженных значений плотностей северо-западного простирания, а субширотная гравитационная аномалия на севере площади объясняется увеличением плотности ВЧР.

5. Используя вычисленные плотности, решена прямая задача для слоя переменной мощности и плотности. Очевидно, что при таком подходе уточняется и поправка за влияние рельефа в ближней зоне (в пределах площади съемки), ранее вычисленная с постоянной плотностью. Полученный эффект вычтен из аномалий силы тяжести при постоянной плотности промежуточного слоя 2,40 г/см<sup>3</sup>. Результирующая карта представлена на рис. 4.12 и совмещена с картой изогипс карбонатных отложений артинского яруса, построенной в 2004 г по данным сейсморазведки 3D OAO «Пермнефтегеофизика».



Рис. 4.12. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге при переменной плотности промежуточного слоя: 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – скважины, 3 – изогипсы отражающего горизонта Ак, приуроченного к кровле карбонатных отложений артинского яруса (ОАО «Пермнефтегеофизи-ка», 2004 г.)

Как видно из сопоставления карт аномалий Буге, вычисленных при постоянной и переменной плотностях промежуточного слоя, изменения морфологии поля весьма существенны. Область положительных аномалий теперь находится на западе площади и соответствует общему подъему кровли карбонатов, местоположение наиболее интенсивной положительной гравитационной аномалии соответствует нижнепермскому рифу, конфигурация которого существенно изменилась по данным сейсморазведки 3D. Восточнее основного рифа выделяются малоамплитудные аномалии гравитационного поля, соответствующие рифам небольшой амплитуды. Разумеется, интерпретационный процесс можно было бы продолжить, используя данные сейсморазведки 3D и вычисленные плотности пород ВЧР. Однако, по нашему мнению, задача решена – выделены гравитационные аномалии, отождествляемые с нижнепермскими рифогенными массивами, подтвержденными сейсморазведочными работами 3D.

Таким образом, задача учета влияния плотностных и структурных неоднородностей верхней части разреза может быть в той или иной степени выполнена при различном объеме априорной информации. Использование плотности пород, полученных по геологическим и другим геофизическим данным, и корректировка их в процессе интерпретации позволяет успешно решать поставленную задачу. Учет влияния плотностных и структурных неоднородностей верхней части разреза следует рассматривать как поправку в аномалии Буге за переменную плотность промежуточного слоя, аналогичную поправке за влияние рельефа.

# 5. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

## 5.1. Методологические вопросы интерпретации

Геологическая эффективность геофизических, и в частности, гравиметрических исследований, главным образом, определяется методологией извлечения информации из данных полевых наблюдений.

Существует большое количество различных методологических подходов к интерпретационному процессу, что обусловлено, с одной стороны, сложностью и многообразием геологических задач, решаемых с помощью геофизических методов, а с другой – наличием множества приемов, способов и методик их решения. Во многом это связано с наличием очень большого множества научных школ в области теории и практики потенциальных полей, каждая из которых понимает сущность интерпретационного процесса по-своему и разрабатывает различные методы и соответствующие компьютерные технологии. С другой стороны, как отмечает В.Н.Страхов, налицо отсутствие определяющей методологической основы» в теории и практике интерпретации, порождающее ситуацию «вавилонской башни» [283, 284, 285, 286].

Рассмотрим некоторые вопросы, связанные с методологией процесса интерпретации гравиметрических данных при решении геологических задач. В данной главе приводится общая характеристика процесса интерпретации, базирующаяся на работах ведущих ученых: Е.Г.Булаха [28], Г.С.Вахромеева [71], Г.Я.Голиздры [87], А.И.Кобрунова [134], В.И.Костицына [145], В.В.Ломтадзе [165], И.И.Никитина [201, 202], В.Н. Страхова [283, 284, 285, 286, 287] и многих других.

Под термином «интерпретация» аномального геофизического поля В.Н. Страховым подразумевается целостная совокупность, включающая в себя (рис.5.1):

- найденное распределение ответственных за поле физических параметров в изучаемом объеме геологической среды;

- геологическое истолкование найденного распределения физических параметров в изучаемом объеме природной среды;

- разложение аномального поля на слагаемые, соответствующие локальной, региональной и случайной составляющим поля.

Суть концепции интерпретационных моделей состоит в том, что любая интерпретация находится по экспериментальным данным в рамках принятых модельных представлений о геологической среде и поле, т.е. полностью определяется этими представлениями. Следовательно, всякая интерпретация геофизических данных модельна.



Рис.5.1. Общая схема интерпретационного процесса в гравиметрии и магнитометрии (по В.Н.Страхову)

При проведении геологического истолкования геофизических полей руководствуются принципами целенаправленности, системности, модельности, оптимизации, многостадийности и т.д. [196]. Основным при этом, должен быть принцип геологической содержательности всех решаемых в интерпретационном процессе задач. Интерпретационный процесс предполагает широкое использование имитационного моделирования, геологического редуцирования и адаптацию имеющихся методик для конкретной геологической обстановки. Таким образом, под термином «геологическая интерпретация» понимается совокупность операций (математических, логических и др.), посредством которых каждой вариации поля ставят в соответствие геологический объект [28].

Интерпретацию принято разделять на качественную и количественную [7, 21, 22, 74, 75, 83, 98 и др.]. На стадии качественной интерпретации, по сути, выясняется геологическая ситуация, которая могла вызвать зафиксированную аномалию. Количественная интерпретация ставит задачу получить параметры, характеризующие аномалиеобразующие геологические объекты. Она может

производиться различными методами, каждый из которых имеет сильные и слабые стороны.

В гравиразведке наибольшее применение прибрело построение плотностных моделей (гравитационное моделирование). Интерпретационные задачи всегда решаются в априорно выбранном модельном классе и в каждом из них есть свой аппроксимационный подход. В.Н.Страховым [280] чётко сформулированы те принципы, которые должны быть учтены при построении апроксимационных модельных представлений. Модель должна описываться небольшим числом параметров, которые определяют местоположение и размеры возмущающих тел [42, 136]. Выбранный модельный класс должен дать эффективное решение прямой задачи и хорошо описывать начальное аномальное поле. А.И.Кобруновым [133, 137, 138] разрабатываются подходы, позволяющие включать в процесс решения обратной задачи априорную информацию о сценариях эволюции системы, ее возможном генезисе.

Совершенствование технологии построения физико-геологической модели объекта исследований возможно за счет выделения локальных аномалий, обусловленных искомыми геологическими объектами. Поэтому, между качественными и количественными методами может быть выделен определенный комплекс методов, позволяющих извлечь дополнительную информацию из аномалий гравитационного поля.

Повышение информативности геофизических методов, использующих потенциальные поля (прежде всего, гравитационное и магнитное) при изучении недр Земли, связано с попытками получить послойное распределение физических свойств пород, т.е. разделить источники полей по вертикали. Очевидно, что в общем случае решить задачу расчленения геологического разреза по вертикали по данным гравиметрии и магнитометрии принципиально невозможно. Тем не менее, необходимость получения трехмерных распределений плотности и намагниченности пород диктуется практикой геофизических работ, усложнением геологических задач, высокой степенью освоения ресурсов и т.д. Поэтому, учитывая известные теоретические ограничения, используя некоторые свойства потенциальных полей и априорную геологическую информацию, в последние годы интенсивно создаются принципиально новые методы интерпретации полей, имеющие цель построение трехмерной модели строения геологической среды, адекватной наблюденному полю и имеющейся априорной информации. К таким методам относятся интерпретационная томография [10, 12], частотная селекция [107, 195], корреляционное зондирование [160, 161], компенсирующая фильтрация [233], методы, основанные на аналитическом продолжении полей [15, 183] или осреднении с последовательным увеличением скользящего окна [186], способ послойного определения плотности [239], вычисление градиентов дисперсии полного нормированного градиента поля [24,

311] – развитие метода полного нормированного градиента В.М.Березкина [17] и др. За рубежом широко применяются способы, основанные на деконволюции Эйлера [340, 347, 349, 362 и др.].

По образному выражению А.В.Матусевича [186], такие трансформанты поля представляют собой «гравиметрическое изображение геологической среды» и могут использоваться, например, в качестве моделей «нулевого приближения» для предварительного анализа и сопоставления с другой геологогеофизической информацией. А.И.Кобрунов [135] предложил путь перехода от пространственного распределения трансформанты поля к пространственному распределению параметра среды, однако эквивалентность решения обратной задачи гравиразведки не позволяет рассматривать такие модели как окончательный результат интерпретации. Только модели, в основу которых положен значительный объём априорной информации, ограничивающий множество эквивалентных решений обратной задачи, могут быть предметом количественного анализа и геологического истолкования.

Таким образом, при интерпретации гравиметрических данных необходимо, прежде всего, решить две основные задачи: разделить поле на составляющие с выделением источников аномалий в плане и по глубине и дать количественную аномалий. Как справедливо оценку параметров источников отмечают К.Ф.Тяпкин и Г.Я.Голиздра «... в принципе нет никакой разницы между обратной задачей и проблемой разделения полей» [298, с.5]. Поэтому нельзя рассматривать проблему разделения полей как самостоятельную в процессе интерпретации аномалий силы тяжести. Эти задачи необходимо решать совместно, т.е. разделение полей формальными процедурами следует осуществлять с учетом моделирования, а само моделирование проводить с учетом результатов разделения полей. По нашему мнению, такая методика интерпретации позволит на каждом шаге итерационного процесса приближаться к искомой модели геологического строения.

## 5.2. Векторное сканирование

### 5.2.1. Сущность векторного сканирования

В начале 1980-х годов коллективом исследователей (А.С.Маргулис, М.С.Чадаев, В.А.Кутин и др.) под руководством В.М.Новоселицкого [188, 203, 207, 208, 212] были заложены основы метода векторного сканирования реализованного в компьютерной системе VECTOR. Одним из основных достоинств системы VECTOR, которая определила большую ее востребованность в практике геофизических работ, является возможность получить трехмерную картину распределения физических свойств пород и локализовать источники аномалий в пространстве. Система VECTOR базируется на устойчивом вычислении векторов горизонтальных градиентов, их обработке, трансформациях и последующем интегрировании трансформант [184, 188, 203, 208, 212, 214, 219, 221, 228, 264, 379, 365].

Исходными данными для векторной обработки потенциальных полей может являться следующая информация о гравитационном или магнитном полях.

1. Результаты полевых наблюдений (массив *X*, *Y*, *H*, *G*<sub>набл</sub>), расположенные по профилям или по произвольной сети пунктов. Площадь съемки покрывается сетью треугольников с вершинами в пунктах наблюдения. Сеть треугольников имеет значительную плотность и многократно перекрывается. В каждом треугольнике по трем приращениям поля устойчиво вычисляется полный вектор горизонтального градиента аномалии силы тяжести.

2. Снятые с карт значения аномалий в той или иной редукции (массив  $X, Y, G_{ah}$ ). Здесь также производится триангуляция площади карты с вершинами треугольников в точках со значениями аномалий, и вычисляются горизонтальные градиенты.

3. Результаты аналитической аппроксимации полей на основе метода линейных интегральных представлений [218], истокообразных функций [108, 110] и др. В этом случае может быть достигнута требуемая плотность векторов, определяющая детальность и масштаб исследований. Вычисления градиентов поля осуществляются не численным способом, а в порядке решения прямой задачи от построенной аппроксимационной конструкции. Кроме горизонтальных производных, могут вычисляться и вертикальные, а также полный тензор градиента поля. Использование аналитической аппроксимации исходного поля характеризуется рядом существенных преимуществ перед традиционной триангуляцией [209].

При проведении векторной обработки в первых двух случаях площадь съемки покрывается сетью треугольников. Вершинами треугольников являются точки наблюдения. Вычисленный полный вектор горизонтального градиента аномалии силы тяжести относится к точке пересечения медиан треугольника. Вектора горизонтальных градиентов являются первичным и основным материалом для дальнейших трансформаций поля в системе векторных преобразований. Управляя процессом триангуляции, можно производить интерпретацию с требуемой детальностью, заполнять пропуски в сети наблюдений и т.д.

Все дальнейшие трансформации поля проводятся в пространстве горизонтальных градиентов. Осреднение в скользящем окне с учетом направления вектора позволяет разделить поле на локальную и региональную составляющие, последующее интегрирование которых дает восстановленное поле. Эффект подавления поля глубинных источников при векторном сканировании объясняется различным характером убывания на удалении от источника самого поля и его градиента. Поскольку градиент убывает значительно быстрее, а осреднение в скользящем окне производится с учетом направления вектора градиента, то при интегрировании на большой площади приповерхностные источники подавляются значительно сильнее, чем при обычном осреднении поля [59].

Результаты векторной обработки гравиметрических (и магнитных) данных могут быть представлены в следующем виде:

1) карты векторов полного горизонтального градиента аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие) при различных значениях коэффициента трансформации (размерах окна сканирования);

2) карты модулей векторов полного горизонтального градиента аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие);

3) карты восстановленного из градиентов поля аномалий силы тяжести (аномальная и региональная составляющие).

Эти карты представляют собой гравитационный эффект слоя пород от земной поверхности до некоторой эффективной глубины ( $H_{3\phi\phi}$ ), определяемой коэффициентом трансформации k, т.е. это эффект слоя выше  $H_{3\phi\phi}$  для локальной составляющей и ниже  $H_{3\phi\phi}$  для региональной. Понятие «эффективной глубины» введено создателями системы векторного сканирования [188, 203, 208, 212] чтобы не путать ее с истинной глубиной источников поля, поскольку ясно, что «глубинность» трансформации во многом зависит от формы возмущающих масс и их взаимного расположения [298]. Некоторые подходы к установлению связи между эффективными глубинами и глубинами аномалиеобразующих источников будут изложены в разд.5.2.2. Коэффициент трансформации k является относительным размером окна сканирования и изменяется от 0 до 1. Максимальное значение k = 1 соответствует полным размерам площади съемки; k = 0,5 означает, что величина окна осреднения равна половине площади съемки и т.д. [188].

Новым моментом, реализованным в системе VECTOR, является получение разностных карт. Решив задачи выделения поля от полупространств ниже глубин  $H1_{3\phi\phi}$  и  $H2_{3\phi\phi}$ , становится возможным выделить гравитационный эффект от источников, локализованных в горизонтальном слое между этими глубинами. Глубина кровли  $H1_{3\phi\phi}$  и подошвы  $H2_{3\phi\phi}$  слоя (а значит толщина слоя) определяются двумя коэффициентами трансформации. В результате могут быть построены соответствующие разностные карты.

Специальные приемы обработки, основанные на решении линейной обратной задачи гравиметрии, позволяют оценивать по разностным картам поля избыточные плотности в заданном эффективном слое [244].

Принципиально новый способ представления результатов наземной гравиметрической и магнитной съемок - трехмерные диаграммы поля. Они могут быть построены как на базе карт модулей градиентов и карт восстановленного из градиентов поля  $\Delta g$  – трехмерные интегральные диаграммы гравитационного поля, так и на базе карт разностей модулей градиентов и карт разностей восстановленного поля – трехмерные разностные диаграммы гравитационного поля. Последние можно считать диаграммами распределения квазиплотности (квазинамагниченности) геологической среды [124, 188, 219]. Построение 3D диаграмм полей и их произвольных горизонтальных и вертикальных срезов позволяет локализовать источники аномалий в пространстве.

# 5.2.2. Определение глубины аномалиеобразующих источников

Ось Z на трехмерной диаграмме распределения поля при векторном сканировании оцифровывается в значениях коэффициента трансформации, который зависит от размеров окна сканирования и величины исследуемой площади. Отсюда оценка глубинной приуроченности аномалиеобразующих объектов носит приближенный характер.

Для количественных оценок глубины залегания предложен метод «погружения» в трехмерную диаграмму поля точечного (сингулярного) источника, создающего на земной поверхности аномалию, близкую к наблюденной. Затем его известная глубина сопоставляется с различными значениями коэффициентов трансформации [203].

На рис.5.2 представлен пример определения оптимального коэффициента трансформации k<sub>опт</sub> на модельном примере гравитационного поля точечного источника. «Оптимальным» назовем коэффициент, при котором В трансформированном поле наилучшим образом проявляется искомая аномалия. По максимуму графика зависимости величины относительного экстремума поля  $G_{\text{жст}}$  от коэффициента трансформации k (рис. 5.2a) можно однозначно определить оптимальный коэффициент для данного модельного источника. Построив такие графики для различных глубин залегания, можно установить зависимость  $k_{\text{опт}}$  от глубинной приуроченности источников (рис. 5.26). Отчетливо видна нелинейность зависимости между глубиной источника и коэффициентами трансформации. С увеличением глубины, как и следовало разрешающая способность векторного ожидать, метода сканирования уменьшается.

Поскольку, очевидно, что при векторном сканировании происходит локализация именно особых точек поля, такой подход в принципе верен. В тоже время известно, что глубина особой точки потенциального поля и глубина залегания аномалиеобразующего (геологического) источника в общем случае не совпадают.



Рис. 5.2. Глубинная характеристика системы VECTOR: а) определение оптимального коэффициента трансформации для поля точечного источника; б) зависимость k<sub>onm</sub> от глубины источника

На примере модели контактной поверхности раздела двух сред, имеющей форму конхоиды Слюза [52], гравитационное поле которой эквивалентно полю горизонтального кругового цилиндра [278], видно, что относительная глубина локализации источников поля в системе VECTOR не связана с глубиной залегания контактной поверхности (рис.5.3). На рисунке представлено суммарное поле двух контактных поверхностей, имеющих форму конхоид Слюза и залегающих на различных глубинах (рис.5.3а). На вертикальном срезе суммарного поля (рис.5.3б), полученном в системе VECTOR, видно, что экстремумы поля локализуются в соответствии с положением эквивалентных горизонтальных цилиндров, а не в соответствии с глубиной контактных поверхностей.

Отметим, что центр горизонтального кругового цилиндра является особой точкой типа полюса первого порядка, и именно его координаты определяются модельного поля, при векторном сканировании данного т.е. глубина локализации источника поля на координате X=5 км больше, чем при X=15 км. Таким образом, граница раздела двух сред с различной плотностью, имеющая более пологую форму и залегающая на меньшей глубине, отражается в системе VECTOR при больших коэффициентах трансформации, чем граница, залегающая на большей глубине, но имеющая крутые крылья. Аналогичные результаты будут получены при изучении распределения плотностей в горизонтальном слое по срезам трехмерной диаграммы в силу эквивалентности полей горизонтального пласта переменной плотности и однородного пласта переменной мощности [205].



Рис. 5.3. Локализация источников поля в системе VECTOR: а) теоретическая модель и гравитационные эффекты контактных поверхностей, б) вертикальный срез гравитационного поля в системе VECTOR : 1 – горизонтальные круговые цилиндры и соответствующие им контактные поверхности в форме конхоид Слюза, 2 – поля контактных поверхностей, 3 – суммарное гравитационное поле

Найти соотношение между глубинами особых точек и истинным распределением аномалиеобразующих объектов без привлечения априорной геологической информации невозможно, особенно при решении задач структурной гравиразведки.

Одним из вариантов уменьшения степени неоднозначности интерпретации является дополнение результатов, полученых в системе VECTOR, данными гравитационного моделирования. Технология совместного использования гравитационного моделирования и системы VECTOR представляется в следующей последовательности [45, 56]:

 решение прямой задачи гравиразведки для основных гравиактивных границ и толщ геологического разреза, хорошо изученных геологогеофизическими методами;

- трансформация модельных полей в системе VECTOR с целью определения коэффициентов трансформации, при которых наилучшим образом проявляются особенности строения отдельных горизонтов;
- исключение из наблюденного гравитационного поля эффектов от хорошо изученных по данным бурения и сейсморазведки толщ, а также возможное их уточнение по остаточным полям путем решения обратной задачи;
- интерпретация остаточного гравитационного поля с применением коэффициентов трансформации, определенных при моделировании

В случае, когда априорных геолого-геофизических данных недостаточно для построения структурных карт и решения по ним прямых задач, можно корреляционные зависимости использовать между значениями поля, трансформированного в системе VECTOR, и абсолютными отметками целевой границы, полученными по скважинным или сейсмическим данным [45, 58]. На рис. 5.4. приведен пример определения оптимального коэффициента трансформации для выделения составляющих гравитационного и магнитного полей, обусловленных влиянием кристаллического фундамента, который в данном районе (территория на границе Пермского края и Удмуртской Республики) испытывает резкое погружение более чем на 10 км [37].



Рис. 5.4. Зависимость изменения коэффициентов корреляции между абсолютными отметками кристаллического фундамента и трансформантами системы VECTOR: a) – корреляционные зависимости для гравитационного и магнитного полей; б) – определениие оптимального коэффициента трансформации (1 – значения исходных полей; 2 – трансформанты поля при k<sub>onm</sub>; 3– гравитационное; 4 – магнитное поля)

В системе VECTOR выполнены различные трансформации (интегральные и разностные диаграммы при различных коэффициентах трансформации) для каждого из полей. Для всех трансформант вычислены коэффициенты корреляции между значениями поля и абсолютными отметками залегания кристаллического фундамента, полученными по региональным сейсмическим профилям и скважинам. На рис. 5.4a представлены корреляционные зависимости между абсолютными отметками и выбранными трансформантами полей. Здесь следует отметить, что практически отсутствует корреляция между глубинами фундамента и исходным магнитным полем (коэффициент корреляции 0.42), т.е. магнитные поле отражает, очевидно, неоднородности внутри фундамента. Однако трансформация в системе VECTOR позволяет выделить в магнитном поле ту составляющую, которая связана именно с рельефом фундамента (коэффициент корреляции для данной трансформанты 0.81). Для гравитационного поля коэффициенты корреляции несколько выше – до 0.86.

Полученные зависимости изменения коэффициентов корреляции между отметками фундамента и вычисленными значениями поля в системе VECTOR при различных коэффициентах трансформации (рис. 5.4б) позволяют определить оптимальные коэффициенты для каждого поля, при которых наилучшим образом отражаются особенности изучаемой толщи пород. Нельзя не отметить схожесть полученного графика зависимости коэффициента корреляции от коэффициента трансформации с аналогичным графиком, полученным для теоретической модели (рис. 5.2а).

## 5.3. Гравитационное моделирование

Гравитационное моделирование или метод подбора включает в себя целую группу методов. Их сущность заключается в подборе формы и параметров возмущающего объекта (объектов) путём последовательных приближений вида рассчитываемой аномалии к наблюдённой кривой посредством многократного решения прямой задачи. Методы подбора и регуляризации решения были теоретически обоснованы А.Н.Тихоновым [292], В.Н.Страховым [280], В.И.Гольдшмидтом [89], Г.Я.Голиздрой [87, 88], П.И.Балком [14] и многими другими.

Гравитационное моделирование широко используется при решении самого широкого круга геолого-геофизических задач в России [38, 43, 51, 72, 80, 81, 85, 122, 125, 187, 206, 222, 224, 294, 295, 303, 313 и др.], в ближнем [1, 27, 31, 32, 104, 118, 128, 129, 139, 140, 226, 227, 240, 299, 314, 316, 317, 324 и др.] и дальнем зарубежье [325, 332, 353, 361, 363, 366, 369, 375, 378 и др.]. Разумеется, приведенный список является далеко не полным, так, например, в библиографической базе данных В.М.Гордина и С.А.Тихоцкого [91] насчитывается более 600 публикаций на эту тему. Достаточно отметить следующие основные школы, развивающие и активно использующие методы моделирования: Е.Г.Булаха [29, 30], С.С.Красовского [150, 151, 153], А.И.Кобрунова [134, 136], А.П.Петровского [185, 236, 237], В.И.Старостенко [273, 274, 275], В.А.Кочнева [149, 290] и многих других.

