

На правах рукописи



Михайлов Павел Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ВЫПОЛНЕНИЯ
МОРСКИХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК**

Специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в лаборатории гравиинерциальных измерений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Научный руководитель: **Конешов Вячеслав Николаевич**
доктор технических наук, профессор, заместитель
директора ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю.
Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Официальные оппоненты: **Олейников Александр Владимирович**
доктор технических наук, заместитель директора
ОАО «Военно-инженерная корпорация»

Лебедев Сергей Анатольевич
доктор физико-математических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории геоинформатики и геомагнитных
исследований ФГБУН Геофизический Центр Российской
Академии Наук (ГЦ РАН)

Ведущая организация: **ОАО «Морская арктическая геологоразведочная
экспедиция» (ОАО МАГЭ)**

Защита состоится «27» апреля 2017 г. в 11^{:00} часов на заседании Диссертационного совета Д 002.001.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1., конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте института www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



Камзолкин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Знание аномалий гравитационного поля Земли позволяет решать ряд фундаментальных и научно-практических задач: общеземных (уточнение формы и глубинного строения Земли), геологических (разведка, поиск и оконтуривание месторождений полезных ископаемых), освоения космоса, обороны государства (расчет полетов баллистических ракет, коррекция координат в инерционных навигационных системах), метрологии и т.д. Возможности использования аномалий гравитационного поля как источника информации, определяются точностью выполнения гравиметрических съемок. Эти возможности расширяются с уменьшением погрешности гравиметрических измерений. Необходимая точность измерений зависит от характера решаемой задачи. В настоящий момент по превышениям геоида над эллипсоидом относимости, получаемым с использованием спутниковых альтиметрии и градиентометрии, возможно вычислять аномалии силы тяжести, строить карты масштаба 1:1 000 000 и 1:500 000 с сечением изоаномал до 5-10 мГал и решать общие гравиметрические задачи. Для решения частных задач геологии и некоторых прикладных задач в акваториях Мирового океана требуются крупномасштабные карты, для чего необходимо выполнять прямые морские гравиметрические съемки.

Морская гравиметрическая съемка является дорогостоящей, поэтому обычно выполняется в комплексе и одновременно с другими работами. В связи с этим не всегда есть возможность строго следовать требованиям действующих инструкций по гравиметрической съемке. Это касается планирования съемочных полигонов и профилей, опорных береговых измерений, количества приборов на борту. Для повышения точности измерений, необходимой, например, для оконтуривания месторождений нефтегазоносных структур, кроме развития аппаратной части, требуются новые усовершенствованные методики как производства самих измерений, так и их последующей обработки.

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии и методики выполнения морских гравиметрических съемок с целью повышения их точности.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ и систематизация источников помех при выполнении морских гравиметрических съемок, а также возможных методов борьбы с ними.

2. Определение наиболее актуальных задач современной морской гравиметрии и направлений дополнительного повышения точности съемок методическими средствами.

3. Разработка методических приемов по использованию современных моделей гравитационного поля Земли для определения скорости-смещения нуля пункта гравиметра, контроля и коррекции прямых измерений.

4. Разработка методических приемов по учету океанического прилива.

5. Выработка предложений по совершенствованию общей методики выполнения морских гравиметрических измерений.

6. Экспериментальная проверка предложенных приемов совершенствования морских гравиметрических съемок.

Научная новизна. Разработан и обоснован комплекс новых методических приемов, использующих современные дополнительные источники данных о гравитационном поле Земли, принципиально уточняющих методику выполнения морской высокоточной гравиметрической съемки. Результаты исследования являются своевременным совершенствованием методики измерения физических полей Земли.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан и на экспериментальном материале проверен ряд методических приемов, существенно повышающих точность и расширяющих возможности выполнения морских гравиметрических съемок в различных условиях.
2. Описанные приемы обработки могут быть полезны как при выполнении стандартных морских измерений, так и при действиях в нештатных ситуациях.
3. Полученные результаты могут быть использованы при подготовке новой редакции «Инструкции по гравиметрической съемке», соответствующей современным реалиям выполнения работ.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Методический прием использования моделей гравитационного поля Земли для определения скорости смещения нуль-пункта гравиметра;
2. Методические приемы контроля и коррекции морских гравиметрических измерений по моделям гравитационного поля Земли;
3. Методический прием введения поправки за океанический прилив для повышения точности морских гравиметрических съемок.

