

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Пугин

ГРАВИРАЗВЕДКА

Часть II

*Допущено методическим советом
Пермского государственного национального
исследовательского университета в качестве
учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению подготовки бакалавров «Геология»
и специальности «Технологии геологической разведки»*



Пермь 2019

УДК 550.312

ББК 26.212

П88

Пугин А.В.

П88 Гравиразведка [Электронный ресурс]: учеб. пособие: в 2 ч. / А. В. Пугин; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Электрон. дан. – Пермь, 2019. – Ч. 2. – 10,1 Мб; 94 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/pugin-graviravezdka-ch-2.pdf>. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7944-3409-5

ISBN 978-5-7944-3411-8 (Ч. 2)

Рассмотрены основные аспекты предполевого и полевого этапов гравиметрических исследований. Приведены основные принципы составления геологического задания, проектов и смет. Подробно изложены все этапы выполнения наземной гравиметрической съемки и процедуры текущей обработки полевых материалов. Описаны источники помех и погрешностей в измеренных данных. Разъяснен физический смысл поправок и даны необходимые формулы для коррекции наблюдаемых значений силы тяжести.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Геология» и специальности «Технологии геологической разведки».

Табл. 1. Ил. 36. Библиограф. 16 назв.

УДК 550.312

ББК 26.212

*Издается по решению ученого совета геологического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Рецензенты: кафедра геофизики ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (и.о. зав. каф. – канд. геол.-минерал. наук **А. А. Иванов**);

главный научный сотрудник Горного института УрО РАН, д-р физ.-мат. наук, доцент **А. С. Долгаль**

ISBN 978-5-7944-3409-5

ISBN 978-5-7944-3411-8 (Ч. 2)

© Пугин А. В., 2019

© ПГНИУ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ПРЕДПОЛЕВЫЕ И ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ	
Глава I. Предполевые работы	6
§1. Составление геологического задания, проекта и сметы работ	6
§2. Организация работ.....	9
Глава II. Полевые работы. Наземная гравиметрическая съемка.	11
§1. Государственная гравиметрическая сеть	13
§2. Полевая опорная сеть	18
§3. Рядовая сеть	23
§4. Методики наблюдений	25
§5. Выполнение гравиметрической съемки	28
Подготовка к работе гравиметра Autograv CG-5.....	32
Выполнение измерений с гравиметром Autograv CG-5	41
§6. Топографо-геодезические работы	47
Глава III. Источники погрешностей и помех при гравиметрических наблюдениях	50
Глава IV. Текущая обработка данных наземной гравиметрической съемки.....	60
§1. Обработка наблюдений в опорных и рядовых рейсах	60
§2. Контроль качества съемки и оценка точности наблюдений	70
Глава V. Ввод поправок в наблюденные значения силы тяжести.....	73
§1. Учет нормального поля.....	73
§2. Поправка за высоту пункта наблюдений	74
§3. Поправка за промежуточный слой	77
§4. Поправка за притяжение небесных тел	83
§5. Другие поправки	86
§6. Составление каталога гравиметрических наблюдений и построение предварительной карты (графиков) аномалий силы тяжести.....	89
Список литературы.....	93

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мир меняется, возникают новые идеи, изобретения и геофизика, являясь прикладной наукой, не стоит на месте. Развивается система образования. Появляются новые требования, заставляющие порой кардинально переосмыслить материал, преподносимый преподавателем своим ученикам. Технический прогресс обуславливает формирование новых компетенций, значительная часть из которых носит прикладной характер. Это вполне логично, поскольку деятельность большинства людей, закончивших университет, связана именно с практическим, профессиональным применением знаний, полученных за годы обучения.

С конца XX в. геофизика сделала значительный рывок относительно применения вычислительной техники. Оборудование, которое стало «умным», способно существенно облегчить работу оператора. Автоматизация и повышение разрешающей способности аппаратуры привели к упрощению методик экспериментальных наблюдений.

Использование компьютеров позволило снизить трудоемкость многих задач, отнимавших значительное время в эпоху «ручного счета». За последние десятилетия отрасль пережила настоящий бум создания компьютерных технологий обработки и интерпретации геолого-геофизических данных. Многие методы, написанные на бумаге, наконец-то обрели свое законное место в инструментарии специалиста-геофизика.

В современных реалиях профессионалу необходимо не столько запоминание вывода тех или иных математических формул, сколько понимание заложенного в них смысла и их предназначения, умение найти эти формулы в глобальном информационном поле и грамотно применять, знать технологию работы с оборудованием и методики выполнения полевых работ, уметь правильно обрабатывать и интерпретировать экспериментальные данные.

Несомненно и то, что теоретические основы геофизических методов остаются неизменными, значительная часть материала старых учебников актуальна и по сей день, а качество изложения в них зачастую намного выше, чем в большинстве современных книг и учебных пособий. Основная задача автора-составителя данного учебного пособия заключается в тщательном отборе и обобщении наиболее полезной информации из учебников предыдущих поколений, книг и статей в области гравиразведки и смежных

областей знаний, обогащении этого материала собственным опытом и опытом коллег-геофизиков.

Вторая часть учебного пособия содержит сведения о предполевом и полевым этапам работ, необходимые для профессиональной деятельности геофизика-оператора при производстве гравиметрических съемок. Рассматриваются методики производства наземной гравиметрической съемки, процедуры текущей обработки полевых материалов.

Данное издание предназначено для обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Геология» и специальности «Технологии геологической разведки». Как источник базовых знаний пособие может быть полезно обучающимся по направлению подготовки магистров «Геология», преподавателям геологических факультетов, обучающих гравиразведке, и специалистам, применяющим данный метод в своей профессиональной деятельности.

Часть вторая. ПРЕДПОЛЕВЫЕ И ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

ГЛАВА I. ПРЕДПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

Предполевой этап очень важен. От того, насколько грамотно будет проводиться подготовка, зависит выполнение всей программы работ и поставленной геологической задачи. В тексте данной и последующих глав используются положения инструкции по гравиразведке и других регламентирующих документов, сформулированные на основании знаний и многолетнего практического опыта геофизиков.

§1. СОСТАВЛЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ, ПРОЕКТА И СМЕТЫ РАБОТ

Организация, заказывающая работы, выдает геологическое задание на объект, которое предшествует проекту и смете и является основным документом, определяющим состав и объем проектируемых геологоразведочных работ. Геологическое задание, являясь приложением №1 к договору, отвечает на вопрос, «что нужно сделать», а проект детализирует, «как нужно сделать» то, что описано в геологическом задании.

Основопологающим принципом разработки геологического задания на объект исследований является его предельная конкретность. В случае сложности достижения поставленной цели геологическое задание следует подразделить на ряд последовательно решаемых конкретных задач. При этом решение каждой последующей задачи должно быть зависимым от результатов предшествующих работ.

В геологическом задании необходимо указать, какая новая информация об объекте (по его конкретным параметрам) будет получена в результате выполнения проектируемых работ, достоверность и уровень значимости параметров оценки объекта.

Геологическое задание разрабатывается на основе анализа практических решений ранее выполненных работ, оценки и обобщения их результатов и построения входной (проектной) модели объекта.

Обязательными разделами геологического задания являются:

- целевое назначение работ, пространственные границы объекта и основные оценочные параметры;
- геологические задачи, последовательность и сроки их выполнения, основные методы их решения (в случае необходимости), перечень инструкций и технических требований, обязательных при выполнении работ;
- формы и тираж отчетной документации, сроки завершения работ, наименование организаций, апробирующих отчет, и порядок апробации.

Проект является основным документом, определяющим работу на всех этапах исследований. Название проекта должно соответствовать геологическому заданию и отражать наименование объекта геологоразведочных работ.

В проекте должна быть сформулирована геологическая задача работ, в зависимости от которой, а также от физико-геологических условий района работ, ожидаемого гравитационного эффекта и типа применяемой аппаратуры должны быть определены:

- методика съемки;
- способы изучения плотностного строения разреза;
- способы обработки и интерпретации материалов;
- ожидаемые результаты.

Под методикой съемки в совокупности понимают:

- вид съемки;
- точность съемки, масштаб и сечение изоаномал отчетной карты, масштаб графиков при профильной съемке;
- система расположения и густота рядовых пунктов наблюдений, система исходных и опорных пунктов;
- техника полевых измерений;
- точность и способы проведения топографо-геодезических работ.

Проект должен содержать необходимые сведения о географии, геологии, геофизической изученности района и все имеющиеся сведения о плотностной характеристике разреза. При проектировании необходимо обосновать категорию местности и выбрать наиболее экономичный вид транспорта (либо пешеходную съемку), обеспечивающий требуемую точность работ.

Проект должен содержать следующие основные графические приложения:

- обзорную карту района работ;
- сводный геолого-геофизический разрез района с выделением основных плотностных границ (по возможности);
- схему геологической и геофизической изученности района;
- схему расположения гравиметрических профилей на геологической или структурно-тектонической картах, а также на предварительной топографической основе;
- схему расположения опорных пунктов.

Гравиметрическая съемка может быть площадной либо профильной. Площадной называется съемка, результаты которой позволяют построить карту изоаномал силы тяжести на всей изучаемой площади. Неравномерность сети наблюдений при съемке, определяемая геологическими и другими особенностями территории (гидрографическая сеть, сложный рельеф, заболоченность, городские и промышленные застройки и пр.), не должна снижать достоверность карты. Соотношение расстояний между пунктами по профилю и отдельными профилями не должно быть меньше 1 : 5. В противном случае съемка будет считаться профильной в связи с невозможностью построить достоверную карту аномалий силы тяжести с требуемой детальностью. Площадная съемка, которая показывает наиболее полную картину гравитационного поля, является предпочтительной по отношению к профильной. При региональных работах и в труднодоступной местности выполняется маршрутная съемка по дорогам, долинам и т.п.

Проектная точность съемки (среднеквадратическая погрешность определения аномалий силы тяжести) выбирается в зависимости от интенсивности предполагаемых или исследуемых аномалий, а также условий работ и заданного масштаба съемки. Среднеквадратическая погрешность определения аномалий силы тяжести или ее производных не должна превышать при поисковой съемке $1/5$, а при региональной – $1/3$ минимальной величины локальных аномалий гравитационного поля, создаваемых искомыми объектами.

Профили наблюдений ориентируются вкрест простирания изучаемых объектов. Густота сети пунктов наблюдений зависит от задач съемки, размеров и интенсивности ожидаемых аномалий, выбранного сечения изоаномал отчетной карты. Аномалия силы тяжести считается достоверной, если она выделена не менее чем на трех пунктах и имеет амплитуду не меньшую

сечения изоаномал карты. В случае коррелируемости более слабых аномалий на трех и более профилях они могут считаться достоверными.

Соотношения между масштабом отчетных карт и графиков, сечением изоаномал, среднеквадратической погрешностью определения аномальных и наблюдаемых значений силы тяжести, густотой сети пунктов наблюдений для равнинных и горных районов приводятся в табл. Следует отметить, что с появлением точной измерительной аппаратуры требования к точности работ существенно возросли. В настоящее время реально достижимая на практике среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений при масштабах съемки 1 : 50 000 и 1 : 25 000 не превышает $\pm 0,02-0,03$ мГал, а для съемок крупнее 1 : 10 000 – не более $\pm 0,01-0,02$ мГал.

Смета составляется на весь объем геологоразведочных работ и затрат, предусмотренных проектом. Сметная стоимость работ складывается из основных расходов, накладных расходов, плановых накоплений, компенсируемых затрат, подрядных работ и резерва на непредвиденные расходы.

§2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

За работу партии или отряда в целом всегда отвечает начальник партии (отряда), которому подчиняются все сотрудники. В течение организационного периода подготавливаются необходимая аппаратура и техника, планируются порядок полевых работ, доставки людей и техники на геофизическую базу, при необходимости порядок строительства объектов базы, обеспечение людей продуктовым довольствием и удовлетворение других бытовых потребностей, обеспечение техники горюче-смазочными материалами, бесперебойной подачей электроэнергии и др.

Организация работ является очень важным этапом. От грамотного планирования зависят человеческие жизни и безопасность проведения работ, выполнение геологического задания и прибыль организации-исполнителя. Рекогносцировка местности перед выполнением работ крайне желательна, а если выполнить ее не представляется возможным, необходимо собрать всю информацию о местности и ее освоении человеком. Неграмотное планирование чревато перерасходом времени, человеческих ресурсов и существенными финансовыми затратами, которые компенсируются из прибыли исполнителя вплоть до причинения прямого убытка.

Соотношения между основными характеристиками гравиметрической съемки

Масштаб отчетных карт и графиков	Сечение изоаномал, мГал	Среднеквадратическая погрешность определения аномалий силы тяжести в редукции Буге, мГал	Среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести, мГал	Среднеквадратическая погрешность определения высот, м	Среднеквадратическая погрешность определения координат пунктов относительно Государственной геодезической сети, м	Густота сети	
						Число пунктов на 1 км ²	Расстояние между пунктами при наблюдениях по профилю, м
ДЛЯ РАВНИННЫХ РАЙОНОВ							
1 : 500 000	5	±1,5	±0,5	±5,0	±200	0,04-0,10	2500-5000
1 : 200 000	2	±0,8	±0,4	±2,5	±100	0,10-0,25	1000-2000
1 : 100 000	1	±0,4	±0,3	±1,2	±80	0,25-1,00	500-1000
1 : 50 000	0.50	±0,20	±0,15	±0,70	±40	2-30	100-500
	0.25	±0,10	±0,07	±0,35	±40	4-50	50-250
1 : 25 000	0.25	±0,10	±0,06	±0,35	±20	12-60	50-250
	0.20	±0,08	±0,06	±0,25	±20	16-80	20-100
1 : 10 000	0.20	±0,08	±0,06	±0,20	±4	20-100	20-100
	0.10	±0,04	±0,03	±0,10	±4	25-200	10-50
1 : 5 000	0.10	±0,04	±0,030	±0,10	±2	50-250	10-50
	0.05	±0,02	±0,015	±0,05	±2	100-500	5-25
ДЛЯ ГОРНЫХ РАЙОНОВ							
1 : 500 000	5	±2,0	±0,5	±3,00	±120	0,04-0,10	2500-5000
1 : 200 000	2	±1,0	±0,40	±3,00	±100	0,10-0,25	1000-2000
1 : 100 000	1	±0,50	±0,25	±1,80	±100	0,25-1,0	500-1000
1 : 50 000	1	±0,50	±0,25	±1,60	±50	1,0-10	100-500
	0.50	±0,25	±0,12	±0,90	±50	2-30	50-250
1 : 25 000	0.50	±0,25	±0,12	±0,90	±25	4-50	50-250
	0.25	±0,12	±0,06	±0,45	±25	12-60	20-100
1 : 10 000	0.20	±0,10	±0,06	±0,25	±5	20-100	20-100
1 : 5 000	0.10	±0,05	±0,03	±0,12	±2	50-250	10-50

ГЛАВА II. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ. НАЗЕМНАЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

До внедрения в геофизическую практику гравиметров широко применялись съемки с гравитационными вариометрами и градиентометрами. Однако ввиду низкой производительности они вскоре были вытеснены измерениями с гравиметрами. В данном разделе рассматривается наземная гравиметрическая съемка. Остальные модификации метода гравиразведки будут описаны в четвертой части данного издания.

Говоря о съемке с гравиметрами, будем иметь в виду не абсолютные измерения силы тяжести, которые могут быть выполнены маятниковыми системами или баллистическими гравиметрами, а относительные измерения. Именно этот вид съемки благодаря высокой производительности наиболее распространен в практике геологоразведочных работ. Ранее были подробно рассмотрены устройство и принцип действия трех гравиметров, предназначенных для относительных измерений силы тяжести. Напомним, что в относительных измерениях получают не абсолютное значение силы тяжести, а некоторое ее изменение (приращение) относительно опорной точки либо системы опорных точек. Если абсолютное значение силы тяжести на пунктах опорной сети известно, то зная его, нетрудно вычислить абсолютные значения во всех точках измерений, связав их с опорными. Если абсолютное значение силы тяжести на пунктах опорной сети неизвестно, съемку выполняют в условном уровне, приняв значение на одном из них за ноль.

Полевые измерения при наземной гравиметрической съемке выполняются рейсами. Рейсом называется совокупность последовательных наблюдений на опорных и рядовых пунктах одним или группой гравиметров, объединенных непрерывным нульпунктом (в том числе ломаным), полученным по результатам измерений на опорных пунктах. Все измерения начинаются и заканчиваются на пунктах опорной сети. Часть рейса между двумя последовательными наблюдениями на опорных пунктах называется звеном. Основным типом рейса является однодневный. При работе в труднопроходимых районах допускается увеличивать продолжительность рейса с применением гравиметров со стабильным смещением нульпункта, обеспечивающим требуемую точность наблюдений.

В современной практике геофизических работ границы между понятиями рейса и звена стираются, и в полевом быту измерения на рядовых пунктах между двумя последовательными наблюдениями на опорных пунктах часто

называют рейсом, а не звеном. Тем не менее в инструкции по гравirazведке (1980) термин «звено» употребляется как самостоятельный, и с ним связано понимание многих важных моментов в тексте данного регламентирующего документа.

Прежде чем перейти к обсуждению полевых наблюдений, отметим следующее: согласно утвержденным правилам поверки аппаратуры необходимо ежегодно выполнять эталонирование гравиметров на специальном аттестованном гравиметрическом полигоне. Это позволяет контролировать работоспособность прибора и определять его рабочие характеристики, которые изменяются с течением времени, например, цена деления измерительной шкалы.

Груз, подвешенный на пружине без фиксации, создает постоянную нагрузку, находясь под которой пружина постепенно стареет, теряет свои упругие свойства и деформируется. Представим, что груз подвешен на каучуковой линейке с миллиметровыми отметками длины. Постепенно линейка растягивается под весом груза и через определенное время ее миллиметр уже не равен стандартному миллиметру. Приложив к линейке с грузом стандартную неизмененную линейку, можно заметить, что, к примеру, через месяц, одно миллиметровое деление на линейке с грузом уже равно 1,1 стандартного миллиметра, а затем, по прошествии некоторого времени, равно 1,2 мм и т.д.



Рис. 2.1. Эталонирование гравиметров в зимнее время. Приборы установлены на бетонном постаменте пункта гравиметрического полигона

Для метрологической поверки гравиметра и его эталонирования используется не линейка, а гравиметрический полигон, пункты которого отстоят друг от друга на определенное расстояние и представляют собой квадратные бетонные постаменты со стороной 1 метр и известными значениями силы тяжести (рис. 2.1). Выполнив рейс с гравиметром на данном полигоне, можно определить цену деления его измерительной шкалы. Обычно при эталонировании выполняется не менее трех рейсов с одним прибором для получения статистически достоверных оценок. В России существуют известные автору Нижне-Тагильский и Казанский гравиметрический полигоны. Значения силы тяжести на пунктах полигона хранятся в архивах специализированного предприятия, имеющего право выполнять поверку.

На сайте <https://fgis.gost.ru> указано, что гравиметр Autograv CG-5 подлежит обязательной поверке с интервалом один раз в два года. В паспорте данного средства измерения указана новая методика поверки МП 253-14-213 «Гравиметр CG-5 Autograv», утвержденная ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» 26.11.2014 г. В качестве основного средства поверки указана установка для передачи единицы ускорения относительным гравиметрам инерциальным методом из состава ГЭТ 190-2011. Текст данной методики на момент написания учебного пособия отсутствует в интернете в свободном доступе. Оценить ее преимущества и недостатки в сравнении с эталонированием на гравиметрическом полигоне не представилось возможным.

§1. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ

При выполнении полевой гравиметрической съемки создается сеть гравиметрических пунктов. При необходимости приведения наблюдений к единому абсолютному уровню значений силы тяжести полевая сеть привязывается к государственной гравиметрической сети (ГГС). Государственная гравиметрическая сеть является основой для выполнения гравиметрических исследований, с целью изучения гравитационного поля и фигуры Земли, их изменений во времени, а также метрологического обеспечения гравиметрической съемки. Она служит для распространения на территорию России единой гравиметрической системы и создается специализированными организациями.

ГГС представляет собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов с известными значениями

силы тяжести, координат и высоты. Она подразделяется по точности на государственную фундаментальную гравиметрическую сеть (ГФГС) и государственные гравиметрические сети первого (I), второго (II) и третьего (III) классов.

ГФГС является высшим звеном гравиметрической сети России и служит для определения и уточнения гравиметрической системы страны, ее связи с мировой и зарубежными гравиметрическими системами, для метрологического обеспечения гравиметрических сетей низших классов и гравиметрической съемки России.

Высшим звеном всей структуры координатного обеспечения территории России является фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС). Поэтому все пункты ФАГС, где определены координаты, высота и абсолютное значение силы тяжести, одновременно являются пунктами ГФГС. Средняя плотность размещения пунктов ГФГС в этом случае составит 1 пункт на 0,5-1,0 млн. км² (рис. 2.2).

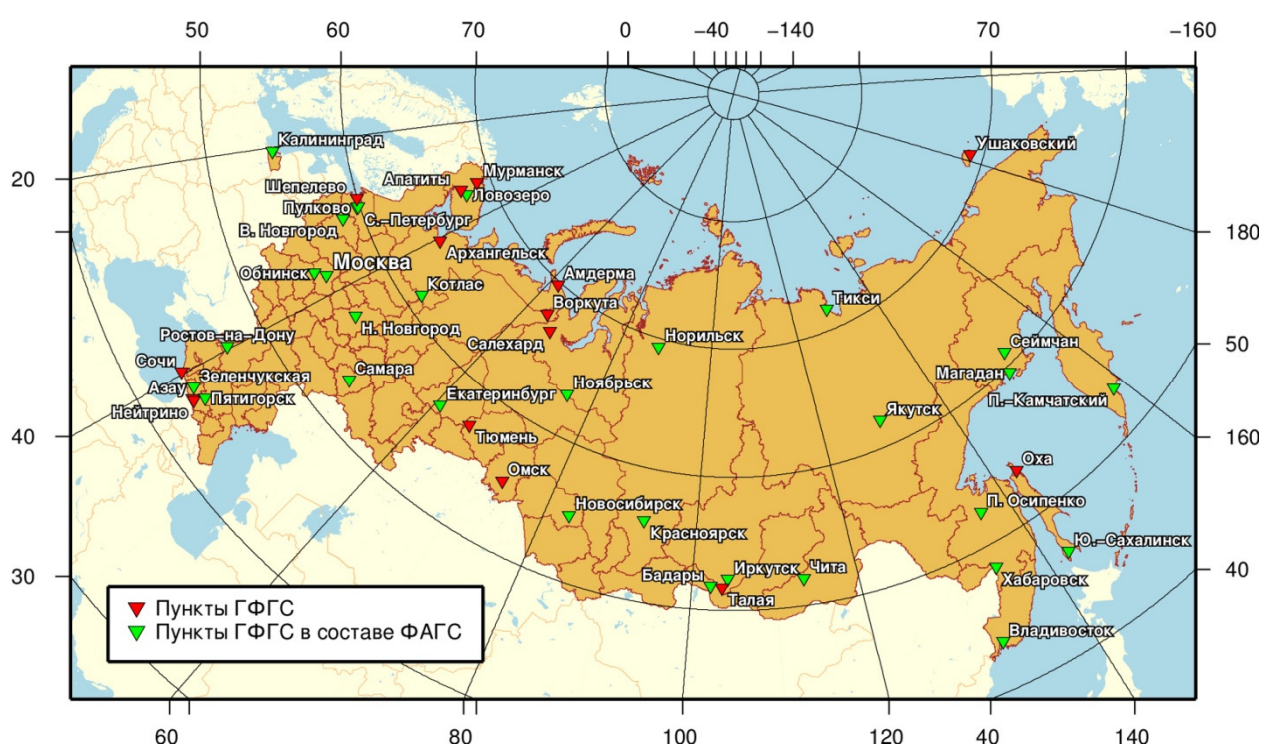


Рис. 2.2. Расположение пунктов государственной фундаментальной гравиметрической сети¹

Основной научной задачей, решаемой с помощью фундаментальной сети, является изучение изменений гравитационного поля во времени. С этой целью

¹ Изображение с открытого интернет-ресурса https://geod.ru/research/gravnet/#_1.

на фундаментальных пунктах (ФП), размещаемых в различных геолого-тектонических регионах, систематически выполняются абсолютные и относительные определения силы тяжести с максимально возможной на данный момент точностью. Один из пунктов ГФГС, расположенный в Москве, на котором имеется продолжительный ряд повторных определений силы тяжести, является главным гравиметрическим пунктом (ГГП) России.

Пункты первого класса представляют собой следующий уровень в иерархии гравиметрической системы страны и предназначены для распространения с требуемой точностью принятой гравиметрической системы на всю территорию России (рис. 2.3). Построение ГГС I класса выполняют поэтапно; на первом этапе определяют от пунктов ГФГС основные пункты I класса с густотой сети один пункт на 50–100 тыс. км². Результаты измерений на основных пунктах I класса и пунктах ГФГС уравнивают совместно и каталогизируют. Затем выполняют сгущение сети до плотности один пункт на 10–25 тыс. км² путем вставок отдельных пунктов в созданную ранее сеть. После завершения работ по сгущению сеть I класса вновь уравнивают совместно с ГФГС как единое построение и издают новый каталог, включающий все пункты ГФГС, ФАГС и ГГС I класса.

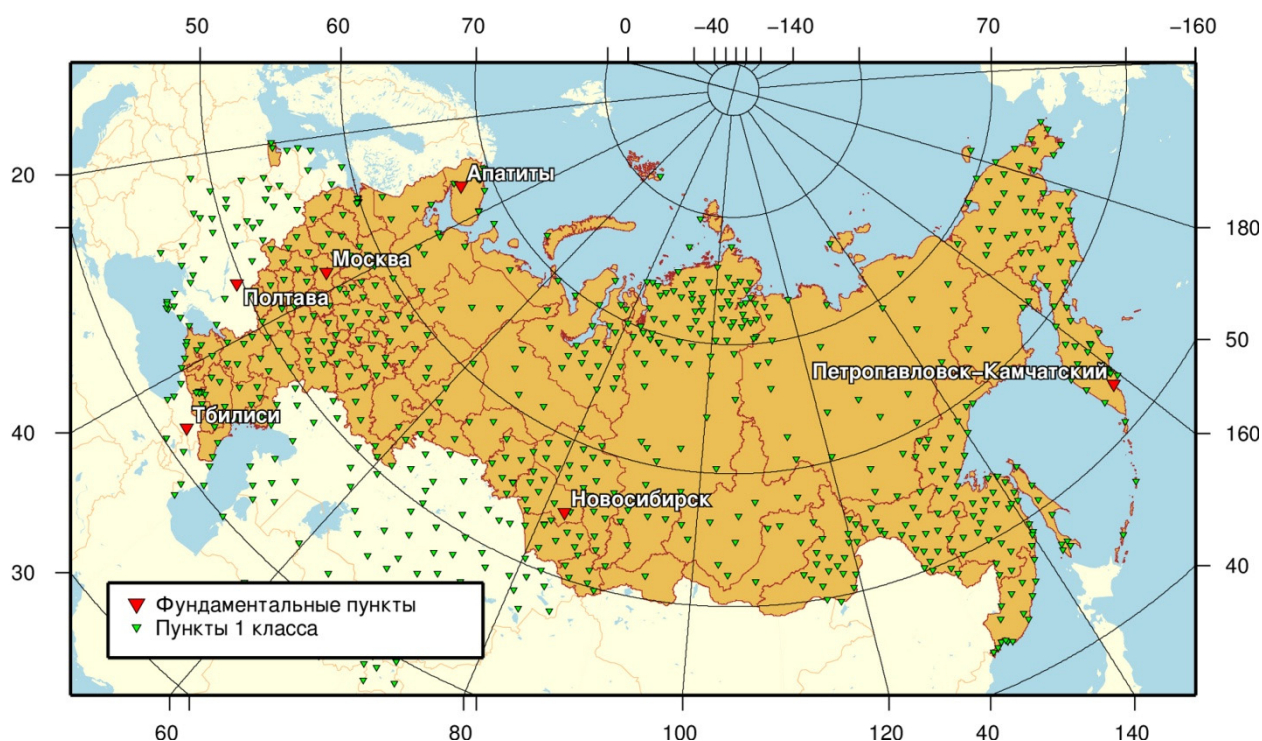


Рис. 2.3. Расположение фундаментальных пунктов и пунктов I класса²

² Изображение с открытого интернет-ресурса https://geod.ru/research/gravnet/#_1.