Методы подбора получили широкое практическое применение в связи с использованием при интерпретации гравиразведочных и магниторазведочных данных вычислительной техники [77, 231]. Как правило, те или иные методы реализуются в пакетах программ по интерпретации гравиразведочных или магниторазведочных данных, как по отдельности, так и в комплексе [67].

Как известно, методом подбора пользуются только тогда, когда исследователь может составить схему-гипотезу геологического строения. При этом, как неоднократно подчеркивал А.К.Маловичко [179], достоверность моделирования зависит от тех геологических представлений, которые используются в процессе интерпретации. Методика и технология моделирования у различных исследователей весьма различна, но обязательным является расчет в рамках тех или иных модельных представлений при жестком закреплении значений некоторых параметров изучаемой среды.

Решение всегда ищется в рамках тех модельных представлений, которые легли в основу первого приближения. Если начальные представления ошибочны, то и рассчитанная модель также будет ошибочна, хотя расчетный эффект от нее может и совпадать с наблюденным полем. Дело в том, что при моделировании путем минимизации расхождений расчетного поля с наблюденным (что является условием обязательным, но отнюдь не достаточным для успешного решения геологической задачи) производится лишь корректировка параметров начальной модели, которая, к сожалению, может быть слишком упрощенной, искаженной или ошибочной [223]. Все принципиальные недостатки и ошибки начальной модели будут характеризовать итоговую модель. Это происходит потому, что все обратные задачи математически решаются неоднозначно, возможны многочисленные варианты в рамках эквивалентных перераспределений объектов изучаемой среды, в том числе и совершенно неприемлемые с геологической точки зрения. В связи с этим геологическое моделирование ни в коей мере не должно сводиться к формальному проведению расчетов по каким-то программам для обеспечения совпадения расчетного поля с наблюденным.

Гравитационное моделирование начинается с построения физикогеологической модели изучаемого объекта по следующей схеме. Анализируются и обобщаются физические свойства горных пород, слагающих геологический разрез. На основе геолого-геофизических данных составляется модель первого приближения изучаемого геологического объекта. Путем последовательного приближения, изменяя геометрические и физические параметры объекта и вмещающей среды, на основе решения прямой задачи составляется окончательная модель объекта и проводится оценка достоверности полученной модели, даются рекомендации для практического использования построенной модели.

Важное значение имеет адекватность интерпретационной модели реальному геологическому объекту [23, 92, 134]. Путь к адекватности пролегает через уточнение физико-геологических представлений о генезисе изучаемых структур и предельно тщательное изучение физических свойств горных пород. На смену претендующим на универсальность типовым технологиям должны прийти «штучные» интерпретационные модели, адаптированные к конкретным условиям и рассчитанные на индивидуальное применение.

Широко развиты методы сейсмогравитационного моделирования, включающие технологии совместного решения обратных задач сейсморазведки и гравиразведки. А.И.Кобрунов и А.П.Петровский [185, 236] ввели понятие пассивной и активной интегральной интерпретации. В модели пассивной интегральной интерпретации предполагается, что данные других методов вводятся в процедуры решения обратных задач - определения количественных параметров модели среды, в уже проинтерпретированной форме, что обеспечивает использование уже существующих наработок из инструментария анализа данных других методов, однако не дает возможности оперативного критического пересмотра в процессе автоматизированной интерпретации априорных данных и особенно модели начального приближения. Модель активной интегральной интерпретации предполагает использование методов и технологий совместного решения нескольких различных обратных задач. Например, совместного решения обратных задач сейсморазведки и гравиразведки. Данный подход обеспечивает возможность динамической корректировки результатов нескольких методов, но вызывает определенные сложности с введением самого понятия решения и согласованных модельных представлений.

Обратная задача может быть решена по двум схемам. В первой — после сопоставления полей исследователь самостоятельно принимает решение о возможных изменениях параметров модели. Такой подход можно назвать простым геологическим моделированием. В этом случае необходимо иметь хорошее математическое обеспечение для эффективного решения прямых задач. По второй схеме — геологическая модель первого приближения уточняется в автоматизированном режиме. В этом случае для сопоставления двух аномальных полей составляются определённые функционалы. Интерпретационная задача сводится к минимизации этих функционалов [30].

Таким образом, метод подбора очень тесно связан с проблемой параметризации геологической модели. По А.И.Кобрунову [136] параметризация геологической среды предполагает предварительное формирование ее содержательной или эффективной модели, в характеристику которой входит перечень параметров с выделенным диапазоном их изменения. Каждому конкретному набору значений параметров соответствует конкретный элемент модели, а ему соответствует конкретное геофизическое поле. Таким образом, модель среды – это параметризированное многообразие допустимых элементов, а выделение из него конкретного элемента, соответствующего заданному полю (т.е. решению обратной задачи), соответствует подбор соответствующего значения из выделенного многообразия параметров. Отсюда следует, что параметризация занимает центральное место в процессе извлечения информации из геофизических данных.

Методам подбора в целом свойственна многозначность равновероятно приемлемых вариантов решения обратной задачи и соответственно значительный субъективизм. Так, например, Т.В.Романюк [254] показала чрезвычайно высокую неединственность интерпретации гравитационного поля. Все модели, построенные ею, с достаточной степенью точности удовлетворяют наблюденному полю, но принципиально различаются между собой. Простые примеры єэквивалентности при решении обратной задачи приведены В.А.Кочневым [149]. Решающее значение для выбора наиболее приемлемого варианта решения играет знание интерпретатором конкретной геологической ситуации в совокупности с учётом данных других геофизических методов. Как неоднократно отмечал С.С.Красовский [152], моделирование ни в коей мере не должно сводиться к формальному проведению расчетов по каким-то программам для обеспечения совпадения расчетного поля с наблюденным. Решающим здесь должен быть учет совокупности различной априорной геологической, петрологической, геофизической информации для выбора модели первого приближения, а применяемые программы должны учитывать принципиальные особенности изучаемой среды.

Нам представляется, что при выборе модели первого приближения и ее параметризации в полной мере должны использоваться 3D распределения гравитационного поля, получаемые, например, в системе VECTOR, а векторное сканирование модельных полей позволяет управлять процессом решения обратной задачи, добиваясь таким образом согласования построенной модели конкретной геологической среде.

# 5.4. Интерпретация аномалий силы тяжести сочетанием методов векторного сканирования и гравитационного моделирования

Пример интерпретации геопотенциальных полей путем совместного применения методов моделирования и векторного сканирования рассмотрим на примере изучения глубинного строения территории Удмуртской Республики.

Региональные геофизические работы на территории Удмуртской Республики возобновлены в 1999 году в соответствии с программой «Региональных сейсмических исследований Удмуртской Республики». Постановка данных работ на территории Удмуртской Республики, в целом изученной сейсморазведкой и другими геофизическими методами, преследовала основные цели [246]: изучение блоковой тектоники фундамента, его влияние на строение осадочного чехла и выявление новых структурно-фациальных зон, благоприятных для постановки детальных нефтепоисковых работ.

Первый региональный профиль длиной 330 км, пересекающий западную часть Удмуртии с юга на север, выполнен сейсморазведкой МОГТ (ОАО «Удмуртгеофизика») совместно с высокоточной гравиметрией (ГИ УрО РАН). На остальных профилях проведены только сейсморазведочные работы и для комплексной интерпретации использовались региональные гравиметрические и аэромагнитные карты масштаба 1:200 000 (рис.5.5). Как видно из рисунка, на юго-востоке территории Удмуртии в гравитационном и магнитном полях отмечаются интенсивные минимумы полей, соответствующие ступенчатому погружению фундамента в наиболее глубокую зону Калтасинского авлакогена. На западе территории, где поверхность фундамента находится на глубинах до 2 км, максимумам гравитационного поля соответствуют преимущественно минимумы магнитного. Очевидно, что магнитное поле отражает, прежде всего, не рельеф, а внутренне строение фундамента.



Рис. 5.5. Расположение региональных профилей в гравитационном (а) и магнитном (б) полях: 1 - региональные профили, 2 – граница ступенчатого борта Калтасинского авлокагена (по В.М.Проворову)

По всем профилям проведено двумерное гравитационное моделирование. На рис. 5.6 представлена согласованная сейсмогравитационная модель по одному из профилей. В качестве исходных геологических моделей по каждому профилю использовались глубинные разрезы, построенные по сейсмическим данным, поскольку основные отражающие границы являются и гравиактивными [98]. Таким образом, геометрия плотностных границ была жестко закреплена и не изменялась при сейсмогравитационном моделировании.



Рис. 5.6. Согласованная сейсмогравиметрическая модель по профилю 4: а) гравитационное поле, б) плотностная модель, в) временной разрез: (1 – исходное гравитационное поле, 2 – модельное поле, 3 – пересечения профилей, 4 – скважины, 5 – плотности пород)

Начальные значения плотности пород (нулевое приближение) получены путем пересчета пластовых скоростей по известным эмпирическим зависимостям [98] между скоростью и плотностью пород с уточнением их по ранее построенным литолого-физическим моделям [215] для различных районов Удмуртской Республики. Поскольку пересчитанные величины плотностей имеют усредненный и вероятностный характер, то подбор полей производился путем коррекции плотностей в диапазоне, определяемом возможными их вариациями в литологических разностях пород.

При сейсмогравитационном моделировании часть локальных аномалий небольшой интенсивности и протяженности не была учтена. Основная часть из них обусловлена кривизной профилей, проходящих по градиентным зонам максимумов и минимумов поля силы тяжести, остальные, вероятно, связаны с локальными аномалиями в верхней части разреза, которые не играют существенной роли при региональных построениях.

Для построения объемной картины геологического строения построена каркасная модель, опирающаяся на сеть региональных профилей (рис.5.7). Модель состоит из согласованных сейсмогравиметрических разрезов по региональным профилям, гравитационного и магнитного полей, с помощью которых можно выполнить интерполяцию глубин основных горизонтов на всю площадь.



Рис.5.7. Каркасная модель территории Удмуртской Республики: а) гравитационное поле, б) магнитное поле, в) глубинные разрезы по региональным профи-

Одной из задач, стоящих перед региональными работами является изучение строения кристаллического фундамента. По существующим данным [215] беломорско-карельский фундамент в данном районе представлен гранитогнейсами, разделен в зонах крупных разломов на отдельные блоки. Наиболее перспективным объектом для обнаружения залежей нефти и газа в осадочных породах докембрия Волго-Уральского бассейна является Калтасинский авлакоген. Он сложен осадочными комплексами рифея (их мощность, по геофизическим данным, на юго-востоке может достигать 13 км) и имеет очень сложное строение [16].

Опираясь на каркасную модель, построенную по региональным профилям, нами сделана попытка построить карту рельефа кристаллического фундамента на территорию Удмуртской Республики [37]. С этой целью в системе VECTOR выполнены различные трансформации гравитационного и магнитного полей и определены оптимальные коэффициенты для каждого поля, при которых на трансформантах наилучшим образом отражается рельеф фундамента (см. рис 5.4). Выделив в гравитационном и магнитном полях составляющие корреляционно связанные с рельефом фундамента (*Hf*), вычислена эмпирическая зависимость, имеющая вид Hf = 5.644 + 0.713Gv + 2.269Tv (буквой *v* обозначены векторные трансформанты соответственно гравитационного (G) и магнитного (T) полей), с коэффициентом множественной корреляции 0.90(рис. 5.8).



Рис. 5.8. Корреляционная зависимость между абсолютными отметками залегания фундамента и трансформантами гравитационного и магнитного полей

Далее, используя полученную зависимость, построена карта рельефа кристаллического фундамента (рис. 5.9а). Профили 6 и 7, сейсмические работы на которых проведены позднее, служили контрольными при вычислении глубин. Как видно из рис 5.9б, распределение невязок подчиняется нормальному закону, среднеквадратическая погрешность построения составляет около ±140 м, что, по нашему мнению, учитывая мелкий масштаб исходных карт потенциальных полей и существенный перепад глубин фундамента, является достаточно хорошим результатом.



Рис. 5.9. Рельеф поверхности фундамента территории Удмуртской Республики (а) и распределение невязок вычисления (б): 1 – скважины, вскрывшие фундамент, 2 – региональные профили, по которым производились вычисления, 3 – контрольные профили

Как видно из полученных результатов, интерпретация потенциальных полей совместным применением векторного сканирования и моделирования в комплексе с данными сейсморазведки обогащает результаты и делает геофизическую интерпретацию более полноценной. В ходе региональных работ получена новая информация о геологическом строении осадочного чехла и кристаллического фундамента, что позволяет использовать данный результат для прогнозирования новых структурно-фациальных зон, благоприятных для постановки детальных нефтепоисковых работ. Таким образом, для наиболее полного извлечения полезной информации из данных гравиразведки в интерпретационном процессе используется технологическое сочетание операций, относящихся к двум различным направлениям математической теории интерпретации. Первое направление связано с преобразованием наблюденного поля в другие функции (трансформации поля), которые осуществляются с целью наиболее четкого выявления части полезной информации, связанной с определенными геологическими объектами. Второе направление охватывает численные расчеты аномальных полей и каких-либо параметров геологической среды, то есть проводить решение прямых и обратных задач.

Совместное применение и сочетание различных подходов к процессу интерпретации при решении различных геологических задач рассмотрено в следующей главе.

# 6. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИЗУЧЕНИЯ НЕФТЕГАЗОПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ

## 6.1. Гравиразведка при региональных геолого-геофизических работах

В настоящее время в Пермском крае, как и во всех старых нефтедобывающих регионах, актуальна проблема поисков новых перспективных территорий и объектов. В тоже время изученность Пермского Прикамья весьма неравномерна [35], несмотря на то, что перспективные в нефтегазоносном отношении земли занимают примерно 80% территории. Наиболее хорошо изучена зона развития Камско-Кинельской системы прогибов (ККСП), охватывающая центральные и южные районы, где открыто большинство месторождений и сосредоточены основные неразведанные ресурсы углеводородов (УВ) [232]. Недостаточно изучены центральные и южные части Юрюзано-Сылвенской депрессии (ЮСД), зарифовые участки на юго-востоке Башкирского свода и Бымско-Кунгурской впадины, большая часть Висимской (ВисВ) и Верхнекамской (ВКВ) впадин, Пермского свода и Ракшинской седловины, северные и восточные районы Соликамской депрессии (СолД). Слабо изучены Передовые складки Урала (ПСУ), Вычегодский и Казанско-Кажимский прогибы, северная часть Камского свода (КС), занимающие значительную часть территории края. Неравномерна изученность различных осадочных комплексов. Наиболее исследованы закономерности пространственного распределения скоплений углеводородов для палеозойского карбонатного комплекса в зоне ККСП [131, 198, 199]. Слабо изучены кристаллический фундамент [82, 130, 171], рифейско-вендские отложения, перспективы нефтегазоносности которых связываются с Осинско-Калтасинским авлакогеном, где по геофизическим данным имеется значительное число крупных объектов (антиклинальные структуры, зачастую осложненные разрывами, вероятные калтасинские рифы, зоны выклинивания рифейских отложений).

Систематические региональные геофизические исследования с нефтегазопоисковыми целями выполняются в крае уже более полувека [35]. Наиболее важные исследования слабоизученных земель выполнены на территории края за последнее десятилетие. В том числе в 2003-2008 гг. выполнено более 7 000 км региональных профилей в западных, северных и восточных районах Пермского края (см. рис.1.1).

## 6.1.1. Методические аспекты региональных геолого-геофизических работ

Опыт проведения региональных геофизических работ как в Пермском крае, так и по России в целом [37, 47, 51, 55, 190, 197, 213, 235, 253, 291], позволил сформулировать основные принципы методики, обосновать технологии извлечения информации из результатов наблюдений и определить основные этапы региональных комплексных геолого-геофизических работ.

Первый этап проведения региональных геофизических работ связан с выполнением аэрокосмогеологических исследований (АКГИ) и аэромагнитных или комплексных аэрогеофизических работ, дающих общее представление об особенностях строения осадочного чехла и фундамента. При этом выполняется линеаментное дешифрирование космических снимков среднего разрешения, структурное и геологическое дешифрирование мелкомасштабных аэрофотоснимков, структурно-геоморфологические исследования, обобщённый геологический и геоморфологический анализ территории, выявляются трещинноразрывные и блоковые структуры, которые могут служить перспективными участками скоплений углеводородного сырья, определяется гипсометрия и элементы разломно-блоковой тектоники «магнитного фундамента», выделяются аномалии по гамма-спектрометрической и газовой съемкам. Итогом первого этапа работ является определение первоочередных площадей и объектов для постановки профильных и площадных региональных геофизических работ.

Второй этап региональных работ связан с созданием каркасной сети взаимоувязанных между собой профилей, на которых выполняются геофизические наблюдения. Профили прокладываются с учетом перспективных участков, выделенных по результатам предыдущего этапа. Поскольку задачей работ является изучение строения территории и выявления нефтегазоперспективных зон и объектов, то вместе с сейсморазведкой, обеспечивающей достаточно точные данные вдоль линии профиля, проводятся гравиметрические наблюдения. Гравиметрические данных являются как дополнительной информацией при сейсмических построения, так и базой для взаимной увязки ранее проведенных гравиметрических съемок на данной территории. Они служат основой для комплексной интерпретации геологических и геофизических данных, позволяя получить согласованную площадную модель для всей территории исследований. Гравиметрические работы, как правило, проводятся по более густой, чем сейсморазведочные, сети профилей, с целью последующей площадной интерпретации гравиметрических данных. Зачастую проводится площадная гравиметрическая съемка масштабов от 1:25 000 до 1:100 000.

В отдельных районах по региональным профилям проводится геохимическая съемка. Данные исследования включают комплекс работ, направленных на изучение особенностей приповерхностного газового фона и выявление различного типа газовых аномалий, формирующихся за счет активизации вертикального массопереноса глубинных флюидов и вертикальных ореолов рассеяния залежей углеводородов. Полученная геохимическая информация позволяет выделить и закартировать в малоизученном районе зоны возможного нефтегазонакопления, характеризующиеся повышенным содержанием углеводородных газов и продуктов их окисления в приповерхностной части разреза; зоны возможных трещинно-разрывных структур (аномалии типа «разлом»), перспективных для формирования ловушек неантиклинального типа; локальные нефтеперспективные объекты, характеризующиеся аномалиями типа «ореолы рассеяния залежей углеводородов».

Комплексная интерпретация в профильном варианте результатов полевых геофизических работ заключается, прежде всего, в решении двумерной обратной линейной задачи гравиразведки (подбор плотностей при жестко закрепленных границах), с определением плотностных характеристик основных толщ, выделенных по данным сейсморазведки. В ряде случаев, когда подбором плотности не удается добиться удовлетворительного совпадения кривых  $\Delta g$  или получить геологически обоснованный плотностной разрез, осуществляется коррекция отражающих горизонтов и переинтерпретация сейсмических данных.

Итогом профильных геофизических работ является построение для территории каркасной геофизической модели, имеющей опорные значения на профилях и интерполированные значения между ними.

Третий этап заключается в площадной интерпретации гравитационного и магнитного полей. Опираясь на профильные гравиметрические работы, выполняется увязка аномалий силы тяжести, полученных при съемках прошлых лет различного масштаба, составляется сводная гравиметрическая карта на всю площадь исследований. Прослеживание выделенных ранее зон и объектов осуществляется путем построения гравиметрических «коридоров» вдоль профилей, что позволяет проследить распространение выделенных в ходе профильных геофизических работ основных черт строения геологической толщи.

После проведения интерпретации геопотенциальных полей на отдельных участках результаты обобщаются на сводных картах, создаваемых для различных интервалов глубин. Дополнительную информацию дают результаты аэрокосмогеологических исследований и обобщённый геологический, геоморфологический и неотектонический анализ изучаемой территории. В результате работ уточняется модель геологического строения осадочного чехла и кристаллического фундамента, определяются дальнейшие направления геологоразведочных работ с целью создания лицензионного фонда недр.

Последующие этапы региональных работ связаны с параметризацией и детализацией результатов предшествующих этапов. Во-первых, это постановка параметрического бурения для изучения геологического строения осадочного чехла и кристаллического фундамента, оценки нефтеперспективности осадочного чехла и получения геолого-геофизических параметров. Во-вторых – проведение на территории выделенных нефтегазоперспективных зон зональнорегиональных геофизических работ, уточняющих строение этих зон, и намечающих отдельные объекты для постановки детальных геофизических работ.

Рассмотрим подробно методические аспекты и некоторые результаты пер-

вых трех этапов на примере региональных исследований, выполненных в Юрюзано-Сылвенской депрессии (ЮСД), расположенной в юго-восточной части Пермского края (см.рис.1.1).

# 6.1.2. Построение геолого-геофизической модели Юрюзано-Сылвенской депрессии

В целом, регион изучен весьма фрагментарно – наиболее исследованы северная и западная его части вдоль зон сочленения с Косьвинско-Чусовской седловиной и Бымско-Кунгурской впадиной. Региональные сейсмические (ОАО «Пермнефтегеофизика») и гравиметрические (Горный институт УрО РАН) работы 2002-2004 гг., выполненные в ЮСД по пяти профилям общей протяженности более 460 км, дали большой объем новый информации о геологическом строении территории. Гравиметрическая съемка выполнена гравиметрами ГНУ-КВ и Autograv CG-3M; при топографо-геодезических работах использованы GPS-4700 Trimble и электронные тахеометры Trimble. Погрешность определения значений аномалий силы тяжести в редукции Буге составила ±0.050 мГал.

Ранее профильные и площадные гравиметрические работы проводились на территории ЮСД в 1952-1973 гг. Опираясь на гравиметрические работы, проведенные по региональным профилям, выполнена увязка аномалий силы тяжести, полученных при съемках прошлых лет различного масштаба, и составлена сводная гравиметрическая карта на всю площадь исследований (рис. 6.1а). Гравитационное поле изменяется от –14 до +26 мГал с общим уменьшением значений на восток, где выделяется интенсивная отрицательная аномалия силы тяжести. Смена положительных величин поля на отрицательные происходит приблизительно в зоне резкого погружения карбонатных пород артинского яруса – уступа седиментационного типа субмеридионального простирания. В западной части площади выделяется ряд положительных аномалий силы тяжести почти изометричной формы. Относительно спокойное гравитационное поле осложнено интенсивной аномалией северо-восточного простирания шириной 15-20 км -Березовским максимумом. Амплитуда максимума достигает 20 мГал, градиенты поля более 2 мГал/км. Интенсивность аномалии возрастает по простиранию в северо-восточном направлении.