Личный вклад автора. Основные экспериментальные результаты получены лично автором. Автор принимал участие в разработке и совершенствовании методик измерений и обработки. Автор непосредственно проверял защищаемые методические приемы в рамках многочисленных экспериментов в процессе выполнения морских гравиметрических измерений и получил положительные результаты. Автором проверено и проанализировано несколько способов коррекции прямых измерений по моделям аномалий гравитационного поля и учета высоты прилива, предложены наиболее уточненные методические приемы, а также определены условия их использования.

Апробация результатов. Результаты выполненной работы доложены на следующих конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана» НАН Украины, г. Запорожье, 2013 г.

2. Симпозиум международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях», г. Санкт-Петербург, 2014 г.

3. Международная научно-техническая конференция «Геодезия, картография, кадастр и ГИС – проблемы и перспективы развития», г. Новополюцк, 2016 г.

4. 44-я сессия Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» г. Москва, 2017 г.

Список публикаций по теме диссертации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 публикациях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в сборниках трудов и тезисов конференций и прочих изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 115 страниц текста с 32 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 132 наименования.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д. т. н. В.Н. Конешову за помощь на всех этапах выполнения работы.

Автор благодарит сотрудников ИФЗ РАН: д.т.н Л.К. Железняк, д.ф.-м.н. А.Б. Манукина и В.Н. Соловьева, а также всех сотрудников лаборатории 601.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации показаны актуальность проблемы, ее научная новизна, сформулированы цели и задачи работы, отражена практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Анализ современных методик морских гравиметрических измерений

В первой главе рассмотрены морские гравиметрические измерения с учетом возможностей современных гравиметров и аппаратуры обеспечения, а также требований, регламентированных существующими инструкциями и описанных в литературе по морской гравиметрической съемке.

В **разделе 1.1** проанализированы факторы влияющие на точность морских гравиметрических измерений: внешние условия их выполнения, характеристики применяемых измерительных приборов и аппаратуры обеспечения, методика выполнения съемки и способы обработки результатов. Для достижения цели настоящей работы необходимо отдельно рассмотреть каждый фактор, оценить привносимую величину погрешности и изучить возможные методы повышения точности.

В **разделе 1.2** определены погрешности, обусловленные условиями измерений: ускорения, возникающие при морских гравиметрических измерениях, и помехи, искажающие полезный сигнал вследствие действий этих ускорений.

Важным аспектом для точности измерений является характеристика измерительных приборов. В **разделе 1.3** описаны схемы построения современных морских гравиметрических комплексов, их достоинства и недостатки. Выявлено, что наиболее оптимальным для решения поставленных задач является вариант сильно демпфированного морского гравиметра, в основе которого находится двойная упругая система крутильного типа из кварцевого стекла (Попов, Железняк, 1982).

В разделе 1.4 проанализирована существующая методика производства морских гравиметрических съемок. В настоящее время основные принципы выполнения измерений изложены в существующих инструкциях и описаны в литературе.

Известным существенным недостатком морских гравиметрических измерений всегда была высокая стоимость эксплуатации судна. Поэтому измерения силы тяжести на море выполняются в комплексе с другими работами (батиметрией, сейсмическими работами, магнитной съемкой, пробоотборными работами), что позволяет снизить их стоимость, но создает некоторые дополнительные особенности при их производстве. Во многом определяющим фактором проведения работ становится экономическая составляющая.

В разделе 1.5 выполнен анализ способов обработки результатов морских гравиметрических съемок. Для решения большинства задач в гравиметрии рационально выполнять обработку измерений апостериорно. При такой методике для фильтрации данных подбираются фильтры и их параметры, которые максимально подавляют помеху и менее всего искажают полезный сигнал с учетом фона возмущающих ускорений (рис.1).

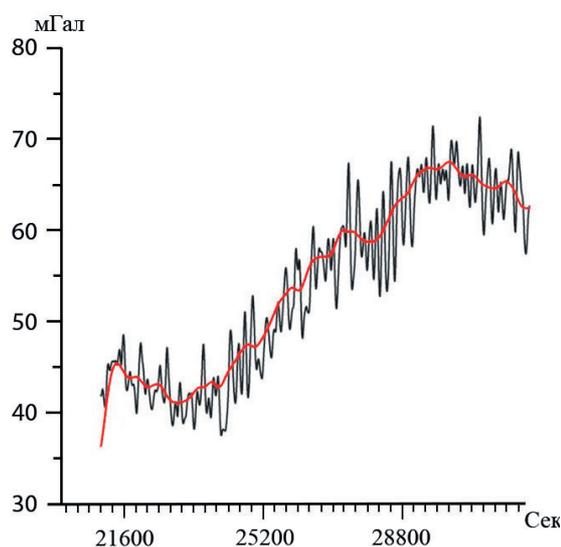


Рис.1. Графики измерений гравитационного поля Земли.

