

ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А. В. Горожанцев,
И. В. Огородова,
А. В. Пугин

**ПРОФИЛЬНАЯ
ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА
(ГРАВИРАЗВЕДКА)**



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

А. В. Горожанцев, И. В. Огородова, А. В. Пугин

**ПРОФИЛЬНАЯ
ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА
(ГРАВИРАЗВЕДКА)**

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



Пермь 2022

УДК 550.831(075.8)

ББК 6.324я73

Г702

Горожанцев А. В.

Г702 Профильная геофизическая практика (гравиразведка) [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / А. В. Горожанцев, И. В. Огородова, А. В. Пугин ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2022. – 2,78 Мб ; 95 с. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Gorozhancev-Ogorodova-Pugin-Profilnaya-geofizicheskaya-praktika-gravirazvedka.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-3923-6

На примере отечественного разведочного гравиметра описаны устройство, принцип действия и основные поверки прибора, техника работы, особенности создания опорных и рядовых гравиметрических сетей. Рассмотрены методики измерений в наземной гравиразведке, способы обработки и оценки качества полевых наблюдений, этапы интерпретации аномалий силы тяжести. Даны сведения о вводимых редукциях при вычислении аномалий силы тяжести, формулы решения прямой и обратной задач гравиразведки для некоторых тел простой формы. Представлены материалы гравиметрических исследований на территории учебной научной базы «Предуралье», выполненных с помощью современного разведочного гравиметра CG-5 Autograv. Приведены основные положения правил техники безопасности при гравиметровых съемках, общие требования к оформлению полевой и отчетной документации.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Геология» и специальности «Технология геологической разведки», также может быть полезным для студентов специальности «Прикладная геология».

УДК 550.831(075.8)

ББК 26.324я73

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

Рецензенты: лаборатория геопотенциальных полей Горного института Уральского отделения Российской академии наук (зав. лабораторией – д-р геол.-мин. наук **С. Г. Бычков**);

ведущий научный сотрудник лаборатории геофизики АО «ВНИИ Галургии», канд. техн. наук **А. М. Пригара**

© ПГНИУ, 2022

© Горожанцев А. В., Огородова И. В.,
Пугин А. В., 2022

ISBN 978-5-7944-3923-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ПРОГРАММА	7
1. ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД	9
1.1. Общие сведения.....	9
1.2. Оценка плотности пород по диаграммам ГГК-П.....	10
2. УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПОДГОТОВКА ГРАВИМЕТРОВ К РАБОТЕ	13
2.1. Общие сведения о кварцевых астазированных гравиметрах.....	13
2.2. Система нивелирования.....	17
2.3. Электрическая и оптическая системы.....	18
2.4. Устройство упругой системы кварцевого астазированного гравиметра.....	19
2.5. Принцип действия температурного компенсатора.....	22
2.6. Подготовка гравиметров к работе.....	22
2.6.1. Внешний осмотр прибора перед полевыми наблюдениями.....	23
2.6.2. Регулировка диапазона измерений.....	24
2.6.3. Проверка юстировки уровней.....	24
2.7. Определение цены деления гравиметра.....	26
2.8. Определение чувствительности гравиметра.....	30
2.9. Определение длительности переходного процесса.....	31
2.10. Определение коэффициента надежности.....	32
3. СОЗДАНИЕ ОПОРНЫХ И РЯДОВЫХ СЕТЕЙ	36
3.1. Нормальные значения силы тяжести.....	36
3.2. Абсолютные значения силы тяжести.....	39
3.3. Назначение опорной сети и ее уравнивание.....	41
3.4. Методики гравиметрических наблюдений на рядовой сети.....	45
3.4.1. Методика однократных измерений (МОИ).....	47
3.4.2. Методика повторных измерений (МПИ).....	50
3.4.3. Методика измерения отдельных приращений (МИОП).....	52
3.4.4. Модификации и достоинства МИОП.....	54
3.5. Определение точности полевых наблюдений.....	56
4. РЕДУКЦИИ И АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ	59
4.1. Определение поправок за высоту и промежуточный слой.....	59
4.2. Учет влияния рельефа.....	60
4.3. Вычисление аномалий силы тяжести.....	63
4.4. Сглаживание аномалий.....	64
4.5. Оценка точности аномалий силы тяжести.....	65
4.6. Разделение наблюденного поля силы тяжести на региональное и локальное.....	67
4.7. Интерпретация аномалий силы тяжести.....	68

5. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ УНБ «ПРЕДУРАЛЬЕ».....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	82
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	84
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ РАБОТ.....	86
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	89