Аэромагнитные работы масштаба 1:200 000 выполнены для всей территории депрессии, а масштаба 1:50 000 – для ее северной части. Аномальное магнитное поле (рис. 6.1б) представляет собой чередование положительных и отрицательных субширотных полос, осложненных локальными аномалиями северо-западного и северо-восточного простирания. В целом магнитное поле довольно слабо коррелирует с гравитационным. Однако следует отметить, что Березовский гравитационный максимум выделяется и в магнитном поле локальной положительной аномалией амплитудой до 200 нТл



Рис. 6.1. Гравитационное (а) и магнитное (б) поля Юрюзано-Сылвенской депрессии (черными линиями показаны региональные профили)

Интерпретация профильных гравиметрических данных произведена путем построения двумерных согласованных сейсмогравиметрических моделей, один из которых приведен на рис. 6.2. В результате моделирования определена степень проявления в наблюденном гравитационном поле структур и приподнятых участков, выделяемых сейсморазведкой по основным отражающим горизонтам, и вычислены плотностные характеристики основных толщ. Как видно из рисунка, осадочная толща имеет весьма существенную латеральную изменчивость плотностей пород. В целом отмечается увеличение значений плотностей с запада на восток.



Рис. 6.2. Согласованная сейсмогравиметрическая модель по профилю III-III: графики полей: 1 - наблюденного гравитационного, 2 – модельного гравитационного, 3 – магнитного; 4 – подобранные плотности пород; 5 – разрывные нарушения; 6 – отражающие границы по данным сейсморазведки и их стратиграфическая приуроченность; 7 –поверхность кристаллического фундамента по сейсмическим данным; литологические комплексы: 8 – преимущественно терригенные, 9 – карбонатные, 10 – кристаллического фундамента, 11 – сульфатно-карбонатно-обломочные, 12 – карбонатно-терригенные, 13 – терригенно-карбонатные

В ряде случаев по гравиметрическим данным выполнена коррекция сейсмических границ. В нижней части рис. 6.2 представлен фрагмент временного разреза во временном интервале отражения от фундамента. Плохая прослеживаемость отражающего горизонта и сильная засоренностью временного разреза не позволяет провести однозначную корреляцию отражения. Использование гравиметрических данных позволило более уверенно определить форму рельефа фундамента и более чем на 1 км изменить его глубину залегания.

Совместно с данными магниторазведки по результатам моделирования можно определить или скорректировать положение разрывных нарушений, выделяемых в осадочном чехле и фундаменте, наметить зоны возможного развития интрузий и других неоднородностей и установить их возможную связь с рельефом кристаллического фундамента и крупными структурами осадочного чехла.

Выполненная интерпретация по профилям показала, что происхождение Березовского максимума связано как с плотными породами фундамента, так и с залегающими выше уплотненными породами осадочного чехла. Соответственно находит свое объяснение расположение большинства месторождений и структур в северной части ЮСД (вне зоны развития ККСП и складчатых областей на востоке) – они располагаются вдоль зоны Березовского максимума, представляющего собой барьер для миграции флюидов.

Опираясь на результаты моделирования, выполнена площадная интерпретация геопотенциальных полей и на ее основе комплексная переинтерпретация и обобщение всего массива геолого-геофизической информации. При наличии каркасной модели, построенной по региональным профилям, задачами площадной интерпретации гравитационного и магнитного полей являлись общий и детальный анализ регионального поля, прослеживание выделенных ранее зон и объектов вне системы профилей, локализация в плане и по глубине новых аномальных зон и объектов, не нашедших своего отражения в каркасной модели, построение карт, отображающих строение целевых объектов в различных интервалах глубин, тектоническое районирование территории.

Для площадной интерпретации геопотенциальных полей использована система VECTOR. При выполнении общего и детального анализа гравитационного и магнитного полей использованы различные трансформанты и их отображения, позволяющие получить представление о закономерностях поля для исследуемой территории, (трехмерные диаграммы гравитационного и магнитного полей, карты интегральных и разностных трансформант, вертикальные разрезы вдоль различных направлений, в том числе и по линиям профилей). На основе совмещения разномасштабных гравиметрических съемок (детальной профильной и мелкомасштабной площадной) прослежены выделенные ранее зоны и объекты вне системы профилей, и локализованы новые. Это осуществлено путем интерпретации в выделенных вдоль профилей прямоугольных участках гравитационного поля («коридорах») размерами примерно 20×30 км. Важной стадией площадной интерпретации является гравиметрическое редуцирование - вычитание из поля «коридора» гравитационных эффектов, полученных для каркасной модели. При этом изучаются различные варианты, добиваясь как наилучшего выделения известных объектов, так и получения наиболее информативной и геологически содержательной картины. Для примера на рис.6.3 показано отражение на трехмерной диаграмме гравитационного поля Канабекской структуры, на которой рекомендовано бурение поисковой скважины. Как видно из рисунка, структура выделяется интенсивной положительной аномалией силы тяжести.



Рис. 6.3. Трехмерная диаграмма гравитационного поля. Сечение через контур Канабекской структуры

Результаты интерпретации геопотенциальных полей на отдельных участках обобщены на сводных картах, создаваемых для различных интервалов глубин. Основными являются карты для трех преобладающих гравиактивных границ: кровля нижнепермских карбонатных отложений (рис. 6.4а); кровля верхнедевевонско-турнейских отложений (рис 6.4б) и поверхность фундамента. Сопоставление карт позволяет проследить разделение площади исследований на блоки, которые могут прослеживаться вверх от фундамента через весь осадочный чехол. Так, например, по результатам интерпретации уточнено местоположение западной границы нижнепермского седиментационного уступа. На большей части территории данная граница достаточно близко совпадает с региональным меридиональным разломом кристаллического фундамента. Отмечается влияние рельефа кристаллического фундамента на региональное строение всего осадочного чехла.



Рис. 6.4. Результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических данных в Юрюзано-Сылвенской депрессии а) карта локальных аномалий, отождествляемых с объектами в нижнепермском карбонатном комплексе; б) карта локальных аномалий, отождествляемых с объектами в верхнедвонскокаменноугольном комплексе: 1 – региональные геофизические профили; 2 – границы тектонических структур, 3 – контуры месторождений нефти и газа; 4 – контуры локальных поднятий; 5 – контуры гравитационных аномалий; 6 – нижнепермский седиментационный уступ; 7 – границы зонально-региональных работ Характерной особенностью строения нижнепермского карбонатного комплекса является седиментационный уступ, проходящий субмеридионально практически по центру площади исследований. Между региональными профилями трассирование границ уступа произведено по результатам интерпретации гравиметрических съемок прошлых лет. На карте трансформанты гравитационного поля, отвечающей влиянию нижнепермского карбонатного комплекса (рис. 6.4а), в пределах седиментационного уступа и восточнее его, выделено 33 локальных гравиметрических аномалии. Из этих аномалий 15 соответствуют структурным формам, выделенным по сейсмическим данным, остальные – предположительно являются отображением ассельско-сакмарских органогенных построек, находящихся вне отработанных сейсмических профилей.

Для верхнедвонско-каменноугольного комплекса (рис.6.4б) в результате интерпретации гравимагнитных данных в системе VECTOR выделены аномалии силы тяжести, которые по своим размерам примерно соответствуют ожидаемым положительным структурным формам. Большинство из них, по нашему мнению, имеет тектоническую природу. Некоторые поднятия, вероятно, осложнены органогенными постройками позднефранского и частично серпуховского возраста. Всего на карте трансформанты гравитационного поля, соответствующей верхнедевонско-верейским нефтегазоносным комплексам, выделено 47 аномалий. Преобладающая часть их находится в западной части района работ. Аномалии проанализированы путем построения в системе VECTOR трехмерных разностных диаграмм-трансформант гравитационного поля с соответствующими сечениями через контур структуры или выявленной аномалии (рис. 6.3). Из выявленных аномалий 22 полностью или со смещением соответствуют структурам или приподнятым участкам по отражающему горизонту II<sup>к</sup>. Девять аномалий совпадают с известными структурами и приподнятыми участками, которые предположительно являются структурами облекания позднедевонских органогенных построек. Ряд приподнятых участков, выделенных сейсморазведкой, располагается в градиентных зонах трансформанты и не выделяются в гравитационном поле. Причиной этого, как правило, является небольшая амплитуда и размеры приподнятых участков, а также недостаточная детальность гравиметрических съемок прошлых лет.

Таким образом, по трансформантам гравитационного поля выделены локальные аномалии для нижневизейско-среднекаменноугольного и нижнепермского нефтегазоносных комплексов. Эти аномалии рассматриваются в качестве перспективных для поисков структур и учитываются при обосновании нефтегазоперспективных зон для постановки дальнейших сейсморазведочных и гравиразведочных работ.

По результатам региональных работ в ЮСД по пяти профилям дано обоснование на проведение зонально-региональных работ на трех площадях,
контуры которых показаны на рис. 6.4б. Сейсмические работы на этих площадях проведены по более густой сети (с расстоянием между профилями 2-4 км), гравиметрическая съемка выполнена в площадном варианте.

Результатом комплексных зонально-региональных работ является оценка ресурсов углеводородов, обоснование участков для последующего лицензирования и рекомендации по дальнейшему ведению геологоразведочных работ.

Рассмотренные методы и приемы интерпретации комплекса региональных геолого-геофизических методов применяются при проведении региональных и зонально-региональных работ в различных районах Пермского края, в Оренбургской, Кировской и других областях [143] при выполнении подпрограммы «Минерально-сырьевые ресурсы» Федеральной целевой программы «Экология и природные ресурсы России (2002-2010 гг.)».

## 6.2. Современная гравиразведка при изучении нефтеперспективных рифогенных структур

Месторождения нефти и газа, приуроченные к погребенным рифогенным образованиям, встречаются на всех континентах и в шельфовой зоне в отложениях различного возраста. В Пермском крае большинство нефтяных месторождений связано с рифогенными массивами и структурами их облекания в бортовой зоне развития Камско-Кинельской системы прогибов [199, 315]. С зоной ККСП связано более 95% начальных разведанных запасов углеводородов и около 70% неразведанных ресурсов нефти Пермского края [232], что определяет необходимость продолжения ее активного опоискования с целью открытия новых месторождений.

Рассмотрим несколько примеров интерпретации гравиметрических материалов в Соликамской депрессии Предуральского краевого прогиба в пределах распространения соляной толщи, включающей залежи калийных солей Верхнекамского месторождения (ВКМКС) [154]. Толща солей находится на глубинах от 200-400 м до 500-700 м. Ниже, на глубине 1.5-2.3 км залегают нефтяные залежи, суммарные ресурсы которых оцениваются более 100 млн. тонн [199]. Эти залежи приурочены к многочисленным рифогенным массивам позднедевонского возраста, входящим в систему Камско-Кинельской прогибов. Нефтяные месторождения распространены почти на всей площади калийной залежи.

Практически вся территория ВКМКС покрыта гравиметрическими съемками масштабов 1:50 000 и 1:25 000, выполненными с целью изучения соляной толщи. Переинтерпретация этих данных позволяет получить новую информацию о строении нефтеперспективных рифогенных структур.

## 6.2.1. Переинтерпретация гравиметрических материалов прошлых лет с использованием современного программного обеспечения

За последние 50 лет различными геологическими и геофизическими организациями накоплены огромные объемы разномасштабных гравимагнитных данных, представленных в различной форме. По данным [344] на территории СССР за период 1950 - 1990 гг. проведено более 10 млн. гравитационных измерений и примерно столько же километров аэромагнитной съемки, которые проводились различными приборами с разной точностью. Интерпретация гравиметрических и аэромагнитных данных проводилась на базе имеющейся в то время априорной информации и с использованием, в основном, качественных методов (широко использовалось осреднение в скользящих окнах и вычисления высших производных).

Данные старых съемок, хранящиеся в виде каталогов и/или карт, интерпретированные с учетом вновь появившейся за это время геологогеофизической информации, на основе современного программного обеспечения, могут быть использованы компаниями, занимающимися поисками углеводородов и рудных месторождений. В работе [344] приводятся примеры подобных работ на поиски месторождений нефти на юго-восточном окончании Прикаспийского соляного бассейна в Казахстане, показавшие высокую геологическую результативность современных методов интерпретации при выделении соляных диапиров.

На территории Соликамской депрессии (рис.6.5) в 1986-1990 годах геофизическими партиями Баженовской геофизической экспедиции и «Пермрудгеофизика» с гравиметрами ГНУ-КС выполнены крупномасштабные гравиметрические съёмки. В результате полевых работ построены кондиционные гравиметрические карты масштаба 1:25 000 для центральной и южной частей ВКМКС. При интерпретации гравиметрических данных построена карта поверхности покровной каменной соли, уточнены контуры крупных купольных структур соленосной толщи, оконтурены ядра рифовых построек в подсолевых отложениях, протрассированы возможные разрывные нарушения в осадочном чехле и выделены участки возможного развития ослабленных зон.

Результаты последующего бурения скважин [86], в основном не подтвердили наличие каких-либо ослабленных зон и разрывных нарушений, делающих невозможной отработку месторождения солей. Закартированное положение южного борта Дуринского прогиба не имеет ничего общего с результатами бурения.

Качественно новый этап гравиметрических исследований нефтеперспективных рифогенных структур наступил в связи с разработкой и внедрением в практику геологоразведочных работ современных методов обработки и интерпретации аномалий силы тяжести [36, 47, 124, 197, 204, 216]. Переинтерпретация имеющихся гравиметрических материалов на данной территории проведена с целью уточнения геологического строения палеозойских толщ, выявления локальных гравитационных аномалий, обусловленных верхнедевонскотурнейскими, нижнепермскими органогенными постройками и структурами их облекания, а также нижнепермской соляной толщей.



Рис. 6.5. Обзорная карта фрагмента Соликамской депрессии: 1 – месторождения нефти, 2 – выявленные и подготовленные структуры, 3 – контур ВКМКС, 4 – граница крупных тектонических структур, 5 – рифогенное палеоплато; зоны ККСП: 6 – осевая, 7 – внутренняя прибортовая, 8 - бортовая

В результате проведенных работ уточнено строение кровли соляной толщи, что подтверждено последующим бурением солеразведочных скважин [86]. Были выделены аномалии от известных нижнепермских и нижнефранскотурнейских рифогенных массивов и выявлены положительные аномалии гравитационного поля, отождествляемые с предполагаемыми карбонатными постройками. Последующие сейсмические работы на ряде площадей подтвердили результаты гравиметрических исследований.

На рис.6.6 демонстрируется результат применения векторного сканирования в сложных условиях Дуринского прогиба – системы впадин в кунгурской соляной толще, заполненных терригенными отложениями. Впадины создают интенсивные положительные аномалии гравитационного поля. Трансформанта гравитационного поля, отражающая неоднородности слоя, залегающего на эффективных глубинах 200 - 700 м (уровень залегания соляной толщи), представлена на рис. 6.6а. Здесь четко выделяются рукава и отдельные впадины Дуринской системы. На рис. 6.66 показан гравитационный эффект слоя с эффективными глубинами 1.6-2.0 км, что соответствует глубинам нижнефранскотурнейской толщи. Как видно из рисунка, интенсивное гравитационное влияние Дуринских впадин практически удалено и положительными аномалиями силы тяжести отображаются Юрчукский, Чашкинский, Бельский и другие рифогенные массивы. Таким образом, с помощью процедур векторного сканирования достаточно успешно выполнено разделение гравитационного поля на составляющие, обусловленные нижнепермскими отложениями и нижнефранскотурнейскими рифогенными массивами [214, 216].



Рис. 6.6. Аномальное гравитационное поле, отражающее особенности строения нижнепермской (а) и верхнедевонско-турнейской толщ (б): 1 – границы Дуринского прогиба, 2 - контуры рифогенных массивов (1 – Юрчукский, 2 – Пашковский, 3 - Чашкинский, 4 – Северо-Чашкинский, 5 – Легчимский, 6 – Бельский, 7 – Жилинский)

На примере выделения локальных аномалий силы тяжести, обусловленных Бельской структурой (рис. 6.7), рассмотрим возможности различных методов интерпретации при изучении нижнефранско-турнейских рифогенных массивов. При традиционном способе выделения локальной (остаточной) компоненты по-

ля с использованием осреднения в скользящем окне размером 2 км (рис. 6.7а) какой-либо характерной аномалии, обусловленной рифогенным массивом, не наблюдается. На полученном в системе VECTOR горизонтальном срезе поля, соответствующем глубине залегания нижнефранско-турнейских отложений (рис. 6.7б), отчетливо выделяется не только аномалия, обусловленная самой Бельской структурой, но и ее юго-восточным продолжением. Сейсморазведочные работы, проведенные здесь позднее, подтвердили наличие этого продолжения и выявили отдельную вершину – Восточно-Бельское поднятие [36, 214].



Рис.6.7. Сравнение результатов интерпретации гравиметрических материалов на Бельском участке: а) карта локальной составляющей, б) горизонтальный срез поля в системе VECTOR; 1 - структурная карта по данным сейсморазведки 1997 г.; 2 - структурная карта по данным сейсморазведки 2000 г. (Б – Бельское, ВБ - Восточно-Бельское поднятия)

## 6.2.2. Построение трехмерной геоплотностной модели месторождения

Пример интерпретации аномалий силы тяжести совместным применением векторного сканирования и моделирования в комплексе с другими геологогеофизическими данными рассмотрим на Шершневском месторождении нефти. Здесь потребовалось использование комплексирования методики векторного разделения полей с геологическим редуцированием, что позволило последовательно вычитать из наблюденного поля гравитационные эффекты от геологических объектов известного строения. Такой подход возможен в том случае, когда на исследуемом объекте имеется достаточная априорная геологическая информация.

Шершневское месторождение нефти расположено в южной части Соликамской депрессии Предуральского прогиба и приурочено к бортовой зоне Камско-Кинельской системы прогибов (рис.6.5). Поднятие выявлено сейсморазведкой 2D в 1998 г. в зоне гравитационных аномалий, по которым в свое время были спрогнозированы расположенные в этом районе Уньвинская, Сибирская, Белопашнинская структуры и соответствующие месторождения нефти [207]. Все эти месторождения являются структурами облекания верхнедевонских рифов. Геологический разрез Шершневского месторождения изучен по материалам солеразведочных, параметрических, поисковых и разведочных скважин и является типичным для месторождений Соликамской депрессии. Разрез сложен, в основном, карбонатными и терригенными породами. В кунгурском ярусе нижнего отдела пермской системы выделяется соляная толща, в отложениях которой имеются сильвинитовая и сильвинито-карнолитовая пачки, содержащие пласты калийных солей Верхнекамского калийного месторождения.

В 2000 г. на Шершневском поднятии проведены детальные гравиметрические работы масштаба 1:25 000 с целью изучения строения соляной толщи, расположения пермских рифов и выявления аномалий, обусловленных девонскими рифогенными массивами. Далее здесь поставлена сейсморазведка 3D, и структура введена в глубокое бурение. Амплитуда структуры по кровле терригенных отложений тульского горизонта (отражающий горизонт II<sup>к</sup>) составляет около 100 м, размеры 6.0×5.5 км. Промышленная нефтеносность установлена в карбонатных отложениях турнейского и фаменского ярусов, в терригенных отложениях бобриковского и тульского горизонтов.

Имея достаточно большой объем априорной геологической информации, полученный по данным сейсморазведки 2D и бурения, на данном месторождении построена трехмерная геоплотностная модель и выявлены аномалий, приуроченные к различным интервалам геологического разреза.

Полевые работы масштаба 1:25 000 выполнены с использованием гравиметров ГНУ-КВ по 16 профилям, расстояние между которыми 500 м, и трем магистралям. Шаг по профилю 100 м. Погрешность определения значений аномалий силы тяжести составила ±0.060 мГал. Для интерпретации размеры площади не ограничились пределами гравиметрической съемки, а были расширены за счет ранее проведенных гравиметрических исследование на Мезенской площади масштаба 1:50 000 (Горный институт УрО РАН, 2000 г) на западе и Верхнекамской площади масштаба 1:25 000 (Баженовская геофизическая экспедиция, 1990 г) на юге и востоке Шершневской площади.

Диапазон изменения значений аномалий силы тяжести в пределах площади составляет около 16 мГал (рис.6.8). Наблюдается общее уменьшение значений поля с запада на восток. Наиболее резкий градиент изменения поля (до 5 мГал/км) совпадает с западной границей Шершневской структуры. Такой перепад обусловлен резким выклиниванием мощной пачки соляной толщи со средней плотностью 2.10 г/см<sup>3</sup> и замещением их терригенными породами с плотностью 2.40-2.50 г/см<sup>3</sup>. На некоторых участках такие зоны сопровождаются образованиями фаций ангидритов с высокой плотностью, что усиливает амплитуду гравитационной ступени.



Рис.6.8. Гравитационное поле Шершневского участка: 1 – контур верхнедевонского рифогенного массива, 2 – гравиметрические пункты съемки Шершевской площади, 3 – гравиметрические пункты съемок прошлых лет, 4 скважины

Качественный анализ гравитационного поля показал, что морфология его наиболее сложна в районе Шершневской структуры и в явном виде в исходном поле рифогенная постройка не выделяется. Она «затушевана» субмеридиональными отрицательными линейными аномалиями силы тяжести, а также изометричными положительными.

С целью определения вклада в суммарное гравитационное поле влияния

различных толщ геологического разреза по имеющимся структурным картам, построенным по данным сейсморазведки и бурения, решена прямая задача для основных гравиактивных границ: кровля и подошва солей, нижнепермские рифы и девонский риф. Моделирование осуществлялось путем аппроксимации геологических структур набором прямоугольных параллелепипедов. Каждое из модельных полей было обработано в системе VECTOR. Анализ полученных карт и трехмерных диаграмм распределения поля (рис.6.9) показал, что гравитационные эффекты от кровли солей и девонского рифа локализуются примерно на одной и той же глубине при коэфициентах трансформации k=0,369 $\div$ 0,475. Учитывая, что аномальные плотности этих объектов противоположны по знаку, а кровля солей создает более интенсивную аномалию, выделить только по наблюденному полю эффект от девонского рифа не представляется возможным. Невозможно разделить эффекты от подошвы солей и пермских рифов, которые также локализуются на одной и той же глубине (k=0,262).

Для успешного разделения полей и решения поставленных задач необходимо использовать известный прием редуцирования, заключающийся в вычитании из наблюденного поля гравитационного эффекта хорошо изученных геологических объектов. Тогда в оставшемся поле будет четко проявляться плотностное строение геологического пространства с неизвестным строением.

Как показало двумерное гравиметрическое моделирование поля (рис. 6.10), резкое поднятие кровли соли в районе скв. 800, отсутствие в этой скважине терригенно-карбонатной и пестроцветной толщ, создает гравитационный эффект меньший по амплитуде, чем аномалия в исходном поле. Существенный вклад в данную аномалию создает разуплотненная зона непосредственно от поверхности до глубины примерно 50-60 м (четвертичные отложения) в пределах речной долины. В плане аномалия совпадает с отрицательной формой рельефа и долиной реки. Установлено [320], что наиболее трещиноватыми являются положительные структуры в кровле солей (соляные купола и валы). Здесь отмечаются явления растворения соли с образованием глинисто-ангидритовых шляп, как, например, выявленной в скв. 800. Надсоляные отложения на сводах соляных куполов также имеют трещиноватый разрыхленный характер и, соответственно, меньшую плотность, что также вносят вклад в морфологию гравитационного поля. Таким образом, первым этапом редуцирования является исключение влияния надсоляных отложений.