Черный график – обработка в реальном времени, красный график – результаты постобработки

Общее состояние морской гравиметрии на момент начала исследования рассмотрено в разделе 1.6. Использование современных гравиметрических

комплексов совместно с апостериорной схемой обработки позволяет получать точность измерений на полигоне в пределах 1 мГал. В некоторых случаях точность измерений может достигать 0.07 мГал, что позволяет строить карту с сечением изоаномал – 0.25 мГал (съёмка в Баренцевом море над нефтегазовым месторождением «Приразломное», 1994 г.). Такая точность измерений может быть достигнута строгим выполнением требований инструкций и благоприятными условиями измерений. Однако общепринятые, описанные в инструкциях и литературе методики не всегда соотносятся с современными условиями морских измерений.

В разделе 1.7 рассматриваются направления дополнительного повышения точности морских измерений силы тяжести методическими средствами. Технические возможности современных гравиметров и аппаратуры обеспечения совместно с предлагаемыми приемами позволяют получать на полигонах точность, при которой необходимым становится учет изменения уровня моря, обусловленное океаническим приливом.

Результаты и выводы по первой главе

1. Проанализированы и систематизированы факторы, влияющие на точность выполнения морских гравиметрических измерений.
2. Рассмотрены особенности выполнения гравиметрических съёмок на момент начала исследований, а также требования существующих инструкций.
3. Определены наиболее актуальные проблемы, возникающие при современных измерениях силы тяжести на море.
4. Для решения этих актуальных задач морской гравиметрии предлагается использовать данные моделей аномального гравитационного поля Земли.
5. В настоящее время для современной морской гравиметрии становится актуальным учитывать изменения уровня моря, обусловленные океаническим приливом.

Глава 2. Использование современных моделей гравитационного поля Земли для определения скорости смещения нуль-пункта

Во второй главе представлена оценка современных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) и предлагается методический прием использования моделей вместо дорогостоящих береговых опорных измерений.

В разделе 2.1 приведены принципы создания моделей ГПЗ и представлен обобщающий обзор их развития. К моменту проведения настоящего исследования создан ряд глобальных ультравысокостепенных моделей ГПЗ (до 2160-й степени гармоник) по своим характеристикам соответствующих поставленным целям диссертации: EGM2008, EIGEN-6C4, FGECO2014.

В разделе 2.2 представлены результаты взаимного сравнения моделей, а также их сравнения с прямыми измерениями. Оценки современных моделей показывают, что основные глобальные модели аномалий ГПЗ имеют схожие составляющие спектра аномалий силы тяжести и отличаются только региональной детализацией (Конешов, Непоклонов и др, 2013; Маркович, 2015). В результате сравнения моделей с прямыми измерениями определено, что короткопериодные волны фактического поля (15 км и менее) и шумы модели мало отличаются друг от друга, а волны длиной свыше 100 км в моделях представлены практически без искажений (Конешов, Непоклонов, Соловьев, 2014).

В разделе 2.3 описаны требования существующих инструкций к выполнению опорных береговых измерений и современные условия их выполнения. Многие гравиметрические работы, особенно выполняемые в интересах геологических изысканий, выполняются в постоянном режиме с периодическими заходами в порт для бункеровки, пополнения запасов провизии и смены экипажа. При этом время захода в порт ограничено, а высокая стоимость стоянок приводит к проведению регламентных портовых

работ одновременно с опорными измерениями и к частым перешвартовкам. Кроме того современные гравиметрические измерения отличаются долговременным отрывом от ОГП (до трех месяцев), а в промежуточных портах захода береговые ОГП могут отсутствовать.

В разделе 2.4 представлен методический прием определения скорости смещения нуль-пункта гравиметра по данным модели аномалий ГПЗ и определены условия его использования. Эта идея была высказана еще в 1995 году (Железняк, Конешов, 1995). АСТ, определенные спутниковыми методами, с длиной волны свыше 100 км почти не имеют систематической составляющей погрешности. В этом случае принципиально можно отказаться от исходных опорных пунктов с абсолютными значениями силы тяжести.

Опорные наблюдения при морских измерениях в ряде случаев являются проблемными и затратными. Нередко для практических целей достаточно использование опорного пункта без абсолютной его привязки, например для геологической интерпретации АСТ. Однако предпочтительным является использование опорного пункта, определенного в абсолютной системе, когда результаты измерений поля могут использоваться как при стыковке соседних площадей, так и в других случаях применения.