Для обеспечения максимально возможной точности измерений и долговременной сохранности фундаментальных пунктов и пунктов I класса их размещают в капитальных зданиях, рассчитанных на длительную эксплуатацию. По возможности ФП размещают в астрономических и геофизических обсерваториях или поблизости от них. Исключение допускается лишь при расположении пунктов I класса в малонаселенной местности, где они размещаются во временных помещениях или на открытом воздухе. Каждый гравиметрический пункт ГФГС и I класса оборудован бетонным постаментом, обеспечивающим устойчивую поверхность наблюдений, и центральной маркой для позиционирования прибора (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Измерения на пункте ГГС I класса

В центре помещения на бетонном постаменте расположены один баллистический гравиметр A10 (Scintrex Ltd.) для абсолютных измерений силы тяжести, два гравиметра Autograv CG-5 (Scintrex Ltd.) для относительных измерений силы тяжести и два широкополосных сейсмометра (фото из личного архива автора).

Гравиметрические пункты II и III класса составляют нижний уровень иерархии ГГС и предназначены для метрологического обеспечения гравиметрических съемок в отдельных регионах страны. Обычно эти пункты совмещаются с пунктами государственной либо местной геодезической сети и закреплены на открытой местности долговременными знаками, обеспечивающими их сохранность (рис. 2.5). Пункты второго класса обычно располагаются в окрестности объектов федерального или регионального значения (зданий аэропортов, вокзалов и т.д.). Плотность сети должна обеспечивать решение прикладных задач гравиразведки в данном регионе. Расстояние между пунктами II класса составляет от 100 до 300 км, между пунктами местной гравиметрической сети III класса — от 2 до 16 км. Сети прикладного значения развиваются в процессе гравиметрических съемок, чтобы обеспечить наилучшее качество метрологического обеспечения. В настоящее время часть пунктов III класса утеряна, поскольку в 1990-е гг. их сохранность не была должным образом обеспечена.



Рис. 2.5. Пункт ГГС III класса

Бетонная свая с центральным маркером и окопкой одновременно является пунктом государственной геодезической сети. С момента создания сети свая, ранее возвышавшаяся над земной поверхностью, ушла в землю на глубину около 0,5 м.

§2. ПОЛЕВАЯ ОПОРНАЯ СЕТЬ

При выполнении гравиметрической съемки сеть пунктов наблюдений подразделяется на полевою опорную и рядовую. Полевая опорная сеть — это сеть гравиметрических пунктов повышенной точности, служащая для учета смещения нуляпункта в рядовых рейсах и приведения съемки к единому уровню. Именно полевая сеть в случае необходимости привязывается к ГГС. Очень часто пункты ГГС III класса используются в качестве центральных или входят в состав опорной сети.

Опорные гравиметрические пункты (ОГП) должны легко и надежно опознаваться на местности, иметь удобные подъезды и подлеты. По возможности их следует совмещать со знаками триангуляции, реперами государственного нивелирования или с другими долговременными предметами.

Сеть опорных пунктов создается как в начале полевых работ, так и в процессе съемки. Основной методикой наблюдений на опорной сети следует считать методику однократных измерений по схеме 1-2-3-...-1. Каждый опорный пункт наблюдается не менее чем в двух независимых рейсах (звеньях). Независимыми называются наблюдения, выполненные в независимых рейсах (звеньях), не связанные общим учетом изменения нуляпункта. Наиболее часто применяются следующие системы наблюдений: центральная — наиболее простая и надежная; двухступенчатая и полигональная.

Центральной называется такая система измерений (рис. 2.6), в которой каждый опорный пункт имеет непосредственную связь с пунктом, принятым за центральный (ЦОГП). Считается, что ОГП имеет непосредственную связь с ЦОГП независимо от количества пунктов в рейсе (звене) и последовательности их обхода. На каждый центральный пункт опорной сети в обязательном порядке создается кроки — схема с привязкой положения пункта на местности относительно нескольких (не менее трех с разных сторон) долговременных объектов. Пример кроки приводится на рис. 2.7.

Оценка точности опорных сетей, созданных по центральной системе, выполняется по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \frac{\varepsilon}{\sqrt{N_{\text{сп}}}}, \quad (2.1)$$

где ε — среднеквадратическая погрешность единичного измерения; $N_{\text{ср}} = N/n$ — среднее количество наблюдений на одном опорном пункте (средняя кратность); N — общее число измерений; n — число пунктов.

Значение ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{(N - n)}}, \quad (2.2)$$

где δ — отклонение измеренного значения силы тяжести от среднего.

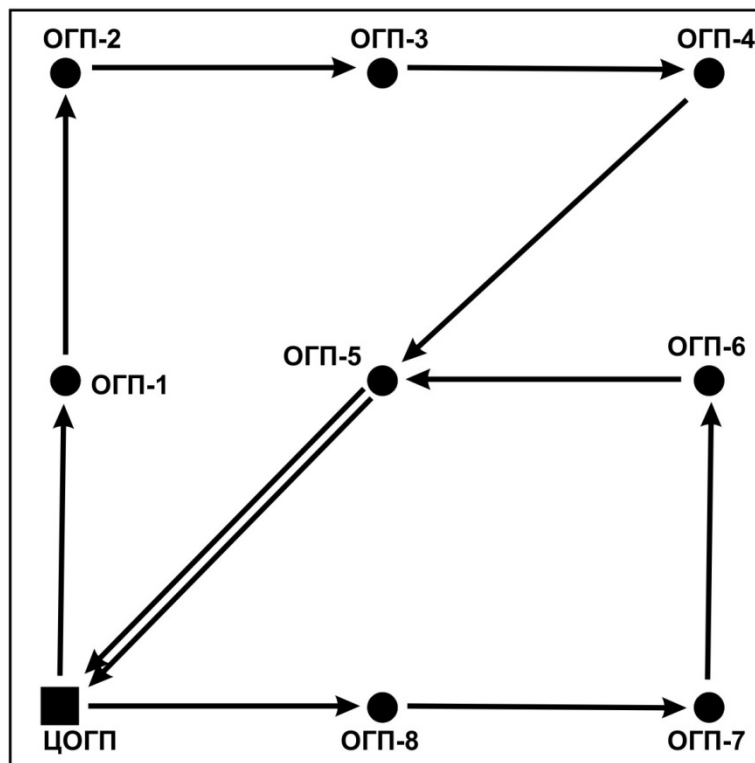


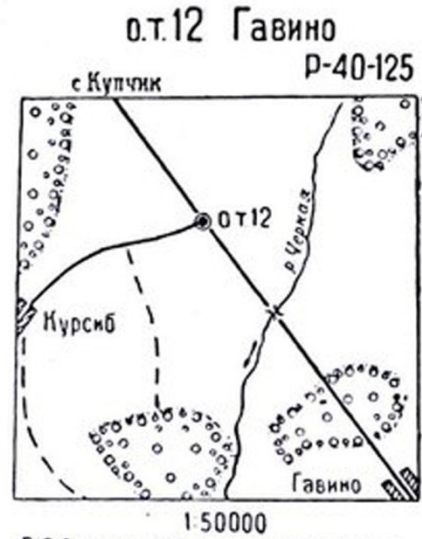
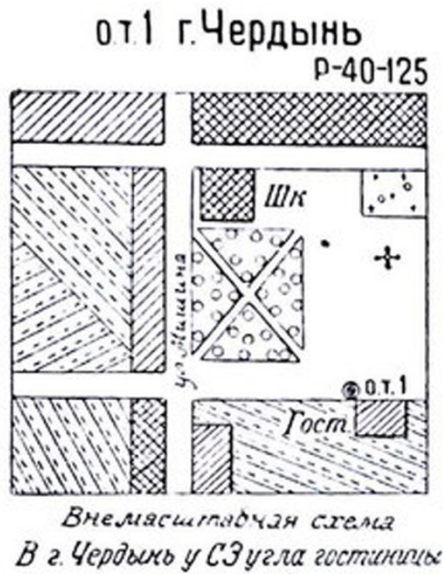
Рис. 2.6. Упрощенная схема развития опорной гравиметрической сети по центральной системе наблюдений (стрелками показано направление обхода)

При оценке точности опорной сети ЦОГП не входит в расчеты. Центральная система может быть и полигональной, если помимо независимых связей с ЦОГП опорные пункты имеют также независимые связи между собой. Любая опорная сеть, созданная по системе, отличной от центральной, создается лишь в случае невозможности создания сети по центральной системе.

Двухступенчатая система состоит из каркасной и заполняющей опорных сетей (рис. 2.8). Каркасные опорные сети (КОС) создаются по центральной системе. Заполняющие опорные сети (ЗОС) определяются рейсами, которые начинаются и заканчиваются на пунктах КОС.

ОБРАЗЦЫ КРОКИ

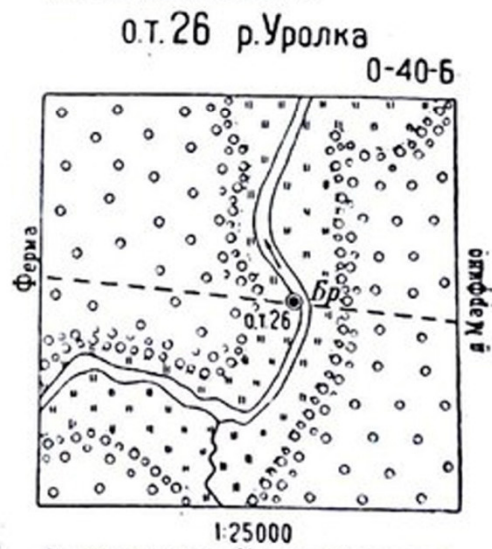
ОПОРНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ТОЧЕК



В 25 км на СЗ от северной окраины д. Гавино, на грунтовой дороге д. Гавино - с Купчик. В 950 м к СЗ от моста через р. Черная, у развилки дороги в д. Курсиб. Опорная точка совмещена с грунтовым репером (железная труба) нивелировки ВКП № 413



В селе Купчик, между 3^{им} и 4^{ым} кварталами среди улицы, против ворот дома Гордеева Ивана.



На левом берегу р. Уролки, на тропе из д. Марфино к коневодческой ферме в 7 км от этой деревни у брода. Опорная точка закреплена деревянным столбом с околкой

Рис. 2.7. Кроки опорных гравиметрических пунктов³

³ Выкопировка из технической инструкции по гравиметрической разведке. М., 1961. Приложение 6

Обычно двухступенчатая система создавалась при работе с гравиметрами ГНУ-КВ или КС, поскольку нелинейность и амплитуда смещения нуля этих приборов были достаточно высоки. Время рейса для них не должно было превышать 2–2,5 ч, и при больших размерах площади исследований требовалась достаточно густая опорная сеть. В настоящее время необходимость в двухступенчатой системе также может возникнуть при значительных размерах площади работ и труднодоступной местности.

Оценка точности опорных сетей, созданных по двухступенчатой системе, производится по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{n_{\text{к}}\varepsilon_{\text{к}}^2 + n_{\text{з}}(\varepsilon_{\text{к}}^2 + \varepsilon_{\text{з}}^2)}{(n_{\text{к}} + n_{\text{з}})}} = \pm \sqrt{\varepsilon_{\text{к}}^2 + \frac{n_{\text{з}}}{(n_{\text{к}} + n_{\text{з}})}\varepsilon_{\text{з}}^2}, \quad (2.3)$$

где $n_{\text{к}}, n_{\text{з}}$ — число каркасных и заполняющих опорных пунктов, $\varepsilon_{\text{к}}, \varepsilon_{\text{з}}$ — среднеквадратические погрешности определения силы тяжести соответственно на каркасных и заполняющих опорных пунктах, вычисленные по формуле (2.1).

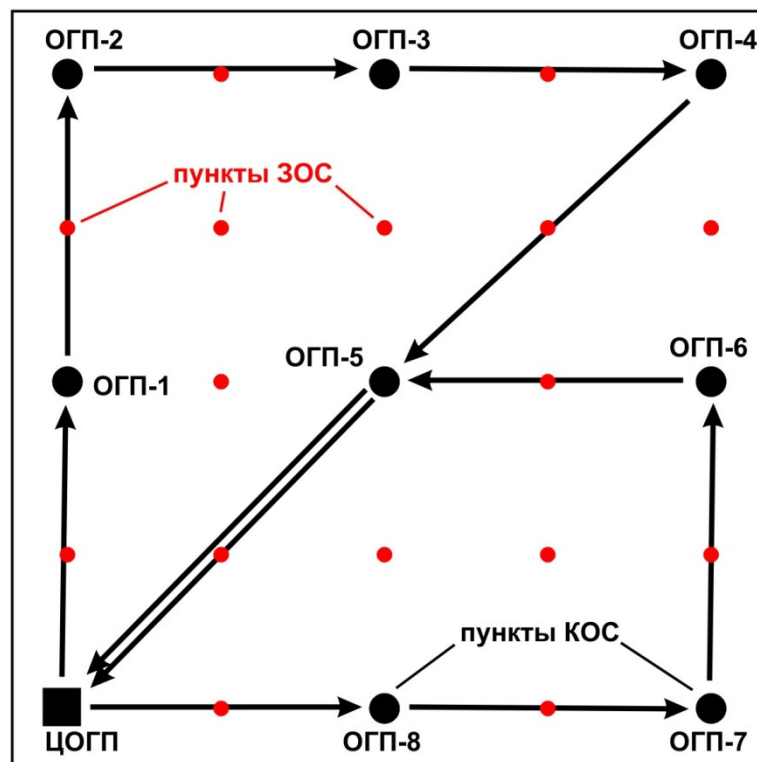


Рис. 2.8. Упрощенная схема развития опорной гравиметрической сети по двухступенчатой системе наблюдений

Полигональной называется такая система измерений, при которой опорная сеть образуется из совокупности полигонов со сторонами, каждая из которых определена в независимых рейсах (звеньях) по схеме 1-2-1 (рис. 2.9).

Предпочтительными являются полигоны с малым числом сторон. Полигоны опорных сетей уравниваются по методу наименьших квадратов. Погрешность определения силы тяжести на опорных пунктах полигональной системы вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \mu \sqrt{\frac{M}{m}}, \quad (2.4)$$

где M — средняя удаленность ОП от ближайших исходных пунктов, выраженная в числе приращений; m — среднее число наблюдений силы тяжести между двумя смежными пунктами.

Значение μ вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{(N - S)}}, \quad (2.5)$$

где S — число сторон, образующих все полигоны опорной сети.

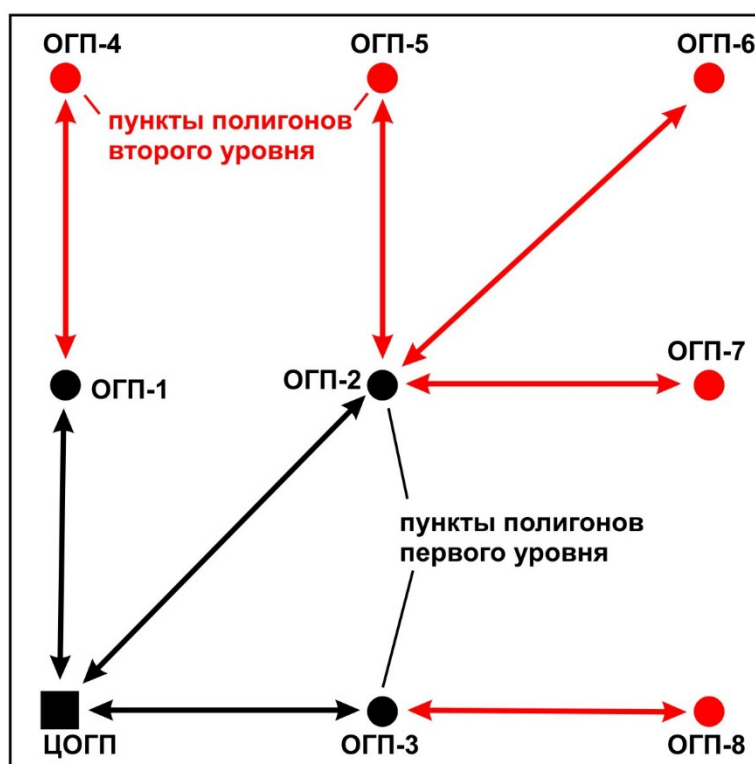


Рис. 2.9. Упрощенная схема развития опорной гравиметрической сети по полигональной системе наблюдений

Необходимость создания полигональной сети обусловлена труднодоступностью района работ и значительными размерами площади исследований. Следует помнить, что погрешность определения значений силы

тяжести на пунктах полигонов каждого последующего уровня развития сети выше, чем на предыдущем уровне. Аналогичное замечание касается пунктов КОС и ЗОС при двухступенчатой системе наблюдений.

Густота опорной сети определяется исходя из необходимости обеспечения линейной интерполяции смещения нуляпункта гравиметра в рядовых рейсах между двумя соседними опорными пунктами. Проще говоря, расстояние между пунктами опорной сети должно быть таким, чтобы в промежутке времени между началом и окончанием рейса на опорных точках нелинейные эффекты смещения нуляпункта гравиметра были бы пренебрежительно малы и не оказывали существенного влияния на погрешность наблюдений.

Очевидно, что схема развития опорной сети зависит от характеристик применяемого гравиметрического оборудования. Так, для гравиметров ГНУ-КВ длительность рейса при среднемасштабной съемке составляла менее 2,5 ч, иначе нелинейный ход нуляпункта мог сказаться на точности определения наблюдаемых значений, поскольку поправка за смещение нуляпункта разбрасывается по наблюдениям внутри рейса линейно. Если число наблюдений на пункте больше трех и одно из значений силы тяжести отличается от среднего из остальных на величину, превышающую $3\varepsilon_0$, где ε_0 — это среднеквадратическая погрешность измерения с гравиметром, определяемая по результатам эталонирования на полигоне, то это наблюдение подлежало выбраковке. Число забракованных наблюдений не должно превышать 2% их общего количества.

§3. РЯДОВАЯ СЕТЬ

Рядовая сеть — сеть гравиметрических пунктов (ГП), значения силы тяжести на которых определяются в процессе гравиметрической съемки. Рядовые пункты располагаются между пунктами опорной сети. Основной формой сети наблюдений при площадной съемке должна являться квадратная, т. е. расстояние между профилями и пунктами по профилю выдерживается одинаковым. Отклонение от квадратной сети определяется геологическим строением участка, общей характеристикой местности (естественных и искусственных препятствий, таких как речная сеть и водоемы, болота, скалы, труднопроходимый лес, а в городе здания, инженерные коммуникации, промышленные объекты и пр.), характером предполагаемых аномалий силы тяжести (определяется по результатам моделирования, если существует возможность, то после анализа ранее выполненных съемок меньшего

масштаба). Если сеть прямоугольная, то отношение расстояний между профилями и пунктами по профилю при площадной съемке не должно превышать 5 : 1.

Наблюдения в рядовых рейсах должны проводиться, как правило, по методике однократных измерений. Учет смещение нуля выполняется по каждому звену рейса (или рейсу в случае, когда за единицу цикла между двумя последовательными измерениями на опорной точке принят рейс). Смещение нуля определяется по сопоставлению разности значений силы тяжести между начальным и конечным опорным пунктом с разностью твердых (опорных, т. е. определенных при создании опорной сети) значений. При наблюдениях могут применяться один, два и более гравиметров.

При проведении съемок в труднодоступных районах наблюдения должны производиться тремя гравиметрами одновременно, чтобы исключить необходимость повторного рейса в случае обнаружения брака в показаниях одного из приборов. Вероятность одновременного искажения показаний всеми тремя гравиметрами очень мала. На практике чаще всего используется пара приборов.

С целью оценки качества съемки в процессе полевых работ проводятся независимые контрольные наблюдения: в каждый последующий рейс попутно включаются один или несколько пунктов из предыдущих рейсов или выполняются специальные контрольные рейсы, секущие профили рядовой сети.

Контроль съемки считается представительным, если он выполнен в достаточном объеме и все рейсы (звенья рейсов) проконтролированы. Количество независимых наблюдений, выполненных для контроля качества работ, устанавливается техническим проектом, но не менее 5% общего объема рядовых наблюдений при съемках одним гравиметром, и обычно 3–5% при наблюдениях на каждом пункте двумя и более гравиметрами одновременно. Общее число проконтролированных пунктов не должно быть менее 50. Методика наблюдений в специальных контрольных рейсах аналогична обычным рядовым наблюдениям.

§4. МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Основной методикой наблюдений при производстве гравиметрических съемок является **методика однократных измерений (МОИ)**. Измерения на пунктах рядовой сети внутри рейса выполняют при передвижении в одном направлении от начального опорного пункта до конечного, без возврата и повторения. Учет смещения нуляпункта выполняют таким образом, как описано в §3. Данная методика наиболее популярна благодаря простоте исполнения и высокой производительности, что обеспечивается грамотным планированием системы наблюдений на этапе проектирования работ. Все остальные методики были разработаны исходя из каких-либо сложностей, приводящих к невозможности применения МОИ, иначе говоря, «не от хорошей жизни».

При измерениях по **методике с повторениями в обратном ходе** после завершения наблюдений на последнем ГП без замыкания на ОГП их повторяют на всех пунктах рядовой сети или в отдельных точках перемещаясь в обратном направлении, то есть от конечного ОПГ к начальному. По двум наблюдениям на каждом ГП строят прямые смещения нуляпункта. В качестве прямой учета смещения нуляпункта (редукционной прямой) в рейсе принимают средневзвешенное значение смещения, где весом служит время между измерениями на ГП.

Методика разработана с целью нивелировать недостатки опорной сети. В некоторых случаях невозможно развитие полноценной опорной сети. Рейс начинается на ОГП, но в его конечной точке по какой-либо причине не существует ОГП (например, вследствие труднодоступности), и оператор должен возвратиться на начальный опорный гравиметрический пункт для учета смещения нуляпункта гравиметра. Такой рейс называется «висячим». В этом случае длительность рейса увеличивается, может измениться рабочий режим между наблюдениями по профилю в прямом ходе, а гравиметр при этом переносится длительное время без измерений с конца профиля на его начало. Чтобы существенно не изменять рабочий режим и наилучшим образом учесть изменения нуляпункта внутри рейса, гравиметр не просто переносят, а повторяют наблюдения при перемещении в обратном ходе.

К недостаткам методики относится увеличение длительности рейса и, как следствие, вероятность увеличения нелинейности хода нуляпункта, параболическое смещение которого практически невозможно обнаружить в данном случае.

Методика с повторениями в прямом ходе (цикловая) заключается в периодическом возврате оператора на несколько шагов сети назад и повторении измерений при перемещении в прямом направлении по системе, например, 1-2-3-1-2-3-1-4-5-6-4-... Рейс повторяется короткими отрезками. При этом также возможен случай невыявления нелинейного смещения нуляпункта на коротких интервалах времени. Иногда цикловая методика включает несколько звеньев с разными точками в звеньях: 1-2-3-4-1-5-6-7-1-...

Методика разностного нуляпункта. Между пунктами КОС проводят одновременные наблюдения двумя гравиметрами в одних и тех же пунктах. По результатам измерений вычисляют разность отсчетов гравиметров и строят график разностного нуляпункта. В точках излома или перегиба графика выставляют опорные пункты ЗОС. После проведения измерений на этих пунктах рядовые рейсы переобрабатывают. Способ достаточно эффективен и позволяет обнаружить скачкообразные изменения нуляпункта одного из приборов. Однако однотипность нелинейного хода нуляпункта у двух приборов по данной методике не выявляется, например, однотипность, обусловленная общим воздействием изменения температуры окружающей среды на показания приборов, в которых отсутствует термостатирование кварцевой системы. Применение методики разностного нуляпункта позволяет уменьшить число опорных пунктов сети, но часто приводит к их резко неравномерному распределению на участке работ.

Методика съемки с минимумом опорных пунктов заключается в уравнивании гравиметрических наблюдений с учетом линейной составляющей смещения нуляпункта и отличается тем, что уравнивают не только сами значения поля силы тяжести, но и редуцированные прямые пересекающихся звеньев. Основной прием построения рейсов состоит в увеличении количества точек пересечения различных звеньев и рейсов, что позволяет иногда довольно успешно работать при малом числе опорных пунктов.

Методика измерения отдельных приращений (МИОП) представляет собой развитие цикловой методики с повторениями в прямом ходе. Измерения выполняют по схеме 1-2-1-2-3-2-3-4-3-..., а учет смещения нуляпункта производят на локальных участках между повторениями по линейному закону. Методика позволяет исключить системную нелинейную составляющую смещения нуляпункта, но одновременно снижает производительность работ. Особенность этой методики заключается в суммировании приращений, поэтому в середине интервала накапливаются погрешности, возникающие в

результате небольших случайных отклонений в показаниях гравиметра на каждом ГП.

Нелинейная составляющая смещения нуляpunkта современных гравиметров Autograv CG-5 весьма мала в сравнении с предыдущими поколениями приборов, поэтому необходимость применения методик наблюдений, отличных от МОИ, возникает крайне редко. Опорная гравиметрическая сеть может иметь малое количество пунктов, а при небольших размерах участка работ наблюдения выполняют от одного центрального пункта, чаще всего увязанного с государственной гравиметрической сетью.

В случае, когда привязка гравиметрических наблюдений к общегосударственной сети не требуется, рекомендуется все же выполнять ее с целью последующего возможного объединения ранее выполненной и будущих съемок на данной территории. Если на данном участке в будущем планируется повторное проведение гравиметрических наблюдений либо таковые будут производиться в окрестности участка работ, то для сопоставления новых съемок с ранее выполненными рекомендуется развитие опорной сети, состоящей из нескольких удаленных на примерно одинаковое расстояние друг от друга ОГП.

Значение силы тяжести на опорных гравиметрических пунктах может существенно измениться с течением времени вследствие различных процессов массопереноса в земной коре. В случае, когда гравиметрические наблюдения привязаны лишь к одному ЦОГП и не привязаны к общегосударственной сети, а истинное значение силы тяжести на ЦОГП изменится, в дальнейшем будет сложно увязать предыдущие измерения с новыми съемками.

Приведем пример: пусть абсолютное значение силы тяжести на ЦОГП в момент выполнения съемки было равно 981900,000 мГал, но поскольку данный пункт не был привязан к ГГС, при выполнении наблюдений значение силы тяжести на этой опорной точке было принято равным нулю. Предположим, что в силу протекания различных процессов, например, карстово-суффозионных, абсолютное значение силы тяжести на ЦОГП изменилось со временем и стало составлять 981900,050 мГал. Поскольку сведения о значении силы тяжести в абсолютной системе отсутствуют, и, следовательно, о ее изменениях. Принятое в таком случае за тот же ноль при последующих съемках условное значение силы тяжести на ЦОГП уже не

отражает произошедших изменений. Средний уровень новой съемки не будет соответствовать реальности.

§5. ВЫПОЛНЕНИЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

В действительности работа геофизика-оператора заключается не только в подготовке аппаратуры к измерениям и выполнению измерений. Много мелочей, не описанных в образовательной литературе, но рассмотренных в данном издании, слагают его ежедневный и кропотливый труд. В этом разделе в числе прочего излагается многолетний опыт гравиметристов, накопленный в Горном институте Уральского отделения РАН («ГИ УрО РАН»).

Так, по приезду на площадку, удаленную от основной базы организации, желательно выделить один день до производства работ, как метрологический. Кварцевая система гравиметра после транспортировки должна «отдохнуть» и «привыкнуть» к новым условиям, новому аномальному полю, характерному для исследуемой площади.

При производстве гравиметрических работ в шахтах и рудниках, спуск гравиметра под землю перемещает его кварцевую систему в место, где сила тяжести увеличена по отношению к земной поверхности. При этом кварцевая пружина (или пружины) испытывает большее натяжение, а нелинейная составляющая дрейфа нуля измерительной системы увеличивается. Прибору необходимо время, чтобы «привыкнуть» к новым условиям. В течение определенного времени после спуска (вплоть до суток) наблюдения с гравиметром производить не рекомендуется. Чтобы не терять драгоценное время при выполнении съемки, целесообразно обеспечить хранение гравиметров непосредственно в горных выработках на тех горизонтах, где будут производиться работы.

Аналогичная ситуация возникает при подъеме гравиметра из шахты. Приступить к наземной гравиметрической съемке рекомендуется через некоторое время после возвращения его на поверхность.

Необходимо не только проверить готовность аппаратуры к работе и ее рабочее состояние, но и настройки автоматизированного гравиметра Autograv CG-5. Поскольку гравиметры Autograv CG-5 являются наиболее распространенным видом аппаратуры в настоящее время, подробно будет описана работа именно с этим типом приборов. Впрочем, отечественные

гравиметры предыдущего поколения также сохранились в рабочем состоянии в некоторых организациях.

Что касается собственно полевых работ, их производство планируется ежедневно на каждый последующий рабочий день. Помимо общего графика в соответствии с проектом ставятся ежедневные оперативные задачи: какие профили или гравиметрические пункты необходимо отработать на следующий день и в какой последовательности. Производительность и качество работы зависят от слаженных действий всей бригады, которая обычно состоит из двух рабочих, двух топографов и одного-двух геофизиков (в случае одновременного использования одного либо двух гравиметров). Для полноценного понимания работы геофизика-оператора необходимо рассмотреть функции всех членов рабочего коллектива.

Опишем деятельность бригады при выполнении съемки в лесном массиве. Первым идет рабочий, намечающий направление профиля, ориентируясь на проектные координаты, заложенные в навигационный приемник (ранее для задания направления профилей использовалась буссоль). Вторым рабочим следует за первым, зачищает профиль от кустарника, валежника и прочих препятствий, которые возможно удалить без существенных затрат сил и времени. Крупные препятствия следует обойти. Первоочередная задача рабочих заключается в том, чтобы сделать профиль пригодным для перемещения с аппаратурой, для топографических наблюдений (создать визирную линию, свободную от растительности на пути лазерного луча тахеометра) и измерений с гравиметром. Прокладывая профили в лесном массиве, рабочие делают засечки на деревьях, которые служат ориентиром другим членам бригады.

Для пересечения водных преград (небольших рек и ручьев) рабочие обеспечивают относительно безопасную переправу, в качестве которой обычно используются поваленные деревья. Поскольку рабочие менее всего загружены аппаратурой и двигаются в авангарде бригады, в их задачу входят подготовка стоянки в обеденное время, разведение костра (особенно в дождливую погоду для просушки одежды) и приготовление пищи.

Кроме того, рабочие должны подготовить гравиметрические пункты для наблюдений и закрепить их на местности кратковременными знаками. Первый рабочий при продвижении вперед отмечает позицию гравиметрического пункта и перемещается дальше, второй — создает удобную площадку для

установки гравиметра, подготавливает колышек из подручных материалов, которым обозначает ГП, втыкая кол в землю и надписывая на нем номер пункта и профиля. Ранее для промера расстояний при определении будущего положения гравиметрических пунктов использовался промерочный шнур заданной длины.

Что касается подготовки площадки для наблюдений, то ее поверхность должна быть плотной, чтобы устойчиво поставить гравиметр. Трава, мох и рыхлая почва по возможности срываются (сапогами или при помощи топора), грунт утрамбовывается. Во многих учебниках написано, что следует избегать расположения ГП вблизи деревьев и других источников микросейсм. Ветер, раскачивая деревья, передает колебания почве через их корневую систему, что благополучно воспринимается корпусом гравиметра. Проблема заключается в том, что в лесу расположить гравиметрический пункт на удалении от деревьев невозможно. Однако в каждом конкретном случае необходимо визуально определить место с наибольшим удалением от деревьев и обязательно вне выступающих из грунта корней.

При расположении гравиметрического пункта в заболоченной местности с обилием воды, рабочий должен создать устойчивую площадку для измерений, вырубив три деревянных колышка и вбив их в землю с треугольным расположением таким образом, чтобы имелась возможность установить на них подставку гравиметра (трипод, в обиходе называемый «пяткой») выше уровня воды.

Очень важно, чтобы рабочий грамотно подготавливал место для наблюдений с гравиметром. Во-первых, геофизик-оператор, замыкающий процессию обычно со значительным отставанием от остальных членов бригады и несущий восьмикилограммовый гравиметр с резервными аккумуляторами, не имеет с собой топора. В ситуации, когда колышки на ГП в заболоченной местности отсутствуют, ему ничего не остается, как пропускать этот пункт и возвращаться позднее с рабочим, что является непродуктивным. Если площадка пункта разбита на корнях деревьев, геофизику приходится переносить ее в сторону. Если высота ГП уже была определена топографами, то при отнесении пункта в сторону он имеет уже другое значение высоты, что неизбежно вносит ошибку при последующей обработке данных. От понимания рабочими задач гравиметриста напрямую зависят производительность бригады и качество получаемых материалов.

Топографы движутся следом за рабочими и выполняют измерения координат и высот гравиметрических пунктов. Если проектом допускается и условия местности позволяют использовать для определения планового положения дифференциальную GPS/ГЛОНАСС аппаратуру в режиме кинематики (обычно это работы масштаба 1 : 25 000 и мельче), то один из топографов несет на спине рюкзак с приемной антенной и держит в руках контроллер, выполняя измерения координат на каждом ГП. Точности навигационной аппаратуры в режиме кинематики не хватает для определения высот с погрешностью, требуемой для детальных гравиметрических съемок, поэтому в лесном массиве их определяют путем геодезического нивелирования с применением электронных тахеометров. Топограф, несущий аппаратуру GPS/ГЛОНАСС, выступает в роли вешечника, т. е. на каждом ГП устанавливает в его центре вешку с отражателем. Второй топограф при этом выполняет измерения тахеометром.

Геофизик-оператор обычно идет замыкающим в этой цепи, поскольку его работа выполняется медленнее, чем действия других участников команды, и требует отсутствия людей, создающих лишние колебательные воздействия вблизи прибора в момент измерения. В задачи геофизика входят проверка соответствия площадки необходимым требованиям, установка гравиметра на пункте, измерение силы тяжести, первичный контроль качества замера. В случае, если площадка не соответствует нормальным условиям, например, требуется ее перенос в сторону от корней дерева, геофизик обязан создать новую площадку, убрав траву, мох, рыхлую почву и уплотнив грунт.

В зимний период во избежание проваливания гравиметра в снег или просто для придания ему устойчивости используются дополнительные приспособления в виде деревянной подставки, прикрепленной к триподу, подобные проиллюстрированной на рисунке 2.10.

При работе на открытой и легкопроходимой местности (степь, поля и пр.), а также при наличии дифференциальной GPS/ГЛОНАСС аппаратуры, позволяющей работать в режиме Real-Time Kinematics (RTK), количество человек в бригаде может быть снижено до трех, по одному каждой специализации: рабочий для ориентирования профилей и подготовки гравиметрических пунктов; топограф с навигационной аппаратурой для измерения координат и высот ГП в режиме RTK; геофизик-оператор, выполняющий измерения с гравиметром.

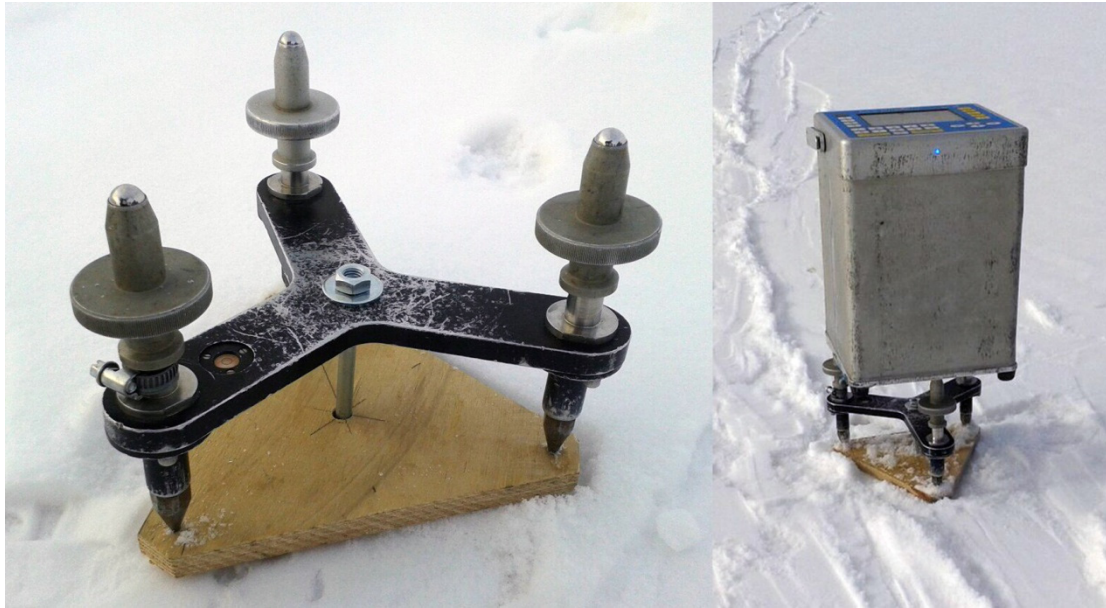


Рис. 2.10. Приспособление для установки гравиметра на снежном покрове

Подготовка к работе гравиметра Autograv CG-5

Гравиметр Autograv CG-5 поставляется в комплекте, состоящем из самого прибора, трипода, блока питания для подключения к сети, батарей, шнуров для переноса данных измерений на компьютер, малого навигационного приемника (в ранних версиях отсутствовал). Транспортировка прибора должна осуществляться только в специальном транспортировочном ящике (рис. 2.11) с мягким наполнителем. Если отсутствует возможность транспортировки в ящике, следует предусмотреть все нюансы и обеспечить защиту прибора от резких механических воздействий, опрокидывания, падения. Прибор дорогостоящий и содержит много элементов пониженной прочности, главным из которых является его измерительная система.

Поскольку в гравиметре применяется термостатирование кварцевой упругой системы, прибор не следует отключать от источника питания. В отсутствие питания кварцевая система быстро остывает, обуславливая существенное изменение ее рабочих характеристик. Если прибор находился некоторое время отключенным от источника питания, перед выполнением измерений ему необходимо время на повторный прогрев (вплоть до 24 ч). Для зарядки аккумуляторов, когда они находятся вне отсеков гравиметра, используется зарядное устройство (рис. 2.11). Обычно оператор берет с собой на профиль минимум две резервные батареи, что незначительно увеличивает носимый вес, но существенно страхует от риска неожиданного выключения прибора в рейсе из-за неполадок с питанием.

Подготовка прибора к работе начинается с настройки его параметров. Autograv CG-5 является компьютеризированным гравиметром, имеющим собственную операционную систему с простым интерфейсом. В руководстве пользователя, представленного на английском и русском языках, доступно разъясняются все моменты использования прибора.

Основные пункты меню главного экрана показаны на рис. 2.12. Пункт «Service» предназначен для выполнения различных сервисных операций. Посредством вложенных в него подменю выполняются не только корректировка значения поправки за долговременный (линейный) дрейф нуля системы, но и датчиков наклона, проверка работоспособности измерительной системы прибора и пр.



Рис. 2.11. Гравиметр Autograv CG-5 в полной комплектации в транспортировочном ящике и сумка для переноски (слева)⁴; батареи и зарядное устройство (справа)

Пункт меню «Memory» отвечает за работу с встроенной памятью прибора. Следует заметить, что память прибора никогда не очищается от данных в период полевых работ. Гравиметр является основным хранилищем данных, его память очищается только по завершении полевых работ и по приезду на основную базу организации, когда данные измерений перенесены на

⁴ Изображение с открытого интернет-ресурса www.scintrexltd.com.

компьютер и скопированы на несколько носителей. Такие меры предосторожности позволяют избежать риска невозможной потери ценной информации. Пункт меню «Dump» отвечает за перенос данных на компьютер. Меню «Clock» позволяет настроить дату и время, которые необходимы для адекватной автоматической коррекции смещения нуля пункта и лунно-солнечного притяжения. С выбором времени прибора связан один нюанс, который будет рассмотрен ниже.

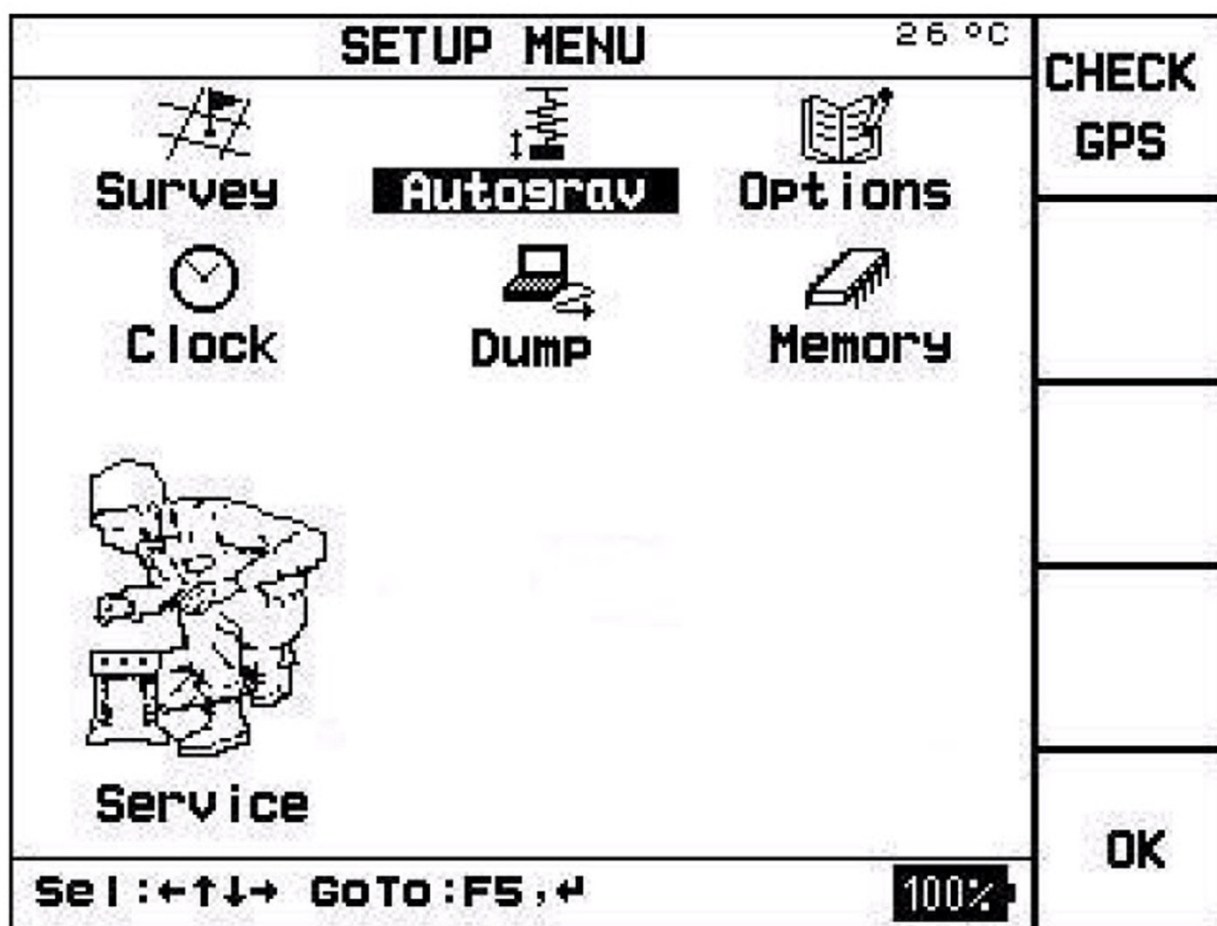


Рис. 2.12. Главный экран гравиметра Autograv CG-5⁵

Пункты «Survey», «Autograv» и «Options» являются основными при подготовке прибора к работе. Действия с этими меню оператору необходимо держать в памяти. Рассмотрим их подробнее.

При входе в пункт меню «Survey» (рис. 2.13) оператор получает возможность указать заголовок съемки (идентификатор, владельца данных, фамилию оператора), широту и долготу участка, номер зоны в проекции UTM и

⁵ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

расхождение времени прибора с абсолютным временем («GMT Diff»). Переход в режим редактирования и выход из него производится нажатием клавиши F3.

Параметры «Azimuth» и «Elevation» весьма специфичны: «Azimuth» вводится, если используется локальная система координат с направлением на север, отличным от направления меридиана; «Elevation» — превышение начальной точки или средняя отметка превышения в пределах площади относительно уровня моря либо относительно любого другого датума (необходимо для вычисления поправок за влияние рельефа непосредственно в процессе гравиметрической съемки). Оба эти параметра обычно обнуляются, поскольку намного проще выполнять измерения в какой-либо из общепринятых координатных систем (например, использовать географические широту и долготу), а поправки за влияние рельефа вычислять при обработке в камеральных условиях.

SURVEY HEADER		26 °C
Survey ID:	Default	PARAMS
Customer:	Default	
Operator:	Default	
<u>GRID REFERENCE:</u>		READ GPS
Latitude:	43.9N	FUNCT EDIT
Longitude:	79.6W	
Azimuth:	0.	CANCEL
Elevation:	0.	
UTM Zone:	0	
GMT Diff.:	5.	OK
Sel: ↑↓← Ch9: Alpha, ↔		100%

Рис. 2.13. Первая страница пункта меню Survey⁶

⁶ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

Широта и долгота участка вводятся для корректного учета влияния лунно-солнечного притяжения. Гравиметр рассчитывает поправку за лунно-солнечное притяжение, используя определенную формулу для вычисления координат Луны и Солнца в данный момент времени. Прибору также необходимо «знать» его положение в принятой для вычислений системе координат. При небольших размерах участка съемки в эти строки вводятся широта и долгота его центральной точки. При больших размерах площадь обрабатывается частями последовательно, а, значит, на каждой стадии вводятся координаты центральной точки исследуемой части. Номер UTM зоны является дополнительной информацией и при корректно введенной широте и долготе может быть проигнорирован. Компьютер прибора вычислит поправку за лунно-солнечное притяжение, ориентируясь на координаты.

О параметре «GMT Diff» следует рассказать отдельно. Если в пункте меню «Clock» выставлено локальное (местное) время, здесь следует указать расхождение локального времени прибора с абсолютным временем. При вычислении поправок за лунно-солнечное притяжение гравиметр вынужден использовать абсолютное время. Зная разницу, он получит его путем простого арифметического пересчета.

Опыт показывает, что в прибор сразу после приобретения целесообразно устанавливать не локальное, а абсолютное время, и в последующем не изменять его. Дело в том, что полевые работы имеют разъездной характер, а территория России расположена более чем в 10 часовых поясах. Выполняя сегодня работы в одном регионе и приехав завтра в другой регион, оператор может запутаться и некорректно изменить параметр «GMT Diff», учитывая, что может возникнуть путаница и с его знаком (параметр имеет знак «минус», если съемка выполняется восточнее Гринвичского меридиана, «плюс» — если западнее). Это приведет к некорректному вычислению поправки за влияние Луны и Солнца, которые необходимо потом исправлять в постобработке. В случае установки абсолютного времени параметр «GMT Diff» всегда неизменно равен нулю. Риск ошибочного ввода времени и некорректного вычисления поправки за лунно-солнечное притяжение в данном случае будет исключен.

Нажатие клавиши F1 выводит оператора на вторую страницу меню, где он может указать основные параметры используемой системы координат. Обычно эти параметры настраиваются единожды и в дальнейшем не изменяются. После двух последовательных нажатий клавиши F5 (OK) введенная информация будет записана во вновь созданный файл (если память прибора

была предварительно очищена) либо дописана ниже в уже существующий файл данных. Рекомендуется создавать индивидуальное описание, используя меню «Survey», для каждого нового дня съемки, чтобы в процессе обработки было легче ориентироваться, извлекая информацию из общего файла данных.

Далее необходимо войти в пункт меню «Autograv», где имеется возможность включить или выключить необходимые математические процедуры автоматической коррекции показаний измерительной системы (рис. 2.14). Рекомендуется включить параметры «Tide Correct» (коррекция влияния Луны и Солнца; от англ. tidal — приливной), «Cont. Tilt Corr» (коррекция за отклонение системы от вертикали), «Auto Reject» (фильтр импульсных помех), «Seismic Filter» (фильтр микросейсмических колебаний). Пункты «Terrain Corr» и «Save Raw Data» обычно не используются; регулятор ставится в положение NO.

AUTOGRAV SETUP		NEXT PAGE
Tide Correct.:	YES	
Cont. Tilt. Corr:	NO	
Auto Reject:	YES	
Terrain Corr.:	NO	FUNCT
Seismic Filter:	YES	EDIT
Save Raw Data:	NO	CANCEL
		RECORD
SeI: ↑↓↔ Ch9: ↔		50%

Рис. 2.14. Первая страница меню Autograv⁷

⁷ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

Параметр «Terrain Corr» предназначен для вычисления поправок за влияние рельефа в центральной зоне (т.е. в ближайшей окрестности гравиметрического пункта) непосредственно в процессе съемки. «Save Raw Data» позволяет записывать показания гравиметрического датчика с частотой 6 Гц. В данном случае возникает огромный массив избыточной информации; для обычной гравиметрической съемки достаточно записи одного среднего арифметического значения для каждого цикла измерений. Пусть время одного цикла измерений составляет 30 с, тогда при включенном режиме «Save Raw Data» гравиметр запишет в память 180 отсчетов, при выключенном — одно среднее значение этой большой выборки.

Фильтр импульсных помех, который действует как робастный, предназначен для фильтрации интенсивных кратковременных ускорений (ветровой помехи, помех от транспорта, людей и т. д.). В момент взятия отсчета с частотой 6 Гц прибор вычисляет среднее арифметическое всех предыдущих отсчетов в данной серии, а также величину их стандартного отклонения (SD). Если новый отсчет в 4 или 6 раз превышает SD, он отбрасывается и не принимается в дальнейшие вычисления. Количество отброшенных значений за цикл записывается.

Микросейсмический фильтр эффективно устраняет высокочастотные колебания с амплитудой менее 0,05 мГал.

Нажимая клавишу F1 оператор может перейти к следующей странице данного меню (рис. 2.15) и проверить величины всех констант, которые используются в процессе коррекции линейного смещения (дрейфа) нуля, остаточной компенсации температуры, константы датчиков угла наклона. Параметр «G.Cal1» представляет собой цену деления шкалы прибора и определяется по результатам эталонирования. Если данный коэффициент пересчета введен корректно, гравиметр автоматически выдает результат измерения в миллигалах.

Пункт меню «Drift Start» позволяет изменить время начала линейной коррекции нуля. Константу «Gref» обычно оставляют равной нулю. По окончании необходимо нажать клавишу F5 (OK), чтобы согласиться с принятыми значениями, и после возврата на первую страницу повторным нажатием клавиши F5 выполнить запись всех данных в файл съемки.

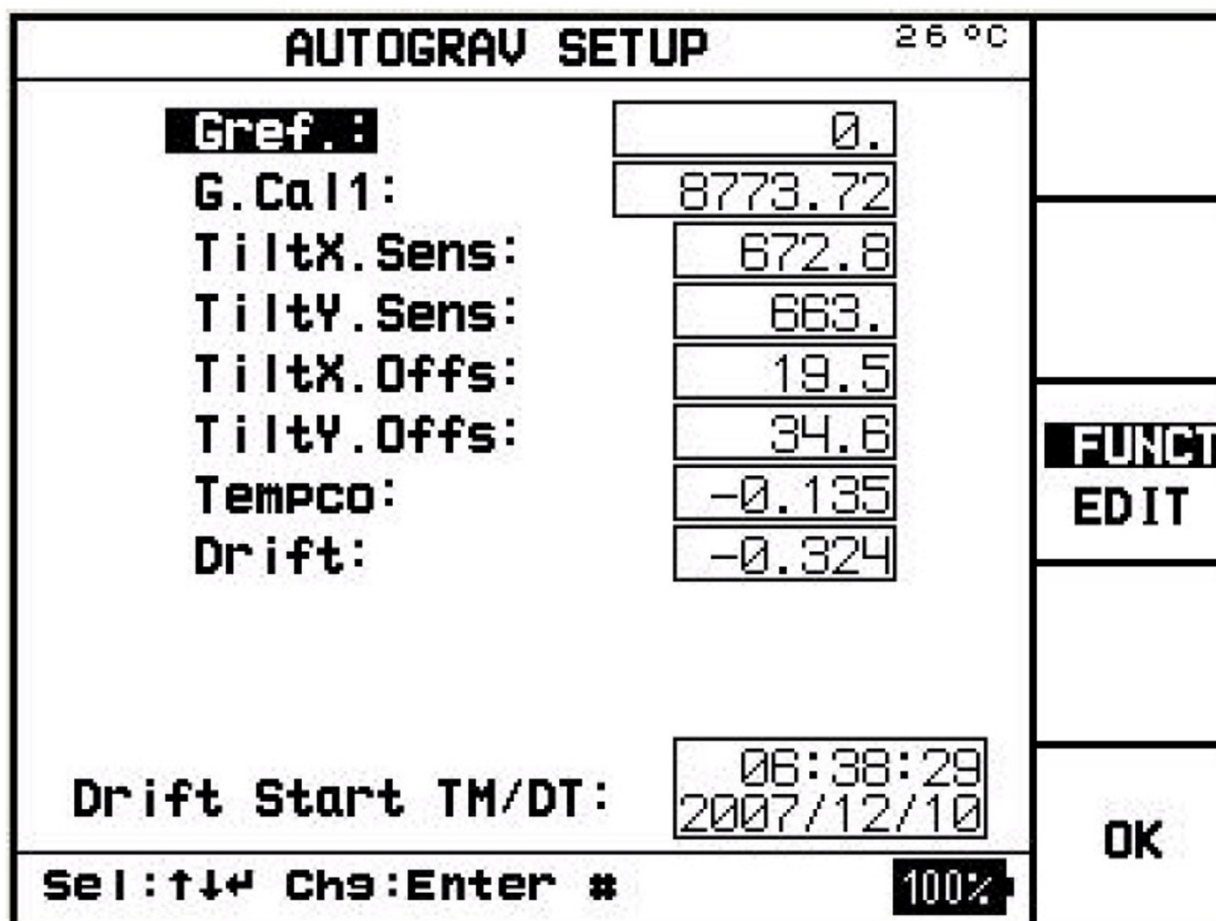


Рис. 2.15. Вторая страница меню Autograv⁸

Третий не менее важный пункт меню — «Options» (рис. 2.16). Рассмотрим его параметры по порядку. Напротив надписи «Read Time» оператор должен выставить длительность одного цикла измерений на каждом гравиметрическом пункте. Обычно при невысоком уровне микросейсмических и импульсных помех 30-40 с (до 60 с) оказывается вполне достаточно, чтобы статистически обеспечить необходимую погрешность измерений. Максимальная длительность цикла — 256 с. Величина «Factory Flag» предустановлена на заводе-изготовителе и корректировке не подлежит; «#Of Cycles» — количество циклов измерений на каждом гравиметрическом пункте. На каждом опорном гравиметрическом пункте выполняется не менее трех циклов измерений; на каждом пункте рядовой сети — от одного до нескольких. После каждого цикла контролируются определенные параметры, характеризующие качество измерений (процедура контроля этих параметров будет описана ниже). При необходимости цикл повторяется.