Рис.6.9. Решение прямой задачи гравиразведки и трансформация модельных полей в системе VECTOR:a) кровля солей; б) подошва солей; в) пермские рифы; г) девонский риф: 1 – структурная карта гравиактивной границы (заливкой показан соответствующий гравитационный эффект), 2 – линия вертикального сечения 3D диаграммы поля, 3 – «глубина» экстремума аномалии



Рис. 6.10. Результаты двумерного гравитационного моделирования на Шериневской площади: 1 – наблюденная и 2 – модельная аномалии силы тяжести, 3 – плотности пород (г/см<sup>3</sup>), 4 – скважины, 5 – четвертичные отложения, 6 – зоны разуплотнения в верхней части разреза, 7 – пестроцветная толща, 8 – терригенно-карбонатная толща, 9 – соляно-мергельная толща, 10 – гипсовоангидритовая шляпа, 11 – калийная соль, 11 - подстилающая каменная соль

В гравитационном поле, восстановленном в системе VECTOR при малых коэффициентах трансформации, представленном на рис.6.11а, четко видны аномалии пониженных значений поля, вытянутые в меридиональном направлении. Обращает на себя внимание практически полное совпадение этих гравитационных аномалий с характером изменения скоростей сейсмических волн, определенных по результатам интерпретации временных полей первых волн на сейсмограммах МОГТ (рис.6.11б), и отождествляемых геофизиками Пермского госуниверситета [192] с зонами «дислокационного разупрочнения пород». Поскольку отрицательные аномалии гравитационного поля соответствуют положительным аномалиям скоростей, то можно сделать вывод о том, что они обу-

словлены поднятиями кровли солей. Это свидетельствует о том, что гравиметрические данные могут давать независимую дополнительную информацию о строении и физических свойствах пород верхней части разреза, которая может быть использована при сейсмических построениях.



Рис. 6.11. Отражение неоднородностей надсоляной толщи в гравитационном поле (a) и в скоростях сейсмических волн (б) [192]

Изучение формы поверхности соли возможно при обработке остаточного гравитационного поля в системе VECTOR с малыми коэффициентами трансформации. Выбор коэффициента трансформации, при котором локальная составляющая гравитационного поля наилучшим способом отражает морфологию кровли солей, выполнен по корреляционным зависимостям между отметками кровли солей по скважинам и значениями трансформанты поля (рис. 6.12). Как видно из рисунка, для исходных значений поля коэффициент парной корреляции около нуля (рис. 6.12а); для трансформанты поля, полученной в системе VECTOR, эта зависимость близка к линейной с коэффициентом корреляции 0.71 (рис. 6.12б).

Далее, используя полученную корреляционную зависимость (коэффициенты регрессии), по локальным аномалиям вычислены абсолютные отметки залегания данного горизонта (рис.6.13). Наблюдается соответствие структурной карты кровли солей по сейсмическим данным (отражающий горизонт С<sup>к</sup>) с картой, построенной по гравитационным данным, особенно в центральной части площади. Нефтеразведочные скважины 67 и 71, пробуренные на месторождении позднее, подтвердили гравиметрические построения. Невязки абсолютных отметок кровли солей составляют от 1 до 17 м (для карты, построенной по сейсмическим данным, эти расхождения составили от 5 до 27 м). В кровле солей отмечается ряд валов субмеридионального простирания, уходящих на север под Камское водохранилище. На другом берегу р.Камы по данным ранее проведенных гравиметрических съемок выделена интенсивная отрицательная гравитационная аномалия, обусловленная Камско-Вишерским валом в кровле солей. Очевидно, что на Шершневском участке выделяется южное окончание этого вала.



Рис.6.12. Корреляционные зависимости между абсолютными отметками кровли солей и наблюденными (а) и локальными (б) гравитационными аномалиями

По артинским отложениям Шершневская структура осложнена разноразмерными по амплитуде и морфологии органогенными постройками пермского возраста. Самые высокоамплитудные рифы расположены в сводовой части и на восточном склоне девонской структуры. Как отмечалось выше, для того, чтобы выделить гравитационные эффекты от данных рифов необходимо из наблюденного поля исключить влияния вышележащих отложений. С этой целью решена прямая задача, т.е. вычислено гравитационное влияние построенной кровли солей. Кроме того, из наблюденного поля вычтен эффект надсоляных отложений, полученный при трансформации поля с малыми коэффициентами в системе VECTOR (рис.6.11а). Остаточное поле вновь подвергнуто векторной обработке с коэффициентами, определенными при трансформации модельных полей в системе VECTOR. В результате получена карта (рис. 6.14), отражающая гравитационное поле слоя на эффективных глубинах 600-800 м, т.е. на глубинах залегания артинских рифов. Сопоставление вычисленных аномалий со структурной картой отражающего горизонта А<sup>т</sup> показывает качественное совпадение их. Выделяются гравитационные аномалии в районе скв. 403 и к северу от нее; между скв. 800, 63 и 64; у скв. 64, 67; севернее скв. 531 и ряд других. В то же время отмечается субмеридиональное простирание выделенных аномалий, особенно в западной части площади, что, возможно, объясняется недоучтенным влиянием вышележащих отложений.



Рис. 6.13. Карта кровли солей Шершневской площади: 1 - кровля солей, построенная по гравиметрическим и 2 – по сейсмическим данным, 3 – скважины (числитель ее номер, знаменатель 0 абсолютная отметка) 4 – контрольные скважины

После исключения всех вышележащих отложений и фоновой составляющей гравитационного поля выделена локальная положительная аномалия силы тяжести амплитудой порядка 1 мГал. На рис.6.15 изображен контур структуры по данным сейсморазведки 3D и локальное гравитационное поле на Шершневской площади, в котором верхнедевонско-турнейская органогенная постройка выделяется интенсивной аномалией силы тяжести. Совпадение очевидно, что свидетельствует о достоверности проведенной интерпретации, в результате которой выявлены плотностные неоднородности надсоляной толщи, построена карта кровли солей и выделены аномалии, обусловленные нижнепермскими и девонским рифогенными массивами.



Рис. 6.14. Сопоставление гравитационных аномалий от слоя на эффективных глубинах 600-800 м с сейсмическими данными: 1 – контуры пермских рифов по сейсмическим данным, 2 - скважины

Шершневская структура граничит на юго-востоке с Белопашнинским рифогенным массивом (месторождение им.Архангельского) и на северо-востоке – с Зыряновским поднятием. В гравитационном поле западное крыло Белопашнинского поднятия отражается положительной аномалией на тех же коэффициентах трансформации, что и Шершневская структура (рис. 6.16а). Зыряновская структура непосредственно не попала на исследуемую площадь, однако по направлению к ней на глубинах, соответствующих фаменско-турнейским отложениям (рис. 6 16б), наблюдается достаточно интенсивная положительная аномалия. Возможно, она является гравитационным эффектом от продолжения Зыряновской структуры на юго-запад под Камское водохранилище. Эта аномалия рекомендована для проверки дальнейшими геолого-геофизическими работами. Сейсморазведочные работы, проведенные здесь в 2008 г., подтвердили наличие нефтеперспективного Зыряновского рифогенного массива.



Рис. 6.15. Выделение девонского рифа в гравитационном поле



Рис. 6.16. Проявление девонского рифа на 3D диаграммах гравитационного поля

Таким образом, реализуя возможности интерпретации потенциальных полей в системе VECTOR с использованием априорной геологической информации, сочетая методы векторного разделения полей с решением прямых задач и геологическим редуцированием можно успешно решать сложные геологические задачи, определять глубины залегания источников аномалий и идентифицировать их с определенными геологическими объектами.

## 6.3. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 3D

Трехмерная сейсморазведка является в настоящее время наиболее эффективной технологией наземных геофизических исследований при поисках и разведке месторождений углеводородов [155, 300]. В комплексе с геофизическими исследованиями скважин она позволяет не только получить трехмерные структурные модели нефтеперспективных объектов, но и проследить в межскважинном пространстве развитие зон с улучшенными емкостными свойствами, оценить их нефтенасыщение, выделить перспективные участки для поисковоразведочного и эксплуатационного бурения. Очевидно, что проведение дорогостоящих исследований 3D сейсморазведки требует использования всей имеющейся информации о геологическом строении месторождений, в том числе гравиметрической [57, 76, 97, 210, 382].

Как известно [300], при проектировании сейморазведочных работ 3D параметры системы наблюдения настраиваются на глубинный диапазон изучения целевых горизонтов. Следствием этого является низкая кратность прослеживания как приповерхностных, так и глубинных отражающих горизонтов. Очевидно, что наиболее эффективным будет являться комплексирование гравиразведки с сейсморазведкой 3D именно при изучении данных горизонтов.

Положительный опыт гравиметрического сопровождения сейсморазведки 3D получен нами на различных площадях Пермского края и в Удмуртской Республике [47, 57, 97, 204, 210, 253]. Установлено, что комплексирование сейсмических исследований 3D и гравиметрии существенно повышает информативность работ при изучении нефперспективных площадей. Результаты интерпретации гравиметрических данных позволяют выявлять плотностные (и скоростные) неоднородности среды как в верхней части разреза, так и в более глубоких отложениях, и в итоге построить детальную геологическую модель месторождения.

### 6.3.1. Изучение глубинного строения площади съемки сейсморазведки 3D

Методику комплексной интерпретации материалов сейсморазведки 3D с высокоточными гравиметрическими данными рассмотрим на примере Решетниковского месторождения нефти, расположенного на юго-западе Удмуртской Республики. Месторождение является приразломной структурой тектонического происхождения. Залежи нефти приурочены к отложениям терригенного девона. Структура имеет северо-северо-восточное простирание в соответствии с восточной границей Северо-Татарского свода и простиранием Мамадашско-Кокарского грабена (рис. 6.17) [246].



Рис. 6.17. Схема строения кристаллического фундамента (Проворов, 2001): 1 – разломы фундамента, 2 – зоны интенсивного дробления, 3 – номера скважин и абсолютная отметка поверхности фундамента, 4 – контур гравиметрической съемки, 5 – контур съемки сейсморазведки 3D; основные структурные элементы: I – Вятскополянкий купол Северо-Татарского свода, II – Нижнекамская межблоковая зона дислокаций, Г – Мамадашско-Кокарский грабен

Решетниковская структура по отражающему горизонту III (кровля тиманского горизонта) представляет группу брахиантиклиналей, не связанных общей изогипсой. Полностью Решетниковская зона поднятий имеет размеры 16×3-7 км, амплитуду около 30 м. Размеры отдельных поднятий составляет от 2.5×1.1 км до 5.3×3 км. Отмечается несоответствие структурных планов по основным отражающим горизонтам осадочного чехла.

Отсутствие ярко выраженных структурно-тектонических и палеоморфологических критериев выделения сложнопостроенных ловушек углеводородов определило необходимость проведения сейсморазведочных работ 3D совместно с гравиметрическими исследованиями. Постановка площадных гравиметрические исследований на месторождении, учитывая его блоково-разрывную тектонику, преследовала цель уточнить особенности геологического строения на уровне кристаллический фундамент - осадочный чехол, выделить и протрассировать тектонические нарушения глубинного происхождения.

Изучение разломов кристаллического фундамента играет важную роль в создании детальной геолого-геофизической модели месторождений нефти [297], поскольку установлена тесная связь нефтеносности осадочной толщи с блоковым строением фундамента. Так, например, все нефтяные залежи над Южно-Татарским сводом на территории Татарстана контролируются разломами кристаллического фундамента [238], которые могут создавать каналы тепломассопереноса или восходящей миграции углеводородов. Поэтому при создании модели сложнопостроенной ловушки в терригенных отложениях девона необходимо учитывать наличие осложнений в виде тектонического экранов и выклинивания ловушки.

Обычно основой картирования поверхности фундамента служат данные сейсмических исследований и глубокого бурения. Как правило, общая совокупность точек, в которых имеются более или менее надежные сведения о глубинах залегания фундамента является весьма ограниченной, а расположение этих точек в плане – чрезвычайно неравномерно [11]. Поэтому необходимым элементом современных технологий построения карт поверхности кристаллического фундамента является привлечение данных гравиразведки и аэромагниторазведки для восполнения дефицита информации, полученной другими геолого-геофизическими методами исследований [62]. Отличительными особенностями геопотенциальных полей являются равномерность изучения и высокая детальность отражения геологического строения территорий. В частности, установлено, что основная часть энергии аномального магнитного поля (до 99%) в большинстве случаев обусловлена влиянием именно верхней части кристаллического фундамента, и для ее картирования магнитная съемка в ряде платформенных регионов фактически может являться прямым методом [11].

Гравиметрическая съемка на месторождении выполнена в 2000 г. по системе профилей сейсморазведки 3D ( $300 \times 100$  м), а также на обрамлении площади по сети 900×200 м. Наблюдения выполнялись гравиметрами ГНУ-КВ. Среднеквадратическая погрешность съемки по данным независимого контроля составила ±0.068 мГал.

Характерным элементом наблюденного гравитационного поля (рис. 6.18) является высокоградиентная зона (гравитационная ступень), находящаяся в западной части площади и составляющая более 1 мГал/км. Повышенные значения гравитационного поля отмечаются также на востоке площади. Таким образом, Решетниковское месторождение находится в области относительно пониженных значений аномалий силы тяжести. Эпицентр отрицательной гравитационной аномалии находится на севере участка; к югу происходит относительное увеличение значений поля примерно на 1 мГал. Резкое изменение характера гравитационного поля свидетельствует о том, что площадь находится на стыке двух тектонических зон с существенно различным распределением физических свойств пород.



Рис. 6.18. Гравитационное поле Решетниковкой площади: 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – контур съемки сейсморазведки 3D; 3 – скважины

Характер магнитного поля по данным аэромагнитных съемок масштаба 1:200 000 в пределах Решетниковского месторождения и прилегающих территорий несколько иной (рис. 6.19). Площадь находится на склоне регионального магнитного минимума. Относительному повышению значений гравитационного поля на запад площади соответствует понижение магнитного. В целом, северо-восточное простирание изолиний гравитационного и магнитного полей соответствует направлению основных разломов кристаллического фундамента. Можно предположить, что состав пород фундамента в пределах месторождения неоднороден и разрывные нарушения контролируют блоки фундамента, повидимому, разного вещественного состава. Западнее разрывного нарушения находятся породы с относительно небольшими значениями магнитной восприимчивости и с повышенными плотностями.



Рис. 6.19. Магнитное поле Решетниковкой площади: 1 – контур гравиметрической съемки, 2 – контур съемки сейсморазведки 3D

Традиционно считается [26, 297 и др.], что в гравитационном и магнитном полях разрывные нарушения, как в кристаллическом фундаменте, так и в осадочном чехле, отображаются в виде ступеней различной амплитуды (зон сгущения изоаномал), цепочками локальных максимумов или минимумов, сменой характерных особенностей аномальных полей. Классическим методом трассирования градиентных зон геопотенциальных полей является вычисление горизонтальных производных [172].

На карте модулей градиентов магнитного поля (рис. 6.20) протрассированы осевые зоны экстремумов, которые хорошо согласуются с положением основных региональных разломов субмеридионального направления, выделенных по геологическим данным. Зона регионального разлома, как это видно из рис. 6.20, имеет достаточно широкую полосу. Этот разлом на территории Татарстана известен как Дигитлинско-Можгинский [26]. Наиболее интенсивные аномалии градиентов совпадают с положением Мамадашско-Кокарского грабена (см. рис. 6.17). Таким образом, даже данные мелкомасштабных карт магнитного поля позволяют уточнить положение основных разломов кристаллического фундамента.



Рис. 6.20. Карта модулей градиентов магнитного поля: 1 – региональные разломы фундамента по геологическим данным, 2 – осевые зоны максимумов градиентов, 3 – контур гравиметрической съемки, 4 – контур съемки сейсморазведки 3D

Если, как указывалось выше, магнитное поле несет в себе информацию преимущественно о составе и морфологии поверхности кристаллического фундамента, то в гравитационное поле существенный вклад вносят также плотностные неоднородности осадочного чехла. Для оценки степени вклада в суммарное гравитационное поле отдельных плотностных границ разреза проведено решение прямой задачи (рис. 6.21). В качестве исходной информации использованы структурные карты основных отражающих горизонтов I<sup>st</sup> (кровля стерлитамакских отложений), II<sup>b</sup> (башкирские отложения), II<sup>al</sup> (ассельские отложения), III (кровля тиманских отложений), полученных по данным сейсморазведки 3D. Аномальные плотности пород на гравиактивных границах взяты по скв. 254 [215]. Гравитационные эффекты основных отражающих горизонтов относительно невелики. В соответствии со свойствами потенциального поля наиболее четко в гравитационных аномалиях отражаются горизонты, залегающие ближе к земной поверхности, поэтому отмечается хорошее совпадение изолиний прямого гравитационного эффекта со структурным планом наблюдаются для отражающего горизонта I<sup>st</sup>. Значения модельных полей закономерно увеличиваются на юг в соответствии с региональным уменьшением глубины залегания горизонтов. Отдельные малоразмерные локальные поднятия амплитудой 5-10 м, картируемые по сейсмическим данным, практически не проявляются в модельных полях.



Рис. 6.21. Гравитационные эффекты основных отражающих горизонтов Ist (a), IIb (б), IIal (в), III (г): 1 – скважины, 2 – изолинии кровли горизонта, 3 – изолинии модельного гравитационного поля, 4 –разрывные нарушения по сейсмическим данным

Суммарный эффект осадочной толщи составляет примерно 1.30 мГал. Вычитание модельного эффекта из наблюденного гравитационного поля позволило существенно упростить морфологию гравитационного поля и уверенно протрассировать зону, разграничивающую участки с различным характером распределения аномалия силы тяжести: резкое увеличение значений на западе и плавное поведение изолиний на востоке площади (рис. 6.22). Эта зона совпадает с разломами фундамента, полученными по геологическим данным и выделенными по магнитному полю. Кроме того, в эту зону «легли» тектонические нарушения, протрассированные по данным сейсморазведки 3D [307]

Плотностные неоднородности внутреннего строения фундамента могут быть выявлены на 3D диаграммах гравитационного поля, полученных в системе

VECTOR. На рис. 6.23 приведено одно из вертикальных сечений диаграммы по линии скважин 257, 252, 250, 251 и 256. На западе площади отчетливо выделяется интенсивная отрицательная аномалия, которая, вероятнее всего, связана с разуплотненными зонами фундамента. Эпицентр этой аномалии расположен между скважинами 257 и 252, т.е. находится в зоне регионального разлома и, вероятно, характеризует дезинтегрированный, трещиноватый состав фундамента. Если придерживаться точки зрения И.Н.Плотниковой [238], то данный разлом можно рассматривать в качестве канала восходящей миграции углеводородов, с которым связано Решетниковское месторождение, и представляет собой самостоятельный поисковый объект.



Рис. 6.22. Остаточное гравитационное поле Решетниковской площади: 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – скважины; разломы кристаллического фундамента: 3 – по геологическим данным, 4 – по аэромагнитным данным, 5 – по данным сейсморазведки 3D, 6 – по гравиметрическим данным; 7 – контур съемки сейсморазведки 3D



Рис. 6.23. Вертикальное сечение трехмерной диаграммы гравитационного поля Решетниковской площади

Таким образом, результаты интерпретации гравиметрических и аэромагнитных данных в дополнение к материалам сейсморазведки 3D позволяют выявлять плотностные неоднородности кристаллического фундамента, трассировать зоны тектонических нарушений и построить детальную геологическую модель месторождения, включая его глубинную часть.

# 6.3.2. Определение априорных статических поправок по гравиметрическим данным

Другим направлением использования гравиметрических данных при проведении сейсморазведочных работ 3D является изучение верхней части разреза [60] с целью определения априорных статических поправок, необходимых для интерпретации сейсмических материалов.

В сейсморазведке МОГТ весьма остро стоит проблема подготовки статических поправок, исключающих скоростные неоднородности горных пород верхней части разреза (ВЧР) из времен регистрации целевых отражающих горизонтов [79, 117, 302]. Это связано, прежде всего, с резким сокращением объемов как специальных работ МПВ и МОВ, направленных на изучение верхней части разреза, так и сейсмокаротажных исследований ВЧР.

В последние годы повсеместный характер приобрел расчет статических поправок по временам первых вступлений в МОВ ОГТ. Появились автоматизированные способы формирования скоростной модели ВЧР [302]. Основным недостатком большинства из них является применение методов решения обратной задачи с использованием упрощенных моделей строения среды, что не позволяет получать высокую точность результатов во многих регионах. Поэтому в сейсморазведке по-прежнему остро стоит проблема учета скоростных неоднородностей ВЧР и расчета статических поправок, появляются многочисленные публикации на эту тему [117].

Как правило, на площадях, где выполняются площадные сейсморазведочные работы 3D, имеется достаточный объем сейсмических профилей 2D и углубленных скважин с ранее выполненными микросейсмокаротажными работами (МСК), а также проведены площадные гравиметрические работы различного масштаба. Поскольку, как указывалось выше, между скоростью распространения сейсмических волн и плотностью пород существует тесная корреляционная зависимость [18, 98], неоднородности в ВЧР отражаются как в сейсмическом, так и в гравитационном полях. Это позволяет использовать гравиметрическую информацию при интерпретации сейсморазведочных материалов, в частности, определить априорные статические поправки перед проведением сейсморазведочных работ 3D [39, 41, 50, 60, 64, 66].

Существующие способы использования данных гравиразведки для расчета статических поправок сводятся, в основном, к решению линейной обратной задачи, т.е. определению плотности пород ВЧР с последующим пересчетом полученных плотностей в интервальные скорости. В качестве исходной информации для решения обратной задачи используется либо наблюденное гравитационное поле [148], либо его локальная составляющая, полученная тем или иным способом [3, 79, 241]. Однако формальный выбор локальной составляющей гравитационного поля, использование модели ВЧР в виде плоского слоя, а также отсутствие корреляционных зависимостей между скоростью и плотностью для толщи ВЧР в конкретных районах исследований вносят значительные погрешности в статические поправки, вследствие чего применение этих методик имеет ограниченный характер.

Технология интерпретации гравиметрических материалов с целью определения плотностей пород верхней части разреза с последующим вычислением статических поправок описана в разд.4.5 и сводится к следующему:

 определение средней плотности пород ВЧР (промежуточного слоя), относительно которой будут вычисляться аномальные плотности для последующих вычислений;

- выделение составляющей гравитационного поля, обусловленной влиянием ВЧР;

 вычисление плотности пород ВЧР путем решения обратной линейной задачи гравиметрии, используя составляющую поля, выделенную на предыдущем этапе;

– выявление корреляционной зависимости между априорными скоростями упругих волн и полученным массивом плотностей;

– решение прямой задачи гравиметрии для толщи ВЧР с полученными плотностями и уточнение локальной составляющей поля;

 пересчет значений плотностей пород в скорости упругих волн используя установленную корреляционную зависимость, и определение статических поправок.

Весь процесс интерпретации может быть повторен после первого этапа коррекции статических поправок, т.е. с использованием полученной корреляционной зависимости получаем массив плотностей пород ВЧР, решаем прямую задачу и вновь выделяем локальную составляющую.На выходе интерактивного итерационного процесса имеем значения скоростей сейсмических волн в ВЧР, которые используются для расчета статических поправок, и значения аномалий силы тяжести, вычисленные с переменной плотностью промежуточного слоя. Таким образом, решение задачи сводится к построению детальной сейсмогравиметрической модели ВЧР.