В открытом океане модельное поле на интервале более 100 км может быть использовано для определения скорости смещения нуль-пункта гравиметра с соблюдением следующих условий: смещение должно быть закономерным на интервале сравнения, сам интервал должен быть порядка 100 км и более, а вся снимаемая площадь не должна сводиться к областям рифтогенеза и другим градиентным зонам океана, а также береговой линии, где реальное поле не соответствует модели.

На рисунке 2 показана разность значений АСТ «измерения - модель» на полигоне, расположенном на континентальном склоне. В качестве исходного на опорном пункте используется значение нормального поля, а сама обработка проводится без ввода поправки за смещение нуль-пункта

гравиметра. Коэффициент при линейном члене аппроксимирующей функции разностей имеет физический смысл скорости смещения нуля-пункта.

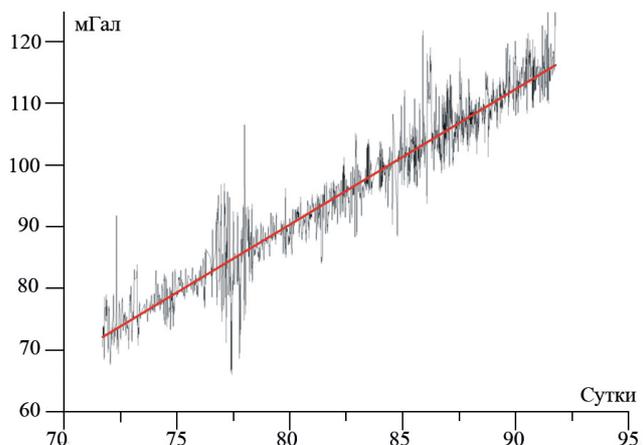


Рис.2. График разности «измерения - модель». Черный график – значения невязок, красный график – их линейная аппроксимация

В разделе 2.5 представлены фактические результаты применения предлагаемого методического приема. Первое защищаемое положение экспериментально проверялось при работах в Индийском океане, выполненных в 2015 г. мобильным гравиметром «Чекан-АМ» «Шельф».

В процессе измерений, выполнялась оценка измерений по нескольким критериям, включая поле модели EGM2008. На рисунке 3 показаны графики определения скорости смещения нуля-пункта и их линейная аппроксимация.

После обработки полученная скорость смещения нуля-пункта равна $+0.8516$ мГал/сут. Учитывая время измерений (8 суток), это значение можно считать достаточно надежным. Скорость смещения нуля-пункта вычисленная по невязкам, вычисленным в точках пересечения съемочных галсов с контрольными составила $+0.8527$ мГал/сут.

Для определения скорости непосредственно по модельному полю EGM2008 используется методика, представленная выше: галсы обрабатываются без учета смещения нуля, в каждой точки определяются разницы «измерения – модель» и линейно аппроксимируется по времени. Полученная скорость смещения нуля-пункта: $+0.8532$ мГал/сут.

Общая сравнительная характеристика приведенных методов определения скорости смещения нуля-пункта гравиметра «Чекан АМ» «Шельф» представлена в таблице 1.

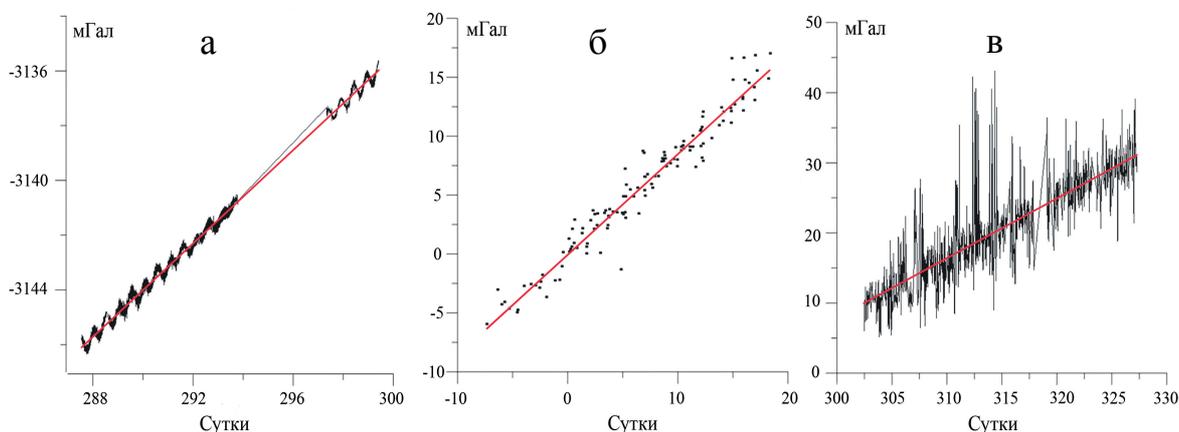


Рис.3. Графики смещения нуль-пунктов, построенные по разным источникам данных: а - График смещения нуль-пункта по опорным измерениям; б - Линейная аппроксимация невязок в точках пересечений галсов; в - Линейная аппроксимация разницы «изменения – модель»