⁸ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

«Start Delay» — время задержки до начала измерений. Установка 4-5 с интервала задержки позволяет прибору «успокоиться» после механического воздействия оператора (нажатие на клавишу, запускающую измерения) перед началом цикла, а оператору дает время, чтобы отойти от прибора на необходимое расстояние либо принять такое положение, чтобы более не оказывать колебательных воздействий на него в период взятия отсчетов.

DEFINE THE OPTIONS 09:16		FINAL KEY
Read Time:	60	on off
Factory Flag:	80	
#Of Cycles:	88888	
Start Delay:	4	
Line separation:	0.	
Station separation:	0.	FUNCT
Auto station inc.:	NO	EDIT
Chart Scale:	1	
Measurement:	NUMERIC	
LCD Heater:	OFF	
Record Amb.Temp:	NO	
Sel: ↑↓← Ch9:Enter #		OK
		100%

Рис. 2.16. Пункт главного меню Options⁹

Константы «Line separation» и «Station separation» отличные от нуля позволят при переходах с одного профиля или с одного гравиметрического пункта на другой изменять его номер на указанную целую величину нажатием всего одной кнопки, что является достаточно удобной функцией. Пункт «Auto station inc» рекомендуется оставить выключенным без серьезной необходимости. Его включение увеличивает номер гравиметрического пункта после каждого выполненного цикла измерений на единицу, что не всегда удобно. Предположим, оператор выполнил один тридцатисекундный цикл

⁹ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

измерений на пункте и заметил плохое качество отсчетов. Записав значения в память прибора, оператор хочет повторить цикл, однако для этого ему необходимо вручную заново ввести номер пункта, уже измененный на следующий путем прибавления единицы, поскольку использовалась опция «Auto station inc». Эта процедура отнимает время и снижает производительность.

Пункт «Measurement» позволяет выбрать режим экрана в момент измерений: Numeric — числовой, Graphic — графический. При производстве съемок более удобен числовой режим, отображающий всю необходимую информацию без построения графика замера в режиме реального времени. Дело в том, что оператор по возможности отходит от гравиметра в сторону на несколько шагов в момент измерений, чтобы не оказывать воздействий. Выбор режима экрана в момент измерений не принципиален, если Вы не смотрите на него. Соответственно, параметр «Chart Scale» указывает на вертикальный масштаб графика в графическом режиме.

«LCD Heater» — функция подогрева экрана, необходима в зимнее время, но может быть отключена в теплый сезон для экономии заряда аккумулятора. Включение «Record Amb. Temp» приведет к тому, что гравиметр будет записывать в память текущую температуру окружающей среды в момент измерений. По окончании редактирования опций необходимо нажать клавишу F5 (OK). В этот момент настройка гравиметра завершена и оператор может приступить к съемке.

Выполнение измерений с гравиметром Autograv CG-5

Прежде чем начинать съемку с измерений на опорном гравиметрическом пункте, гравиметр необходимо ввести в рабочий режим, т. е. дать кварцевой системе время, чтобы привыкнуть к режиму съемки. Если предполагается выполнение пешеходной съемки, необходимо некоторое время походить с гравиметром, затем выполнить несколько циклов измерений на опорной точке, затем снова походить с гравиметром и снова выполнить измерения, после чего оценить сходимость результатов между собой. Если отсчеты достаточно близки (в пределах единиц микрогал), значит гравиметр вошел в рабочий режим. Иначе процедуру ввода в режим необходимо продолжить.

Измерения на гравиметрическом пункте начинаются с установки трипода, который плотно вдавливается в грунт, и установки гравиметра на трипод. Прежде чем выпустить гравиметр из рук, во избежание опрокидывания

оператор должен убедиться, что тот правильно и устойчиво расположен на триподе! Нажатием кнопки «Measure» оператор входит в меню ввода данных о гравиметрическом пункте (рис. 2.17).

В данном меню оператор может ввести параметры «Station» — номер гравиметрического пункта, «Line» — номер профиля, к которому относится этот ГП, «Elevation» — высота гравиметрического пункта (данный параметр обычно не используется, поскольку функция вычисления поправок за влияние рельефа отключена). После ввода номера профиля и ГП необходимо нажать клавишу F5 (LEVEL), и гравиметр перейдет в меню установки по уровням (рис. 2.18).



STATION DESIGNATION		
Station:	<input type="text" value="100042."/>	OPT ION
Line:	<input type="text" value="40012."/>	NEXT LINE
Elevation:	<input type="text" value="284."/>	FUNCT EDIT
		NEXT STAT.
		
Sel: ↑↓↔ Ch9: Enter # 100%		LEVEL

Рис. 2.17. меню ввода данных о гравиметрическом пункте¹⁰

Гравиметр имеет электронные уровни с датчиками наклона, информация от которых выводится на экран. Установка по уровням начинается с одновременного вращения двух боковых микрометрических винтов, расположенных на триподе, до тех пор, пока вертикальный штрих уровня не выйдет в центральную часть круга. После чего одной рукой при помощи

¹⁰ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

фронтального микрометрического винта оператор выводит в центр горизонтальный штрих, постоянно контролируя второй рукой при помощи одного из боковых винтов центральную позицию вертикального штриха. В тот момент, когда перекрестье «прицела» войдет в зону центрального маркера (малый круг), на экране появится смайлик, указывающий, что измерительная система гравиметра находится в положении, близком к оптимальному. Убедившись, что положение гравиметра не отклоняется от вертикали со временем («уровни не плывут»), оператор осторожно отступает от прибора, повторно проверяет положение уровней, при необходимости выполнив доводку микрометрическими винтами, нажимает клавишу F5 (READ GRAV) либо клавишу «Measure», запуская цикл измерений.

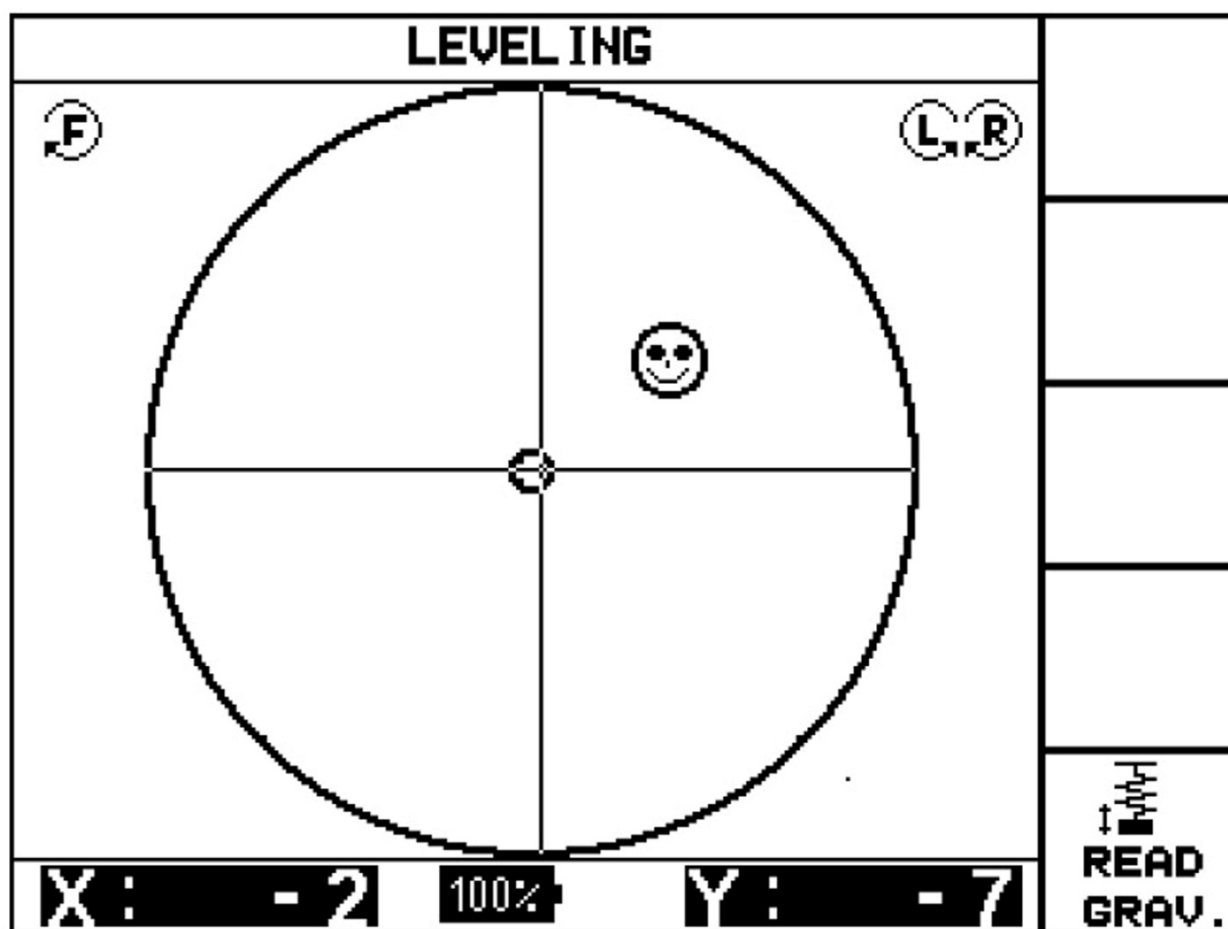


Рис. 2.18. Окно режима установки гравиметра по уровням¹¹

В цифровом режиме экран измерений будет выглядеть, как показано на рисунке 2.19. В верхней таблице показаны до пяти результатов предыдущих циклов измерений, ниже и слева — электронные уровни. Параметр «SD» есть стандартное отклонение отсчетов от среднего арифметического на текущий

¹¹ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

момент времени. «Tilt X» и «Tilt Y» — углы отклонения от вертикали в угловых секундах.

После окончания измерений гравиметр автоматически перейдет на окно результатов (рис. 2.20), где в табличном виде представлены основные параметры, характеризующие их качество. Данные по текущему циклу измерений расположены в столбце «Current», по предыдущему — в столбце «Preceding».

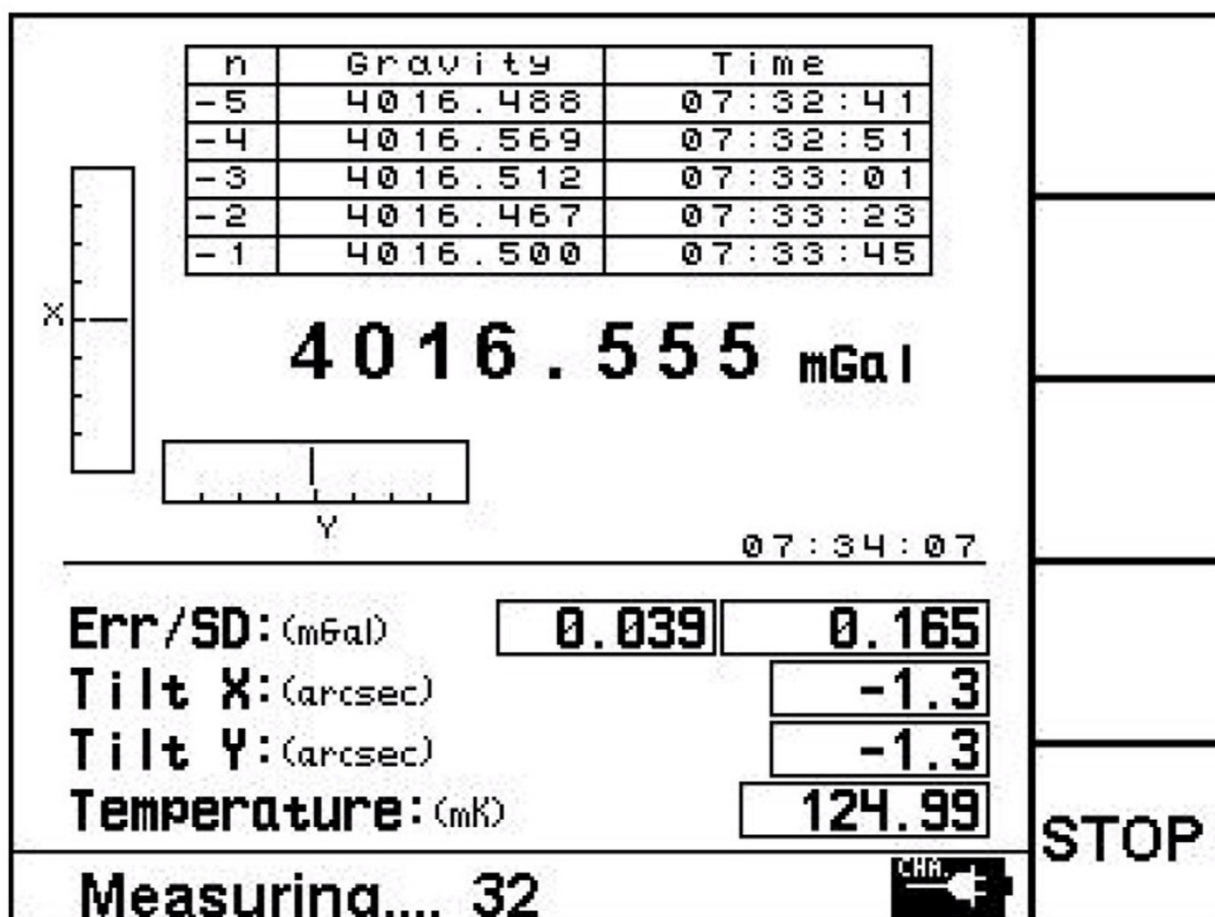


Рис. 2.19. Экран измерений в числовом режиме (Numeric)¹²

Оценивая качество первого измерения на ГП, прежде всего нужно уделить внимание четырем важным показателям: «SD» — величина стандартного отклонения, в мГал; «Tilt X» и «Tilt Y» — максимальные отклонения от вертикали в течение цикла, в угловых секундах; «#Rej» — количество отброшенных значений из-за влияния импульсных помех. Чем меньше каждое из этих значений, тем ниже погрешность измерения. По опыту при хороших условиях съемки приемлемыми считаются: «SD» менее 0,05 мГал, «Tilt X» и

¹² Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

«Tilt Y» – не более 25–50 секунд, «#Rej» — не более 2 выскоков в течение 40-секундного цикла. Нажатием клавиши F5 (RECORD) данные записываются в память гравиметра.

Если хотя бы один из этих параметров превышает указанное пороговое значение, отсчет лучше проконтролировать повторным циклом измерений. При микрогравиметрической съемке и мониторинге желательно добиваться меньших значений указанных параметров.

AUTOGRAV FINAL DATA			
ID	Preceding	Current	
Grav.	2339.267	2339.252	
S.D.	0.049	0.051	
TiltX	-2.824	-2.824	
TiltY	12.435	12.435	
Temp.	0.09	0.09	
E.T.C.	-0.028	-0.034	
Dur.	64	64	
#Rej.	0 = 0.0%	0 = 0.0%	
Time	18:11:42	18:20:59	CANCEL
Line	0.S	0.S	
Stat.	0.W	0.W	RECORD
Preceding Recall ↓			:(n- 1)

Рис. 2.20. Окно результатов измерений¹³

После повторного замера помимо указанных четырех параметров «SD», «Tilt X», «Tilt Y», «#Rej» необходимо сравнить текущий отсчет с предыдущим (параметр «Grav»). Гравиметр выдает показания в миллигалах. Допустимая величина расхождения предыдущего и последующего отсчетов на ГП определяется проектной погрешностью съемки. В процессе измерений можно ориентироваться на величину расхождения не более $\pm 0,01-0,015$ мГал; качество геофизического материала при этом будет достаточно высоким.

¹³ Изображение из руководства пользователя к гравиметру Autograv CG-5.

Иногда условия не позволяют четко выдержать все указанные параметры в пределах пороговых величин (сильный ветер, болотистая местность с неустойчивыми грунтами и т.д.). В этом случае оператор должен выполнить серию циклов на ГП, чтобы впоследствии была возможность выбирать наиболее достоверное значение в сопоставлении с результатами контрольных измерений.

Отсчеты на каждом гравиметрическом пункте должны сниматься через равные промежутки после установки прибора, чтобы сохранять равномерный ход рабочего режима. Первый отсчет всегда записывается в память прибора, даже если качество результатов первого цикла измерений не удовлетворяет оператора. В этом случае при повторе замера оператор будет иметь первичный набор данных и возможность сопоставления с ним других отсчетов.

Каждый рейс обязательно начинается и заканчивается измерениями на опорном гравиметрическом пункте. Контрольные измерения для оценки качества полевого материала чаще всего выполняются попутно: например, на следующий день в новом рейсе оператор захватывает часть точек предыдущего дня.

Хранение гравиметра CG-5 осуществляется в помещении. Желательно подключение к постоянному источнику питания. Не следует допускать отключения прибора в течение всего срока выполнения полевых работ. Поскольку измерительная система прибора термостатирована, не требуется его хранение на улице в тех же условиях, в которых производится производство работ.

Гравиметры ГНУ КВ не имели термостатирования. Их хранение обеспечивалось в условиях улицы — воздействия внешней атмосферы, поскольку при выходе из теплого помещения в прохладную уличную среду, кварцевая система прибора охлаждалась, что вызывало изменение ее упругих свойств и нелинейное смещение нуля в течение некоторого периода времени. Выполнение съемки в указанный временной промежуток привело бы к снижению качества материала в виду невозможности учета сильного нелинейного хода нуля системы.

При хранении обеспечивается выставление гравиметра на триподе по уровням, как и при производстве замера. Находясь длительное время под наклоном, кварцевая система впоследствии долго привыкает к вертикальному положению, что неизбежно сказывается на достоверности замеров. Гравиметр устанавливается в таком месте, где его не смогут случайно задеть и опрокинуть, что чревато обрывом кварцевой пружины и выходом системы из строя.

§6. ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Топографо-геодезические работы регламентируются Инструкцией по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. Выше кратко описаны действия топографов при плано-высотной привязке гравиметрических пунктов в процессе рядовых измерений. Рассмотрим этот вид работ более детально как с навигационным оборудованием, так и с электронным тахеометром.

Дифференциальные навигационные системы позволяют определять координаты и высоты геофизических пунктов с точностью до единиц сантиметров в зависимости от применяемого режима измерений (миллиметров, если площадки имеют жесткую поверхность и центральный маркер, т. е. ошибка позиционирования антенны минимальна).

В одиночку в обычном режиме «большой» навигационный приемник обеспечивает погрешность определения координат и высот аналогично малому навигационному приемнику или, например, заключенному в современный смартфон. Основное отличие измерений в дифференциальном режиме от обычных измерений координат и высот навигационным оборудованием заключается в коррекции показаний приемника путем внесения дифференциальных поправок от базовых станций или геостационарных спутников.

Рассмотрим работу с комплектом из двух приемников, один из которых называется базовой станцией, второй — ровером. Базовая станция устанавливается на точку с известной высотой и координатами, где и находится постоянно во время съемки. Обычно в качестве такой точки используются пункты государственной геодезической сети (тригонометрические пункты или тригопункты). Базовая станция в течение всего периода съемки принимает и записывает в память сигнал со спутников с кратковременным интервалом, например, каждую секунду. Ровер перемещается топографом по профилю с остановкой и записью сигнала от спутников на каждом гравиметрическом пункте. Часы обоих приемников синхронизированы с атомными часами спутниковой группы.

Погрешности приема каждой одиночной антенны практически одинаковы. При последующей обработке системные погрешности приема взаимно устраняются, и результатом становится вектор координат каждого гравиметрического пункта относительно базовой станции. То есть высота и

координата каждого пункта наблюдений определяются не только сигналом, поступающим на ровер от спутников, но и дифференциальной поправкой, внесенной от базовой станции, и корректирующей его позицию от наземного пункта с известными координатами и высотой.

Погрешность определения координат и высоты ГП зависит от многих составляющих (от расположения группировки спутников над горизонтом, их количества, окружающих препятствий, уменьшающих горизонт обзора приемной антенны и т. д.), выбранного режима измерений, определяющего время измерений на каждой точке. В режиме кинематики (стой – иди) время измерений на точке обычно не превышает полутора минут, что при хороших условиях наблюдений может обеспечить погрешность определения координат не более $\pm 1-2$ м. Для надежного определения высот с сантиметровой погрешностью данный режим не подходит и значения высоты определяются нивелированием. Оператору навигационного оборудования целесообразно закреплять приемник на штанге за спиной (рис. 2.11), чтобы руки оставались свободными. В этом случае он может выполнять дополнительные функции, например, совмещать работу вешечника, рабочего или геофизика, если бригада испытывает дефицит «рабочих рук».



Рис. 2.21. Навигационный приемник зафиксирован за спиной топографа (слева); рюкзак-крепление с приемником (справа)

В режиме быстрой статики приемная антенна устанавливается на вешку, высота которой замеряется. Прием сигнала от спутников длится более 10–

15 мин, в результате статистически снижается погрешность определения координат и высот. Поскольку данный режим низкопроизводителен, он используется обычно для определения координат закрепленных точек на концах звеньев нивелировочного полигона для контроля высотного хода.

В настоящее время в ряде регионов России существует развитая сеть наземных базовых станций. Заключив договор с компанией, владеющей этой сетью, можно получать дифференциальные поправки в режиме реального времени. Многие GPS/ГЛОНАСС приемники оснащены функцией RTK (Real Time Kinematic) и позволяют установить сим-карту сотового оператора с доступом в интернет. Если сотовый оператор обеспечивает хорошее покрытие с устойчивым сигналом и условия местности позволяют работать с навигационным оборудованием, то «подписавшись» на данные сети базовых станций, можно получать корректирующие поправки и снимать координаты и высоты в режиме реального времени. Съёмка в таком режиме выполняется быстро, а на выходе из приемника в компьютер переносится уже готовый массив координат и высот гравиметрических пунктов, измеренных с погрешностью, соответствующей режиму быстрой статики.

ГЛАВА III. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ПОМЕХ ПРИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Наблюденные значения и аномалии силы тяжести отягощены погрешностями вследствие искажающего влияния различных факторов. Основные из них рассмотрены в данном разделе. Чем точнее выполнены наблюдения, чем более слабыми по интенсивности являются целевые аномалии, которые требуется обнаружить в результате гравиметрических измерений, тем больше возрастает относительное влияние любых помех.

В первую очередь необходимо отметить **несовершенство измерительной системы гравиметра** (несовершенство кварцевой упругой системы и датчиков малых перемещений, микродефекты материалов, влияние электростатических зарядов, несовершенство операций эталонирования, старение системы со временем и пр.), влияние которого также называют **чистой ошибкой наблюдений**. Так, в технических характеристиках гравиметра Autograv CG-5 указано, что его соседние цикловые отсчеты могут колебаться в диапазоне стандартного отклонения $\pm 0,005$ мГал вследствие особенностей кварцевой системы. Поскольку на чистую ошибку наблюдений влияет текущее состояние гравиметра, то скорректировать ее в меньшую сторону возможно лишь путем вмешательства во внутренний мир прибора, например, путем ремонта или замены изношенных/дефектных деталей.

Вторую очевидную погрешность в наблюдения вносят общая квалификация оператора, его опыт, умение обращаться с аппаратурой и минимизировать влияние внешних искажающих факторов. Каждый гравиметр индивидуален, имеет свои достоинства и недостатки, которые в зависимости от обращения с прибором усиливаются или ослабляются. В итоге от умения оператора использовать достоинства и нейтрализовать недостатки аппаратуры зависит качество наблюдений.

Далее рассмотрим механические воздействия, воспринимаемые корпусом гравиметра и передающиеся кварцевой упругой системе.

Микросейсмический шум и вибрации – слабые колебания земной поверхности с амплитудой обычно до 1-10 мкм и с периодом от сотых долей до десятков секунд, а иногда и более. Земля никогда не находится в состоянии полного покоя. Очевидно, что полностью изолировать гравиметр от вибраций невозможно, поскольку невозможно устранить его соприкосновение с землей даже посредством вспомогательных инструментов, таких как трипод.

Источниками микросейсм являются упругие волны от удаленных землетрясений, атмосферные явления, морские прибои, стоячие морские волны в океанах, города и промышленные зоны, транспорт и другие технические объекты. В современных гравиметрах Autograv CG-5, CG-6 присутствует фильтр микросейсмических помех, который успешно позволяет снижать влияние высокочастотных гармонических колебаний в диапазоне ускорений до 0,05 мГал.

Исследования гравиметров советского производства на вибростенде показали, что их отсчеты зависят не только от амплитуды, но и от частоты вибраций: отклонения упругой системы от положения равновесия при высокочастотных вибрациях весьма низкой интенсивности наблюдались в узких полосах частот и достигали нескольких миллигал. Для каждого гравиметра была характерна своя полоса резонансных частот. Предполагалось, что это явление обусловлено резонансными колебаниями упругой системы в сочетании с другими индивидуальными особенностями строения прибора. Какие-либо сведения о проведении аналогичных испытаний разработчиками гравиметров серии Autograv отсутствуют; в то же время современная механика свидетельствует, что явления резонанса присутствуют в любой колебательной системе.

Вместе с тем в обычных условиях при относительно небольшом микросейсмическом шуме данные гравиметры способны демонстрировать завидную устойчивость показаний, что достигается, в том числе, за счет представительной статистической выборки отсчетов. Как было указано выше, CG-5 фиксирует показания упругой системы с частотой 6 Гц (6 отсчетов в секунду), а значит за один цикл измерений длительностью 30 с достигается весьма репрезентативная выборка в 180 отсчетов, что намного лучше 3 отсчетов, которые требовалось взять вручную оператору гравиметра ГНУ-КВ или ГНУ-КС. Впоследствии за наблюдаемое значение принимается среднее арифметическое всего цикла за исключением выбросов, но при необходимости гравиметр позволяет записывать в память все отсчеты, взятые с частотой 6 Гц.

На рис. 3.1 проиллюстрированы две последовательные 60-секундные серии отсчетов (между сериями пропущен интервал в 1 с из-за особенностей регистрации), зафиксированных гравиметром Autograv CG-5 на одной точке без перемещения. Заметим, что несмотря на флуктуации, достигающие 0,08 и более мГал, среднее арифметическое двух серий совпадает с погрешностью до третьего знака после запятой, т. е. означает, что при небольшой интенсивности

микросейсмических ускорений значительная выборка отсчетов позволяет устойчиво определять относительное значение силы тяжести на гравиметрическом пункте.