Рассмотрим пример интерпретации геофизических материалов на одной из площадей, расположенных в Соликамской депрессии Предуральского краевого прогиба в пределах распространения калийной залежи Верхнекамского месторождения. Толща солей является помехой при сейсмических построениях и создает интенсивные гравитационные аномалии, многократно превышающие эффект от целевых геологических объектов. Ниже соляной толщи на глубине 1.9-2.1 км расположено месторождение нефти, приуроченное к рифогенному массиву позднедевонского возраста.

На площади с целью детального изучения геологического строения месторождения нефти поставлены сейсморазведка 3D (ОАО «Пермнефтегеофизика») и гравиразведка масштаба 1:10 000 (Горный институт УрО РАН). Гравиметрическая съемка выполнена с использованием гравиметров Autograv CG-5 по сейсмическим профилям 3D по сети 250×300 м с шагом 50 м. Среднеквадратическая погрешность определения аномалий Буге составила ±0.028 мГал. Основной задачей гравиразведки являлось изучение плотностного строения территории и, прежде всего, локализация плотностных неоднородностей в надсолевой и солевой толщах.

Данная площадь особенно удобна для построения сейсмогравиметрической модели ВЧР с целью определения априорных статических поправок, поскольку здесь ранее проводились сейсморазведочные работы 2D, и имеется достаточно большой объем углубленных скважин, где были выполнены микросейсмокаротажные работы (МСК). Кроме того, на обрамлении изучаемой площади имеются кондиционные карты аномалий силы тяжести масштаба 1:25 000, которые использованы для учета краевых эффектов при трансформациях поля.

Плотность промежуточного слоя, наиболее близкая к истинной плотности пород слагающих рельеф, определялась методом Неттлетона. Для каждого профиля строилось семейство кривых аномалий Буге, вычисленных с различной плотностью промежуточного слоя, и из них выбрана та, которая меньше всего коррелирует с рельефом (рис. 6.24). В целом средняя плотность пород промежуточного слоя для всей площади составляет около 2.40 г/см<sup>3</sup>. С этой плотностью вычислены аномалии Буге и дальнейшее решение прямых и обратных задач производилось относительно этой плотности.



Рис. 6.24. Подбор плотности промежуточного слоя методом Неттлетона (параметр кривых – значение плотности в г/см<sup>3</sup>)

Как указывалось выше, основной гравиактивной границей на данной площади является кровля солей с перепадом плотности -(0.2 - 0.3) г/см<sup>3</sup>. Морфология поверхности солей изучена солеразведочными скважинами и уточнена по гравиметрическим данным, поэтому целесообразно исключить влияние этой толщи из наблюденного гравитационного поля, т.е. выполнить геологическое редуцирование. Как видно из рис. 6.25, где представлены результаты редуцирования, изменение альтитуд кровли соляной толщи, составляющее более 100 м на данной площади (рис. 6.25б), создает гравитационной эффект более 3 мГал, исключение которого приводит к существенному изменению морфологии гравитационного поля (рис. 6.25в).



Рис. 6.25. Редуцирование гравитационного поля: а) исходная карта аномалий силы тяжести, б) карта кровля соляной толщи (точками показаны скважины), в) остаточная аномалия силы тяжести

Следующей задачей является выделение локальной составляющей поля, обусловленной влиянием верхней части разреза. Как указывалось выше, эта задача неоднозначна и в определенной степени может быть решена с использованием векторного сканирования. Для оценки гравитационного влияния ВЧР из набора трансформант поля, рассчитанных в системе VECTOR с различными параметрами, выбрана та локальная составляющая, которая наилучшим образом коррелирует с «твердыми» значениями скоростей в ВЧР, определенными по данным MCK.

Результаты разделения гравитационного поля представлены на рис. 6.26. Из исходного (редуцированного) поля (рис. 6.26б) выделены локальные составляющие, вычисленные с различными параметрами трансформации k системы VECTOR (рис. 6.26в). Полученные локальные аномалии сравнивались с картой скоростей ВЧР, построенной по данным MCK (рис. 6.26а). Как видно из рис. 6.26г, д трансформация поля в системе VECTOR позволила выделить локальную составляющую, которая с коэффициентом линейной корреляции 0.80 согласуется с картой скоростей упругих волн в толще ВЧР.

Линейная обратная задача решалась путем подбора плотности в слое, ограниченном сверху рельефом местности, снизу – уровнем приведения. Аппроксимация слоя осуществлена набором прямоугольных параллелепипедов. На рис. 6.27 представлены результаты подбора плотности пород ВЧР. Подбор осуществлялся в точках, расположенных на поверхности земли (рис. 6.276), методом локальных поправок [247]. Среднеквадратическая погрешность подбора составила ±0.028 мГал. Результат вычислений – карта распределения значений плотностей ВЧР, представлен на рис. 6.27в.



Рис. 6.26. Разделение гравитационного поля на составляющие: а) карта скоростей упругих волн в ВЧР (точками показаны скважины МСК), б) наблюденное гравитационное поле, в) трансформанты поля, полученные в системе VECTOR при различных коэффициентах k, г) корреляционные зависимости между скоростями и наблюденными аномалиями силы тяжести, д) корреляционные зависимости между скоростями и трансформантой поля при k=0.15



Рис. 6.27. Результаты подбора плотности пород ВЧР: а) карта локальных аномалий силы тяжести, б) рельеф местности, в) подобранные плотности пород ВЧР

Используя полученное уравнение регрессии, построена карта изменения скоростей в данной толще на всю площадь исследования, которая затем пересчитана с учетом мощности ВЧР в карту статических поправок (рис. 6.28б). Сравнение полученных результатов с поправками, определенными при обработке первых вступлений всей совокупности сейсмических записей 3D в комплексе программ Millenium (Green Mountain Geophysics, USA) в ОАО «Пермнефтегеофизика» (рис. 6.28а), показывает очень хорошую их сходимость. Это говорит о достоверности полученных результатов и возможности прогноза скоростных неоднородностей ВЧР по гравиметрическим данных опережающего сейсмические работы 3D. При отсутствии на площади скважин с МСК в качестве априорных данных о скоростях упругих волн могут выступать результаты интерпретации сейсмических наблюдений, предшествовавших площадной съемке.

Полученные скорости сейсмических волн в ВЧР, пересчитанные в плотности пород, могут быть использованы далее при интерпретации гравиметрических данных. Так, например, если решить прямую задачу для слоя, ограниченного сверху рельефом, а снизу уровнем приведения, с полученными значениями плотностей, то получим поправку в аномалии Буге за переменную плотность промежуточного слоя, аналогичную поправке за влияние рельефа [39, 60, 64]. Тем самым мы избавимся от аномалий-помех, не представляющих интереса при изучении нефтеперспективных объектов, залегающих на больших глубинах.



Рис. 6.28. Карты статических поправок, полученных различными способами: а) по преломленным волнам (комплекс программ Millenium), б) по гравиметрическим данным (точками на картах показаны скважины с МСК)

Таким образом, опыт гравиметрического сопровождения сейсморазведочных работ 3D, интерпретация полученных результатов на основе новых технологий на ряде нефтяных месторождений в Удмуртской Республике и на территории Пермского края наглядно демонстрирует возможности высокоточной гравиразведки при построении детальной геологической модели месторождения и необходимость включения гравиразведки в поисково-разведочный комплекс с целью уточнения геологического строения изучаемых объектов и оптимизации этапа освоения нефтяных месторождений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не вызывает сомнений, что возросшие аппаратурные и программноалгоритмические возможности современной гравиразведки требуют новых подходов к обработке и интерпретации гравиметрических данных с целью повышения геологической эффективности гравиметрических исследований. В работе систематизирован и обобщен опыт проведения высокоточных гравиметрических съемок с использованием современной аппаратурной базы и представлена единая технологическая цепочка гравиметрических исследований, включающая в себя высокоточные измерения поля силы тяжести, эффективные способы вычисления необходимых редукций, современные способы интерпретации гравитационных аномалий, содержательный геологический анализ результатов.

Повышение точности полевых работ, безусловно, требует пересмотра методов камеральной обработки материалов. В частности, необходимо точное введение различных редукций в наблюденные аномалии силы тяжести. В настоящее время нет никаких причин для применения упрощенных формул при вычислении поправок и редукций в гравиметрические наблюдения.

Для вычисления одной из самых трудоемких операций при обработке гравиметрических данных – вычисления поправок за влияние рельефа, разработана технология, базирующаяся на прогрессивных методах подготовки первичной картографической информации и на современном математическом аппарате и позволяющая с априори заданной точностью вычислять поправки за влияние рельефа. В качестве исходной информации используются векторизованные крупномасштабные топографические карты и цифровые матрицы высот Земли, распространяемые через Internet - GTOPO30 и SRTM. При вычислении поправки используется аппроксимация дискретных значений высот двойным рядом Фурье и линейная аналитическая аппроксимация поправок. Имитационное моделирование позволяет получить эффективные оценки точности определения поправок. Использование данной технологии позволит существенно повысить точность вычисления данных поправок.

Показано, что учет влияния плотностных и структурных неоднородностей верхней части разреза следует рассматривать как поправку в аномалии Буге за переменную плотность промежуточного слоя, аналогичную поправке за влияние рельефа. Задача учета влияния неоднородностей верхней части разреза может быть в той или иной степени решена при наличии априорной информации. Использование плотности пород, полученных по геологическим и другим геофизическим данным, и корректировка их в процессе интерпретации позволяет успешно решать поставленную задачу.

В работе выполнен анализ возможностей принципиально нового метода интерпретации потенциальных полей – системы векторного сканирования. Показано, что совместное применение системы векторного сканирования, гравитационного моделирования и корреляционного анализа позволяет построить геологическую модель, адекватную априорной геологической информации и наблюденному полю. Эффективность технологии показана на примерах интерпретации гравиметрических данных в сложных геологических условиях.

Очевидно, что эффективность поисков и разведки месторождений нефти и газа может быть повышена только при использовании комплекса геофизических методов. Проведение гравиметрических работ с применением современных методов обработки и интерпретации, полученные результаты применения гравиметрических исследований на различных стадиях изучения нефтегазоперспективных объектов, изложенные в данной книге, по мнению автора, должно существенно повысить результативность гравиразведки в комплексе геологогеофизических методов.

#### Литература

1. 3-D гравитационное моделирование при изучении глубинного строения Карпатско-Паннонского региона / И.Макаренко, О.Легостаева, М.Биелик, В.Старостенко, Я.Дерерова, Я.Шефара // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. -М, ОИФЗ РАН, 2003. - С. 72-73.

2. Аведисян В.И. О перспективности сейсмо-гравиметрического комплексирования на примере анализа критериев региональной нефтегазоносности / В.И.Аведисян // Разведка и охрана недр, №4, 2004. – С. 37-43.

3. Александров Ю.М. Изучение ВЧР при картировании структур способом многократных перекрытий на территории Пермского Прикамья / Ю.М.Александров Р.Ф.Лукьянов, Л.К.Орлов // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа / Перм. ун-т. Пермь, 1987.- С.57-66.

4. Андреев Б.А. Геологическое истолкование гравитационных аномалий / Б.А.Андреев, И.Г.Клушин. - Л.: Гостоптехиздат, 1962.- 495 с.

5. Андреев Б.А. Курс гравитационной разведки / Б.А.Андреев, М.С.Закашанский, Н.Н.Самсонов, Э.Э.Фотиади // М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. - 432 с.

6. Антипин В.В. Способ учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях / В.В.Антипин, С.Г.Бычков, И.С.Путилов // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: материалы научн. сес. ГИ УрО РАН. Пермь, 2002.- С.56-58.

7. Антонов Ю.В. Разделение сложных аномалий силы тяжести / Ю.В.Антонов. – Воронеж. Воронежск. ун-т, 1985.- 240 с.

8. Аронов В.И. Обработка на ЭВМ значений аномалий силы тяжести при произвольном рельефе поверхности наблюдений / В.И.Аронов. - М.: Недра, 1976. - 131 с.

9. Архангельский А.Д. Геология и гравиметрия / А.Д.Архангельский. Труды НИИ геологии и минералогии. М.: ОНТИ НКТП СССР, 1933. - 112 с.

10. Бабаянц П.С. Возможности и ограничения алгоритмов интерпретации гравимагнитных данных в пакете программ СИГМА-3D / П.С.Бабаянц, Ю.И.Блох, А.А.Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 29-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ИГ УрО РАН: Екатеринбург, 2002. - С.302-306.

11.Бабаянц П.С. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки / П.С.Бабаянц, Ю.И.Блох, А.А.Трусов // Геофизика. 2003. № 4. - С. 37-40.

12.Бабаянц П.С. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» / П.С.Бабаянц, Ю.И.Блох, А.А.Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31 сес. Междунар. науч. семинара им.Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН. М, 2004. -С.11.

13.Балабушевич И.А. Высшие производные потенциала силы тяжести и возможности их использования в геологической гравиметрии / И.А.Балабушевич // АН УССР. Киев, 1963. - 267 с.

14.Балк П.И. К теории метода подбора в решении трехмерной обратной задачи гравиметрии / П.И.Балк // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 9. -С. 65-77.

15.Баньковский М.В. Изучение глубинного строения и перспектив нефтегазоносности восточной части Преддобружинского прогиба и прилегающей акватории Черного моря по данным метода квазиэкстремумов квадратичного функционала / М.В.Баньковский, Б.М.Полухтович, А.М.Гейхман // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч.

семинара им. Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН. М., 2003. -С. 17-18.

16.Белоконь Т.В. Строение и нефтегазоносность рифейско-вендских отложений востока Русской платформы / Белоконь Т.В., Горбачев В.И., Балашова М.М. – Пермь, ИПК «Звезда», 2001. – 108 с.

17.Березкин В.М. Метод полного нормированного градиента при геофизической разведке / В.М.Березкин. - М., Недра, 1988. - 188 с.

18.Березкин В.М. Применение гравиразведки для поисков месторождений нефти и газа / В.М.Березкин. - М.: Недра, 1973. - 164 с.

19. Березкин В.М. Учет влияния рельефа и промежуточного слоя при детальной гравиразведке / В.М.Березкин. - М.: Недра, 1967. - 117 с.

20.Благиных В.Л. Об учете влияния ЗМС при гравиразведочных исследованиях на сейсмических структурах / В.Л.Благиных // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, №11 / Перм. ун-т. Пермь, 1974. -С. 109-112.

21. Блох Ю.И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий / Ю.И.Блох. - М.: МГГА, 1998. - 88 с.

22. Блох Ю.И. Обнаружение и разделение гравитационных и магнитных аномалий / Ю.И.Блох. - М.: МГГА, 1995. - 80 с.

23. Блох Ю.И. Проблема адекватности интерпретационных моделей в гравиразведке и магниторазведке / Ю.И.Блох // Геофизический вестник. 2004. № 6. - С. 10-15.

24.Болдырева В.А. Выявление разуплотнений геологического разреза по гравиметрическим данным / В.А.Болдырева, А.А.Чернов // Геофизика, №6, 2002. - С.48-57.

25.Боровский М.Я. Влияние неоднородности в верхней части разрезов Татарии на геофизические поля / М.Я.Боровский // Разведочная геофизика. Вып. 108. - М.: Недра, 1988. - С. 63-66.

26.Боронин В.П. Геофизическое изучение кристаллического фундамента Татарии / В.П.Боронин, В.П.Степанов, Б.Л.Гольдштейн. – Казань, Казанский ун-т., 1982. – 200 с.

27.Булага В.Х. Интерпретация гравитационных аномалий Припятской впадины методом геологического редуцирования / В.Х.Булага, В.А.Ксенофонтов // Разведочная геофизика. Вып. 100. М.: Недра, 1985. - С. 85-89.

28. Булах Е.Г. К методике интерпретации гравитационных аномалий / Е.Г.Булах, С.П.Левашов // Прикладные алгоритмы решения обратных задач геофизики. М., Сов.радио, 1979. - С.34-38.

29. Булах Е.Г. Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий / Е.Г.Булах, М.Н.Маркова, П.Д.Бойко // Киев: Наукова думка, 1984. -112с.

30.Булах Е.Г. Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравиразведки / Е.Г.Булах, В.А.Ржаницын, М.Н.Маркова // Киев, Наукова думка, 1976. -220 с.

31.Булычев А.А. Построение модели тектоносферы разломной зоны Романш (Экваториальная Атлантика) по гравиметрическим данным / А.А.Булычев, Д.А.Гилод, К.В.Кривошея, А.А.Шрейдер // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН. Пермь, 2005. - С. 28-31.

32. Бурьянов В.Б. Трехмерное моделирование при изучении гравитационного эффекта осадочной толщи и плотностных неоднородностей фундамента Припятского прогиба / В.Б.Бурьянов, И.Б.Макаренко, В.И.Старостенко, О.В.Легостаева // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Международного науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН. М., 2000. - С. 35-37.

33. Быков М.А. О способе учета влияния рельефа местности и промежуточного слоя на результаты гравиметрических измерений / М.А.Быков // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.

1978. №1. - C. 116-119.

34.Быков М.А. Усовершенствование методики гравиметрических работ на нефть и газ для условий Саратовского Поволжья: автореф. дис. ... канд.техн.наук / Быков Максим Абрамович. – М.: ВНИИГеофизика, 1982. - 18 с.

35.Бычков С.Г. Геофизическая изученность / С.Г.Бычков, В.М.Неганов, Л.Д.Нояксова // Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края. Энциклопедия. - Пермь, 2006. - С.41-49.

36.Бычков С.Г. Гравиметрические исследования нефтеперспективных объектов Камско-Кинельской системы прогибов / С.Г.Бычков, Г.В.Простолупов, Г.П.Щербинина // Нефть. Газ. Новации. №4, 2009. - С.6-11.

37.Бычков С.Г. Изучение глубинного строения территории Удмуртской республики по сейсмо-, грави-, магниторазведочным данным / С.Г.Бычков, В.Ф.Фурман // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН. Москва, 2004. - С.15-16.

38. Бычков С.Г. Интерпретация аномалий силы тяжести методом редуцирования с использованием системы VECTOR / С.Г. Бычков, В.Л. Воеводкин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН. Пермь, 2005. - С.34-38.

39. Бычков С.Г. Исключение влияния неоднородностей верхней части разреза по сейсмическим и гравиметрическим данным / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // «ГЕОМОДЕЛЬ-2008»: материалы Х международной научно-практической конференции [Электронный ресурс]. Геленджик, 2008. Бычков.pdf. – 4 с.

40. Бычков С.Г. К вопросу о вычислении аномалий силы тяжести в редукции Буге / Бычков С.Г. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского / ИГ УрО РАН. Екатеринбург, 2006. - С. 73-77.

41. Бычков С.Г. Комплексирование сейсмических и гравиметрических данных для учета влияния верхней части разреза / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. научн.-практ. конф. – Пермь, Перм.ун-т, 2009. - С.173-176.

42. Бычков С.Г. О выборе модельных тел при интерпретации гравитационных аномалий методом подбора / С.Г.Бычков // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа: межвуз. сб. науч. трудов / Перм. ун-т: Пермь, 1979. - С.117-122.

43.Бычков С.Г. О комплексной интерпретации геофизических данных в условиях передовых складок Урала / С.Г.Бычков, Б.А.Заварзин, Л.К.Орлов // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа: межвуз. сб. науч. трудов /Перм. ун-т. Пермь, 1991. - С.51-56.

44. Бычков С.Г. Об учете влияния верхней части разреза при подготовке гравитационных аномалий для геологической интерпретации / С.Г.Бычков // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа / Перм.ун-т: Пермь, 1994. - С.55-60.

45.Бычков С.Г. Определение глубины аномалиеобразующих источников в системе «ВЕКТОР» / С.Г.Бычков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. школы-семинара им. Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН. Апатиты, 2002. - С.17-18.

46.Бычков С.Г. Определение поправок за влияние верхней части разреза при гравиметрических исследованиях на нефть и газ / С.Г.Бычков // Геофизика. 2007. №1. -С.56-58 47.Бычков С.Г. Основные направления совершенствования теории и практики гравиметрических исследований в Пермском Прикамье / С.Г.Бычков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского / ГИ УрО РАН. Пермь, 2005. - С.3483Бычков С.Г. Особенности обработки результатов современной гравиметрической
съемки / С.Г.Бычков // Геофизический вестник, 2005. №12. - С. 9-13.

49. Бычков С.Г. Повышение точности и эффективности гравиметрических работ с использованием современного гравиметрического и геодезического оборудования / С.Г.Бычков, А.А.Симанов // ГЕО-Сибирь-2005. Т.2. Геология, геофизика, геодинамика и геомеханика: материалы науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2005» / СГГА. Новосибирск, 2005. - С. 14-18.

50. Бычков С.Г. Подавление влияния приповерхностных неоднородностей с помощью сейсмогравитационного моделирования / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 36-й сессии Междунар. семинара. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – С. 77-80.

51.Бычков С.Г. Построение геолого-геофизической модели передовых складок Урала на территории Пермского края / С.Г.Бычков, И.В.Геник // Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов: материалы Междунар. конференции (г. Казань; 13 – 16 ноября, 2007 г.) Том 1:– Казанск. гос. ун–т. Казань, 2007. - С.90-97.

52. Бычков С.Г. Построение контактной поверхности с использованием конхоиды Слюза / С.Г. Бычков / Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, №12. Перм. ун-т: Пермь, 1974. - С.127-130.

53. Бычков С.Г. Построение согласованной сейсмогравиметрической модели на основе минимизации соотношения между скоростью и плотностью пород / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 28-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского/ ОИФЗ РАН. М., 2001. - С. 22-24.

54. Бычков С.Г. Применение адаптированных аномалий силы тяжести при интерпретации их в условиях нефтегазоносных территорий (на примерах Удмуртской АССР и Тюменской области): автореф. дис. ... уч.ст. канд. геол.-мин. наук: 04.00.12 / Бычков Сергей Габриэльевич. - Пермск. политех. ин-т: Пермь, 1982. - 20 с.

55.Бычков С.Г. Программные принципы региональных геофизических работ, реализуемые на северо-востоке Урало-Поволжья / С.Г.Бычков, В.М.Неганов, В.М.Новоселицкий // Приоритетные направления геологоразведочных работ на территории Приволжского и Южного Федеральных округов в 2004-2010 гг: материалы науч.-практ. регион. конференции / Саратовское отд. ЕАГО. Саратов, 2003. С.89-90

56.Бычков С.Г. Связь глубины залегания источников поля и параметров векторного сканирования \ С.Г.Бычков, В.М.Новоселицкий // Перспективы развития геофизических методов в XXI веке: материалы Междунар.науч.-практ. конф. / Пермь, 2004. - с.28-33.

57.Бычков С.Г. Современная гравиразведка при исследованиях нефтегазоперспективных объектов / С.Г. Бычков // Новые идеи в науках о Земле: Материалы IX Междунар. конференции. –М.: РГГРУ, 2009. - С. 5.