Таблица 1

Методы определения скорости смещения нуль-пункта

Метод определения	Скорость смещения нуль-пункта, мГал/сут.	Временной период, сут.	Количественная характеристика
Береговые опорные измерения	+0.8516	8.3	11 712 пунктов через 1 мин
По пересечениям галсов	+0.8527	24.6	125 пересечений
По модельному полю EGM2008	+0.8532	24.8	170 738 пунктов через 10 сек

Полученные результаты доказывают, что скорость смещения нуль-пункта гравиметра может быть определена с достаточно высокой точностью непосредственно в море. Таким образом, обосновывается **первое защищаемое положение**.

Результаты и выводы по второй главе

1. Выполнен обзор современных моделей. Основные глобальные модели аномалий ГПЗ имеют схожие составляющие спектра аномалий силы тяжести в акваториях Мирового океана и отличаются только региональной детализацией.

2. Значения АСТ модельного поля в диапазоне длин волн поля ≥ 100 км совпадают с морскими измерениями в открытом океане и могут быть

использованы для решения ряда задач при выполнении морских гравиметрических съемок.

3. Разработан методический прием использование модели ГПЗ для определения скорости смещения нуль-пункта гравиметра непосредственно в море.

Глава 3. Контроль и коррекция текущих морских гравиметрических измерений по моделям гравитационного поля Земли

Поскольку модель ГПЗ не имеет систематической составляющей погрешности, она может использоваться как независимый источник информации для контроля, оценки и коррекции прямых измерений.

В разделе 3.1 рассмотрены требования существующих инструкций к выполнению морской гравиметрической съемки. Работы на море должны сопровождаться систематической проверкой результатов измерений надежным полевым контролем. Следует выделить ряд актуальных требований инструкций для обеспечения полевого контроля: одновременное использование группы гравиметров (не менее трех), выполнение измерений на независимых и повторных контрольных пунктах.

Независимые контрольные пункты позволяют выявлять систематические погрешности измерений, а повторные контрольные пункты получить дополнительную оценку погрешностей определения навигационных параметров и погрешностей съемки, медленно изменяющихся во времени. В рейсе должно определяться максимально возможное количество контрольных пунктов, по возможности равномерно размещенных по району плавания и времени измерений.

В разделе 3.2 проанализированы способы оценки морских гравиметрических измерений. Очевидно, что наиболее удобный и верный способ оценки точности измерений это - анализ измерений на повторных пунктах в точках пересечений профилей (галсов). При наличии некоторого

числа пересечений на галсе определяются статистические характеристики невязок. При этом выделяется постоянная составляющая невязки, которую можно трактовать как систематическую погрешность измерений на галсе и учитывать в процессе дальнейшей обработки и уравнивания (Железняк, Боярский, 1987). Таким способом, площадная съемка уравнивается с точностью до постоянной составляющей всей снятой площади. Во многих случаях (например, при геологической интерпретации) постоянная составляющая на всей площади не имеет никакого значения. Однако предпочтительным является отсутствие систематических погрешностей при выполнении даже площадных съемок, что необходимо для совмещения соседних площадей при составлении общих карт.

В разделе 3.3 предлагается новый методический прием оценки и, при необходимости, коррекции результатов морских гравиметрических съемок по моделям аномалий ГПЗ. Для этого в качестве опорного используется модельное поле с длиной волны 100 км и более. Обязательным является соблюдение условий, приведенных в главе 2.

Порядок работы следующий: выполняется обработка показаний гравиметра до получения каталога значений гравиметрических пунктов, по координатам пунктов выбираются значения поля из модели, затем вычисляется невязка между измерениями и моделью на галсе, производится статистическая обработка невязок. Среднее значение невязки вводится в качестве поправки во все значения измеренного поля на галсе.

При площадной съемке на большой площади с протяженными профилями поправка может вводиться в измерения на каждом профиле, после чего выполняется уравнивание всей съемки. Также в некоторых случаях возможен обратный порядок обработки: сначала выполняется уравнивание, а затем вычисление средней невязки по всему полигону в целом. В этом случае невязки вычисляются точнее, поскольку они вычисляются на больших промежутках времени, а их различие по профилям

учитывается при уравнивании. При маршрутных измерениях выполняется непрерывное сравнение измерений с моделью, невязку необходимо сглаживать низкочастотным фильтром и вводить ее в качестве поправки.