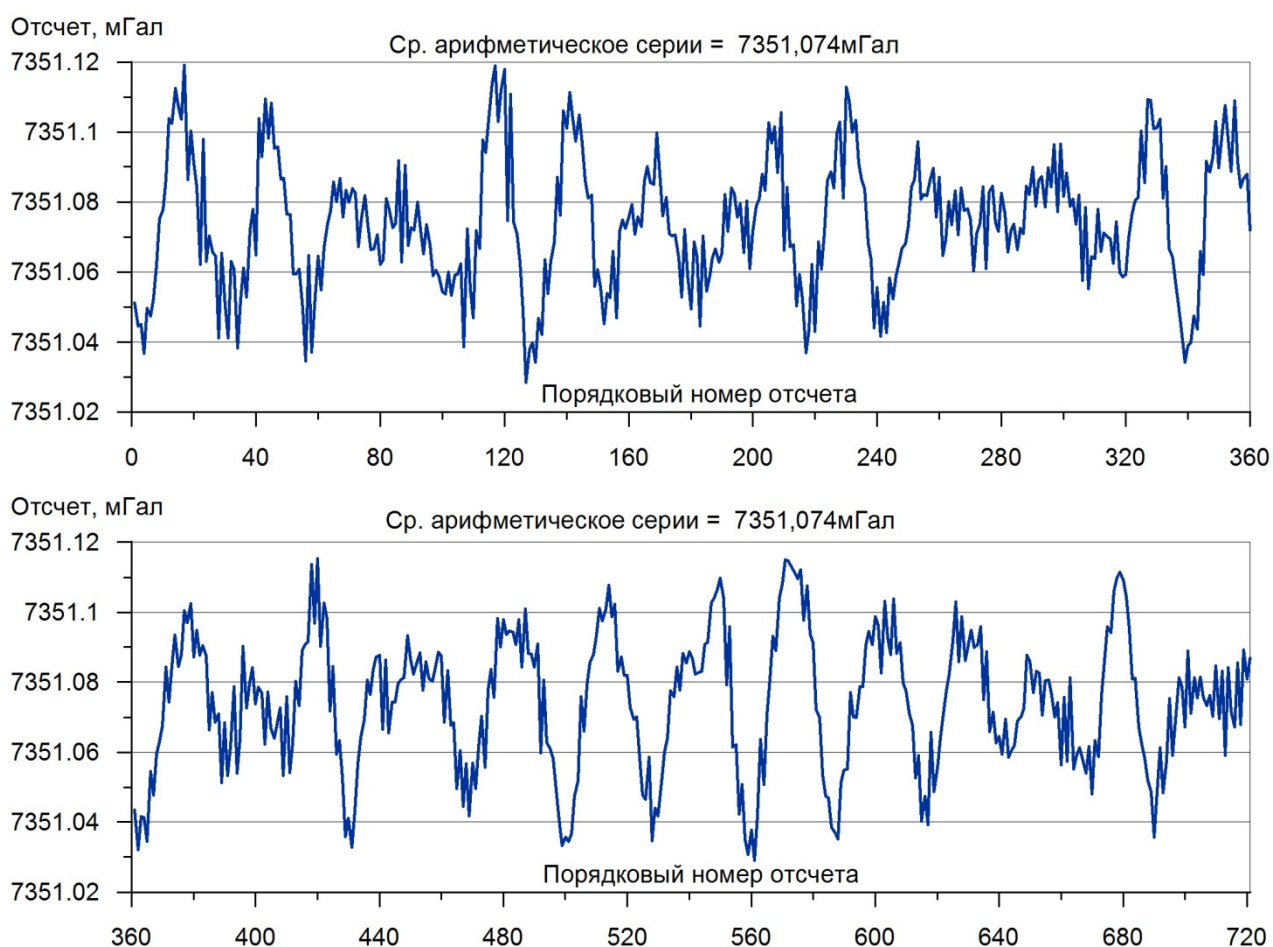


Рис. 3.1. Две последовательные серии измерений гравиметра Avtograd CG-5 на одной точке без перемещения (RawData)

Кратковременные (импульсные) помехи представляют собой непериодические ускорения, придаваемые упругой системе гравиметра различными толчками (воздействие оператора), колебаниями земной поверхности (колебания почвы вблизи раскачивающихся деревьев, транспорт, пешеходы), порывами ветра. Эти воздействия по интенсивности могут значительно превышать уровень микросейсмического шума. Наблюдаемые в течение длительного времени они способны исказить большую часть отсчетов в выборке в течение цикла измерений и сделать непригодным для использования его среднее арифметическое значение. Частично подавить импульсную помеху гравиметру помогает специальный робастный фильтр, отбрасывающий отсчеты, отскочившие от среднего арифметического значения больше чем на 4-6 величин стандартного отклонения (SD). Однако если помеха

затронула значительную часть отсчетов (например, неожиданный порыв ветра, воздействовавший на гравиметр в течение нескольких секунд), средний отсчет будет сильно искажен. В этом случае на фильтр не следует надеяться и оператор должен повторить измерение.

Любые механические воздействия на гравиметр, приводящие к колебаниям упругой системы, обуславливают **упругое последствие**. При транспортировке кварцевая система не арретируется (не фиксируется) в гравиметрах серии Autograv и ГНУ. При переноске гравиметра в рейсе груз остается в свободно подвешенном состоянии. Строго говоря, система никогда не пребывает в состоянии покоя, а всегда колеблется относительно некоторого положения равновесия. Груз постоянно совершает колебательные движения, преимущественно ориентированные вертикально.

Инерционность упругого последствия проявляется в том, что после установки гравиметра на пункте среднее арифметическое значение отсчетов медленно «сползает» к некоторому истинному положению равновесия упругой системы, собственно и характеризующему приращение силы тяжести. Этот процесс называется стабилизацией отсчета и требует определенного времени.

Чем интенсивнее механическое воздействие на гравиметр при переноске между гравиметрическими пунктами в рейсе, а также при установке прибора на пункте и измерениях, тем сильнее проявляется упругое последствие. Исходя из теории рейс должен быть построен таким образом, чтобы внутри него, между двумя измерениями на опорных гравиметрических пунктах, дрейф нуля упругой системы гравиметра можно было считать линейным, что никогда не достигается на практике. Ход нуля системы всегда остается нелинейным, и тем он больше, чем сильнее колебательные воздействия на гравиметр. Поэтому оператору очень важно минимизировать механические воздействия на прибор в рейсе.

На рис. 3.2 показан характерный график дрейфа нуля гравиметра Autograv CG-5, установленного на ГП без перемещения после дневного пешеходного рейса. Отчетливо видна смена характера дрейфа: вначале гравиметр находится «под впечатлением» от рабочего режима в период выполнения съемки, его кварцевая система «помнит» эти условия с запаздыванием (инертно) переходит в режим спокойного состояния. Время переходного процесса и скорость дрейфа могут быть различными у каждого прибора. Данное явление будет наблюдаться при любой смене режима.

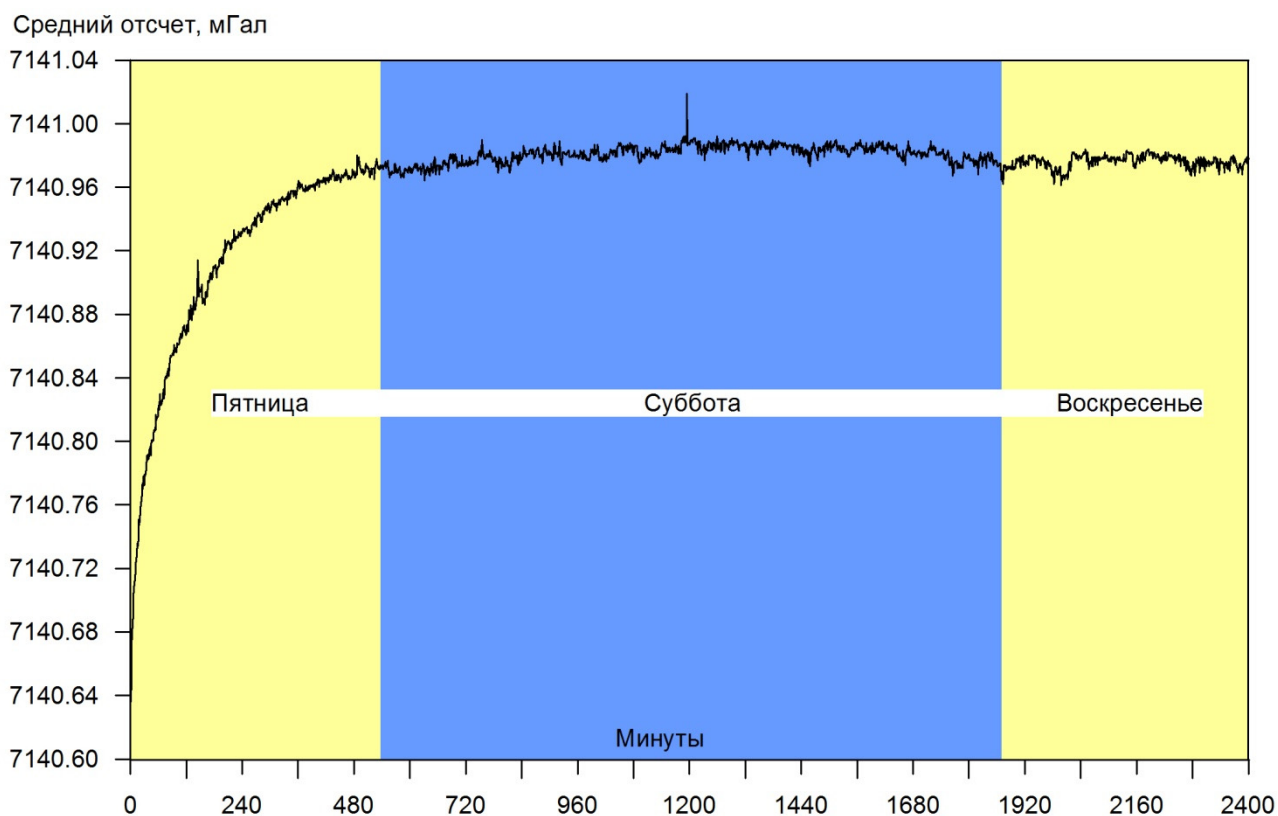


Рис. 3.2. График нелинейного дрейфа нуля упругой системы гравиметра Autograv CG-5 в течение нескольких суток после установки на ГП

Наблюдения за нульпунктом дают четкие указания оператору: рабочий режим прибора в период выполнения гравиметрической съемки, и особенно внутри рейса, должен сохраняться неизменным, поскольку его изменения неизбежно усилят нелинейный характер дрейфа нуля системы.

Отклонение кварцевой упругой системы от вертикали в момент измерений приводит к тому, что показания гравиметра будут искажены тем более, чем больше данное отклонение. Упругая система имеет наибольшую чувствительность к изменениям силы тяжести, если ось ее максимальной чувствительности сориентирована по направлению действия этой силы: строго говоря, согласно отвесной линии по нормали к поверхности геоида, упрощенно – по вертикали вниз к земной поверхности.

В гравиметрах серии Autograv имеются датчики угла наклона, которые позволяют оператору ориентировать упругую систему по вертикали при установке гравиметра на пункте при помощи микрометрических винтов трипода. Однако в процессе измерений на неустойчивом грунте, что чаще всего и бывает при обычной гравиметрической съемке, система отклоняется от вертикали, провоцируя увеличение погрешности измерений. Хотя в

технических характеристиках гравиметра указано, что математически отклонение от вертикали компенсируется поправкой, в реальности данная поправка не всегда адекватно может выправить ситуацию.

Погрешности планово-высотной привязки пунктов гравиметрических наблюдений подразделяются на **погрешности определения координат и высот** гравиметрического пункта и **погрешности позиционирования** гравиметра в момент измерений. Первые вызваны собственно несовершенством топографо-геодезической аппаратуры в совокупности с условиями выполнения работ на местности. Это чистая инструментальная ошибка определения координат и высот, а также погрешность установки вешки с отражателем или антенной на пункте наблюдений, привязки в пунктах государственной геодезической сети и пр. Например, работая с тахеометром на рыхлом грунте, вешечник чуть более или менее заглубляет несущую отражатель вешку в грунт, тем самым внося малую погрешность. Аналогичная ситуация повторяется при работе с GPS/ГЛОНАСС антенной, закрепленной на вешке. Сюда же добавляется ошибка, связанная с отклонением вешки с отражателем или приемной антенной от вертикали.

Ошибки позиционирования гравиметра вызваны тем, что геофизик-оператор может выставить прибор на пункте не точно в той точке, координаты и высота которой измерены топографом, а с некоторым смещением относительно нее, что не является редкостью при производстве гравиметрических работ в лесном массиве (например, чтобы удалиться от деревьев или их корней). При работах, требующих повышенной точности измерений (гравиметрический мониторинг) положение точки наблюдений фиксируется специальным маркером. Именно его координаты и высота определяются в процессе топографо-геодезических работ как координаты и высота гравиметрического пункта. Впоследствии гравиметр устанавливается точно по центру над маркером. Минимальное смещение всегда существует, только в данном случае оно весьма ничтожно.

Погрешности планово-высотной привязки опорных гравиметрических пунктов и определения значений силы тяжести на них также являются искажающими факторами, оказывающими влияние на результаты гравиметрической съемки.

Погрешности округления при вычислениях различного рода, например, при вычислении поправок или учете смещения нуляпункта, возникают

вследствие приближенных вычислений с точностью до n -го знака после запятой. Чем больше математических операций выполняется с данными, тем больше накопленная погрешность округлений. Очевидно, что при работе с современными гравиметрическими данными суммарно она не должна проявляться в третьем знаке (идеальный случай), т. е. должна составлять лишь десятитысячные доли миллигал.

Погрешности учета влияния рельефа земной поверхности, а также зданий и сооружений при гравиметрической съемке в условиях населенных пунктов и промышленных зон, вызваны наличием неточностей в описании геометрии в связи с тем, что данная информация обычно получена путем векторизации топографических карт либо использованием цифровых моделей местности, построенных по данным радарной съемки (SRTM). Каждый из источников сведений о рельефе имеет свою степень неполноты его описания, свою погрешность, характеризующую отклонения содержащейся в нем информации от реальных высот рельефа в принятом датуме (системе высот). Мелкомасштабные карты характеризуются большей погрешностью описания рельефа, крупномасштабные — меньшей. Информация о геометрии зданий и сооружений может быть получена двумя путями: менее точно — путем оцифровки топографических планов и космоснимков; более точно — инструментально, посредством геодезических работ. Вместе с тем не поддается адекватному учету средняя плотность каждого здания, которая будет приниматься в расчете соответствующей поправки.

Погрешности, характеризующие разведочную эффективность съемочной сети, определяются соответствием реальной структуры сети наблюдений характеру аномального поля. Одна и та же сеть наблюдений в условиях разных аномальных полей может оказаться излишне густой или чересчур разреженной.

Погрешность интерполяции вытекает из необходимости приведения данных гравиметрической съемки в узлы регулярной сети. При определенных математических операциях над аномальным полем целесообразно использовать равномерное распределение его значений в пространстве. Соответственно, возникает задача восстановления значений аномального поля в произвольных точках земной поверхности там, где эти данные отсутствуют между точками наблюдений, и таким образом, как если бы они были непосредственно измерены в этих точках.

Влияние атмосферных явлений проявляется, прежде всего, в изменении плотности воздушного столба непосредственно над гравиметром в период съемки. При обычной гравиметрической съемке данное влияние пренебрежительно мало. Однако при гравиметрическом мониторинге, когда изучаются весьма слабые изменения силы тяжести во времени, атмосферное влияние целесообразно учитывать.

Среди **геологических помех** следует отметить влияние гидрогеологического режима, различных геологических объектов и антропогенных факторов.

Влагоемкость пород зоны гипергенеза и более глубоких рыхлых отложений может значительно изменяться в связи с выпадением атмосферных осадков от сезона к сезону. При близком расположении к поверхности уровня грунтовых вод (например, в поймах рек) его колебания неизбежно будут вызывать изменения силы тяжести на расположенных здесь гравиметрических пунктах. Выполняя микрогравиметрические измерения или гравиметрический мониторинг в течение длительного времени необходимо учитывать **влияние гидрогеологического режима**; при этом не рекомендуется располагать опорные гравиметрические пункты в долинах рек или в других понижениях рельефа, где уровень грунтовых вод близок к поверхности.

Фоновое геологическое влияние глубоко залегающих объектов или крупных структурных элементов разреза проявляется в изменении фона, относительно которого выделяются аномалии от целевых объектов. Данное влияние обычно пытаются устранить при помощи математических инструментов, например, тренд-анализа, аппроксимируя фон достаточно простой непрерывной функцией с обязательным геологическим обоснованием выбора. Всегда возникает дилемма: что считать аномалией, а что фоном.

Влияние приповерхностных неоднородностей, не являющихся целевыми объектами для изучения при выбранном масштабе съемки, частично устраняется на этапе отбраковки первичного материала, когда из аномалий силы тяжести «отбрасываются» явные «выбросы», т. е. слишком интенсивные аномалии, зафиксированные всего лишь в одной-двух точках. Даже в отсутствие явных «выбросов» неоднородности верхней части разреза искажают аномалии от целевых объектов, накладываясь поверх них в суммарном поле. Применением математических методов обработки в камеральных условиях интерпретатор пытается снизить влияние этих высокочастотных помех (имеется

в виду пространственная частота – величина обратно пропорциональная ширине аномалии) и очистить от них искомые аномалии.

Пространственные ограничения площади или профиля съемки налагают свой отпечаток в виде искажающего **влияния соседних объектов — боковых (сторонних) источников**. Боковые источники располагаются за пределами профиля или площади съемки в проекции на земную поверхность. Имея значительную аномальную массу, они могут вносить существенный вклад в аномальное поле в пределах изучаемой территории. Оценка их влияния и его подавление являются весьма нетривиальной задачей камерального этапа обработки гравиметрических данных. Способы борьбы с этим фактором будут рассматриваться в третьей части пособия.

Влияние разновысотности наблюдений — совокупное влияние аномального вертикального градиента и кривизны поверхности измерений — проявляется в искажении формы и амплитуды аномалия силы тяжести в связи с разным удалением гравиметрических пунктов от различных плотностных неоднородностей в недрах Земли.

На рисунке 3.3 проиллюстрирован примитивный, но наглядный пример такого влияния. Аномалия от шара при измерениях на холмистом рельефе распадается на две положительные аномалии и одну отрицательную в центре профиля, вызванные разным удалением гравиметрических пунктов от аномалообразующего объекта. Влияние разновысотности обуславливает значительные искажения в горной местности. Для подавления этого фактора при камеральной обработке данных гравиметрической съемки используют математические методы, позволяющие учесть формализованные сведения о рельефе земной поверхности, а при обработке аэрогравиметрических рейсов – данные о фактических высотах полета.

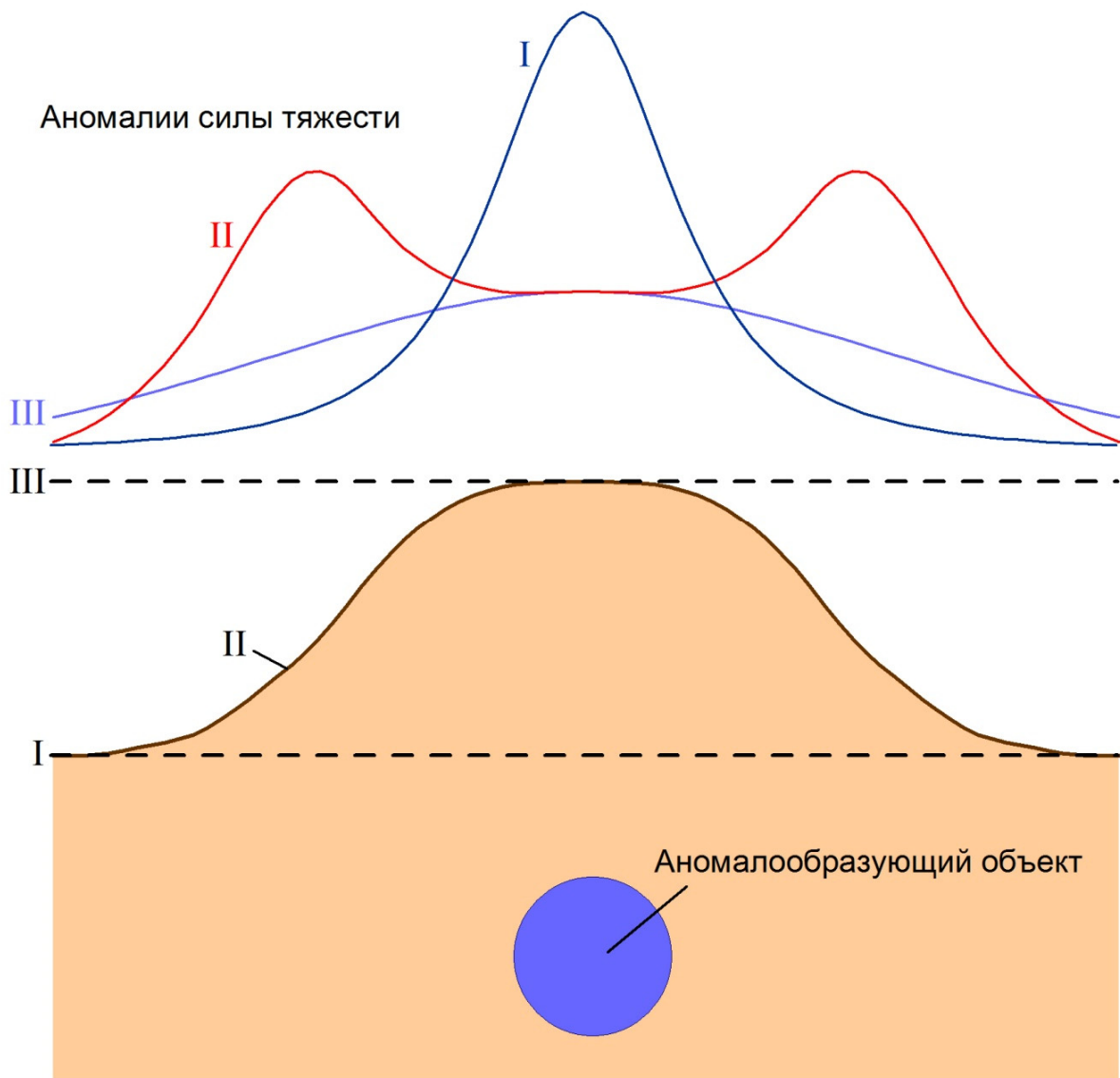


Рис. 3.3. Аномалии силы тяжести при наблюдениях на холмистом рельефе земной поверхности (II) и на горизонтальной плоскости, проходящей через минимальную (I) и максимальную (III) отметки рельефа по профилю через центральную часть объекта — шара

ГЛАВА IV. ТЕКУЩАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Обработка результатов гравиметрических наблюдений выполняется в два этапа и подразделяется на текущую и камеральную. Задача текущей обработки — обеспечивать непрерывный контроль качества полевых материалов и получение предварительных результатов съемки. Очевидно, что текущая обработка должна выполняться в процессе полевых работ, без больших затрат времени и трудоемких процедур, с учетом того, что проводится она ежедневно. Уставший после съемки оператор, вернувшись на базу, может произвести лишь достаточно простые операции, которые позволят ему понять, насколько качественный материал он получил.

Текущая обработка включает в себя обработку наблюдений, выполняемых в рядовых и опорных рейсах; при необходимости, уравнивание опорной сети; вычисление наблюденных значений силы тяжести; оценку качества полевого материала по результатам повторных наблюдений в независимых рейсах; учет нормального поля; ввод поправок за высоту и притяжение промежуточного слоя; вычисление аномалия силы тяжести. В полевой период составляется каталог гравиметрических пунктов и предварительная карта аномалий силы тяжести в редукции Буге без поправок за влияние рельефа.

Инструкция по гравirazведке является основным регламентирующим документом, т. е. определяет, методику обработки и формулы для произведения расчетов. В данном разделе показано, как должна выполняться текущая обработка гравиметрических данных на основании инструкции и каким образом следует оформить результаты обработки надлежащего вида.

§1. ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ В ОПОРНЫХ И РЯДОВЫХ РЕЙСАХ

Обработка рейса осуществляется в тот же день, в течение которого он был выполнен либо в максимально ближайшее время. Это условие необходимо поскольку в течение рейса оператор не имеет возможности сделать все необходимые пометки на бумаге или в памяти компьютера, так как ему необходимо выдерживать нормальный темп производства работ. Приведем простой пример: на одной точке взято несколько значений; очевидно, у оператора была причина повторить измерения (например, неустойчивость грунта в данном месте), однако, если пометка не была сделана, то через день оператору будет сложно вспомнить, какой из отчетов он посчитал наиболее

достоверным и по какому поводу выполнил повторный замер. Отображаемые в файле статистические характеристики замера не всегда являются определяющими. Поэтому рейс необходимо обрабатывать в день его завершения, пока воспоминания о проделанной работе свежи в памяти.

Файл измерений выкачивается с гравиметра Autograv CG-5 на компьютер через интерфейсный кабель посредством любой из двух специализированных программ «SCTUTIL» или «RS232 Data Logger». При записи измерений в памяти гравиметра формируется файл в двоичной кодировке с расширением *.raw. Структура файла не разглашается компанией Scintrex. Этот файл считается первичным. Неизвестная структура не позволяет открыть его и внести в него какие-либо изменения. Данный файл при скачивании или завершении переноса на компьютер можно конвертировать в текстовый формат *.txt, редактируемый в любом текстовом или табличном редакторе, или в двоичный формат *.sgd базы данных для специализированного программного пакета «Oasis Montaj».

Супервайзеру, контролирующему работу подрядной организации, необходимо знать о файле формата *.raw. Недобросовестный исполнитель работ, получив при измерениях бракованные данные, может вручную изменить результаты измерений в текстовом файле *.txt, выдав впоследствии их за первичную информацию. Запросив с подрядной организации файлы формата *.raw и самостоятельно конвертировав их в текстовый формат, супервайзер может отследить любые изменения, внесенные исполнителем работ в первичные материалы.

Некритичными являются любые обоснованные корректировки в текстовом файле, кроме корректировок отсчетов гравиметра. Иногда оператор совершает незначительные ошибки в пикетаже во время рейса, а затем исправляет их при обработке. Может возникнуть ошибка установки даты или времени в настройках прибора, вследствие чего поправки за притяжение Луны и Солнца будут рассчитаны гравиметром некорректно. Впоследствии их можно пересчитать, задав корректные дату и время и внося соответствующие изменения в файл при обработке.