58.Бычков С.Г. Современные технологии интерпретации гравиметрических данных при исследованиях на нефть и газ: [Электронный ресурс] / С.Г. Бычков // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. Режим доступа к журн.: http://www.ogbus.ru/authors/Bychkov/Bychkov 1.pdf. - 22 с.

59. Бычков С.Г. Сравнительные возможности интерпретации гравиметрических материалов в системе «VECTOR» / С.Г.Бычков // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. Пермь, 2002. - С.107-110.

60.Бычков С.Г. Технология определения статических поправок по гравиметрическим данным / С.Г. Бычков // Геофизика №3, 2009. - С.65-68.

61.Бычков С.Г. Технология построения плотностной модели промежуточного слоя при высокоточных гравиметрических наблюдениях / С.Г.Бычков // Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: материалы Междунар. конф. «Четвертые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича» (2-6 июня 2007 г.) / Институт геофизики УрО РАН: Екатеринбург, 2007. - С.66-68.

62. Бычков С.Г. Уточнение глубинного строения Пермского края по результатам интерпретации геопотенциальных полей / С.Г.Бычков, А.С.Долгаль, А.В.Мичурин // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Пятые научные чтения Ю.П.Булашевича. – Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2009. - С.163-Бычков С.Г. Учет влияния верхней части разреза по сейсмическим и гравиметрическим данным / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 35-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского / УГТУ. Ухта, 2008. -С.38-40.

64.Бычков С.Г. Учет влияния неоднородностей верхней части разреза по сейсмическим и гравиметрическим данным / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Известия вузов. Нефть и газ, №5, 2009. - С. 22-27.

65. Бычков С.Г. Учет влияния неоднородностей верхней части разреза при высокоточных гравиметрических работах / С.Г.Бычков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 34-й сес. Междунар. науч. семинара / ИФЗ РАН. М., 2007. -С. 48-50.

66.Бычков С.Г. Учет неоднородностей верхней части разреза по сейсмическим и гравиметрическим данным / С.Г.Бычков, И.Ю.Митюнина // Новые идеи в науках о Земле: Материалы IX Междунар. конференции. –М.: РГГРУ, 2009. - С. 6.

67.Бычков С.Г. Эволюция программно-алгоритмического обеспечения обработки и интерпретации гравиметрических материалов / С.Г.Бычков, А.А.Симанов // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН, 2007, №2. Пермь. -С. 38-42

68.Варламов А.С. Определение плотности горных пород и геологических объектов / А.С.Варламов, В.Г.Филатов. - М., Недра, 1983. - 216 с.

69. Васильева Е.Г. Создание АРМ обработки и комплексного анализа данных морских геофизических съемок на базе ГИС-технологий: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Васильева Елена Григорьевна. – М.: РГГРУ, 2006. - 32 с.

70. Вахромеев Г.С. Моделирование в разведочной геофизике / Г.С.Вахромеев, А.Ю.Давыденко. - М.: Недра, 1987. 192 с.

71. Вахромеев Г.С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений / Г.С.Вахромеев. - М.: Недра, 1973. 152 с.

72. Вельтистова О.М. Результаты сейсмогравитационного моделирования складчато-надвиговых зон Приуралья / О.М.Вельтистова // Геофизика и математика: материалы II Всеросс. конференции / ГИ УрО РАН. Пермь, 2001. – С. 320-324.

73.Веселкова Н.В. Анализ погрешностей различных методов интерполяции на основе статистического моделирования / Н.В.Веселкова // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. Горного института УрО РАН. Пермь, 2005. - С.84-85.

74.Веселов В.К. Гравиметрическая разведка / В.К.Веселов, М.У.Сагитов. - М.: Недра, 1968. 512 с.

75.Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка / К.Е.Веселов. - М: Недра, 1986. - 312 с.

76.Воеводкин В.Л. Рациональный комплекс геолого-геофизических исследований месторождений нефти и газа Соликамской депрессии: автореф. ... канд геол.-мин. наук / Воеводкин Вадим Леонидович. - Пермь ГИ УрО РАН. 2006. – 27 с.

77. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика / Под ред. В.И. Дмитриева. - М.: Недра, 1990. - 498 с.

78. Галуев В.И. Технология построения физико-геологических моделей земной коры по региональным профилям / В.И.Галуев // Геоинформатика, №1, 2008. – С. 1-12.

79. Гаченко С.В. Оптимизация статических поправок при проведении сейсмических исследований / С.В.Гаченко, Н.К.Иванов, М.М.Мандельбаум // Технологии сейсморазведки, 2006, №3. – С. 47-50.

80. Геник И.В. Построение каркасной геолого-геофизической модели строения Юрюзано-Сылвенской депрессии / И.В.Геник, М.С.Зотеев / Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. 2004. № 4 (18). - С. 24-28.

81. Геник И.В. Применение гравитационного моделирования для построения каркасной геолого-геофизической модели строения Юрюзано-Сылвенской депрессии / И.В.Геник, М.С.Зотеев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН. Пермь, 2005. - С. 50-54.

82. Гершанок В.А. Районирование гравитационных аномалий на территории Пермского Прикамья по глубине источников / В.А.Гершанок, М.С.Чадаев // Вестн. Пермского ун-та. Геология. Пермь, 1997. - Вып. 4. - С. 193-198.

83. Гладкий К.В. Гравиразведка и магниторазведка / К.В.Гладкий. - М.: Недра, 1967. 319 с.

84. Гладкий К.В. Разделение суммарных гравитационных полей как процесс частотной фильтрации / К.В.Гладкий // Прикладная геофизика, вып.25. М.: Гостоптехиздат, 1960. - С.114-129.

85. Глазнев В.Н. Комплексная магнитная модель литосферы Фенноскандии / В.Н.Глазнев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН. М., 2000. - С. 58-61.

86. Глебов С.В. Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореферат дисс. ... канд. техн. наук: специальность 25.00.16: защищена 27.06.2006 г. / Глебов Сергей Валерьевич. – Пермь, 2006. – 23 с.

87. Голиздра Г.Я. Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры / Г.Я.Голиздра. - М.: Недра, 1988. 212 с.

88. Голиздра Г.Я. Основные методы решения прямой задачи гравиразведки на ЭВМ / Г.Я. Голиздра // Обзор. Региональная, разведочная и промысловая геофизика. М.: ВИЭМС, 1977. - 98 с.

89. Гольдшмидт В.И. Региональные геофизические исследования и методика их количественного анализа / Гольдшмидт В.И. - М.: Недра, 1979. - 219 с.

90.Гольцман Ф.М. Компьютерная технология MultAlt альтернативной классификации и прогноза по комплексу геоданных / Ф.М.Гольцман, Д.Ф.Калинин, Т.Б.Калинина // Российский геофизический журнал, № 17-18, 2000. - С.64-70.

91.Гордин В.М. Библиографическая база данных «Гравиметрия и магнитометрия»: история создания, состояние дел и перспективы / В.М.Гордин, С.А.Тихоцкий // Вопросы теории и практкики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им.Д.Г.Успенского / ОИФЗ РАН: М., 2004. - С. 20-21.

92. Гордин В.М. Проблема адекватности интерпретационных моделей в магнитометрии и гравиметрии / В.М.Гордин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / М.: ОИФЗ РАН, 2003. - С. 32-34.

93. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях / Гордин В.М. // Обзор. Региональная, разведочная и промысловая геофизика. М.: ВИЭМС, 1974. - 90с.

94. Горожанцев А.В. К вопросу о вычислении плотностей горных пород в слоистых средах / А.В.Горожанцев// Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа / Перм. ун-т: Пермь, 1994. - С. 61-64.

95. Горожанцев С.В. Совершенствование способов учета влияния рельефа и верхней части разреза (ВЧР) при детальной гравиразведке: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.12 / Горожанцев Сергей Владимирович. - Пермь: ППИ, 1986. - 19 с.

96. ГОСТ Р 52334-2005. Гравиразведка. Термины и определения. - М., Стандартинформ,

2005. – 22 c.

97. Гравиметрическое сопровождение сейсморазведки 2D и 3D с целью обнаружения, локализации и описания нефтегазоносных объектов / В.М.Новоселицкий, М.С.Чадаев,

С.Г.Бычков, Г.П.Щербинина, Г.В.Простолупов // Проблемы и перспективы геологического изучения и освоения мелких нефтяных месторождений: материалы рег. научн.-техн. конф. - Ижевск, 2002. - С.103-104.

98. Гравиразведка: Справочник геофизика. / Под ред. Е.А. Мудрецовой, К.Е. Веселова. - М.: Недра, 1990. - 607 с.

99. Грушинский Н.П. Введение в гравиметрию и гравиметрическую разведку / Грушинский Н.П. - М.: МГУ, 1961. - 206 с.

100. Грушинский Н.П. Гравитационная разведка / Н.П.Грушинский, Н.Б. Сажина // М.: Недра, 1981. - 391 с.

101. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии / Н.П. Грушинский // М.: Наука, 1983. - 352 с.

102. Деев К.В. Многоуровневая двумерная интерполяция при обработке геологогеофизической информации / К.В. Деев // Геоинформатика, 2003, №3. М.: ВНИИ геосистем. -С.55-59.

103. ДеМерс М.Н. Географические информационные системы. Основы. / М.Н.ДеМерс; пер. с англ. – М.: Дата+, 1999. – 489 с.

104. Денисюк Р.П. Некоторые аспекты построения петроплотностных моделей для юговостока Украинского щита / Р.П. Денисюк, П.И.Пигулевский // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН: М., 2004. - С. 23-24.

105. Дергачев Н.И. Об учете влияния рельефа местности при обработке и интерпретации детальных гравиметрических наблюдений: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / Дергачев Николай Иванович. – Пермь: ПГУ, 1963. 16 с.

106. Дергачев Н.И. Установление связи между плотностью и скоростью для пород на территории севера Волго-Уральской провинции / Н.И. Дергачев, А.А. Шилова // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – Перм. ун-т: Пермь, 1984. - С.109-111.

107. Довбнич М.М. Опыт построения 3D плотностных моделей на основе частотной селекции гравитационного поля / М.М.Довбнич // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31 сес. Междунар.науч. семинара им.Д.Г.Успенского/ ОИФЗ РАН: М., 2004. - С.24-25.

108.Долгаль А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач / А.С. Долгаль // Геофизический журнал, 1999. Т.21, №4. - С. 71-80.

109.Долгаль А.С. Компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа местности при гравиметрических наблюдениях / А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин [Электронный ресурс] // Геофизика XXI века – прорыв в будущее: материалы Междунар. геофизической конф. М., 2003. 171.pdf. - 4 с.

110.Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности / А.С. Долгаль. - Абакан: ООО «Фирма-МАРТ», 2002. 188 с.

111.Долгаль А.С. Моделирование погрешностей учета влияния рельефа при гравиметрической съемке / А.С. Долгаль // Известия РАН. Сер. Физика Земли. 1997. № 8. - С. 88-93.2.Долгаль А.С. Определение поправок за влияние удаленных областей рельефа местности при гравиметрических наблюдениях / А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Вестн. Пермского ун-та. 2004. Вып. 3. Геология. - С. 95-101.

113.Долгаль А.С. Определение топографических поправок при гравиметрических наблюдениях на основе аналитических аппроксимаций рельефа / А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Геоинформатика, 2003, №1. – НАНУ: Киев. - С. 33-42

114.Долгаль А.С. Основные особенности современной компьютерной технологии определения топопоправок при гравиметрической съемке / А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН: М., 2003. - С.38-40.

115.Долгаль А.С. Повышение точности определения поправок за влияние рельефа при гравиметрической съемке / А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Геофизика, 2003, №6. - С.44-50

116.Долгаль А.С. Учет влияния рельефа местности в гравиметрии – новые подходы и их реализация/ А.С.Долгаль, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН: М., 2004. - С.25-26.

117.Долгих Ю.Н. Недостатки упрощенных подходов к учету ВЧР в условиях Западной Сибири / Ю.Н.Долгих // Технологии сейсморазведки, 2006, №3. - С 35-42.

118.Егорова Т.П. Гравитационное моделирование земной коры региона UEROBRIDGE-97 (Беларусь и Украина) / Т.П.Егорова, В.И.Старостенко, В.Г.Козленко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 28-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН: М., 2001. -С. 38-39.

119.Закатов П.С. Курс высшей геодезии / П.С.Закатов. - М.: Геодезиздат, 1953. 405 с.

120.Инструкция по гравиразведке. - М., Недра, 1980. - 79 с.

121.Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. М., ЦНИИГАиК 2002. -124 с.

122.Интерпретация гравитационного поля Тимано-Печорского и Баренцевоморского бассейнов на основе технологии объемного структурно-плотностного моделирования / А.В.Мужикова, Е.Н.Мотрюк, А.И.Дьяконов, С.В.Моисеенкова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М. ИФЗ РАН, 2004. - с. 49.

123. Интерпретация данных высокоточной гравиразведки на неструктурных месторождениях нефти и газа / Е.А.Мудрецова, А.С.Варламов, В.Г.Филатов, Г.М.Комарова. – М.: Недра, 1979. – 196 с.

124.Информационная технология содержательной интерпретации геопотенциальных полей / С.Г.Бычков, В.М.Новоселицкий, Г.В.Простолупов, Г.П.Щербинина // Геоинформатика, 2004, №1. НАНУ, Киев. - С. 33-42

125.Казаис В.И. Сейсмогравимагнитное моделирование, как основной метод решения региональной структурной задачи на северо-западе Сибирской платформы / В.И.Казаис // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН: Пермь, 2005. - С. 95-101.

126.Калабин С.Н. Структурно-формационные предпосылки поисков месторождений нефти и газа в Юрюзано-Сылвенской депрессии: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин.наук / Калабин Сергей Никитич. - Пермь, ППИ, 1994. - 23 с.

127. Каленицкий А.И. Методические рекомендации по учету влияния рельефа местности в гравиразведке / А.И.Каленицкий, В.П.Смирнов. – Новосибирск, СНИИГиМС, 1981. – 174 с.

128.Каратаев Г.И. Динамика гравитационного поля в процессе герцинской эволюции Припятского палерифта / Г.И.Каратаев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / М., ОИФЗ РАН, 2000. - С. 88-92.

129.Каратаев Г.И. Построение плотностных, магнитных и скоростных моделей земной

коры, согласованных по комплексу геофизических полей / Г.И.Каратаев, Е.Г.Козловская // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 25-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Воронеж, ВГУ, 1998. - С. 231-244.

130.Кассин Г.Г. О связи разломов кристаллического фундамента Пермского Прикамья со структурами осадочного покрова / Г.Г.Кассин // Вопросы разведочной геофизики. 1968, вып. 54. Тр. Свердловского горного ин-та, Свердловск. - С. 65-76

131.Килейко Е.С. Геолого-геофизические модели локальных структур Пермского Приуралья / Е.С.Килейко // Латеральная изменчивость состава и физических свойств осадочной толщи в пределах локальных структур и ее отражение в зональности геофизических полей. Пермь, КО ВНИГНИ, 1974. - С.171-181.

132.Клейнер М.В. Об интерполировании вычисленных на ЭВМ поправок за влияние рельефа / М.В.Клейнер, С.Г.Бычков, Г.Л.Микрюков // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, 1974, №11. Перм. ун-т. Пермь - С.157-158.

133.Кобрунов А.И. Геодинамические принципы постановки обратных задач гравиметрии / А.И.Кобрунов // Геофизика, 2005, №3. - С.33-45.

134.Кобрунов А.И. О некоторых проблемных вопросах в теории интерпретации гравиметрических данных / А.И.Кобрунов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 121-122.

135.Кобрунов А.И. О содержательных и эффективных интерпретационных моделях в гравиразведке / А.И.Кобрунов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2006. - С. 136-141.

136.Кобрунов А.И. Параметризация в математических моделях геологических сред и решение обратных задач / А.И.Кобрунов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.семинара. Т.2. М.: ОИФЗ РАН, 2001. - С. 125-149.

137.Кобрунов А.И. Принципы прикладной геодинамики в комплексной интерпретации геолого-геофизических данных / А.И.Кобрунов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 29-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / М., ОИФЗ РАН, 2002. - С. 40-41.

138.Кобрунов А.И. Эволюционно-динамические принципы при реконструкции структурных плотностных моделей седиментационных бассейнов / А.И.Кобрунов, А.П.Петровский, С.А.Кобрунов // Геофизический журнал, 2005, №3, Т.37. Киев, ИГ НАНУ. - С.381-386.

139.Козленко В.Г. Глубинное строение Донбасса по данным сейсмогравитационного моделирования / В.Г.Козленко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / М., ОИФЗ РАН, 2000. - С. 92-94.

140.Койфман Л.И. Объемное моделирование при решении задач разведочной геофизики. Л.И.Койфман, К.А.Кореневич //Геологическое истолкование потенциальных полей. - Киев: Наукова думка, 1983. - С. 121-130.

141.Кокшаров Д.Е. Алгоритмы и новые компьютерные технологшии решения структурных обратных задач гравиметрии и магнитометрии: автореф. дис. ... канд.физ.-мат. наук / Кокшаров Дмитрий Евгеньевич. – Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2005. - 34 с.

142.Комплексирование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика / Под ред. В.В.Бродового, А.А.Никитина. - М.: Недра, 1984. - 384 с.

143.Комплексный подход к решению региональных проблем освоения георесурсов (на примере Пермского края) / А.Е.Красноштейн, А.А.Барях, Б.А.Бачурин, В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков // Устойчивое развитие: природа–общество–человек: Материалы Международной конференции. Т.П. - М.: ЗАО "Инновационный экологический фонд", 2006. с. 41-42. (.

144.Компьютерная технология определения поправок за влияние рельефа земной поверхности при гравиметрической съемке / А.С.Долгаль, В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков, В.В.Антипин // Геофизический вестник, 2004, №5. - С.10-19.

145.Костицын В.И. Геофизическая кибернетика / В.И.Костицын, А.И.Колосов. - Пермь, Пермск. ун-т, 1989. 96 с.

146.Костицын В.И. Методы и задачи детальной гравиразведки / В.И.Костицын. - Иркутск, Иркут. ун-т, 1989. 128 с.

147.Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки / В.И.Костицын. - Пермь, Перм. ун-т, 2002. 224 с.

148.Кочнев В.А. Возможности гравиметрии и магнитометрии при интерпретации сейсмических данных // В.А.Кочнев, И.В.Гоз // Геофизика, 2008, №4. – С.28-32.

149.Кочнев В.А. Модель среды – основа для интерпретации и решения прямых и обратных задач / В.А.Кочнев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2006. - С. 154-157.

150.Красовский С.С. Гравитационное моделирование – задачи, проблемы, геологический результат / С.С.Красовский, П.Я.Куприенко, А.С.Красовский // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.-семинара. Т.2. М.: ОИФЗ РАН, 2001. - С. 166-197.

151.Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия / С.С.Красовский. - Киев, Наукова думка, 1989. 248 с.

152.Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур: успехи, ошибки, проблемы / С.С.Красовский, А.С.Красовский // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / М, ОИФЗ РАН, 2003. - С. 57-59.

153.Красовский С.С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле / С.С.Красовский. - Киев, Наукова думка, 1981. 264 с.

154.Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И.Кудряшов // Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. - 429 с.

155.Кузнецов В.И. Элементы объемной (3D) сейсморазведки / В.И.Кузнецов. – Тюмень, изд-во «Тюмень». 2002. – 272 с.

156.Кузнецов О.Л. Геоинформационные системы / О.Л.Кузнецов, А.А.Никитин, Е.Н.Черемисина. - М.: ВНИИГеосистем, 2005. 346 с.

157.Курс гравитационной разведки / С.К.Гирин, А.А.Попов, М.А.Садовский, Д.Г.Успенский. -М.: ОНТИ НКТП СССР, 1935. 368 с.

158. Ласкин В.М. Выделение и учет плотностных неоднородностей верхней части разреза в гравиразведке / В.М.Ласкин // Разведочная геофизика. Экспресс информация ВМЭМС, 1986, вып.3. - С.29-37.

159. Ласкин В.М. Применение морфометрического метода для учета влияния ЗМС при гравиметрической съемке высокой точности / В.М. Ласкин // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. - ПГУ, Пермь, 1984. - С.122-125.

160.Лебедев А.Н. Корреляционное зондирование геополей / А.Н.Лебедев, А.В.Петров // Известия вузов, 2001, №3. – С 18-24.

161.Лебедев А.Н., Петров А.В. Статистическое зондирование геополей в скользящих окнах А.Н.Лебедев, А.В.Петров // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.-семинара. Т.2. М.: ОИФЗ РАН, 2001. - С. 208-213.

162.Левин Г.С. О влиянии выбора системы высот на результаты высокоточных гравиметрических съемок / Г.С.Левин, С.А.Тихоцкий // Геофизика, 2003, №5. - С. 55-59.

163.Липилин А.В. Проблемы комплексной интерпретации геофизических данных по региональным профилям и пути их решения / А.В.Липилин, А.А.Никитин, Е.Н.Черемисина //

Геофизика 2002, №4. - С. 3-6.

164.Ломтадзе В.В. Геоинформационный анализ: дискуссионные вопросы / В.В.Ломтадзе // Geosciences – To Discover and Develop: International Conference & Exhibition EAGE, EAGO and SEG. Saint Petersburg, 16-19 October 2006. [Электронный ресурс] В047. - 5 с.

165. Ломтадзе В.В. Методология и технология комплексного анализа геологогеофизической информации на разных уровнях ее обобщения / В.В. Ломтадзе // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы Междунар. шк.-семинара. Т.2. М.: ОИФЗ РАН, 2001. - С. 214-219.

166. Ломтадзе В.В. Программное и информационное обеспечение геофизических исследований / В.В.Ломтадзе. - М.: Недра, 1993. 268 с.

167. Лосева Н.А. Способы аппроксимации рельефа земной поверхности / Н.А. Лосева // Математические методы исследований в геологии. - Обзор ВИЭМС. 1973. 28с.

168.Лукавченко П.И. Возможности и перспективы скважинной гравиметрии / П.И.Лукавченко // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, №7. - Пермь, Пермск.ун-т, 1967. - С.60-67.

169. Лукавченко П.И. Гравиметрическая разведка на нефть и газ / П.И. Лукавченко. - М.: Гостоптехиздат, 1956. 336 с.

170.Любимов Г.А. Методика гравимагнитных исследований с использованием ЭВМ / Г.А.Любимов, А.А.Любимов. - М.: Недра, 1988. 303 с.

171.Мавричев В.Г. Отражение неоднородности промежуточных комплексов платформ в материалах грави-магнитометрических съемок / В.Г.Мавричев, Ю.Н.Гололобов, А.И.Атаков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского / Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 167-169.

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

173.Маловичко А.К. Гравиразведка / А.К.Маловичко, В.И.Костицын // М.: Недра, 1992. - 357 с.

174. Маловичко А.К. Детальная гравиразведка на нефть и газ / А.К.Маловичко, В.И.Костицын, О.Л.Тарунина. - М.: Недра, 1989. 224 с.

175. Маловичко А.К. Детальные гравиметрические наблюдения при разведочных работах на нефть и газ / А.К.Маловичко, Н.И.Дергачев, М.С.Чадаев. - Пермь, Перм. ун-т, 1967. 131 с.

176.Маловичко А.К. Исключение из аномалий силы тяжести влияния верхней части разреза / А.К.Маловичко, С.Г.Бычков // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа. Перм. ун-т. Пермь, 1980. - С.21-26.