В разделе 3.4 представлены результаты экспериментальной проверки предлагаемых методических приемов.

В 2012 г. в акватории Индийского океана было опробовано два способа оценки и приведения съемки к модельному уровню. В первом случае для каждого галса отдельно в каждом гравиметрическом пункте с шагом 2 мин была вычислена разность между полученной аномалией в свободном воздухе и модельными значениями. Затем средние значения этих разностей по профилям в качестве невязок с обратным знаком внесены как поправки в измерения гравиметром на соответствующих галсах.

Полученные после приведения отдельных галсов к уровню модели и их обработки по 42 пересечениям статистические характеристики приведены в таблице 2. Используя последнее значение отклонения от модели, можно повторно привести эту уравненную систему к уровню модельного поля.

Таблица 2

Статистические характеристики (первый способ)

Этап обработки	Количество пересечений	Системат. составл.	Случ. составл.	Отклонение от модели
После приведения галсов	42	0.76	0.95	0.04
Уравнивание полигона	42	0.00	0.22	-0.24

Дополнительно обработка выполнялась в другой последовательности: сначала уравнивались измерения на полигоне, затем вычислялись средние отклонения измеренного поля от модельного по всему полигону и в качестве единой поправки вводились в измеренные значения после уравнивания. Полученные статистические характеристики приведены в таблице 3. Схематическая карта поля на полигоне представлена на рисунке 4.

Статистические характеристики (второй способ)

Этап обработки	Количество пересечений	Системат. составл.	Случ. составл.	Отклонение от модели
Уравнивание полигона с введением поправки за уровень	42	0.00	0.25	0.001

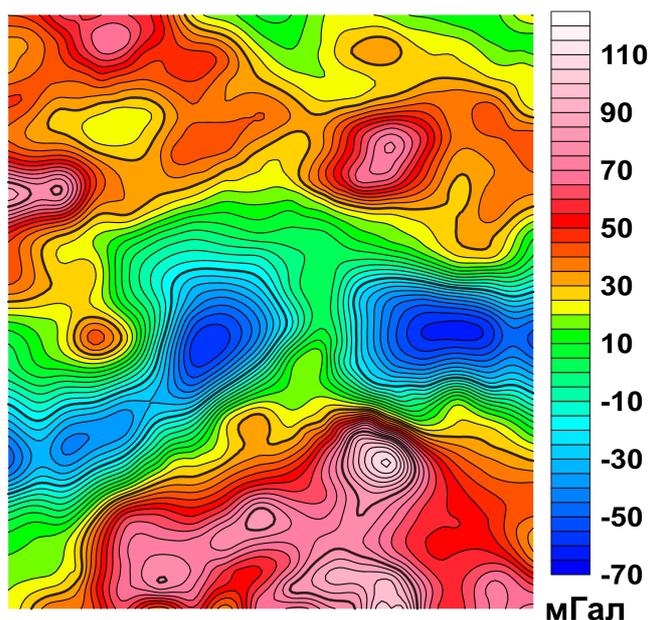


Рис.4. Карта аномалий силы тяжести в свободном воздухе полигона

Методический прием использования модели ГПЗ для контроля работы прибора представлен на рисунке 5. На нем показаны измеренные и модельные значения АСТ на профиле, выполненном двумя галсами с перерывом и с перекрытием. В промежутке между галсами имеет место скачок показаний, легко обнаруживаемый сравнением измерений с моделью.

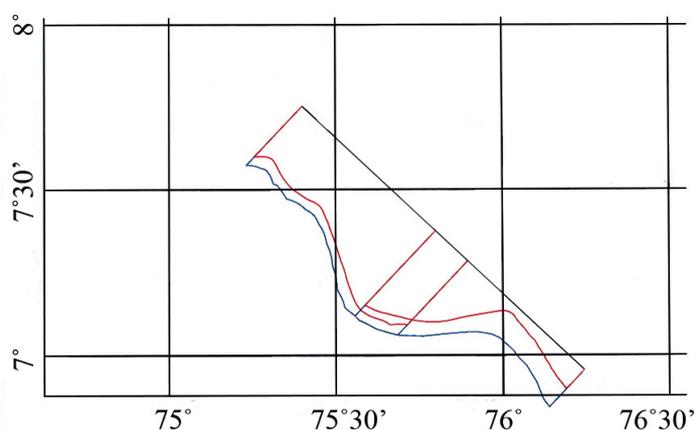


Рис.5. График модельного и измеренного полей на съемочном профиле. Синий график – модельное поле. Красные графики – прямые измерения

Представленные результаты показывают, что при оценке результатов морских гравиметрических съемок в числе ряда факторов должно учитываться отклонение измерений от модельного поля. Практически проверено, что сравнения с данными моделями аномалий ГПЗ по сути заменяют собой контрольные пункты, регламентированные инструкциями (их количество равняется количеству отснятых пунктов), и контрольные сравнения между приборами. Использование предлагаемых методических приемов дает широкие возможности для построения геометрии съемочных сетей, увеличивает надежность долговременных маршрутных съемок и позволяет уменьшить количество относительных гравиметров на борту до одного. Таким образом, обосновывается **второе защищаемое положение**.