ВВЕДЕНИЕ

При подготовке выпускников геологического факультета ПГНИУ, способных использовать профильно-специализированные знания фундаментальных и прикладных разделов естественных наук для решения практических задач, в действующих учебных планах предусмотрена профильная геофизическая практика, которая ориентирована на получение первичных профессиональных умений и навыков в области применения основных методов полевой и скважинной геофизики для решения прикладных задач. Практика по гравиметрическому методу разведки (гравиразведке) является ее составной частью и имеет с ней общие цели. Способ проведения геофизической практики стационарный – форма – непрерывная. Для обучающихся на геологическом факультете практика проводится на втором курсе в весенне-летний период (май-июнь) после изучения дисциплины «Геофизика» и является ее логическим завершением. В соответствии с действующим образовательным стандартом профильная геофизическая практика относится к учебным, полевым и проводится на специализированной учебно-научной базе (УНБ). Практика условно разделена на следующие этапы: подготовительный; основной; заключительный.

Гравиразведка является одним из основных методов полевой геофизики и широко применяется при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии, региональном и крупномасштабном геологическом картировании, поисках и разведке многих полезных ископаемых, гидрогеологических и инженерно-геологических работах.

Цель учебной практики по гравиразведке – это формирование общекультурных и профессиональных компетенций в соответствии с действующей образовательной программой обучающийся должен:

- критически анализировать и оценивать свой профессиональный и социальный опыт, при необходимости быть готовым изменить профиль своей профессиональной деятельности, демонстрировать готовность к саморазвитию и самосовершенствованию, повышению профессионального уровня и мастерства;
- быть способным к профессиональной эксплуатации современного полевого и лабораторного оборудования;
- осознавать важность соблюдения техники безопасности при проведении геологоразведочных работ, контролировать соблюдение.

Задачи практики формулируются следующим образом:

- углубление имеющихся и получение новых теоретических знаний по гравиразведке;
- приобретение навыков подготовки гравиметрической аппаратуры для проведения полевых работ и освоение техники работы с разведочным гравиметром;

- получение базовых навыков обработки гравиметровых измерений, выявления аномальных эффектов в поле силы тяжести и оценки их точности, интерпретации и геологического истолкования результатов гравиразведочных работ, оформления полевой и отчетной документации.

На *подготовительном этапе* перед выездом к месту практики проводится общее собрание обучающихся и преподавателей совместно с руководителем производственных практик от университета, деканом факультета, заведующим кафедрой геофизики, где сообщаются правила техники безопасности (ТБ) и основные положения практики. После прибытия на место учебной практики (перед началом работ) обучающиеся проходят повторный инструктаж по ТБ и противопожарной безопасности, трудовой дисциплине и условиям безопасного ведения полевых работ. Также проводятся и другие необходимые организационно-методические мероприятия, после чего обучающиеся приступают к основному этапу.

Основной этап практики включает индивидуальную работу с приборами при выполнении полевых и лабораторных (камеральных) работ согласно учебному плану и графику прохождения практики. При освоении гравиметрического метода разведки внимание обучающихся обращается:

- на технику безопасности при работе с гравиметрами в полевых условиях;
- понимание принципа действия и конструктивные особенности упругой измерительной системы разведочных гравиметров;
- технику работы с приборами и использование их по назначению;
- освоение методик наблюдений при выполнении самостоятельных маршрутов;
- получение практических навыков оформления полевой документации, обработки полевых наблюдений, выделения неоднородностей (аномалий) в поле силы тяжести, оценки точности аномалий, проведения качественной, количественной интерпретации и геологического истолкования полученных результатов;
- составление и оформление, в соответствии с предъявляемыми требованиями, отчета об учебной полевой практике по гравиразведке;
- порядок проведения текущего контроля знаний.

На *заключительном этапе* практики обучающиеся исправляют недостатки, указанные руководителями, и представляют заключительный отчет о практике по конкретному геофизическому методу, в данном случае по гравиразведке, оформленный в соответствии с предъявляемыми требованиями. На этом же этапе проводится промежуточный контроль знаний и результаты прохождения профильной геофизической практики заносятся в электронные ведомости успеваемости ЕТИС.

ПРОГРАММА ПРОФИЛЬНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ (ГРАВИРАЗВЕДКИ)

Тема 1. Общие сведения о плотностных свойствах пород и силе тяжести на территории учебно-научной базы.

Общие сведения о геологическом разрезе на территории УНБ. Изучение плотностных свойств горных пород, выявление предполагаемых источников аномальных гравитационных полей, анализ результатов топографической съемки, оценка возможностей применения гравirazведки в комплексе геофизических исследований в пределах района проведения практики. Постановка задачи.

Тема 2. Подготовка гравиметров к полевым наблюдениям.