Пример текстового файла с данными измерений гравиметра Autograv CG-5 показан на рис. 4.1. Структура файла требует отдельного рассмотрения. Верхние три абзаца представляют собой шапку съемки, в которой содержится исходная информация о предустановленных параметрах прибора. Под

заголовком «CG-5 SURVEY» расположена информация о введенных оператором при настройке прибора следующих сведений:

- Survey name — наименование съемки;
- Operator — фамилия оператора или иной его идентификатор;
- LONG — долгота центра участка работ (необходимо для вычисления поправок за притяжение Луны и Солнца);
- LAT — широта центра участка работ (необходимо для вычисления поправок за притяжение Луны и Солнца);
- ZONE — номер зоны в проекции UTM (вводить необязательно, если правильно введены долгота и широта центра участка);
- GMT DIFF — разница времени, установленного в часах гравиметра с абсолютным временем.

```

/      CG-5 SURVEY
/      Survey name:  campus
/      Instrument S/N: 11111
/      Client:       psu
/      Operator:     pugin
/      Date:         2015/10/20
/      Time:         09:42:29
/      LONG:         56.1800000 E
/      LAT:          58.0000000 N
/      ZONE:         10
/      GMT DIFF.:   -5.0

/      CG-5 SETUP PARAMETERS
/      Gref:         4400.000
/      Gcal1:        8534.346
/      TiltxS:       648.248
/      TiltyS:       668.432
/      Tiltx0:       22.990
/      Tilty0:       135.779
/      Tempco:       -0.127
/      Drift:        -0.253
/      DriftTime Start: 10:07:29
/      DriftDate Start: 2015/10/09

/      CG-5 OPTIONS
/      Tide Correction: YES
/      Cont. Tilt:     YES
/      Auto Rejection: YES
/      Terrain Corr.:  NO
/      Seismic Filter: YES
/      Raw Data:      NO

/--LINE-----STATION-----ALT.-----GRAV.---SD.---TILTX---TILTY-TEMP--TIDE--DUR-REJ--TIME-----DEC. TIME+DATE--TERRAIN---DATE
0.0000000  1.0000000  0  700.511 0.026  6.5  -6.1 0.01 -0.028 30  0 10:13:56  42266.42566  0.0000 2015/10/20
0.0000000  1.0000000  0  700.514 0.030  9.2  -6.5 0.01 -0.028 30  0 10:14:35  42266.42611  0.0000 2015/10/20
0.0000000  1.0000000  0  700.513 0.024 12.0  -7.8 0.01 -0.028 30  3 10:15:10  42266.42652  0.0000 2015/10/20
Line
1.0000
/--LINE-----STATION-----ALT.-----GRAV.---SD.---TILTX---TILTY-TEMP--TIDE--DUR-REJ--TIME-----DEC. TIME+DATE--TERRAIN---DATE
1.0000000  1.0000000  0  700.658 0.012  -6.3  -2.0 0.00 -0.030 30  0 10:20:10  42266.42998  0.0000 2015/10/20
1.0000000  2.0000000  0  700.666 0.013  -0.8  -7.3 0.00 -0.031 30  0 10:23:07  42266.43203  0.0000 2015/10/20
1.0000000  3.0000000  0  700.672 0.018  -8.2  -1.9 -0.01 -0.031 30  0 10:25:46  42266.43386  0.0000 2015/10/20
1.0000000  4.0000000  0  700.681 0.015  -2.3  -2.8 -0.02 -0.032 30  0 10:27:54  42266.43534  0.0000 2015/10/20
1.0000000  5.0000000  0  700.692 0.014  -3.4  0.0 -0.04 -0.033 30  0 10:30:29  42266.43714  0.0000 2015/10/20
Line
0.0005
/--LINE-----STATION-----ALT.-----GRAV.---SD.---TILTX---TILTY-TEMP--TIDE--DUR-REJ--TIME-----DEC. TIME+DATE--TERRAIN---DATE
0.0000000  1.0000000  0  700.520 0.022  4.0  0.8 -0.05 -0.034 30  0 10:34:42  42266.44006  0.0000 2015/10/20
0.0000000  1.0000000  0  700.521 0.021  4.3  0.6 -0.04 -0.034 30  0 10:35:21  42266.44051  0.0000 2015/10/20
0.0000000  1.0000000  0  700.523 0.022  4.7  0.7 -0.04 -0.035 30  0 10:35:56  42266.44091  0.0000 2015/10/20
    
```

Рис. 4.1. Пример файла первичных данных гравиметра Autograv CG-5

Под заголовком «CG-5 SETUP PARAMETERS» указываются все основные константы датчиков угла наклона, температуры и основного сенсора силы тяжести. Рассмотрим основные из них:

- Gcal1 — константа пересчета показаний гравиметрического датчика в миллигалы (аналог цены деления у гравиметров ГНУ); гравиметр Autograv CG-5 выдает результат в файл в миллигалах;

- Drift — постоянная, определяющая учет линейного смещения нуля пункта датчика.

Под заголовком «CG-5 OPTIONS» указано, какие из опций прибора включены, а какие — нет. Подробно эти пункты рассматриваются в §5 гл. II.

Ниже начинается массив данных замеров на гравиметрических пунктах в рейсе. Каждый профиль отделен от другого строкой- заголовком. В столбцах слева направо указаны:

- LINE — номер профиля;
- STATION — номер гравиметрического пункта;
- ALT — высота гравиметрического пункта (вводится редко, необходима для автоматического вычисления поправок за влияние рельефа в процессе съемки);
- GRAV — отсчеты гравиметра в миллигалах (основные данные); записывается средний арифметический отсчет за один цикл измерения на пункте;
- SD — стандартное отклонение отсчетов в миллигалах, автоматически взятых гравиметром с частотой 6 Гц в течение одного цикла измерений, от среднего арифметического значения, записанного в столбец GRAV;
- TILTX, TILTY — максимальное отклонение кварцевой системы от вертикали вдоль оси X, Y в течение цикла измерений;
- TEMP — температурная поправка в миллигаллах, учитывающая остаточные колебания температуры, не скомпенсированные аппаратными устройствами;
- TIDE (англ. — tidal — приливной) — величина поправки за лунно-солнечное притяжение в миллигалах;
- DUR — продолжительность одного цикла измерений на пункте в секундах;
- REJ — количество забракованных отсчетов в течение цикла измерений;
- TIME — время измерения (взятия замера);
- DEC.TIME+DATE — время измерения в формате секунд с учетом даты;
- TERRAIN — величина поправки за влияние рельефа в миллигалах;
- DATE — дата измерения;

Обработка каждого рейса выполняется независимо от остальных. Напомним, каждый рейс начинается и заканчивается на пунктах опорной гравиметрической сети либо на исходном пункте. Общепринятое обозначение пунктов опорной сети отсутствует; поэтому каждая организация принимает

свое обозначение. В случае, показанном на рис. 4.1 пункты опорной сети обозначаются как нулевой профиль и далее – порядковыми значениям в колонке «STATION». Из рис. 4.1 видно, что рейс начинался на опорном гравиметрическом пункте с номером 1 (LINE 0, STATION 1) и заканчивался на нем же (см. последние три строки файла).

В ее современном виде обработка рейса заключается в распределении поправки за смещение нуля. При работе с гравиметром ГНУ первоначально измеренные значения силы тяжести переводились из размерности отсчетов микрометрического винта гравиметра в миллигалы, путем умножения каждого отсчета на цену деления измерительной шкалы прибора. В гравиметре Autograv CG-5 константа перевода показаний гравиметрического датчика в миллигалы уже внесена в настройки прибора по результатам эталонирования, поэтому все результаты измерений уже имеют размерность миллигал.

Рассмотрим распределение поправки за смещение нуля, опираясь на рис. 4.2. Обратите внимание, что ось абсцисс имеет двойную индикацию: под осью приводятся индикаторы гравиметрических пунктов (чаще всего числовое обозначение порядкового номера); выше оси — время выполнения замера на пункте.

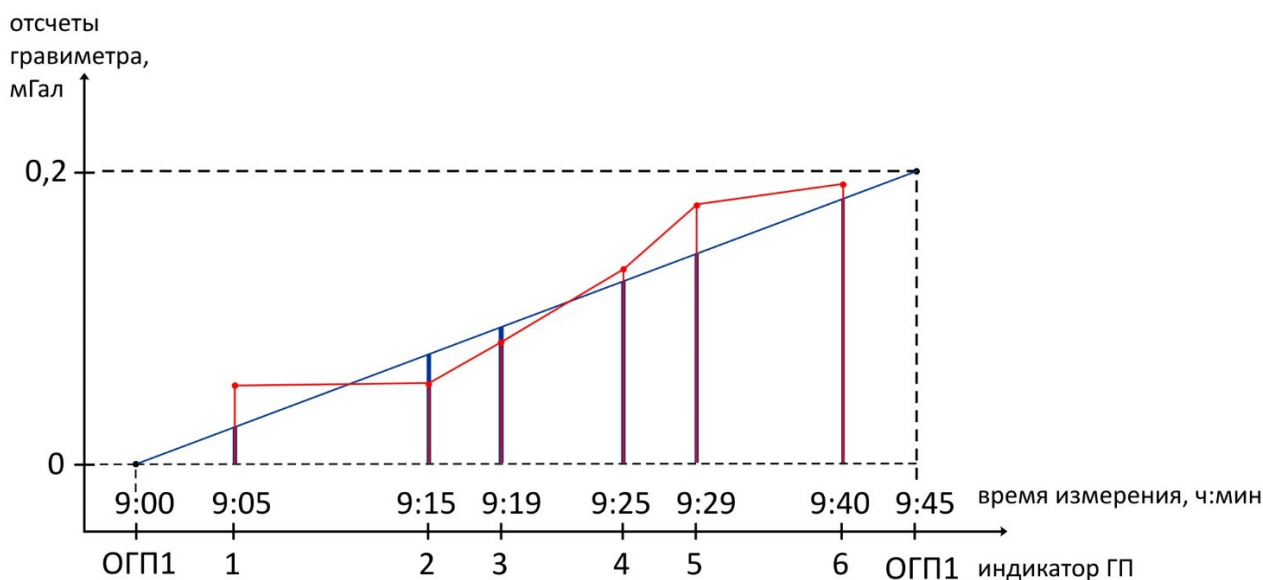


Рис. 4.2. Графический пример расчета поправки за смещение нуля

Время имеет приоритет, т. е. ось абсцисс ранжируется по времени, а не по номеру ГП. Если внимательно рассмотреть иллюстрацию, можно заметить, что временной интервал между ГП не равномерен, как это обычно имеет место в

практике работ. Иначе говоря, результаты измерений на соответствующих ГП располагаются на оси времени в соответствии с действительным ходом съемки.

Предположим, что рейс имел начало на опорном гравиметрическом пункте №1 (ОГП 1) и оканчивался измерениями на том же пункте опорной сети. Значение силы тяжести на данном пункте известно, стабильно (не меняется в течение съемки) и составляет 0 мГал в условном уровне. Другими словами, если бы смещение нуля пункта упругой системы отсутствовало, то придя вновь на ОГП1, оператор зафиксировал бы то же самое нулевое значение.

Далее, выполнив серию измерений на гравиметрических пунктах 1-6 в течение 45 мин (с 9:00 до 9:45), оператор завершил рейс на ОГП1 и получил значение силы тяжести, равное 0,2 мГал. Это означает, что за 45 мин нулевая отметка измерительной системы сместилась на 0,2 мГал.

Какой характер имело смещение нуля пункта между наблюдениями на опорных гравиметрических пунктах с известными и неизменными значениями силы тяжести? Неизвестно. В отсутствие данных оператор имеет право принимать лишь линейную зависимость смещения нуля пункта между началом и концом рейса. На самом деле смещение нуля пункта всегда нелинейно, но длительность рейса принимают исходя из таких условий, чтобы нелинейный ход внутри рейса незначительно отличался от линейной зависимости, чтобы нелинейностью можно было пренебречь.

Красным цветом на графике показаны отсчеты гравиметра в мГал, синим — линейный ход смещения нуля пункта. Вертикальные линейки красного цвета на каждом ГП дают представление о величине значения, выдаваемого гравиметром в результате измерения; линейки синего цвета — величина поправки за смещение нуля пункта исходя из линейного закона смещения нуля кварцевой системы внутри рейса. В процессе обработки необходимо вычесть из результата измерений величину поправки, опираясь на время замера. Разница между красной и синей вертикальными линейками показывает величину силы тяжести на данном гравиметрическом пункте в принятом условном (или абсолютном уровне).

Предположим, что абсолютное значение силы тяжести на ОГП1, перенесенное с пунктов государственной гравиметрической сети, составляет 981000 мГал. Для того чтобы перевести измерения из относительного уровня в абсолютный, оператору необходимо прибавить ко всем значениям в рейсе данную величину.

Достаточно обыденной является ситуация, когда рейс начинается на одном опорном гравиметрическом пункте, а заканчивается на другом. Пусть ОГП1 имеет абсолютное значение силы тяжести в 981600 мГал, а ОГП2 — 981602 мГал. Ситуация аналогична проиллюстрированной на рисунке 4.2, однако, чтобы завершить рейс на ОГП1, оператор завершил его на ОГП2. В этом случае обработка отличается только тем, что к линейному смещению нуля нужно вычесть (в другом случае — добавить) еще и разницу между абсолютными значениями силы тяжести на двух пунктах, которая составляет 2 мГал. За вычетом разницы график смещения нуля примет тот же вид, что и на рис. 4.2.

Подведем теперь итог вышесказанному. Конечно, поправку за смещение нуля не рассчитывают графически. Рисунок лишь иллюстрировал общий принцип ее вычисления. Для аналитического расчета время измерений приводят к одной размерности, например, переводят в секунды. Именно для этого и существует столбец «DEC.TIME+DATE» в текстовом файле исходных данных. Затем вычисляют линейное изменение нуля $Drift_c$ за единицу времени (за 1 с), разделив полное изменение $Drift$ в мГал на полное время рейса $Time$ в сек:

$$Drift_c = \frac{Drift}{Time} = \frac{S_{ОГП1} - S_{ОГП2}}{Time}. \quad (4.1)$$

Полная коррекция за смещение нуля производится по формуле:

$$g_{набл} = (S_{ГП} - S_{ОГП1}) * C - (Time_{ГП} - Time_{ОГП1}) * Drift_c + g_{абс}, \quad (4.2)$$

где $S_{ГП}$ и $S_{ОГП1}$ — отсчеты гравиметра на пунктах рядовой и опорной сетей соответственно; $Time_{ГП}$ и $Time_{ОГП1}$ — время замера на гравиметрическом пункте и время начала рейса на опорном гравиметрическом пункте в сек; C — цена деления гравиметра служит для перевода показаний прибора в мГал (для Autograv CG-5 значение принимается равным единице, поскольку гравиметр автоматически пересчитывает величину возвратного потенциала с датчика в мГал при помощи предустановленного коэффициента $Gcal1$; для ГНУ это значение равно цене деления микрометрического винта); $g_{абс}$ — абсолютное значение силы тяжести на опорном гравиметрическом пункте.

Протокол обработки гравиметрических наблюдений
КАМПУС ПГНИУ

Scintrex AUTOGRAV CG-5

Ser No	302	C=	1.0
Дата	17 сен 16	Operator	Пушин
0-пункт	0.020		
0-пункт/сек	0.0001		
Длительность рейса (ч, м, с)	0:57:19		

Line	Station	Grav,	SD,	Tilts		Temp	E.T.C	Dur	Rej	Time			сек	Снабл	№	Дата	Прим
				x	y					час	мин	сек					
0	1	717.110	0.011	-4.6	-4.8	-0.05	-0.024	30	1	11	46	5	42365	0.150	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.130	0.020	-4.2	-1.8	-0.04	-0.011	30	0	12	43	24	45804	0.150	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.108	0.020	-1.2	-3.4	-0.06	-0.024	30	10	11	44	51	42291	0.148	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.110	0.013	-3.1	-3.8	-0.06	-0.024	30	0	11	45	30	42330	0.150	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.110	0.011	-4.6	-4.8	-0.05	-0.024	30	1	11	46	5	42365	0.150	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
2	38	717.412	0.009	-2	-0.8	-0.06	-0.022	30	0	11	50	46	42646	0.450	302	17 сен 16	
2	39	717.417	0.008	-6.4	-3.4	-0.05	-0.022	30	0	11	53	8	42788	0.455	302	17 сен 16	
2	40	717.425	0.010	-0.7	-3	-0.06	-0.021	30	0	11	55	45	42945	0.462	302	17 сен 16	
2	41	717.432	0.012	-5.2	-2.9	-0.06	-0.02	30	0	11	58	15	43095	0.468	302	17 сен 16	
2	42	717.436	0.013	-4.5	-9.3	-0.07	-0.02	30	0	12	1	42	43302	0.471	302	17 сен 16	
2	43	717.442	0.015	-6.6	-6.7	-0.07	-0.019	30	0	12	4	20	43460	0.476	302	17 сен 16	
2	44	717.450	0.011	-6.5	-1.8	-0.07	-0.018	30	0	12	7	4	43624	0.483	302	17 сен 16	
2	45	717.443	0.008	-8.2	-2.7	-0.07	-0.018	30	0	12	9	0	43740	0.475	302	17 сен 16	
2	46	717.446	0.028	3.3	-1.3	-0.07	-0.017	30	0	12	12	40	43960	0.477	302	17 сен 16	
2	47	717.446	0.020	-2.6	-6.8	-0.08	-0.016	30	0	12	15	52	44152	0.476	302	17 сен 16	
2	48	717.460	0.014	-8.2	-3	-0.09	-0.016	30	0	12	18	4	44284	0.489	302	17 сен 16	
2	49	717.460	0.010	2.6	-0.4	-0.09	-0.015	30	0	12	20	26	44426	0.488	302	17 сен 16	
2	50	717.464	0.010	-1.3	-3	-0.1	-0.015	30	0	12	22	52	44572	0.491	302	17 сен 16	
2	51	717.468	0.010	-4.8	-2.3	-0.1	-0.014	30	0	12	25	39	44739	0.494	302	17 сен 16	
3	1	717.460	0.012	-6.7	-3.7	-0.1	-0.014	30	0	12	28	49	44929	0.485	302	17 сен 16	
3	2	717.459	0.008	-3.2	-1.1	-0.1	-0.013	30	1	12	31	17	45077	0.483	302	17 сен 16	
0	1	717.130	0.020	-4.2	-1.8	-0.04	-0.011	30	0	12	43	24	45804	0.150	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.131	0.023	-3	-2.1	-0.03	-0.011	30	0	12	44	3	45843	0.151	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо
0	1	717.129	0.029	-2.6	-2.8	-0.03	-0.011	30	2	12	44	38	45878	0.149	302	17 сен 16	Опорка - крыльцо

Рис. 4.3. Пример обработки и оформления рейса в табличном редакторе «MS Excel»

В результате обработки рейса оператор получает множество наблюденных значений силы тяжести на гравиметрических пунктах сети, скорректированных за смещение нуляпункта. Пример оформления таблицы в табличном редакторе «MS Excel» с обработкой рейса проиллюстрирован на рис. 4.3.

Так, в левом верхнем углу приведенной на рисунке таблицы указываются ее название и идентификатор участка работ. Ниже следует шапка обработки с указанием основных параметров съемки и расчетом длительности рейса, величины полного смещения нуляпункта и смещение нуляпункта за расчетную единицу времени (сек).

Данные в представленной на рисунке основной таблице извлечены из текстового файла результатов измерений с гравиметра. Первые две строки содержат измерения на опорных пунктах в начале и в конце рейса; обе строки дублируют соответствующие строки из основного массива данных ниже; их можно идентифицировать по совпадению чисел в ячейках. Измерения на опорных пунктах обозначены нулевым идентификатором в столбце профиля («LINE»). В данном случае рейс имел начало и конец на одном и том же опорном пункте под номером 1 («STATION»). На каждом опорном пункте зафиксировано три измерения.

Задача оператора при обработке рейса заключается в грамотном выборе начала и конца рейса. Выбор может быть выполнен по следующим критериям:

- обратить внимание на три измерения на опорном пункте в начале рейса; первое значение «717,108» в столбце «GRAV» (отсчет гравиметра) отличается от двух остальных — «717,110»; кроме того, при первом измерении в течение 30 секунд (столбец «Dur») было забраковано 10 отсчетов (столбец «Rej»), значит, измерение было не самого лучшего качества; в результате оператор может выбрать в качестве начальной точки рейса любое из двух последующих измерений, как наиболее часто встречающееся; принципиального различия между ними нет, но если необходимо обосновать выбор из двух одинаковых отсчетов, то следует выбрать тот, у которого меньше величина стандартного отклонения в процессе измерений (столбец «SD»), меньше величина случайных помех;
- обратить внимание на три измерения на опорном пункте в конце рейса; эти измерения характеризуются примерно одинаковым качеством; по всем позициям их можно считать равноправными; различие в отсчетах между ними небольшое, одинаковые значения отсутствуют; в данном случае

оператор может остановить свой выбор на том из них, которое находится ближе всех остальных к их общему среднему арифметическому; в данном случае это отсчет со значением «717,130».

После того, как выбраны отсчеты начала и конца рейса, можно рассчитать величину полного и секундного смещения нуля прибора в рейсе и поместить их в соответствующие ячейки шапки таблицы. Поскольку предельное разрешение гравиметра составляет 0,001 мГал, то все числа при оформлении таблицы удобно округлять до трех знаков после запятой, но в расчеты должны входить полные значения с максимально возможным знаком. В первую очередь, это касается таких малых величин, как смещение нуля за единицу времени.

Столбец «сек» содержит время, переведенное в формат секунд. Столбец «Гнабл» содержит расчет наблюдаемых значений силы тяжести, скорректированных за смещение нуля согласно формуле (4.2). Однако первые две строки начала и конца рейса, отделенные от остального массива данных, вместо формул содержат условные или абсолютные значения силы тяжести (число) $g_{абс}$ на опорных пунктах для приведения съемки в единый уровень. Столбец примечаний содержит всю дополнительную информацию, полученную в процессе съемки, которая может быть полезной оператору в обработке или при последующей интерпретации.

Обработка опорных рейсов при разбивке опорной сети гравиметрических пунктов производится аналогично. В качестве исходных (начала и конца рейса) выступают пункты государственной гравиметрической сети либо один исходный пункт вблизи участка работ, закрепленный долговременным опознавательным знаком с принятым условным значением силы тяжести (если не требуется приведение съемки к абсолютному уровню). Поскольку каждый опорный пункт наблюдается не менее чем в трех независимых рейсах, в результате за значение силы тяжести на нем принимается среднее арифметическое всех наблюдаемых значений.

В сложном случае, когда опорная сеть разбивается полигонами в нескольких рейсах, при этом полигоны имеют общие звенья, уравнивание значений силы тяжести производится любым из известных способов, например, методом полигонов или методом узлов. В данном учебнике эти методы не рассматриваются. На практике легче грамотно подойти к проектированию наблюдений на пунктах опорной сети, предельно упростив

съемку, чем увязывать сеть при последующей обработке, что обычно и делается.

§2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СЪЕМКИ И ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Контроль качества съемки и оценка точности наблюдений выполняются в полевой период работ, чтобы при выявлении некачественных измерений вовремя переделать их заново.

Количество контрольных наблюдений должно составлять не менее 5 – 10% от общего числа наблюдений на пунктах рядовой сети и определяется геологическим заданием.

После обработки рейсов оператор выбирает первичные и повторные (контрольные) значения, формируя ведомость контрольных наблюдений. Фрагмент оформленной ведомости представлен на рисунке 4.4. Процесс обработки заключается в следующем: из нескольких значений на пункте рассчитывается среднее арифметическое, которое записывается в столбец « \bar{G} » ведомости. Столбец «откл²» делает расчет более наглядным и содержит число — квадрат отклонения каждого из наблюденных значений на пункте от их общего среднего.

В столбце «СКП» рассчитано среднеквадратическое отклонение, характеризующее рассеяние k -числа единичных равноточных измерений $G_{\text{набл}_i}$ на пункте относительно их среднего арифметического \bar{G} по формуле:

$$\text{СКП} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (G_{\text{набл}_i} - \bar{G})^2}{k \cdot (k - 1)}}. \quad (4.3)$$

В столбце «Количество измерений» указывается количество независимых измерений k на одном проконтролированном пункте.

Рассмотрим теперь шапку ведомости, содержащую текст красного и синего цвета. Среднее число измерений на пункте или средняя кратность K получается путем деления полного числа контрольных измерений N на полное число проконтролированных пунктов n . Основным критерием качества наблюдений с гравиметром является среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения, вычисляемая согласно инструкции по гравиразведке на основе сходимости контрольных наблюдений с первичными по формуле

$$\varepsilon_{\text{ряд}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_{\text{набл}i} - \bar{G})^2}{N - n}}, \quad (\text{XI.4})$$

Измерения признаются доброкачественными, если погрешность $\varepsilon_{\text{ряд}}$ не превышает установленную проектом.

Ведомость контрольных наблюдений с гравиметром									
КАМПУС ПГНИУ									
Среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения, мГал									0.005
Полное количество проконтролированных пунктов									80
Полное количество независимых контрольных измерений									160
Среднее количество независимых измерений на пункте									2.00
Процент контрольных наблюдений									100.00%
Профиль	ГП	Гнабл	Ser No	Дата	откл^2	Кратность	\bar{G}	СКП	Прим.
1	1	-15.980	302	3 авг 16	0.000	2	-15.982	0.002	Контроль
		-15.984	302	5 авг 16	0.000				
1	011	-15.999	302	3 авг 16	0.000	2	-16.004	0.005	Контроль
		-16.009	302	5 авг 16	0.000				
1	2	-16.068	302	5 авг 16	0.000	2	-16.064	0.004	Контроль
		-16.059	302	3 авг 16	0.000				
1	021	-15.999	302	3 авг 16	0.000	2	-16.002	0.003	Контроль
		-16.006	302	5 авг 16	0.000				
1	3	-15.958	302	3 авг 16	0.000	2	-15.957	0.000	Контроль
		-15.957	302	5 авг 16	0.000				
1	031	-15.911	302	3 авг 16	0.000	2	-15.912	0.001	Контроль
		-15.913	302	5 авг 16	0.000				
1	4	-15.935	302	3 авг 16	0.000	2	-15.938	0.003	Контроль
		-15.942	302	5 авг 16	0.000				
1	041	-15.852	302	3 авг 16	0.000	2	-15.848	0.004	Контроль
		-15.844	302	5 авг 16	0.000				
1	5	-15.623	302	3 авг 16	0.000	2	-15.624	0.001	Контроль
		-15.625	302	5 авг 16	0.000				
1	6	-15.527	302	3 авг 16	0.000	2	-15.529	0.002	Контроль
		-15.531	302	5 авг 16	0.000				
1	7	-15.441	302	3 авг 16	0.000	2	-15.443	0.001	Контроль
		-15.444	302	5 авг 16	0.000				
1	8	-15.337	302	3 авг 16	0.000	2	-15.337	0.000	Контроль
		-15.337	302	5 авг 16	0.000				
1	9	-15.192	302	3 авг 16	0.000	2	-15.190	0.001	Контроль
		-15.189	302	5 авг 16	0.000				
1	10	-15.071	302	3 авг 16	0.000	2	-15.072	0.001	Контроль
		-15.073	302	5 авг 16	0.000				
1	11	-14.913	302	3 авг 16	0.000	2	-14.912	0.001	Контроль
		-14.912	302	5 авг 16	0.000				
1	12	-14.757	302	3 авг 16	0.000	2	-14.752	0.004	Контроль
		-14.748	302	5 авг 16	0.000				
1	13	-14.656	302	3 авг 16	0.000	2	-14.658	0.002	Контроль
		-14.660	302	5 авг 16	0.000				
1	14	-14.548	302	3 авг 16	0.000	2	-14.549	0.001	Контроль
		-14.549	302	5 авг 16	0.000				
1	15	-14.437	302	3 авг 16	0.000	2	-14.441	0.004	Контроль
		-14.445	302	5 авг 16	0.000				

Рис. 4.4. Фрагмент ведомости контрольных наблюдений в табличном редакторе «MS Excel»

Среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения ε для пунктов опорной сети рассчитывается аналогично согласно формуле (4.4). Оценка точности опорной сети, созданной по центральной системе, выполняется по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \frac{\varepsilon}{\sqrt{K}}. \quad (4.5)$$

Среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести на гравиметрическом пункте рядовой сети вычисляется по формуле

$$\varepsilon_g = \pm \sqrt{\varepsilon_{\text{оп}}^2 + \varepsilon_{\text{ряд}}^2}. \quad (4.6)$$

Три обозначенные выше оценки в соответствии с выражениями (4.4)—(4.6) вместе характеризуют качество выполненной гравиметрической съемки.