Результаты и выводы по третьей главе

1. Проанализированы способы оценки и уравнивания морских гравиметрических измерений.
2. При общепринятых способах уравнивания площадная съемка уравнивается с точностью до постоянной составляющей всей снятой площади, которая может содержать систематическую погрешность.
3. Разработан методический прием оценки и коррекции результатов морской гравиметрической съемки по модели ГПЗ.
3. Разработан методический прием контроля работы гравиметров посредством непрерывного сравнения измерений с данными модели ГПЗ.
4. Использование предлагаемых методических приемов позволяет уменьшить количество дорогостоящих относительных гравиметров на борту без потери надежности измерений.
5. Предлагаемый методический прием позволяет выполнять морскую гравиметрическую съемку без береговых опорных пунктов.

Глава 4. Учет океанического прилива при морской гравиметрической съемке

На современном этапе выполнения высокоточных морских гравиметрических измерений в числе факторов, влияющих на точность, должно учитываться изменение уровня моря, обусловленное океаническим приливом. В четвертой главе рассмотрены проблемы учета океанского прилива при морских измерениях силы тяжести.

В разделе 4.1 рассмотрено явление океанического прилива на Земле, его физический смысл и факторы, определяющие его возникновение. Возникновение приливов связано с периодическим изменением гравитационного потенциала под влиянием движения космических тел относительно земного шара.

В разделе 4.2 рассматривается влияние приливного эффекта на точность морской гравиметрической съемки. С ростом точности морских гравиметрических измерений величины этих поправок из пренебрегаемых превращаются в значительные. Задачу учета приливного эффекта можно разделить на две: определение величины прилива и вычисление поправки.

Значения прилива могут быть определены прямыми измерениями с использованием спутниковых методов, и по динамическим нагрузочным моделям этого явления. Расчет поправок в измерения связан с корректным применением вертикального градиента силы тяжести и его линейного коэффициента, а также комбинаций чисел Лява и амплитудного дельта-фактора.

В разделе 4.3 проанализированы особенности прямых измерений высоты прилива, выполнен предварительный расчет точности вертикальных измерений в зависимости от удаления от базовых береговых спутниковых станций и определены условия для измерений высоты прилива с точностью, необходимой для расчета поправок в измерения силы тяжести. Расчет приливной поправки в морские гравиметрические измерения с помощью прямых спутниковых измерений связан с рядом трудностей. Достаточная

точность вертикальных измерений достигается на расстоянии не более 200 км от береговой спутниковой станции. Кроме того многие окраинные северные моря РФ являются относительно мелководными и закрытыми берегами, где для расчета поправок, как и в заливах, необходимо учитывать влияние береговых масс.

В разделе 4.4 описаны принципы создания динамических моделей океанского прилива и возможности их использования для расчета приливных поправок в морские гравиметрические измерения. Создание таких моделей связано с расчетом нагрузочного океанического эффекта. Впервые уравнения для такого расчета получены М.С. Молоденским в 1961 году, позднее методы расчетов получили развитие в работах других авторов (Перцев, Фаррел, Дехант, Венцель, Виноградова и др.).

Для получения поправок предлагается использовать отечественную компьютерную программу ATLANTIDA 3.1. В данном программном пакете расчет океанического нагрузочного эффекта выполняется на основе разложения высоты прилива по сферическим функциям до 1440 порядка с дополнительными поправками за сохранение масс и высоту (Спиридонов, Виноградова, 2014).

Введение поправок за океанический прилив в морские гравиметрические измерения предлагается выполнять при высокоточной съемке с большим количеством пересечений для лучшей статистической оценки. Порядок введения поправок предлагается следующий: на полигоне выбирается центральная точка, для которой программой ANTLATIDA 3.1 вычисляется временной ряд приливных поправок за период выполнения измерений на полигоне, затем путем сравнения времени пересечений вводятся поправки в файлы съемочных галсов полигона, далее выполняется уравнивание.

В разделе 4.5 представлены экспериментальные результаты использования нагрузочной модели океанского гравитационного эффекта (ATLANTIDA 3.1) для коррекции морских гравиметрических съемок. В таблице 4 приведен результат использования методического приема,

полученный при съемке полигона прямоугольной формы, содержащего 125 пересечений (Индийский океан, 2015 г.)