177. Маловичко А.К. Методы аналитического продолжения аномалий силы тяжести и их приложения к задачам гравиразведки / А.К.Маловичко. - М., Гостоптехиздат, 1956. – 160 с.

178. Маловичко А.К. О зависимости латеральных неоднородностей верхней терригенной толщи от характера рельефа местности / А.К.Маловичко // Прикладная геофизика, 1975, вып.77. М.: Недра. - С.167-170.

179. Маловичко А.К. О точности геологической интерпретации гравитационных аномалий / А.К. Маловичко // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – Пермь, Перм. ун-т, 1989. - С.4-8.

180.Маловичко А.К. Основной курс гравиразведки. Ч.1 / А.К.Маловичко. - Пермь, Перм. ун-т, 1966. 326 с.

181.Маловичко А.К. Подготовка структур, перспективных на нефть и газ, к глубокому бурению / А.К.Маловичко, С.Г.Бычков, Л.К.Орлов // Геология нефти и газа, 1991, №9. - С.20-22.

182.Мартышко П.С. О некоторых алгоритмах и новых компьютерных технологиях решения структурных обратных задач гравиметрии / П.С.Мартышко, Д.Е.Кокшаров // Геодинами-

ка. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Четвертые научные чтения Ю. П. Булашевича: материалы Междунар. конференции. - Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2007. - С. 75 – 78.

183.Мартышко П.С. О разделении источников гравитационного поля по глубине/ П.С.Мартышко, В.М.Новоселицкий, И.Л.Пруткин // [Электронный ресурс] Электронный научно-информационный журнал "Вестник отделения наук о Земле РАН" № 1(20)'2002. Режим доступа: www.scgis.ru/russian/cp1251/h\_dgggms/1-2002/scpub-7.htm#begin. – 7c.

184.Математические и геологические проблемы в системе «VECTOR» / В.М.Новоселицкий, П.С.Мартышко, С.Г.Бычков, Г.П.Щербинина, Г.В.Простолупов // Геофизика и математика: материалы II Всеросс. конф. - Пермь, 2001. - С. 240-247.

185.Математические модели интегральной интерпретации комплекса геологогеофизических данных / А.П.Петровский, А.И.Кобрунов, В.Н.Суятинов, С.А.Кобрунов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. -Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 226-228.

186.Матусевич А.В. Гравиметрическое изображение солянокупольного структурного этажа Прикаспийской впадины / А.В.Матусевич // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2006. - С. 208-211.

187.Матусевич А.В. Объемное моделирование геологических объектов на ЭВМ / А.В. Матусевичю - М. Недра, 1988. 184 с.

188.Метод векторного сканирования / В.М.Новоселицкий, М.С.Чадаев, С.В.Погадаев, В.А.Кутин // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. - Пермь, Перм. уг-т, 1998. - С. 54-59.

189.Методика объективного сравнения методов интерполяции / В.В.Масюков, В.И.Шленкин, В.В.Федоров, А.В.Масюков // Геофизический вестник, 2005, №1. - С. 17-21.

190.Методические аспекты комплекса региональных сейсмо-, грави-, магниторазведочных исследований, проводимых в Пермском Прикамье / В.М.Новоселицкий, В.М.Неганов, С.Г.Бычков, И.В.Геник, М.С.Зотеев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 208-212.

191. Миронов В.С. Курс гравиразведки / В.С. Миронов. - Л.: Недра, 1972. 512 с.

192.Митюнина И.Ю. Первые волны на сейсмограммах МОВ и изучение верхней части разреза / И.Ю.Митюнина, Б.А.Спасский, А.П.Лаптев // Геофизика, 2003, №5. - С.5-12.

193.Митюнина И.Ю. Построение физико-геологической модели ВЧР на основе комплексного анализа сейсмических и гравиметрических данных / И.Ю.Митюнина, С.Г.Бычков / Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа. - Перм. ун-т, Пермь, 199\$94. Микайлов И.Н. Первый отечественный компьютеризированный наземный гравиметр (ГНУ-КВК) [Электронный ресурс] / И.Н.Михайлов, Ю.К.Рябиков. Режим доступа http://www.neftekip.ru/rus/st 1.php. - 3 с.

195.Мусебов Н.И. Методика глубинного гравиметрического зондирования и ее возможности в решении прогнозно-поисковых и экологических задач / Н.И.Мусебов, М.И.Целомудрова, Р.В.Голева // Геофизический вестник, 2004, №10. - С.9-12.

196.Мухаметшин А.М. Магниторазведка / А.М.Мухаметшин, В.Б.Виноградов. - Екатеринбург, УГГГА, 2003. 208 с.

197.Направления и результаты гравиметрических исследований на территории Прикамья / С.Г.Бычков, В.Л.Воеводкин, В.М.Новоселицкий, Г.В.Простолупов, Г.П.Щербинина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ОИФЗ РАН. М., 2004. -С.14-15.

198.Неганов В.М. Геологическое строение Пермского Прикамья по данным геологогеофизических исследований / В.М.Неганов, В.И.Родионовский, М.С.Зотеев // Геофизика, 2000, спец.вып. - С.11-22.

199.Неганов В.М. Строение Камско-Кинельской системы прогибов по результатам геофизики и бурения / В.М.Неганов, А.Н.Морошкин, С.А.Шихов // Геофизика, 2000, спец.вып. -С.36-38.

200. Немцов Л.Д. Высокоточная гравиразведка / Л.Д.Немцов. - М.: Недра, 1967. - 240 с.

201.Никитин А.А. Детерминированность и вероятность в обработке и интерпретации геофизических данных / А.А.Никитин // Геофизика, 2004, №3. - С.10-16.

202.Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации / А.А.Никитин. - М.: Недра, 1986. - 342 с.

203.Новоселицкий В.М. Векторная обработка гравиметрических наблюдений с целью обнаружения и локализации источников аномалий / В.М.Новоселицкий, Г.В.Простолупов // Геофизика и математика: материалы I Всеросс. конф. - М.: ИОФЗ РАН, 1999. - С.104-107.

204.Новоселицкий В.М. Гравиметрические исследования в комплексе методов на различных стадиях изучения нефтегазоперспективных объектов / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков // [Электронный ресурс] International Conference & Exhibition «Туител-2007», ЕАГО, SEG, and AAPG. Тюмень, 2007. L21. – 4 с.

205.Новоселицкий В.М. Гравитационная эквивалентность сложнопостроенной среды и горизонтального пласта / В.М.Новоселицкий //Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, 1971, №9. - Пермь, Перм. ун-т. - С. 19-24.

206.Новоселицкий В.М. Изучение строения осадочного чехла севера Урало-Поволжья неа основе гравитационного моделирования / В.М.Новоселицкий, М.Г.Губайдуллин, Л.И.Койфман // Геофизический журнал, 1979, №2. - С.99-104.

207.Новоселицкий В.М. Интерпретация гравитационных аномалий в условиях латерального изменения плотности осадочных толщ: дисс. ... докт. геол.-мин. наук / Новоселицкий Владимир Маркович. - Пермь, 1975. - 368 с.

208.Новоселицкий В.М. Использование гравиметрической градиентной съемки для локализации плотностных неоднородностей / В.М.Новоселицкий, А.С.Маргулис, М.С.Чадаев // Геофизические работы при региональных и геологосъемочных исследованиях на Урале. - Свердловск, 1989. - С 33-35.

209.Новоселицкий В.М. Новый алгоритмический базис технологии векторного сканирования геопотенциальных полей / В.М.Новоселицкий, А.С.Долгаль, С.Г.Бычков // Геофизические исследования Урала и сопредельных регионов: материалы Междунар. конф., посвященной 50-летию Института геофизики УрО РАН. - Екатеринбург, 2008. - С. 183-186.

210.Новоселицкий В.М. Основные направления современных гравиметрических исследований нефтегазоперспективных объектов / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 36-й сессии Междунар. семинара – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – С. 74-76.

211.Новоселицкий В.М. Применение скважиной гравиразведки в нефтяной геологии / В.М.Новоселицкий, М.С.Чадаев // Региональная, разведочная и промысловая геофизика: обзор ВИЭМС, 1981. - 50 с.

212.Новоселицкий В.М. Принцип сканирования в векторной обработке геологогеофизических полей / В.М.Новоселицкий, М.С.Чадаев, С.В.Погадаев // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: материалы Междунар. симпозиума SPM-95. - Пермь, 1995.- С. 113-114.

213.Новоселицкий В.М. Региональные геофизические работы и выделение локальных нефтегазоносных объектов на территории севера Волго-Уральской провинции / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков, И.В.Геник // Фундаментальные проблемы геологии и геохимии нефти и газа и развития нефтегазового комплекса России: Материалы Отчетной конференции по Программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН. – М.:, ИПНГ РАН, 2007. - С.304-313.

214.Новоселицкий В.М. Система «VECTOR» и результаты ее реализации / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков // Горное эхо: Вестник Горного института, №3-4, 2008. – С. 53-63.

215.Новоселицкий В.М. Физические свойства пород осадочного чехла севера Урало-Поволжья / В.М.Новоселицкий, В.М.Проворов, А.А.Шилова. - Свердловск, УНЦ АН СССР, 1985. – 134 с.

216.Новоселицкий В.М. Эволюция гравиразведки в Пермском Прикамье / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков // Геофизика, 2000, спец.вып. - С. 115-120.

217.Новоселицкий В.М., Гравиметрические исследования изменений плотностной характеристики геологической среды под воздействием горных работ / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков, Г.П.Щербинина, Г.В.Простолупов, С.И.Яковлев // Горный журнал. – 2008, №10. - С.37-41.

218.Новый информационный базис гравиметрии и магнитометрии / В.Н.Страхов, И.А.Керимов, И.Э.Степанова, А.В.Страхов, Л.В.Гричук // Геофизика и математика: материалы 2-й Всеросс. конф. - Пермь, Горный ин-т УрО РАН, 2001. - С. 274-277.

219.Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе "VECTOR" / Г.В.Простолупов, В.М.Новоселицкий, В.Н.Конешов, Г.П.Щербинина // Физика Земли. 2006. № 6. - С. 90-96.

220.Об учете влияния верхней терригенной толщи при обработке детальных гравиразведочных и сейсморазведочных наблюдений / А.К.Маловичко, [и др.] // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений, 1972, №10. Пермь, Перм.ун-т. - С.3-11. 221.Обнаружение и локализация источников аномалий геопотенциальных полей в системе «VECTOR» / В.М.Новоселицкий, Г.В.Простолупов, С.Г.Бычков, Г.П.Щербинина [Электронный ресурс] // Геофизика XXI века – прорыв в будущее: материалы Междунар. геофизической конф. М., 2003. 242.pdf. - 4 с.

222.Объемная гравимагнитная модель земной коры северного Урала / В.А.Пьянков, П.С.Мартышко, Н.И.Начапкин, Т.В.Полянина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М. ИФЗ РАН, 2004. - С. 61-62.

223.Объемное гравитационное моделирование градиентно-слоистых сред – новые возможности в изучении структуры и вещественного состава / С.С.Красовский, П.Я.Купренко, А.С.Красовский, Т.И.Пономарева, Г.В.Рябоконь // Геофизика и математика: материалы II Всеросс. конф. / Пермь, ГИ УрО РАН, 2001. – С. 180-189.

224.Овчаренко А.В. Создание 4D-моделей развития земной коры Урала по комплексу геополей / А.В.Овчаренко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М., ОИФЗ РАН, 2000. - С. 127-128.

225.Определение поправок за 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 // Вестник отделения наук о земле РАН. [Электронный ресурс] 2004 № 1(22). Режим доступа: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h dgggms/1-2004/screp-1.pdf. - 15 с.

226.Орловский А.С. Применение высокоточной гравиразведки для изучения подсолевого структурного плана в пределах Чарджоузской тектонической ступени / А.С.Орловский, В.А.Каплун, М.А.Высокий // Геофизические исследования на нефть и газ в Узбекистане. - Ташкент, 1977, вып. 27. - С. 41-48.

227.Орловский А.С. Результаты детальной гравиразведки по изучению подсолевого структурного плана в районе Щуртанского.газоконденсатного месторождения / А.С.Орловский, М.А.Высокий // Геофизические исследования на нефть и газ в Узбекистане. -

Ташкент, 1980, вып. 7. - С. 14-22.

228.Основные технологии векторной обработки и интерпретации гравитационных и магнитных полей / В.М.Новоселицкий, С.Г.Бычков, М.С.Чадаев, Г.П.Щербинина,

Г.В.Простолупов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 28-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского. - М.: ОИФЗ РАН, 2001. - С. 71-72.

229.Особенности геологического строения и нефтегазоносности передовых складок Урала / С.Н.Калабин, А.Ф.Катошин, Е.С.Килейко, В.В.Макаловский, В.И.Зотиков. – М.: ОАО НТК РМНТК «Нефтеотдача», 2000. – 105 с.

230.ПАНГЕЯ – 10 лет. Геофизика, Специальный выпуск. 2004. - 106 с.

231.Пашко В.Ф. Методы решения прямых и обратных задач гравиметрии и магнитометрии на ЭВМ (по материалам зарубежных публикаций) / В.Ф.Пашко, В.И.Старостенко // Региональная, разведочная и промысловая геофизика: обзор ВИЭМС, 1982. - 93 с.

232.Перспективы нефтегазоносности турнейской толщи заполнения Камско-Кинельских прогибов в северных районах Пермской области / С.Н.Калабин, А.Ф.Катошин, В.Г.Козлов, А.П.Лаптев, В.С.Попова, А.И.Савич, Э.К.Сташкова, Л.И.Тетерина, В.А.Чижова. – М., ОАО НТК РМНТК «Нефтеотдача», 2002. – 94 с.

233.Петров А.В. Алгоритм адаптивной компенсирующей фильтрации потенциальных полей / А.В.Петров // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского. - М.: ОИФЗ РАН, 2003. - С. 89-90.

234.Петров А.В. Новые возможности компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа геоданных «КОСКАД 3Dt» / А.В.Петров, П.В.Пискун, С.В.Зиновкин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского. – Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 219-221.

235.Петров А.К. Региональные гравиметрические работы в Пермском Прикамье / А.К.Петров, С.Г.Бычков // Геологическая служба и минерально-сырьевая база России на пороге XXI века: материалы Всеросс. съезда геологов и науч.-практ. геологической конф. Книга 1. С.-Пб, 2000. - С. 192-194.

236.Петровский А.П. Автоматизированная система GCIS – количественной комплексной интерпретации данных сейсмогравиметрии для персонального компьютера / А.П.Петровский, А.И.Кобрунов, В.Н.Суятинов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М., ОИФЗ РАН, 2000. - С. 133-135.

237.Петровский А.П. Технологические особенности автоматизированной системы комплексной интерпретации сейсмогравиметрических данных / А.П.Петровский, С.В.Моисеенкова, С.В.Шилова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М, ОИФЗ РАН, 2003. - С. 90-91.

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

239.Подгорный В.Я. Методика послойного определения плотности по гравитационным аномалиям, на примере профиля Свободный – Комсомольск-на-Амуре – м.Сюркум / В.Я.Подгорный // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г.Успенского. - М.: ОИФЗ РАН, 2003. - С. 96-98.

240.Поисково-разведочные возможности геофизических методов при выявлении и картировании рифогенных массивов на территории Западного Узбекистана / С.А.Шихов, Р.А.Жаркова, А.С.Орловский, С.Г.Бычков, И.В.Ванцева // Геология месторождений горючих полезных ископаемых, их поиски и разведка. - Перм. политех. ин-т., Пермь, 1984. - С.47-51.

241.Покровский Н.С. Прогнозирование латеральных изменений скорости по результатам комплексной интерпретации гравиразведки и сейсморазведки / Н.С. Покровский // Разведочная геофизика: экспресс информация. ВИЭМС, 1987. - С.20-26.

242.Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф.Препарата, М.Шеймос. Пер. с англ. - М., Мир, 1989. - 478 с.

243.Прихода А.Г. Геодезическое обеспечение геологоразведочных работ / А.Г.Прихода // Геопрофи, 2003, №2. - С.3-5.

244.Проблема разделения источников и решения обратных задач геопотенциальных полей в системе VECTOR с целью решения поисково-разведочных и экологических задач / С.Г.Бычков, П.С.Мартышко, В.М.Новоселицкий, И.Л.Пруткин, А.Ф.Шестаков // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов: материалы Междунар. конф. / ГИ УрО РАН. Волгоград-Пермь, 2001. - С.12-13.

245.Проворов В.М. К вопросу о структуре фундамента Пермского Прикамья и его связи с осадочным чехлом / В.М.Проворов, В.М.Новоселицкий, С.А.Шихов// Уч. зап. Перм. ун-та, 1968, вып. 3. - С.69-82.

246. Проворов В.М. Состояние и основные результаты региональных нефтепоисковых работ в Удмуртской Республике / В.М. Проворов // Геология нефти и газа, №3, 2005. - С.2-11.

247.Пруткин И.Л О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок / И.Л Пруткин // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986, № 1. - С. 67-77.

248.Пугин А.В. Вейвлеты и вейвлетный подход к решению интерпретационных задач гравиметрии / А.В.Пугин // Пятая Междунар. науч.-практ. конф.-конкурс молодых ученых и специалистов.– СПб.:СПбГУ, ВВМ, 2005. - С. 236-238.

249.Пугин А.В. Компьютерные технологии интерпретации геопотенциальных полей на основе аналитических аппроксимаций и вейвлет-анализа: автореферат дисс. ... канд. физ.мат.наук: 25.00.10 / Пугин Алексей Витальевич. - Екатеринбург: ИГ УрО РАН, 2007. - 26 с.

250.Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / А.И.Кудряшов, В.Е.Васюков, Г.С.Фон-дер-Флаасс, Е.А.Иконников, В.А.Гершанок, Л.А.Гершанок, С.В.Глебов. – Пермь, ГИ УрО РАН, 2004. – 194 с.

251.Ремпель Г.Г. Актуальные вопросы введения поправок, связанных с рельефом местности, в данные гравиразведки и магниторазведки / Г.Г.Ремпель // Физика Земли, 1980, №12. -С. 75-89.

252.Ремпель Г.Г. Опыт согласованного моделирования аномалий силы тяжести и данных ВЭЗ с применением ЭВМ / Г.Г.Ремпель, Н.И.Паршуков // Новое в развитии рудной геофизики в Сибири: труды СНИИГГиМС, 1976, вып.238, Новосибирск. - С.5-8.

253.Роль гравиметрических исследований в комплексе методов на различных стадиях изучения геологического строения территорий / С.Г.Бычков, В.М.Новоселицкий, Г.В.Простолупов, Г.П.Щербинина // Вопросы теории и практики геологической интерпрета-

ции гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 34-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ИФЗ РАН. М., 2007. С. 50-53.

254.Романюк Т.В. Плотностное моделирование литосферы зоны перехода океан континент (Южная Калифорния) / Т.В.Романюк // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М. ИФЗ РАН, 2004. - С. 62-63.

255.Рыскин М.И. Комплексирование геофизических методов при изучении подсолевого комплекса в Прикаспийской впадине / М.И.Рыскин, Т.С.Герасименко, И.И.Науменко // Геология нефти и газа, №2, 2008. – С. 59-65.

256.Рыскин М.И. Об эффективности комплексирования сейсмических и гравимагнитных данных при разведке нефтегазоперспективных объектов / М.И.Рыскин, К.Б.Сокулина, Д.А.Барулин // Геофизика, №4, 2005. – С. 14-21.

257.Сербуленко М.Г. Линейные методы разделения потенциальных полей /

М.Г.Сербуленко // Дополнительные главы курса гравиразведки и магниторазведки. - Новосибирск: Новосиб.ун-т, 1966. - С.389-457.

258.Серкеров С.А. Гравиразведка и магниторазведка в нефтегазовом деле / С.А.Серкеров // М.: РГУ нефти и газа, 2006. - 512 с.

259.Симанов А.А. Информационно-аналитическая система обеспечения крупномасштабных гравиметрических съемок / А.А. Симанов // Геоинформатика, 2007, №4. - С. 1-11.

260.Симанов А.А. Картографические погрешности при обработке геофизических данных: причины возникновения и оценка / А.А. Симанов // Шестая Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник научных материалов. - Пермь, 2005. - С. 213-217.

261.Симанов А.А. Особенности использования крупномасштабных топографических карт при обработке результатов гравиметрических наблюдений / А.А.Симанов // Горное эхо. Вестник Горного института. 2004, № 4(18). - С. 36-40.

262.Симанов А.А. Разработка и создание информационно-аналитической системы хранения, обработки и анализа гравиметрических данных: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Симанов Алексей Аркадьевич. – М.: РГГРУ, 2008. - 24 с.

263.Симанов А.А. Современная технология топографо-геодезических работ при высокоточной гравиметрической съемке / А.А.Симанов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. Горного института УрО РАН, 2005. - С.101- 103.

264.Система «VECTOR» - объемная интерпретация геопотенциальных полей / В.М.Новоселицкий, П.С.Мартышко, М.С.Чадаев, И.Л.Пруткин, С.Г.Бычков, Г.П.Щербинина, А.Ф.Шестаков, Г.В.Простолупов // Теория и практика морских геолого-геофизических исследований: материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф. - Геленджик, 2001. - С. 246-248.

265.Слепак З.М. Гравиразведка в нефтяной геологии / З.М.Слепак. - Казань, Казанск. унт, 2005. –224 с.

266.Слепак З.М. Об изучении плотности верхней части разреза / З.М.Слепак // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. - Пермь, Перм. ун-т, 1982. - С. 66-77.

267.Слепак З.М. Опыт изучения плотностных неоднородностей верхней части разреза / З.М.Слепак // Разведочная геофизика:экспресс-информация ВНИЭМС, 1987, вып.7. - С.19-24.

268.Слепак З.М. Применение гравиразведки при поисках нефтеперспективных структур / З.М.Слепак. – М.: Недра, 1989. – 200 с.

269.Современные проблемы спутникового геодезического обеспечения геолого-геофизических исследований / А.Г.Прихода, А.П.Лапко, Г.И.Мальцев, А.А.Пыстин // Геофизика, 1999, №5. - С.54-58

270.Сорокин Л.В. Курс гравиметрии и гравиметрической разведки / Л.В. Сорокин // М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. - 568 с.

271.Спасский Б.А. Использование первых волн в сейсморазведке методом отраженных волн для изучения верхней части разреза / Б.А.Спасский, И.Ю.Митюнина. - М.: МГП «Гео-информарк», 1992. - 46 с.

272.Способ многокомпонентного гравиметрического моделирования геологической среды: пат. №2365895 С1, РФ, МПК G01V 7/00 (2006.01) / Новоселицкий В.М., Бычков С.Г., Долгаль А.С., Чадаев М.С.; заявитель и патентообладатель ГИ УрО РАН. – 2007146867/28; заявл. 17.12.2007; опубл. 20.08.2009, бюл.№23.

273.Старостенко В.И. Методика и комплекс программ решения обратной задачи гравиметрии на ЭВМ «Минск-22» / В.И.Старостенко, А.Н.Заворотько. - Киев, Наукова думка, 1976. – 62 с.