После выполнения оценки качества гравиметрических наблюдений оператор формирует каталог наблюдаемых значений силы тяжести, в который отбирает по одному из значений $G_{\text{набл}}$ на каждом гравиметрическом пункте. Если проектом предусмотрено выполнение контрольных измерений в объеме 100% от общего числа гравиметрических пунктов рядовой сети, то каталог наблюдаемых значений создается по среднеарифметическим значениям силы тяжести, взятым из ведомости контрольных наблюдений.

В случае, когда проектом не предусмотрена 100%-ная повторяемость, в каталог отбирается по одному наблюдаемому значению силы тяжести на каждом гравиметрическом пункте из обработанных рейсов. Рекомендуется отбирать в каталог гравиметрические наблюдения из одного рейса, если пункты, принадлежащие этому рейсу, были проконтролированы независимыми наблюдениями фрагментарно (не 100% от объема). Если на гравиметрическом пункте выполнено несколько измерений, оператор должен выбрать наиболее достоверное из них, руководствуясь каким-либо критерием, среди которых могут быть:

- неоднократное совпадение величин отсчетов на пункте;
- наименьшая величина стандартного отклонения SD при измерениях;
- наименьшие углы отклонения системы от вертикали TILT_X, TILT_Y;
- наименьшее количество отбракованных значений в столбце «Dur»;
- собственные наблюдения за поведением прибора и влиянием на него различных помех в процессе съемки.

Последующие процедуры учета нормального поля и ввода поправок в наблюдаемые значения силы тяжести детально рассмотрены в следующей главе наряду с физическими основами, поясняющими смысл каждой из них.

ГЛАВА V. ВВОД ПОПРАВК В НАБЛЮДЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Интерпретации подвергаются аномалии силы тяжести, а не наблюдаемые значения. Аномалия есть отклонение от нормального поведения или принятого в качестве такового. Вклад нормальной модели в наблюдаемые значения силы тяжести настолько велик, что на его фоне аномалии от неоднородностей внутри Земли визуально не различимы, что затрудняет интерпретацию.

В случае силы тяжести для получения аномального поля необходимо вычесть влияние некоторой нормальной модели Земли, состоящей из нескольких приближений. Влияние каждого из приближений устраняется применением к наблюдаемым значениям корректирующих процедур, иначе говоря, вводом поправок (англ. — corrections).

§1. УЧЕТ НОРМАЛЬНОГО ПОЛЯ

Вычитание из наблюдаемых значений силы тяжести $g_{\text{набл}}$ нормального значения γ_0 позволяет частично устранить общее влияние Земли, аппроксимированной более простым телом в виде несжимаемого эллипсоида вращения, заполненного массами с однородной плотностью. Это самое первое — нулевое приближение нормальной модели Земли (рис. 5.1). Существует множество эллипсоидов, приближающих фигуру Земли. Все они различаются положением центров и размерами полуосей.

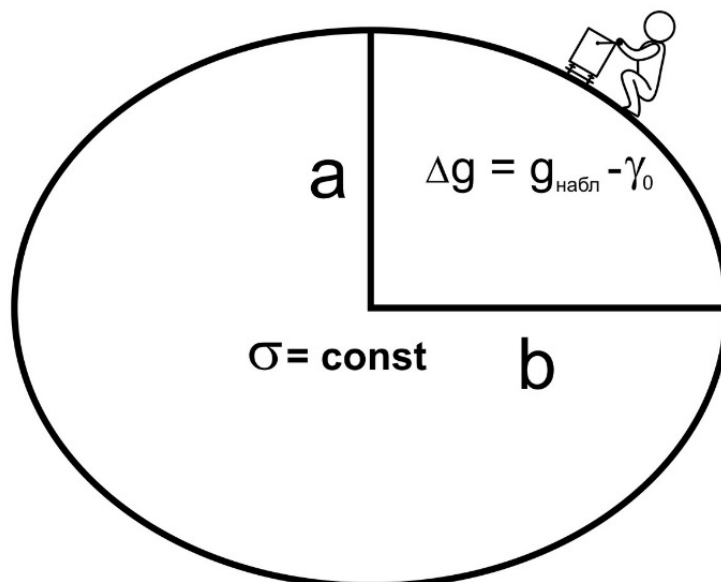


Рис. 5.1. Приближение Земли эллипсоидом вращения и вычитание нормального значения силы тяжести

Напомним, что под нормальным значением силы тяжести γ_0 понимается ее значение, вычисленное на поверхности теоретической Земли (эллипсоида относимости, референц-эллипсоида). Процедура вычисления нормального значения силы тяжести выполняется по одной из формул, указанных в §3 гл. I в первой части учебного пособия. В России со времен СССР инструкцией по гравиразведке регламентировано применение формулы Гельмерта (1901-1909 гг.), поскольку она выведена для эллипсоида со сжатием, близким к сжатию эллипсоида Красовского, наилучшим образом аппроксимирующего поверхность Земли на территории бывшего СССР. Значение нормального поля γ_0 , рассчитанное по формуле Гельмерта для каждого гравиметрического пункта исходя из его географической широты, вычитается из наблюдаемого значения силы тяжести. Таким образом, получается первое из аномальных значений силы тяжести:

$$\Delta g = g_{\text{набл}} - \gamma_0. \quad (5.1)$$

§2. ПОПРАВКА ЗА ВЫСОТУ ПУНКТА НАБЛЮДЕНИЙ

Учета нормального поля недостаточно для того, чтобы привести наблюдаемые значения силы тяжести в удобный для интерпретации вид. Нормальное значение силы тяжести представляет собой гравитационное влияние эллипсоида, рассчитанное на поверхности самого эллипсоида, тогда как гравиметрический пункт в общем случае расположен вне этой поверхности на некоторой высоте выше или ниже ее.

Рассмотрим рис. 5.2 в сравнении с рис. 5.1. Данный рисунок делает простым и ясным понимание поправки за высоту, которая вводится для того, чтобы нивелировать устранение избыточной (или недостаточной) величины нормального поля. На рис. 5.1 оператор выполняет измерения с гравиметром непосредственно на поверхности двухосного эллипсоида. На рис. 5.2 ситуация адекватна реальности, поскольку измерения выполняются вне поверхности эллипсоида. Высота h есть превышение гравиметрического пункта над эллипсоидом.

Предположим, что значение силы тяжести на поверхности эллипсоида было равно 150 мГал. То есть если бы оператор выполнял измерения на поверхности эллипсоида, он попросту бы вычел 150 мГал из наблюдаемых значений силы тяжести и таким образом полностью произвел учет принятой нормальной модели Земли.

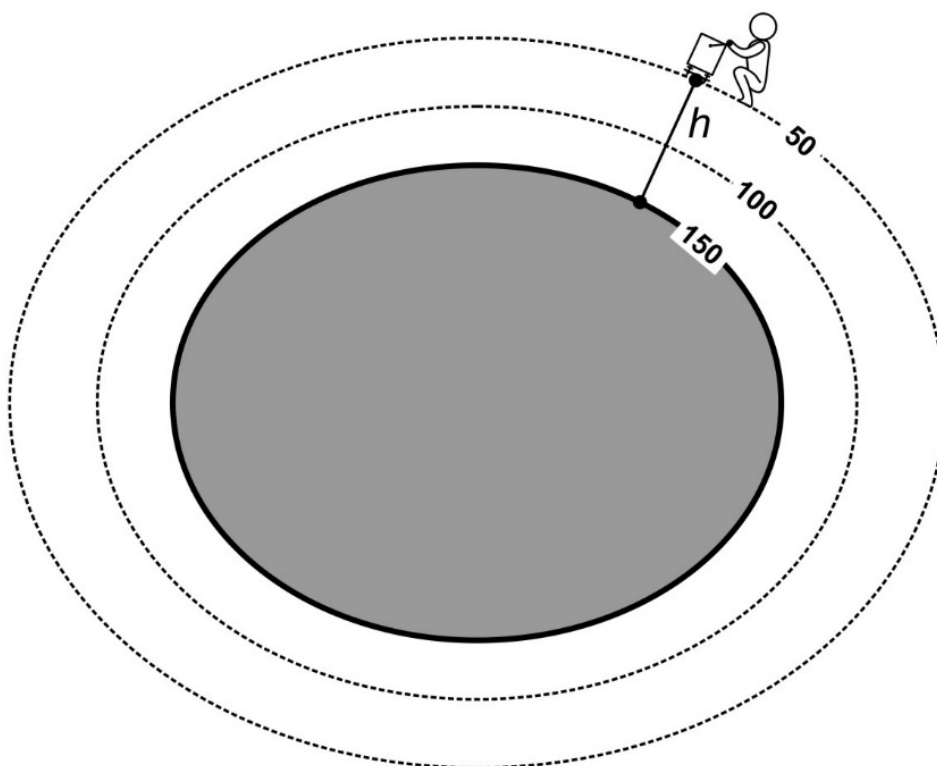


Рис. 5.2. Коррекция наблюдаемых значений силы тяжести за высоту

Допустим, что на высоте h над поверхностью эллипсоида, где оператор в реальности выполнял измерения, гравитационное влияние эллипсоида равно 50 мГал. Гравитационное поле затухает с удалением от источника. Вычитая из наблюдаемых данных нормальное значение $\gamma_0 = 150$ мГал, рассчитанное на поверхности эллипсоида, оператор удаляет из них лишние 100 мГал, поскольку на данной высотной отметке ему необходимо было удалить всего лишь 50 мГал.

Эти незаслуженно удаленные 100 мГал необходимо вернуть в расчеты, чтобы сделать аномалию корректной. Соответственно, оператор должен прибавить к уже полученному аномальному значению некоторую величину, которая в упрощенном виде рассчитывается как произведение нормального градиента влияния земного эллипсоида на высоту точки наблюдений.

На этапе становления гравиметрии как геофизического метода поисков и разведки полезных ископаемых было принято решение упростить формулу вычисления поправки за высоту точки наблюдений h до следующего вида:

$$\delta g_{\text{св.в}} = 0,3086 \cdot h. \quad (5.2)$$

На самом деле формула имеет более сложный вид и для каждого из эллипсоидов, приближающих Землю, немногим отличается. Но выражение (5.2) так и осталось общепринятым в общемировой практике

гравиметрических исследований, хотя за рубежом иногда применяют формулу с точностью до пятого знака после запятой:

$$\delta g_{\text{св.в}} = 0,30865h. \quad (5.3)$$

Поправка за высоту, таким образом, является лишь дополнением к модели нормального поля, вычисленного на поверхности эллипсоида и корректирующем его. Она вводится исходя из предположения, что между точкой наблюдений и поверхностью эллипсоида относимости отсутствуют какие-либо массы. На самом деле массы здесь присутствуют, но поправка их попросту не учитывает; ее величина учитывает лишь нормальный градиент силы тяжести, создаваемый эллипсоидом. Из-за этого поправку за высоту иначе называют поправкой в свободном воздухе, а аномалию, полученную путем применения формулы (5.4) — аномалией или редукцией в свободном воздухе:

$$\Delta g_{\text{св.в.}} = g_{\text{набл}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{св.в.}} \quad (5.4)$$

Поправка за высоту вводится с положительным знаком, если пункт наблюдений расположен выше поверхности эллипсоида относимости, и с отрицательным — если ниже нее. Нормальный вертикальный градиент силы тяжести настолько велик (0,3086 мГал/м), что пренебрежение им в расчетах (имеется в виду пренебрежение поправкой за высоту) делает невозможным интерпретацию аномалий силы тяжести при геологоразведочных работах. Для корректного расчета высоты гравиметрических пунктов должны быть измерены с малой погрешностью (не более 5 см для современных поисково-разведочных работ; не более 1–2 см для микрогравиразведки), что налагает достаточно высокие требования на топографо-геодезическое сопровождение гравиметрических съемок.

Аномалию в свободном воздухе часто путают с аномалией Фая или аномалией в редукции Фая. Последняя называется так по имени известного астронома Эрве Фая (англ. — H. Faye) (1814–1902), сочетавшего редукцию силы тяжести в свободном воздухе с поправкой за влияние рельефа земной поверхности (имеется в виду отклонение земной поверхности от сфероида) для решения задач геодезической гравиметрии.

В равнинных районах, где перепады рельефа земной поверхности невелики, аномалия в свободном воздухе весьма близка по величине к аномалии Фая, обуславливая при этом смешение данных понятий. Если рассмотреть графики аномалий силы тяжести в свободном воздухе, они будут

иметь практически полную корреляцию с рельефом земной поверхности и не пригодны для решения геологоразведочных задач.

§3. ПОПРАВКА ЗА ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ

Как было указано в предыдущем параграфе, поправка за высоту точки наблюдений не учитывает влияния масс, расположенных между поверхностью референц-эллипсоида и пунктом наблюдений. Она не предназначена для этой цели. Данное влияние учитывается при помощи двух других поправок — за влияние промежуточного слоя и влияние рельефа местности.

Поправка за промежуточный слой являет собой еще одну ступень приближения нормальной модели Земли, ее уточняющий компонент. В целом обе поправки — и за промежуточный слой, и за влияние рельефа местности призваны оценить влияние масс выше эллипсоида относимости, но ниже земной поверхности. В настоящее время нет никаких препятствий разделять процедуру учета этих масс на две отдельные коррекции. Такое разделение возникло в эпоху ручного счета. В связи с низкой производительностью вычислений требовалось упростить сложную вычислительную задачу — расчет гравитационного влияния от слоя с эллипсоидальной подошвой и произвольного вида кровлей (рис. 5.3), причем сведения о кровле слоя, т. е. о земной поверхности, были доступны лишь в виде топографических карт, построенных по данным аэрофотосъемки или наземной топографической съемки.

Первое упрощение состояло в разделении одной сложной корректирующей процедуры на две: одна из них — поправка или коррекция за промежуточный слой давала приближенную оценку гравитационного влияния промежуточного слоя с эллипсоидальными границами, нижняя из которых совпадала с поверхностью принятого референц-эллипсоида, а верхняя проходила через точку наблюдений параллельно нижней; другая, являлась коррекцией за влияние рельефа местности, позволяла оценить влияние отклонений земной поверхности от поверхности эллипсоида, проведенной через точку наблюдений и являющейся кровлей промежуточного слоя. В иностранной литературе поправку за влияние рельефа местности принято называть топографической коррекцией (англ. — topographic correction), а массы, слагающие рельеф земной поверхности, — топографическими массами.

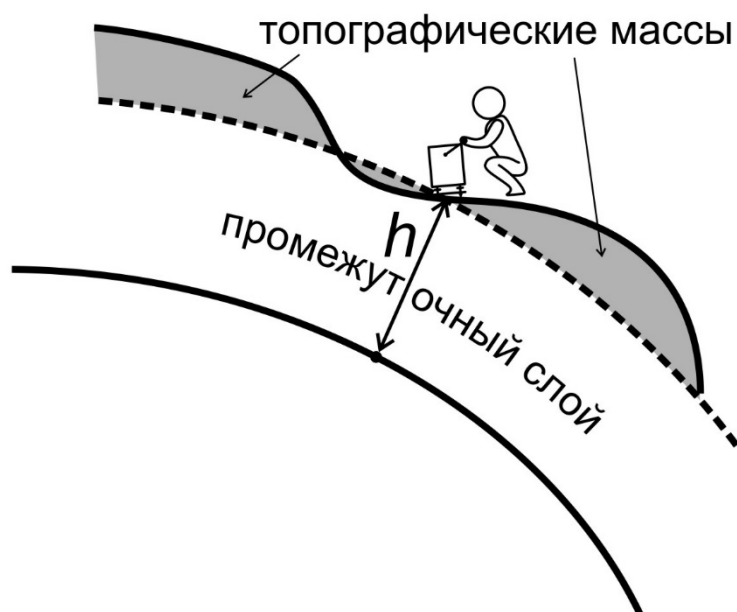


Рис. 5.3. Пояснение к учету масс между эллипсоидом относимости и земной поверхностью

Второе упрощение заключалось в том, чтобы заменить расчет влияния эллипсоидального промежуточного слоя более простым расчетом влияния плоскопараллельного слоя, пренебрегая до известной степени кривизной Земли. В таком случае гравитационный эффект бесконечного по простираению плоскопараллельного слоя (рис. 5.4), заполненного массами с постоянной плотностью σ и имеющего мощность, равную высоте h точки наблюдений над эллипсоидом, вычисляется по следующей формуле:

$$\delta g_{\text{пр.сл}} = 0,0419\sigma h. \quad (5.5)$$

Поправка, состоящая из суммы поправок за высоту и промежуточный слой, называется неполной поправкой Буге, а с учетом поправки за влияние рельефа местности — полной поправкой Буге, по имени французского ученого Пьера Буге (P. Bouguer) (1698–1758), впервые описавшего данную процедуру редуцирования. Соответственно, аномалия силы тяжести, полученная по формуле:

$$\Delta g_{\text{Б}} = g_{\text{набл}} - \gamma_0 + \delta g_{\text{св.в}} - \delta g_{\text{пр.сл}} + \delta g_{\text{р}}, \quad (5.6)$$

называется аномалией Буге или аномалией в редукации Буге.

В развернутом виде формула (5.6) преобразуется в выражение:

$$\Delta g_{\text{Б}} = g_{\text{набл}} - \gamma_0 + (0,3086 - 0,0419\sigma)h + \delta g_{\text{р}}. \quad (5.7)$$

Ранее возникали споры о том, что поправки в наблюдаемые значения относят аномалии в проекции точек наблюдений на поверхность референц-

эллипсоида или геоида. Данное утверждение неверно. Аномалии Буге никуда не перемещаются в результате корректирующих процедур и относятся к координатам и высотам гравиметрических пунктов.

КОСВЕННЫЙ ЭФФЕКТ¹⁴

При вычислении аномалий силы тяжести часто умалчивается, что высоты гравиметрических пунктов с измеренными значениями силы тяжести определяются относительно геоида в то время, как нормальные значения силы тяжести вычисляются на поверхности эллипсоида. Поверхности геоида и эллипсоида не совпадают. Поправки за высоту и промежуточный слой зависят от высоты гравиметрического пункта. Таким образом, нормальное поле определено на эллипсоиде, а корректирующие поправки за высоту и промежуточный слой определены для высот относительно геоида. Вычисленные аномалии в этом случае называют «смешанными», а гравитационный эффект, возникающий вследствие разницы высот, — «косвенным».

До появления глобальных систем спутникового позиционирования для измерения посредством нивелирования были доступны только высоты пунктов относительно геоида (уровень моря). Поэтому практически во всех учебниках описывается только система высот относительно геоида. Современные системы спутниковой навигации осуществляют измерение высоты земной поверхности относительно референц-эллипсоида, поэтому использование таких высот автоматически снимает вопрос о необходимости учета косвенного эффекта.

За рубежом предлагается аномалии силы тяжести, вычисленные с высотами относительно эллипсоида, называть «эллипсоидальными». Учет косвенного эффекта не только актуален для мелкомасштабных съемок на больших площадях или протяженных региональных профилях, но и желателен и при средне- и крупномасштабных съемках на площадях более 100 км².

Поправка за влияние рельефа местности δg_p будет рассмотрена в третьей части учебного пособия, поскольку ее расчет производится на камеральном этапе выполнения гравиметрических исследований. Поправка за влияние рельефа рассчитывается с плотностью σ , принятой к расчету для поправки за промежуточный слой. Подробно о процедуре выбора плотности промежуточного слоя также будет изложено в третьей части издания.

Идея введения поправки за промежуточный слой в геодезической гравиметрии состояла в том, чтобы представить гравитационное поле «регуляризованной Земли» за исключением масс, выступающих за поверхность геоида. Фактически же введение этой поправки следует рассматривать как

¹⁴ Бычков и др. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках с корректировками автора учебника. Пермь, 2015.

частичное исключение влияния первой и наиболее контрастной границы — рельефа земной поверхности.

Граница «земля-воздух» является наиболее близкой из всех геологических границ к датчику гравиметра при выполнении измерений. Поскольку воздух имеет весьма малую плотность, эта граница является еще и самой контрастной. Третье ее свойство — кривизна. Если бы земная поверхность являлась горизонтальной плоскостью, необходимость ввода поправок за промежуточный слой и влияние рельефа местности при гравиметрической съемке в относительном уровне попросту бы отсутствовала, поскольку поправка вводится с некоторой средней плотностью пород, выходящих на поверхность. Аномалия силы тяжести просто изменялась бы на постоянную величину.

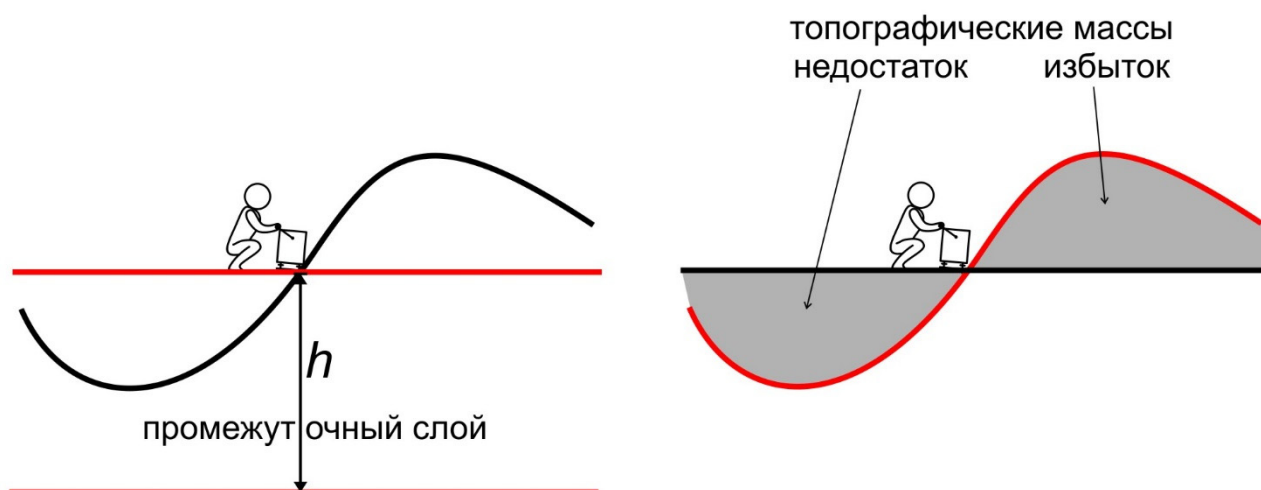


Рис. 5.4. Разделение поправки за влияние масс между эллипсоидом относимости и земной поверхностью на поправку за плоскопараллельный промежуточный слой (слева) и поправку за влияние рельефа местности (справа)

Аномальный эффект создается разностью (различием, контрастом, перепадом, скачком) плотностей на какой-либо границе раздела одной или нескольких сред, а не собственно плотностью или массой. Аномальный эффект плоскопараллельного горизонтального слоя с постоянной аномальной плотностью равен нулю. Такой слой создает плоское поле, изолинии которого параллельны кровле и подошве. Криволинейная кровля слоя — реальная земная поверхность — является причиной всех аномалий силы тяжести в составе комплексной поправки за промежуточный слой и влияние рельефа. Пренебрежение данными поправками приводит к тому, что в аномалиях в свободном воздухе сложно различить влияние геологических тел. Контрастная

граница «земля-воздух» создает интенсивные аномалии, маскирующие аномалии от целевых объектов в земной коре.

При производстве современных гравиметрических съемок сферичность Земли необходимо учитывать. Различными исследователями (Г.Г. Ремпель, T.R. LaFehr, А.И. Каленицкий и В.П.Смирнов) предложены специальные формулы вычисления поправки за сферический промежуточный слой. Формула Г.Г.Ремпеля приводится ниже.

Поправки за влияние рельефа в радиусе до 5–10 км допустимо считать без учета кривизны Земли. Дальше данного расстояния от пункта наблюдений уклонения земной поверхности от горизонтальной плоскости за счет сферичности существенно возрастают и составляют более 5 м, что превышает погрешность представления высот на крупномасштабных топографических картах.

Если поправки за влияние рельефа местности для модели «плоской» Земли имеют всегда положительный знак, то при использовании сферической модели они могут быть как положительны, так и отрицательны, в зависимости от положения топографических масс относительно горизонтальной плоскости, проходящей через точку наблюдений.

Следует повторить, что поправки за промежуточный слой и влияние рельефа местности учитывают влияние масс между эллипсоидом относимости (или иной поверхностью относимости) и земной поверхностью только в приближении постоянной плотности распределения этих масс.

В соответствии с регламентом, установленным инструкцией по гравиразведке, помимо каталога гравиметрических пунктов и карты аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя, наиболее адекватной реальной плотности пород, выходящих на поверхность, ранее подлежали передаче в специализированные предприятия карты аномалий силы тяжести в этой же редукции с поправкой за промежуточный слой при принятых стандартных значениях плотности слагающих его пород $\sigma = 2,30$ г/см³ и $\sigma = 2,67$ г/см³, причем карта с плотностью промежуточного слоя $\sigma = 2,30$ г/см³ сдавалась без поправки за влияние рельефа местности. Данные значения плотности характеризуют средние значения плотности пород, слагающих верхнюю часть разреза в равнинной и горной местности соответственно.

Для геологической интерпретации составляются карты и графики аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя, близкой к реальной плотности пород, слагающих рельеф. В этих случаях поверхность относимости (подошва промежуточного слоя) не обязательно должна совпадать с поверхностью эллипсоида или геоида. Часто при выборе подошвы промежуточного слоя руководствуются принципом его наименьшей мощности.

Описанные выше поправки исчерпывающе учитывают вклад в наблюдаемое поле некоторой простой нормальной модели Земли и ее гравитационного поля. Помимо этих поправок, ввод которых представляет стандартную процедуру коррекции наблюдаемых значений силы тяжести, обязательно учитываются не только влияние лунно-солнечного притяжения, но и иные факторы (плотность атмосферного столба, влияние влажности грунтов, изменения уровня подземных вод, техногенных факторов и др.), изменяющие величину и форму аномалий силы тяжести.

МНЕНИЕ АВТОРА

При развитии метода гравиметрической разведки неоднократно предпринимались попытки учета влияния промежуточного слоя и рельефа местности с переменной плотностью пород верхней части геологического разреза. На взгляд автора издания, данная процедура не приобрела популярности при производстве гравиметрических работ и, скорее всего, будет востребована только в каких-либо исключительно уникальных исследованиях в силу того что для коррекции данных с переменной плотностью пород необходимы детальные сведения о плотностях пород верхней части разреза на всей изучаемой площади, которые могут быть получены преимущественно по данным каротажа либо лабораторным исследованиям керна из скважин, расположенных по густой сети. В противном случае данная процедура внесет больше неоднозначности и запутает интерпретацию, поскольку будет представлять собой существенное усложнение простой модели, влияние которой устраняется из наблюдаемых данных.