Таблица 4

Результаты учета океанского прилива при гравиметрической съемке

Этап обработки	Систематическая составляющая	Случайная составляющая	Погрешность одного измерения
Предварительная оценка полигона	-0.03	0.22	0.16
Уравнивание полигона	0.00	0.11	0.08
Оценка после учета океанского прилива	-0.04	0.21	0.15
Уравнивание полигона после учета океанского прилива	0.00	0.09	0.06

После введения приливных поправок улучшение случайной погрешности составило 24%. Следовательно, учет прилива при высокоточных морских гравиметрических измерениях является действующим фактором повышения точности, что подтверждает правильность **третьего защищаемого положения**.

Результаты и выводы по четвертой главе

1. Способ использования прямых спутниковых измерений в дифференциальном режиме для определения высоты прилива и расчета гравитационной поправки целесообразно использовать для повышения точности в прибрежных районах.

2. Определение поправок в морские гравиметрические измерения возможно по динамическим моделям океанических явлений. Для расчета значений поправок предлагается использовать программный пакет ATLANTIDA 3.1 (авт. Е.А. Спиридонов, А.Ю. Виноградова).

3. Разработан методический прием учета океанического прилива при выполнении высокоточной морской гравиметрической съемки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы:

1. Выявлены наиболее актуальные проблемы современной морской гравиметрии, определены цели и задачи диссертационной работы.

2. Разработан и экспериментально подтвержден методический прием использования моделей гравитационного поля Земли для определения скорости смещения нуль-пункта гравиметра непосредственно в море.

3. Разработан и экспериментально подтвержден методический прием использования моделей гравитационного поля Земли для оценки и коррекции морских гравиметрических съемок.

4. Разработан и экспериментально подтвержден методический прием использования моделей приливных океанических явлений для повышения точности морских площадных гравиметрических съемок.

5. Предлагаемые методические приемы дают возможность выполнять гравиметрические съемки отдаленных акваторий Мирового океана без берегового опорного пункта и, при необходимости, сократить количество относительных гравиметров на борту.

6. Предлагаемые методические приемы позволяют экономить ресурсы и выполнять камеральную обработку измерений с составлением отчета непосредственно на борту судна.

8. Возможности моделей гравитационного поля Земли и предложенные методические приемы должны быть учтены при подготовке новой редакции инструкции по морской гравиметрической съемке, отвечающей современным условиям выполнения работ.

9. Возможным продолжением научной работы по теме настоящей диссертации будет дальнейшая проверка и выработка критериев использования моделей гравитационного поля Земли и приливных океанических явлений на различных геологических структурах Мирового океана.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Железняк Л.К., **Михайлов П.С.** Использование КНС для учета прилива при измерениях силы тяжести на море // Физика Земли. - 2012. - №6. - С.90.
2. Железняк Л.К., **Михайлов П.С.**, Соловьев В.Н. Морские измерения силы тяжести без привязки к береговым опорным пунктам // Физика Земли. - 2014. - №2. - С. 63.
3. Железняк Л.К. Конешов В.Н., **Михайлов П.С.**, Соловьев В.Н. Использование модели гравитационного поля Земли при измерениях силы тяжести на море // Физика Земли. - 2015. - №4. - С.103.
4. Железняк Л.К. Конешов В.Н., **Михайлов П.С.** Экспериментальное определение вертикального градиента силы тяжести ниже поверхности моря // Физика Земли. - 2016. - №6. - С.83.

Материалы и тезисы конференций:

5. **Михайлов П.С.**, Железняк Л.К., Соловьев В.Н. Современные методы обработки гравиметрических измерений // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана» НАН Украины. - 2013.
6. **Михайлов П.С.**, Железняк Л.К., Соловьев В.Н. Современная морская гравиметрия // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, кадастр и ГИС – проблемы и перспективы развития» Полоцкий Государственный университет. - 2016.
7. Конешов В.Н., Железняк Л.К., **Михайлов П.С.** Использование моделей аномального гравитационного поля при выполнении морской гравиметрической съемки // Материалы 44-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». - 2017.

8. Zheleznyak L.K., **Mikhaylov P.S.**, Solovyev V.N. Estimation and correction of marine gravity measurements based on the model of gravitational field // Сборник материалов симпозиума Международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных основаниях» (TG-SMM2013) State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor. - 2014.

Подписано в печать 27.02.2017

Объем: 1 усл. печ. л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии «Реглет»
125009, г. Москва, Страстной бульвар, д. 4