274.Старостенко В.И. Решение обратной задачи гравиметрии для нескольких контактных поверхностей: автоматизированная реализация / В.И.Старостенко, О.В.Легостаева, А.Н.Заворотько // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитацион-

ных, магнитных и электрических полей: материалы 27-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - М., ОИФЗ РАН, 2000. - С. 173-174.

275. Старостенко В.И. Устойчивые численные методы в задачах гравиметрии / В.И. Старостенко. - Киев: Нукова думка, 1978. – 228 с.

276.Столниц Э. Вейвлеты в компьютерной графике / Э.Столниц, Т.ДеРоуз, Д.Салезин: пер. с англ. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. - 272 с.

277. Страхов В.Н. Геофизика и математика. Методологические основы математической геофизики / В.Н.Страхов // Геофизика. 2000, № 1. - С. 3-18.

278. Страхов В.Н. К вопросу о неоднозначности обратной задачи гравиметрии / В.Н. Страхов // Прикладная геофизика, 1972, вып.69. - М.:Недра. - С.115-140.

279. Страхов В.Н. К истории Всесоюзного семинара имени профессора Д.Г.Успенского / В.Н. Страхов. – М.: ОИФЗ РАН, 2000. – 32 с.

280.Страхов В.Н. К теории метода подбора / В.Н.Страхов // Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964, №4. - С. 494-509.

281. Страхов В.Н. Линейные аналитические аппроксимации рельефа поверхности Земли / В.Н. Страхов, И.А. Керимов, А.В. Страхов // Геофизика и математика: материалы 1-й Всеросс. конф. - М.: ОИФЗ РАН, 1999. - С. 199-212.

282.Страхов В.Н. Новый информационный базис гравиметрии, магнитометрии и геодезии / В.Н.Страхов, И.Э.Степанова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 30-й сессии Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. Часть І. - М.: ОИФЗ РАН, 2003. - С. 118-123.

283.Страхов В.Н. Общая схема и основные итоги развития теории и практики интерпретации потенциальных полей в СССР в XX веке / В.Н.Страхов // Развитие гравиметрии и магнитометрии в XX веке: материалы конф. - М.: ОИФЗ РАН, 1997. - С 98-120.

284. Страхов В.Н. Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдении / В.Н.Страхов // Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. - ИФЗ АН СССР, 1979. - С. 146-269.

285.Страхов В.Н. Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. Ч.І. / В.Н. Страхов // Геофизика. 1995. № 3. - С. 9-18.

286.Страхов В.Н. Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. Ч.П. / Страхов В.Н. // Геофизика. 1995. № 4, - С. 10-20.

287. Страхов В.Н. Три парадигмы в теории и практике интерпретации потенциальных полей (анализ прошлого и прогноз будущего) / В.Н.Страхов – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 78 с.

288.Страхов В.Н. Что делать? (о развитии гравиметрии и магнитометрии в России в начале XXI века) / В.Н.Страхов. – М.: ОИФЗ РАН, 1998. – 24 с.

289. Тарунина О.Л. Структурно-картировочные возможности гравиразведки в комплексе геолого-геофизических исследований / О.Л. Тарунина. - Пермь, Перм. ун-т., 1993. - 200 с.

290. Технологии решения прямых и обратных задач 3D гравиметрии и магнитометрии / В.А.Кочнев, Д.В.Васильев, И.В.Гоз, В.Ю.Сидоров // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 134-137.

291. Технология проведения региональных геофизических работ на территории Пермского края / В.М.Новоселицкий, В.М.Неганов, С.Г.Бычков, И.В.Геник [Электронный ресурс] // Geosciences – To Discover and Develop: International Conference & Exhibition EAGE, EAGO and SEG. Saint Petersburg, 16-19 October 2006. P124. – 4 с.

292. Тихонов А.В. Об устойчивости обратных задач / А.В. Тихонов // ДАН 39, 1943, №5. - С. 195-198.

293. Торге В. Гравиметрия / В. Торге – М.: Мир, 1999. - 429 с.

294. Трехмерная гравимагнитная модель земной коры Североуральского сегмента Плати-

ноносного пояса / В.А.Пьянков, П.С.Мартышко, Н.И.Начапкин, Т.В.Полянина, А.А.Ефимов // Геофизический вестник, 2006, №2. - С.11-16.

295. Трехмерное гравитационное моделирование литосферы по району Уральской сверхглубокой скважины СГ-4 / Н.И.Начапкин, В.С.Дружинин, А.Н.Бахвалов, Ю.С.Каретин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 29-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2002. - С. 189-194.

296.Тулин В.А. История метрологии и создания аппаратуры в гравиметрии / В.А.Тулин, В.А.Романюк // Развитие гравиметрии и магнитометрии в XX веке: материалы конференции. - М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 62-69.

297. Тяпкин К.Ф. Изучение разломных и складчатых структур докембрия геологогеофизическими методами / К.Ф. Тяпкин. – Киев: Наук. Думка, 1986. – 168 с.

298. Тяпкин К.Ф. Краткий обзор современных методов ослабления регионального фона гравитационного и магнитного полей // К.Ф.Тяпкин, Г.Я.Голиздра. – М., ОНТИ ВИМСа, 1963. – 51 с.

299.Урдабаев А.Т. Согласованные физические модели земной коры Южного Торгая / А.Т.Урдабаев // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 276-278.

300.Урупов А.К. Основы трехмерной сейсморазведки / А.К.Урупов. – М.: ФГУП «Нефть и газ», 2004. – 584 с.

301. Успенский Д.Г. Гравиразведка / Д.Г.Успенский // Л.: Недра, 1968. - 331 с.

302.Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке / В.С.Козырев, А.П.Жуков, И.П.Коротков, А.А.Жуков, М.Б.Шнеерсон. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 227 с.

303.Федорова Н.В. Моделирование источников магнитных аномалий земной коры вдоль геотраверса «Гранит» / Н.В.Федорова, В.А.Чурсин // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 29-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - Екатеринбург, ИГ УрО РАН, 2002. - С. 56-57.

304. Федынский В.В. Разведочная геофизика / В.В. Федынский // М.: Недра, 1964. – 672 с.

305. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. / Под ред.Н.Б.Дортман. - М.: Недра, 1984. - 455 с.

306.Фотиади Э.Э. Геологическое строение Русской платформы по данным региональных геофизических исследований и опорного бурения / Э.Э.Фотиади - М., Гостоптехиздат. 1958. – 47 с.

307.Фурман В.Ф. Преимущества пространственной сейсморазведки 3D при трассировании тектонических нарушений при построении дизъюнктивно-блоковой модели (на примере Решетниковского месторождения) / В.Ф.Фурман // Проблемы и перспективы геологического изучения и освоения мелких нефтяных месторождений: Материалы региональной научнопрактической конференции. Ижевск, 2001. – с. 88-90.

308.Худяков С.С. Анализ планово-высотного положения сети сейсмических профилей на основе обработки данных дистанционного зондирования Земли / С.С.Худяков, В.А.Поздняков, А.С.Ефимов / Технологии сейсморазведки, 2004, №2. - С.35-37.

309.Хурсик В.З. Органогенные постройки Пермского Приуралья и литолого-фациальная изменчивость пород в зонах их развития / В.З.Хурсик // Латеральная изменчивость состава и физических свойств осадочной толщи в пределах локальных структур и ее отражение в зональности геофизических полей: труды КО ВНИГНИ, вып. 160. - Пермь, КО ВНИГНИ, 1974. - С. 103-117.

310.Черемсина Е.Н. Геоинформационные системы в природопользовании / Е.Н.Черемсина, А.А.Никитин // Геоинформатика №3, 2006. – С. 5-20.

311.Чернов А.А. Геологическое картирование малоизученных районов посредством геопотенциальных полей / А.А.Чернов, В.В.Шульгина [Электронный ресурс] // International Conference & Exhibition «Saint Petersburg-2008», ЕАГО, ЕАGE, SEG. - С-Петербург, 2008. P055. – 4 с.

312.Шилова А.А. Статистические связи между физическими параметрами осадочных пород / А.А.Шилова, Л.Н.Заглядова, Н.И.Дергачев // Геофизические изыскания, 1976, вып.2. – Перм. ун-т., Пермь. - С.165-172.

313.Шилова С.В. Особенности интегрированной интерпретации сейсмогравиметрических данных на примере Тимано-Печорской провинции / С.В.Шилова, С.В.Моисеенкова, О.М.Вельтистова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского. - Пермь, ГИ УрО РАН, 2005. - С. 291-294.

314.Шихов С.А. Геолого-геофизические предпосылки изучения мезозойских рифов Западного Узбекистана детальной гравиразведкой / С.А.Шихов, С.Г.Бычков, И.В.Ванцева // Геология и разведка горючих полезных ископаемых, их поиски и разведка. -Перм. политех. ин-т., Пермь, 1985. - С.101-105.

315.Шихов С.А. Исследование Камско-Кинельской системы прогибов геофизическими методами в северной части Волго-Уральского бассейна в связи с поисками нефтегазоносных структур: автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук // Шихов Степан Александрович. - Пермь, Перм.ун-т, 1974. - 43 с.

316.Шихов С.А. Применение гравитационного моделирования при решении поисковоразведочных задач нефтегазовой геологии / С.А.Шихов, С.Г.Бычков //Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа. -Перм. ун-т., Пермь, 1985. - С.17-23.

317.Шихов С.А. Принципы и возможности гравитационного моделирования при решении задач нефтегазовой геологии / С.А.Шихов, С.Г. Бычков, А.Е.Казанцев // Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа. - Перм. ун-т., Пермь, 1984. - С.12-18.

318.Шрайбман В.И. Корреляционные методы преобразования и интерпретации геофизических аномалий / В.И.Шрайбман, М.С.Жданов, О.В.Витвицкий // М.: Недра, 1977. - 236 с.

319.Щербаков О.А. Реконструкция древних бассейнов седиментации в областях со сложной складчато-разрывной тектоникой (на примере карбона Западного Урала) : автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук / Щербаков Олег Анатольевич. – Свердловск, ИГГ УНЦ АН СССР, 1982. - 55 с.

320.Щербинина Г.П. Исследование причин обрушения пород на Втором Соликамском руднике Верхнекамского месторождения солей по геолого-геофизическим данным / Г.П.Щербинина // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – Перм. ун-т., Пермь, 1998. - С. 85-95.

321.Щербинина Г.П. Новый нефтеперспективный объект в Соликамской впадине / Г.П. Щербинина // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. - Пермь, 2009. - С.143.

322.Юзвак В.П. Интерпретация гравитационных полей рифогенных структур: автореф. дис. ... канд.техн.наук / Юзвак Виталий Павлович. – Пермь, ППИ, 1989. - 20 с.

323.Юзефович А.П. Гравиметрия / А.П.Юзефович, Л.В.Огородова // М.: Недра, 1980. - 320 с.

324. Якимчук Н.А. О моделировании поля аномалии силы тяжести при сложном рельефе контактной поверхности / Н.А. Якимчук // Прикладные алгоритмы решения обратных задач геофизики. - М., Сов. радио, 1979. - С.45-46.

325.Acquisition/Processing – Applications of geophysical inversions in mineral exploration / D.W.Oldenburg, Y.Li, C.G.Farquharson, P.Kowalzhyk, T.Aravanis, A.King, P.Zhang, A.Watts // The Leading Edge, 1998, No 4, Vol. 17. - P.461-465.

326.Aiken C.L.V. The Variable Bouguer Reduction Datum, Its Relation to the Prediction of Gravity Anomalies from Topography, and Computation of Residual Bouguer Gravity Anomalies /

C.L.V.Aiken // SEG Expanded Abstracts, 1982. - P. 247-250

327.Ander M.E. LaCoste & Romberg gravity meter: System analysis and instrumental errors / M.E.Ander, T.Summers, M.E.Gruchalla // Geophysics, 1999, №6, Vol. 64. - P.1708-1719.

328.Ander M.E. LaCoste & Romberg gravity meter: tares, drift, and temporal mass variations / M.E.Ander, T.Summers // SEG Expanded Abstracts, 1997. - P. 498-501.

329.Arafin S. Relative Bouguer anomaly / S.Arafin // The Leading Edge, 2004, N.9. - P.850-851.

330. Autograv Automated Gravity Meter. Operator manual. Ontario Canada, 1998. - 218 c.

331.Balde M. Global Positioning System (GPS) elevations and geoid corrections in geophysical surveys with examples in Nevada, North Dakota and Ecuador / M.Balde, C.L.V.Aiken // SEG Expanded Abstracts, 1997. - P. 535-538.

332.Barbosa V.C.F. Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depth / V.C.F.Barbosa, J.B.C.Silva, W.E.Mederios / Geophysics, 1997, № 6, Vol. 62. - P.1745-1757.

333.Biegert E.K. Beyond recon: The new world of gravity and magnetics / E.K.Biegert, P.S.Millegan // The Leading Edge, 1998, № 1, Vol. 17. - P.41-43.

334.Carbone D. Calibration shifts in a LaCoste-and-Romberg gravimeter: comparison with a Scintrex CG-3M / D.Carbone, H.Rymer // Geophysical prospecting, 1999, №1, Vol. 47. - P.73-83.

335.CG-5. Гравиметрический комплекс Autograv компании Scintrex. Руководство по эксплуатации: пер. с анг. AGT Systems. М.: 2002. – 248 с.

336.Chapin D. Gravity instruments: Past, present, and future / D.Chapin // The Leading Edge, 1998, №1, Vol. 17. - P.100-112.

337.Chapin D.A. A side-by-side test of four land gravity meters / D.A.Chapin, M.F.Crawford, M.Baumeister // SEG Expanded Abstracts, 1998. – 4 p.

338.Chapin D.A. A side-by-side test of four land gravity meters / D.A.Chapin, M.F.Crawford, M.Baumeister // Geophysics, 1999, Vol. 64, №. 3. - P. 765–775

339.Chapin D.A. The theory of the Bouguer gravity anomaly: A tutorial / D.A.Chapin // The Leading Edge, 1996, N.5. - P.361-363.

340.Cordell L. Potential-field sounding using Euler's homogeneity equation and Zidarov bubbling / L.Cordell // Geophysics, 1994, Vol. 59, No. 6. – P. 902-908.

341.Deep Penetration Density: A new borehole gravity meter / M.E.Ander, J.Govro, J.Shi, D.Aliod // SEG Expanded Abstracts, 1999. - 4 p.

342.Ervin C.P. Short note. Theory of the Bouguer anomaly / C.P.Ervin // Geophysics, 1977, V. 42, N. 7. - P. 1468.

343.Fairhead J.D. Advances in gravity survey resolution / J.D.Fairhead, M.E.Odegard // The Leading Edge, 2002, №1. - P. 36-37.

344.Fairhead J.D. New insights into old data / J.D.Fairhead, I.W.Somerton // The Leading Edge, 1998, № 1, Vol. 17. - P.71-72.

345.Fairhead J.D. The use of GPS in gravity surveys / J.D.Fairhead, C.M.Green, D.Blizkow // The Leading Edge, 2003, №10. - P. 954-959.

346.Featherstone W. E. A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics / W.E.Featherstone, M.C.Dentith // Computers & Geosciences, 1997, V. 23, N. 10. - P. 1063-1070.

347.Fedi M. 3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution / M.Fedi, A.Rapolla // Geophysics, 1999, Vol. 64, No. 2. – P. 452-460.

348.Genrich J.F. GPS-Positioned Gravity Survey of Guadalupe Island, Mexico / J.F.Genrich, J.M.Stevenson // SEG Expanded Abstracts, 1992. -P. 593-596.

349.Grauch V.J.S. Johnston Gradient window method: A simple way to separate regional from local horizontal gradients in gridded potential-field data / V.J.S.Grauch, S.Cambrey // SEG Int'l Exposition and 72nd Annual Meeting. Salt Lake City, Utah, 2002. - 4 p.

350.Hansen R.O. Gravity and magnetic methods at the turn of the millennium / R.O.Hansen // Geophysics, 2001, Vol. 66,  $N_{2}$  1. - P. 36–37.

351.Hecimovic Z. Terrain effect on gravity field parameters using different terrain models / Z.Hecimovic, T. Basic // Newton's Bulletin, n3, 2005. – P. 92-102.

352.Hugill A. Scintrex CG-3 Automated. Gravity Meter: Description and Field Results / A.Hugill // SEG Expanded Abstracts, 1990. - P. 601-604.

353.Hunter H.H. Methodology for interpreting 3D marine gravity gradiometry data / H.H.Hunter, H.Sestak, G.D.Lyman // The Leading Edge, 1999, №4, Vol. 18. - P.482-485.

354.Jackson H.A. Terrain correction methods and accuracy for gravity data / H.A.Jackson, J.W.van Gulik // SEG Expanded Abstracts, 1983. - P.210-211.

355.Karl J.H. Short notes. The Bouguer correction for the spherical earth / J.H.Karl // Geophysics, 1971, V. 36, N. 4. - P. 761-762.

356.Kinematic GPS Positioning of Geophysical Surveys: Gravity Survey of Ft. Berthold Indian Reservation, North Dakota / M.Balde, C.L.K.Aiken, J.Hare, W.D.Gosnold, S.Cates // SEG Expanded Abstracts, 1992. - P. 585-588.

357.LaFehr T.R. Comprehensive Treatment of Terrain Corrections with Examples from Sheep Mountain, Wyoming / T.R.LaFehr, H.L.Yarger, J.E.Bain // SEG Expanded Abstracts, 1988. - P.361-363.

358.LaFehr T.R. On Talwani's "Errors in the total Bouguer reduction" / T.R.LaFehr // Geophysics, 1998, Vol. 63, № 4. - P.1131-1136.

359.LaFehr T.R. Standardization in gravity reduction / T.R.LaFehr // Geophysics, 1991, v. 56, n.8. - P. 1170-1178.

360.Li X., Gotze H.-J. Tutorial. Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics / X.Li, H.-J.Gotze // Geophysics, 2001, v. 66, n. 6. - P. 1660-1668.

361.Li Y. 3-D inversion of gravity data / Y.Li, D.W.Oldenburg // Geophysics, 1998, № 1, Vol. 63. - P.109-119.

362.Marson I. Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation / I.Marson, E.E.Klingele // Geophysics, 1993, Vol. 58, No. 11. – P. 1588-1595.

363.Martin-Atienza B. 2D gravity modeling with analytically defined geometry and quadratic polynomial density functions / B.Martin-Atienza, J.Garcia-Abdeslem // Geophysics, 1999, №6, Vol. 64. -P.1730-1734.

364.Meurers B. Gravity anomaly determination in mountainous areas – general aspects revisited / В.Meurers [Электронный ресурс]. Режим доступа:

http://www.ecgs.lu/pdf/jlg90/jlg90\_Meurers.pdf. - 8 p.

365.Microgravity investigation for solution an engineering and geological problems by use the computer-based system "VECTOR" / V.Novoselitskiy, G.Prostoloupov, G.Scherbinina, S.Iakovlev, S.Bychkov / International workshop "Geosciences for urban development and environmental platting", Lithuania, Vilnius, 2003. - P.118-120.

366.Moraes A.V.R. Constrained inversion of gravity fields for complex 3-D structures / A.V.R.Moraes, R.O.Hansen // Geophysics, 2001, Vol. 66, No. 2. – P.501-510.

367.New standards for reducing gravity data: The North American gravity database /

W.J.Hinze, C.Aiken, J.Brozena, B.Coakley, D.Dater, G.Flanagan, R.Forsberg, T.G.Hildenbrand,

R.Keller, J.Kellogg, R.Kucks, X.Li, A.Mainville, R.Morin, M.Pilkington, D.Plouff, D.Ravat,

D.Roman, J.Urrutia-Fucugauchi, M.Veronneau, M.Webring, D.Winester // Geophysics, 2005, V. 70, N. 4. - P. J25-J32.

368.Oasis montaj 6.2. Mapping and Processing System.Quick start<sup>™</sup> Tutorials // Program Copyright<sup>©</sup> Geosoft Inc. 2005. – 312 p.

369.Paul R.J. Reducing the risk: Intergating gravity, magnetic, and seismic data in Papua New Guinea / R.J.Paul, J.E.Bain // The Leading Edge, 1998, № 1, Vol. 17. - P.59-62.

370.Rauth M. Gridding of Geophysical Potential Fields from Noisy Scattered Data / M.Rauth [Электронный ресурс]. PhD Thesis, University of Vienna, May 1998, Режим доступа: http://www.rauth.at/papers/thesis.asp. - 123 p.

371.Recent developments in digital gravity data acquisition on land / C.L.V.Aiken, M.Balde,

J.F.Ferguson, G.D.Lyman, X.Xu, A.H.Cogbill // The Leading Edge. 1998, Vol. 17, № 1. - P.93-97 372.Salvaderi R. Variable Density Gravity Processing in the Appenine Mountains (Central

Italy) / R.Salvaderi, J.Lakshmanan // SEG Expanded Abstracts, 1989. - P. 329-331.

373.Schiavone D. Near-station topographic masses correction for high-accuracy gravimetric prospecting / D.Schiavone, D.Capolongo, M.Loddo // Geophysical Prospecting, 2009, v. 57. - P.739-752.

374.Seigel H.O. A guide to high precision land gravimeter surveys / H.O.Seigel. - Ontario Canada, 1995. – 23 p.

375.Silva J.B.C. Potential-field inversion: Choosing the appropriate technique to solve a geologic problem / J.B.C. Silva, E W.Medeiros, V.C.F.Barbosa // Geophysics, 2001, Vol. 66, No. 2. – P. 511-520.

376.Spradleu L.H. Expanded Roles of the Global Positioning System (GPS) in Geophysical Exploration / L.H.Spradleu // SEG Expanded Abstracts, 1992. - P. 568-570.

377.Talwani M. Errors in the total Bouguer reduction / M. Talwani // Geophysics, 1998, Vol. 63, № 4. - P.1125-1130.

378. The 3D geometry of the Linglong granitic complex from 2D gravity forward modeling, Shandong Province, east China / H.Zeng, T.Wan, C.Teyssier, C.Yao, B.Tikoff // Geophysics, 2000, №2, Vol. 65. - P.421-425.

379. The computer-based system VECTOR as a tool for detection and localization of both gravity and magnetic field sources and its applications at geological interpretation / S.Bitchkov, V.Novoselitskiy, G.Prostoloupov, G.Scherbinina, M.Tchadaev [Электронный ресурс] // Abstracts of Contribution of the EGS-AGU-EUG Joint Assembly, France, Nice, 2003, Vol. 5, EAE03-A-01497. – 2 p.

380.Tsoulis D. Terrain modeling in forward gravimetric problems: a case study on local terrain effects / D.Tsoulis // Journal of Applied Geophysics, 2003, № 54. - P.145–160.

381.Xia H. Terrain corrections with variable density distributions / H.Xia, W.T.Dewharst // SEG Expanded Abstracts, 1986. - P.142-143.

382.Yang Z. The gravity & seismic data jointed formation separation technique for deep structure study / Z.Yang, Y.Wei // SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2005. - P. 635-638.

383.Ziegler D.G. Rapid GPS Positioning of a Gravity Survey in the South Georgia Basin, Georgia, Using the Two Occupation Rapid Static Ambiguity Function Technique / D.G.Ziegler // SEG Expanded Abstracts, 1992. - P. 589-592.