При интерпретации аномальных геофизических полей важно понимание не только самих аномалий, но и нормального поведения поля и тех составляющих модели Земли, которые генерируют это поле. Интерпретация отклонений (аномалий) от простой модели вызывает намного меньше вопросов, чем интерпретация отклонений относительно сложной модели. Данный аспект указан в учебном пособии как личное мнение автора исходя из его геофизического опыта и понимания предмета и не должен восприниматься читателем как догма.

§4. ПОПРАВКА ЗА ПРИТЯЖЕНИЕ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

Взаимное перемещение Земли и небесных тел относительно друг друга изменяет наблюдаемую величину силы тяжести. Наибольшее влияние оказывает изменение положения Луны и Солнца относительно Земли. В наблюдаемые значения в обязательном порядке вносится поправка за влияние лунно-солнечного притяжения или приливная поправка (англ. — tidal). Современные гравиметры Autograv CG-5 и CG-6 автоматически рассчитывают величину данного влияния в процессе измерений и вносят соответствующую поправку в наблюдаемые значения. Для корректного учета необходимо знать траекторию движения Луны относительно Земли и Земли относительно Солнца. В некоторых формулах, например в формулах А. К. Маловичко, необходимы сведения о положении небесных тел в системе небесных координат — эфемерид. Альманах эфемерид представляет собой таблицу положений Луны, Солнца и других небесных тел, вычисленных через равные промежутки времени.

Пусть в качестве фигуры Земли в невозмущенном состоянии принимается сфероид с центром в точке O (рис. 5.5). Точка L является центром небесного тела, а P — точка наблюдений на поверхности Земли. Кривизной рельефа земной поверхности в данном случае можно пренебречь ввиду малого отношения высот рельефа к расстояниям R и r , где R — радиус Земли; ; r — расстояние между центрами небесного тела (Луны или Солнца) и Земли.

Нормальная к поверхности земного сфероида составляющая притяжения Луны или Солнца g_r до приемлемой степени упрощения выражается формулой

$$g = 3G \frac{m}{r^3} R \left(\cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right), \quad (5.8)$$

где G — гравитационная постоянная; m — масса Луны или Солнца Ψ — центральный угол между направлением из центра Земли на небесное тело и направлением из центра Земли на точку наблюдений.

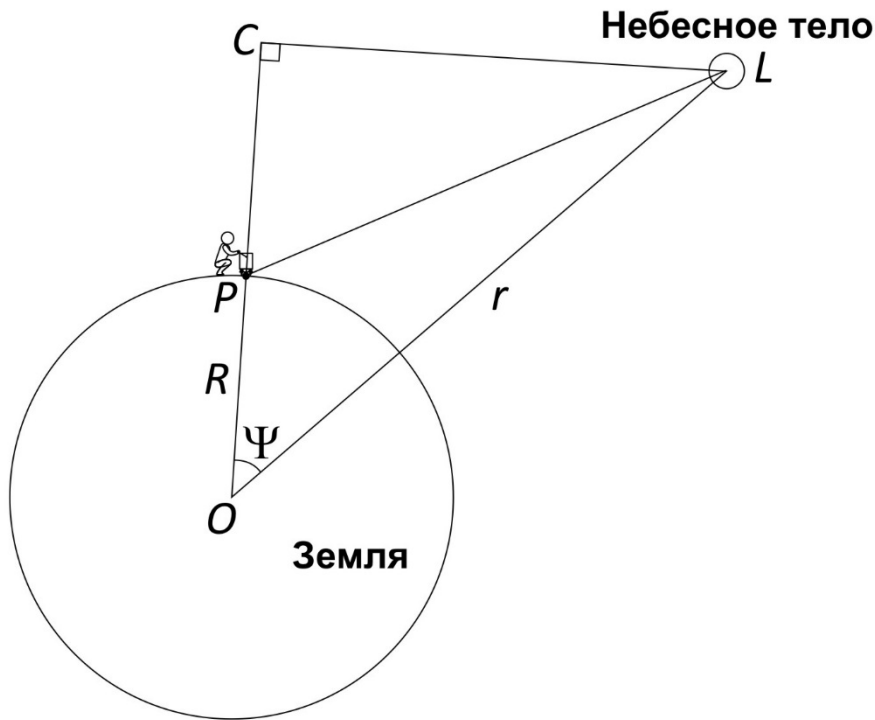


Рис. 5.5. Лунно-солнечное влияние, рассчитанное по формулам Лонгмана за неделю (слева), и по тем же формулам — гравиметром Autograv CG-5 в течение рейса длительностью 7,5 ч (справа)

Используя средние значения указанных величин, Маловичко вычислил значения коэффициента $3G \frac{m}{r^3} R$ для каждого из этих небесных тел и привел формулы к следующему виду:

$$g_L = 0,165\chi \left(\cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right), \quad (\text{XII. 9})$$

где χ — коэффициент, учитывающий изменение расстояния между Землей и Луной при обращении последней по орбите вокруг Земли, $\chi = \frac{(r_L)_{\text{cp}}^3}{r_L^3}$; $(r_L)_{\text{cp}}$ — среднее расстояние между центрами Земли и Луны; r_L — расстояние между центрами Земли и Луны в момент времени, для которого рассчитывается влияние приливных сил.

Влияние Солнца рассматривается в виде:

$$g_C = 0,076 \left(\cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right). \quad (\text{XII. 10})$$

Очевидно, что изменение расстояния между Землей и Солнцем при движении Земли по орбите вокруг Солнца в данной формуле игнорируется, по-видимому, ввиду его малой величины.

А. К. Маловичко рассмотрен также случай приливного эллипсоида, возникающего в результате деформации сферической фигуры Земли вследствие действия приливных сил. В этом случае к формулам (5.9) и (5.10) необходимо добавить слагаемые, отвечающие изменению силы тяжести за счет: 1) перераспределения массы в теле Земли; 2) смещения точки по высоте вследствие деформации земной поверхности и образования приливного эллипсоида.

Согласно утверждению автора формул (5.9) – (5.10), гравиметрические наблюдения, проводимые в стационарных условиях, показывают, что наблюдаемые величины лунно-солнечных вариаций силы тяжести больше вычисленных по данным формулам примерно на 15% (разброс обусловлен особенностями строения земной коры), а значит, для практических целей достаточно численные коэффициенты в данных формулах увеличить на 15% и привести их к виду:

$$g_{\text{л}} = 0,190\chi \left(\cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right), \quad (5.11)$$

$$g_{\text{с}} = 0,087 \left(\cos^2 \Psi - \frac{1}{3} \right). \quad (5.12)$$

В настоящее время траектории объектов солнечной системы изучены достаточно хорошо. Разработаны математические модели для расчета эфемерид. В гравиметрах компании Scintrex, начиная с моделей CG-3, для коррекции лунно-солнечного притяжения заложены формулы Лонгмана (I.M. Longman).

Поскольку применение этих гравиметров «де факто» стало стандартом в мировой наземной гравиразведке, формулы Лонгмана требуют обязательного упоминания на страницах данного издания. На практике бывают случаи, когда настройки времени или широты в гравиметре перед началом съемки введены неверно. Часть рейсов требует пересчета некорректно рассчитанных поправок за лунно-солнечное притяжение по тем же самым формулам, что и остальные — введенные корректно.

Отталкиваясь от тех же базовых формул, что и Маловичко, но со ссылками на зарубежные первоисточники, Лонгман выражает такие величины, как зенитные углы Луны и Солнца, и расстояния между центрами Земли и этих небесных тел через переменные времени (с привязкой к универсальному времени) и расстояния (в зависимости от широты и альтитуды) от точки

наблюдений на поверхности Земли до ее центра и получает систему формул, полностью описывающих приливные силы. Если для вычисления поправок по формулам Маловичко необходимы таблицы эфемерид, то в формулах Лонгмана траектории движения небесных тел рассчитываются аналитически для заданного момента времени.

Ввиду большого объема формулы Лонгмана в данном учебном пособии не приводятся. Ознакомиться с ними можно в оригинале его статьи 1959 г., ссылка на которую приводится в библиографическом списке.

Величина изменения нормальной составляющей приливных сил во времени для одной и той же точки наблюдений не превышает 0,24 мГал. Фрагмент графика лунно-солнечного влияния $g_{лсв}$, рассчитанного по формулам Лонгмана за период, равный одной неделе, для точки наблюдений на земной поверхности в умеренных широтах северного полушария представлен на рис. 5.6, как и фрагмент графика влияния, рассчитанного гравиметром Autograv CG-5 для средней точки небольшого участка гравиметрической съемки в течение рейса длительностью 7,5 ч.

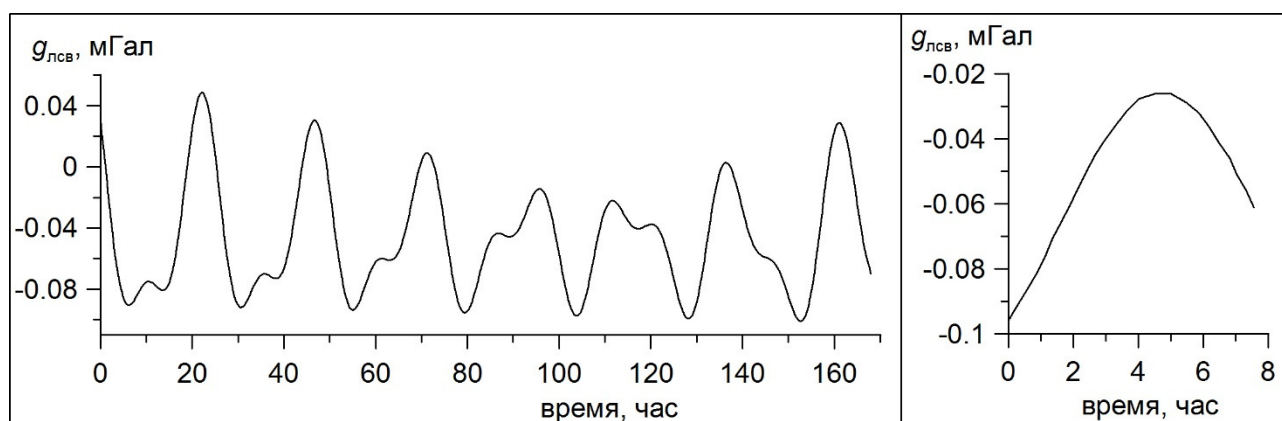


Рис. 5.6. Лунно-солнечное влияние, рассчитанное по формулам Лонгмана за неделю (слева), и по тем же формулам — гравиметром Autograv CG-5 в течение рейса, длительностью 7,5 часов (справа)

§5. ДРУГИЕ ПОПРАВКИ

Необязательными при стандартной гравиразведке, но желательными при выполнении микрогравиразведки (особенно если съемка производится в течение длительного периода) и обязательными при высокоточных мониторинговых исследованиях являются коррекции за изменение плотности атмосферы и влажности грунтов.

Атмосферные массы находятся выше эталонной массы гравиметра и оттягивают ее вверх, занижая значение силы тяжести. Если рассматривать гравитационное влияние атмосферного столба как влияние вертикального цилиндра высотой h и радиусом r , то оно будет выражаться следующей формулой:

$$g_{\text{атм}} = 2\pi G \sigma_{\text{в}} \left(r + h - \sqrt{r^2 + h^2} \right). \quad (5.13)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ — плотность воздуха.

При замене цилиндра бесконечным по простиранию плоскопараллельным слоем получаем:

$$g_{\text{атм}} = 2\pi G \sigma_{\text{в}} h. \quad (5.14)$$

Если бы плотность воздуха не менялась со временем и в пространстве, атмосфера оказывала бы одинаковое влияние на показания гравиметра. Поскольку анализу подлежат аномалии силы тяжести, учет такой атмосферы не имел бы смысла. Но атмосфера неоднородна по плотности и меняется во времени. Вводя поправку, имеет смысл переходить к относительным изменениям плотности воздуха $\Delta\sigma$, а в практических целях вместо плотности воздуха удобно использовать величину атмосферного давления. Следовательно, основной смысл имеет изменение атмосферного давления ΔP в период проведения съемки.

Используя формулы гидростатики при переходе от плотности к давлению, получим формулы (5.13) – (5.14) в виде:

$$\Delta g_{\text{атм}} = 2\pi G \frac{\Delta P}{g} \left(r + h - \sqrt{r^2 + h^2} \right), \quad (5.15)$$

$$\Delta g_{\text{атм}} = 2\pi G \frac{\Delta P}{g} h. \quad (5.16)$$

На первый взгляд задача выглядит абсурдной. Чтобы более корректно определить величину силу тяжести (ускорения свободного падения) или ее аномалии, необходимо рассчитать притяжение атмосферных масс; а чтобы найти влияние атмосферных масс, необходимо знать величину силы тяжести. Но на самом деле пространственные изменения силы тяжести оказывают небольшое влияние на изменение плотности воздуха в сравнении с другими факторами, поэтому для вычисления гидростатического давления атмосферного столба достаточно принять некоторое среднее значения силы тяжести. С.А. Серкеревым предложено использовать величину $g = 980$ Гал, что

вместо (5.15) – (5.16) при мощности активного атмосферного слоя $h = 10$ км дает следующие формулы:

$$\Delta g_{\text{атм}} = 0,426 \cdot 10^{-3} \Delta P \left(r + h - \sqrt{r^2 + h^2} \right), \quad (5.17)$$

$$\Delta g_{\text{атм}} = 0,426 \cdot 10^{-3} \Delta P. \quad (5.18)$$

Обычно вычисления не усложняют и используют формулу (5.18) либо ее аналог с учетом сферичности Земли:

$$\Delta g_{\text{атм}} = 0,406 \cdot 10^{-3} \Delta P. \quad (5.19)$$

Подставляя в формулу значения перепада давлений в миллибарах (1 мбар = 10^2 Па), величину атмосферного влияния получим в миллигалах.

Изменение влажности (обводненности) приповерхностного слоя грунтов также вносит свои коррективы в измеряемое значение силы тяжести. При необходимости его учитывают поправкой также, как и влияние промежуточного слоя по формуле:

$$\Delta g_{\text{вл}} = 0,0419 \Delta \sigma H, \quad (5.20)$$

где $\Delta \sigma$ — изменение плотности приповерхностного слоя грунта вследствие влажности относительно некоторого базового значения (например, относительно принятой плотности промежуточного слоя); H — мощность слоя грунта, влажностные свойства которого подлежат учету.

При гравиметрических наблюдениях в зимнее время влияние снежного покрова может быть учтено посредством моделирования либо путем разбиения формулы (5.5) на две составляющие, одна из которых учитывает влияние промежуточного слоя с выбранной плотностью пород, слагающих рельефа, а вторая — влияние снежного покрова с постоянной средней плотностью снега. При геодезическом сопровождении гравиметрических работ в таком случае производится измерение высоты точки наблюдений на поверхности снега и мощности самого снежного покрова посредством прокалывания щупами с нанесенными мерочными отметками или геодезической вешки. Во-втором случае геодезист просто снимает две высотные отметки, пробивая снег вешкой отражателя или GPS/ГЛОНАСС антенны до плотного основания.

При выполнении работ на поверхности водоемов в зимнее время может вводиться поправка за влияние льда и воды аналогично учету влияния снежного покрова. При производстве работ бурят лунки и измеряют толщину льда. Если

данные о батиметрии водоема, удовлетворяющие условиям производства гравиметрических работ, отсутствуют, в каждой точке наблюдений определяется глубина водоема посредством погружения эхолота в лунку.

При морских работах на акваториях поправка за промежуточный слой также разбивается на две составляющие: первая учитывает влияние морской воды, обычно с плотностью $\sigma_{\text{м.в.}} = 1,03 \text{ г/см}^3$; вторая — влияние донных отложений. Сведения о батиметрии дна в этом случае являются обязательными.

К специфическим мерам относится учет влияния техногенных факторов, например, отсыпки при строительстве сооружений или прокладке дорог, коммуникаций. Учет такого влияния производится путем математического моделирования по простым формулам, описывающим притяжение тел правильной формы, либо их комбинаций.

§6. СОСТАВЛЕНИЕ КАТАЛОГА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПОСТРОЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КАРТЫ (ГРАФИКОВ) АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Результатом выполнения процедур текущей обработки являются каталог гравиметрических наблюдений и предварительная карта (графики) аномалий силы тяжести в редукции Буге без поправки за влияние рельефа местности.

Основным критерием оценки точности аномалий силы тяжести служит среднеквадратическая погрешность ε_a , вычисляемая по формуле:

$$\varepsilon_a = \pm \sqrt{\varepsilon_g^2 + \varepsilon_B^2 + \varepsilon_{\gamma_0}^2 + \varepsilon_p^2}, \quad (5.21)$$

где ε_g — среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести; ε_B — среднеквадратическая погрешность определения поправки Буге, зависящая от погрешностей определения высот; ε_{γ_0} — среднеквадратическая погрешность определения нормального значения силы тяжести, зависящая от погрешности определения координат гравиметрических пунктов; ε_p — среднеквадратическая погрешность определения поправок за влияния рельефа местности.

Пример оформления каталога в виде файла табличного редактора MS Excel представлен на рис. 5.6 (для сохранения секретности координаты скрыты). Пример карты аномалий силы тяжести в редукции Буге проиллюстрирован на рис. 5.7. В стандартном оформлении карта аномалий силы тяжести не имеет

заливки. Помимо изоаномал с заданным сечением на нее должны быть нанесены пронумерованные местоположения гравиметрических пунктов (на рис. 5.7 указаны кружками) со значениями силы тяжести на каждом из них. С появлением компьютеров для лучшей наглядности на картах стали использовать заливки. Типовой палитрой в России для гравитационного поля постепенно стала зелено-коричневая (также как для магнитного поля типовой является красно-синяя палитра).

Сечение изоаномал карты определяется масштабом съемки и погрешностью наблюдений. Согласно инструкции по гравirazведке для решения поставленных задач интервал сечения изоаномал отчетной карты при региональных и детальных поисковых съемках должен быть меньше амплитуды исследуемых аномалий, а при детальных разведочных съемках — в 2-3 раза меньше амплитуды исследуемых аномалий.

Профиль	ГП	X, м	Y, м	Высота, м	Снабл, мГал	γ ₀ , мГал	δсв.в., мГал	δпр.сл. (σ = 2.60), мГал	ΔG (σ = 2.30), мГал	ΔG (σ = 2.67), мГал	ΔG (σ = 2.60), мГал
1	1	#####	#####	203.38	981121.937	981201.715	62.763	22.156	-36.615	-39.768	-39.171
1	2	#####	#####	204.62	981121.673	981201.596	63.146	22.291	-36.496	-39.669	-39.068
1	3	#####	#####	201.15	981122.324	981201.480	62.075	21.913	-36.466	-39.584	-38.994
1	4	#####	#####	199.72	981122.460	981201.354	61.634	21.757	-36.507	-39.603	-39.017
1	5	#####	#####	199.27	981122.418	981201.236	61.495	21.708	-36.526	-39.616	-39.031
1	6	#####	#####	199.33	981122.304	981201.114	61.513	21.715	-36.506	-39.597	-39.012
1	7	#####	#####	207.74	981120.356	981200.996	64.109	22.631	-36.552	-39.772	-39.163
1	8	#####	#####	218.20	981118.235	981200.876	67.337	23.771	-36.332	-39.715	-39.075
1	9	#####	#####	215.54	981118.249	981200.756	66.516	23.481	-36.763	-40.104	-39.472
1	10	#####	#####	207.76	981119.101	981200.634	64.115	22.633	-37.440	-40.661	-40.051
1	11	#####	#####	196.69	981121.485	981200.557	60.699	21.427	-37.329	-40.378	-39.801
1	12	#####	#####	186.10	981123.463	981200.413	57.430	20.274	-37.455	-40.340	-39.794
1	13	#####	#####	190.11	981123.060	981200.512	58.668	20.711	-37.105	-40.052	-39.495
1	14	#####	#####	193.91	981122.512	981200.613	59.841	21.125	-36.947	-39.953	-39.384
1	15	#####	#####	213.98	981119.405	981200.658	66.034	23.311	-35.839	-39.157	-38.529
1	16	#####	#####	240.11	981114.735	981200.750	74.098	26.158	-35.057	-38.779	-38.075
1	17	#####	#####	254.94	981112.253	981200.857	78.674	27.773	-34.498	-38.450	-37.703
1	18	#####	#####	260.46	981111.306	981200.972	80.378	28.375	-34.389	-38.427	-37.663
1	19	#####	#####	264.27	981111.070	981201.030	81.554	28.790	-33.874	-37.971	-37.196
1	20	#####	#####	249.85	981114.577	981201.062	77.104	27.219	-33.459	-37.333	-36.600

Рис. 5.7. Фрагмент каталога гравиметрических наблюдений

Построение предварительной карты аномалий силы тяжести в полевой период необходимо для своевременного выявления бракованных наблюдений, которые остались незамеченными на этапе обработки полевых материалов. Аномалии, морфология которых вызывает сомнение, должны быть проконтролированы дополнительными наблюдениями, если контролем не было охвачено 100% гравиметрических пунктов. Если брак будет обнаружен

после выезда экспедиции с площади исследований, это повлечет за собой дополнительные затраты на повторную организацию проверочных полевых работ.

Для оценки качества гравиметрической карты вычисляется полная погрешность интерполяции E по формуле:

$$E = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta g_i - \Delta g_{\text{инт}i})^2}{n}}, \quad (5.22)$$

где Δg_i — наблюдаемое значение аномалии силы тяжести в редукции Буге в гравиметрическом пункте; $\Delta g_{\text{инт}i}$ — значение той же аномалии, полученное путем интерполяции с карты; n — количество гравиметрических пунктов, по которым производилось сравнение.

Вычисление полной погрешности интерполяции производится по интерполяционным профилям, наблюдения по которым производятся с шагом вдвое более частым, чем на обычных рядовых профилях. Гравиметрическая карта считается кондиционной, если величина полной погрешности интерполяции не превышает значений, указанных в табл. в главе 1. В противном случае необходимо проводить дополнительные наблюдения, сгущающие сеть.

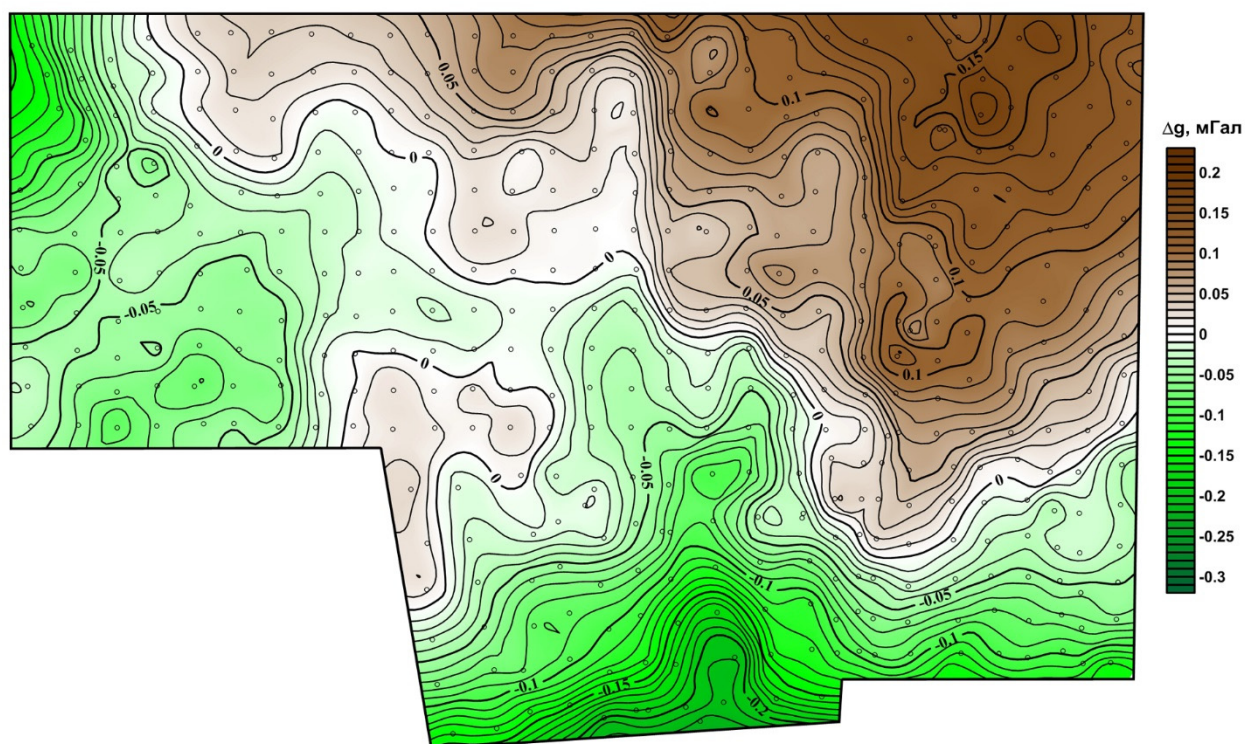


Рис. 5.8. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $\sigma = 2,05 \text{ г/см}^3$ (уровень условный)

По возвращении экспедиции на основное место нахождения организации, где будут выполняться камеральная обработка и интерпретация полученных данных, составляется акт сдачи-приема полевых материалов. Все полевые материалы обычно подлежат бессрочному хранению в архиве организации.

Таким образом, основным задачей геофизика-оператора в поле являются грамотное выполнение измерений с гравиметром, обработка полевых данных, составление каталога гравиметрических наблюдений и построение предварительной карты аномалий силы тяжести в редукции Буге без поправки за влияние рельефа. Цель задачи — получение высококачественных экспериментальных данных для проведения исследований и решения поставленной геологической задачи.

Если возможности и время позволяют, то поправки за влияние рельефа местности можно также рассчитать и ввести в наблюдаемые значения на этапе текущей обработки, но повторим, что выполнение трудоемких вычислительных процедур не входит в задачу оператора при выполнении полевых работ. Отбраковка материала и оценка качества также производятся в полевых условиях. После передачи полевых материалов в камеральные условия работа оператора считается выполненной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь: УрО РАН, 2015. 142 с.

Гравirazведка. справочник геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово, К.Е. Веселова. М.: Недра, 1990. 607 с.

Долгаль А.С. Комплекcирование геофизических методов. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2012. 167 с.

Инструкция по гравirazведке. М., 1980. 80 с.

Инструкция по составлению проектов и смет на геологоразведочные работы. М.: Роскомнедра, 1993. 59 с.

Инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. М.: ЦНИИГАиК, 2001. 32 с.

Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. М., 1996. 50 с.

Маловичко А.К., Костицын В.И. Гравirazведка. М.: Недра, 1992. 357 с.

Техническая инструкция по гравirazведке. М., 1961. 69 с.

Электронные ресурсы в свободном доступе

Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Учебное пособие для студентов университетов и вузов, обучающихся по специальности 0804000 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых». <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf>.

CG-5 Система Scintrex Autograv. Руководство по эксплуатации. №867700.

https://geod.ru/research/gravnet/#_1

LaCoste&Romberg. Instruction manual. Model G & D gravity meters.

www.scintrex.com

www.https://ru.wikipedia.org (верифицированные статьи)

Учебное издание

Пугин Алексей Витальевич

Гравиразведка

Часть вторая

Учебное пособие

Редактор *Н. И. Стрекаловская*
Корректор *А. В. Цветкова*
Компьютерная вёрстка: *А. В. Пугин*

Объем данных 10,1 Мб
Подписано к использованию 23.12.2019

Размещено в открытом доступе
на сайте www.psu.ru
в разделе НАУКА / Электронные публикации
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Издательский центр
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15