Закрепление знаний, связанных с устройством и принципом действия гравиметров разных типов. Внешний осмотр и определение работоспособности разведочных гравиметров ГНУ-КС. Получение практических навыков по регулировке диапазона измерений, юстировке уровней, определению цены деления, длительности переходного процесса, коэффициента надежности гравиметров. Сравнительные характеристики разведочных гравиметров ГНУ-КВ, ГНУ-КВК и CG-5 AutoGrav «Scintrex».

Тема 3. Гравиметровые съемки.

Выбор пунктов наблюдения для опорной и рядовых сетей. Способы создания опорной сети и методики наблюдений на гравиметровых пунктах опорной сети. Проведение полевых измерений на рядовых пунктах с использованием методик однократных измерений (МОИ), повторных измерений (МПИ), измерений отдельных приращений (МИОП). Оформление полевых журналов. Сравнительные характеристики методик измерений.

Тема 4. Обработка, интерпретация и геологическое истолкование материалов гравиметровой съемки.

Проведение ручной и компьютерной обработки полевых измерений: вычисление для гравиметрических рейсов поправок за смещение нуля-пункта гравиметра, наблюдаемых приращений, внутренней и внешней сходимости измерений силы тяжести. Определение поправок за влияние рельефа, высоты пунктов наблюдения и промежуточного слоя. Вычисление нормальных значений, аномалий и абсолютных значений силы тяжести. Сглаживание и оценка точности аномалий Буге. Знакомство с программой С. Г. Бычкова GRAWIS для обработки гравиметрических данных на ПЭВМ.

Качественная интерпретация: построение графиков, их корреляционных схем (карты графиков), карт аномалий силы тяжести, разделение поля на региональную и локальную составляющие, оценка местоположения, формы и размеров источников аномальных влияний, выбор аппроксимирующей модели.

Количественная интерпретация: определение численных значений параметров, характеризующих аномальные объекты (глубина центра и величина аномальных масс, их геометрические размеры) в рамках выбранной модели. Знакомство с программными продуктами в области обработки и интерпретации данных гравиметровых съемок.

Геологическое истолкование данных геофизической интерпретации: анализ результатов качественной и количественной интерпретации гравиметрических данных, выявление зависимости гравитационного поля от плотности горных пород и геологического строения района исследований, физикогеологическое моделирование с привлечением данных других методов. Знакомство с программой Oasis montaj компании Geosoft.

Тема 5. Составление отчета об учебной профильной геофизической практике по гравиразведке.

1. ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД

1.1. Общие сведения

К плотностным параметрам горных пород, минералов и руд относятся плотность, пористость, влагоемкость, насыщенность и проницаемость [1].

Плотность σ горной породы – это количество массы M породы в единице объема V (объемная плотность):

$$\sigma = M/V.$$

В международной системе СИ единицей плотности является килограмм на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$), однако на практике чаще используется единица плотности в системе Гаусса (СГС) – грамм на кубический сантиметр ($\text{г}/\text{см}^3$). Знание плотности геологических образований является одним из важных факторов, необходимых для интерпретации данных геофизических методов.

В гравиразведке, например, плотность является основным физическим параметром, определяющим аномальное гравитационное поле. Величина и знак гравитационной аномалии зависят от величины и знака аномальной плотности, которая представляет собой разность плотностей изучаемого объекта σ и вмещающих пород $\sigma_{\text{вм}}$.

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{\text{вм}}.$$

Заметим, что удельный вес p горной породы определяется как вес P (сила, с которой тело давит на горизонтальную опору) единицы объема V этой породы:

$$p = P/V.$$

В системе СИ единицей удельного веса служит ньютон на кубический метр ($\text{Н}/\text{м}^3$), а в СГС – дина на кубический сантиметр ($\text{дин}/\text{см}^3$).

Величины плотности и удельного веса горной породы связаны между собой следующим образом:

$$p = \sigma g,$$

где g – ускорение свободного падения.

Известно, что при перемещении точки наблюдения по поверхности Земли и около нее значение g будет являться величиной переменной. Поэтому, в отличие от плотности, удельный вес не используют в качестве параметра горных пород при геофизических исследованиях.

В лабораторных условиях плотность горных пород определяют по образцам способом гидростатического взвешивания. Для определения плотности в естественных условиях залегания пород применяют полевые и скважинные геофизические методы. Разработаны, в частности, различные модификации гамма-гамма-метода.

Значение плотности горных пород зависит от многих параметров: генезиса, минерального состава, пористости, трещиноватости, влажности, степени

метаморфизма, а также от температуры и давления при залегании на значительных глубинах в толще земной коры. Поэтому для одних и тех же разностей горных пород значение объемной плотности может изменяться в широких пределах.

В табл. 1.1 приведены сведения об изменении величины плотности осадочных горных пород, опубликованные в работе [1].

Таблица 1.1

Плотностная характеристика осадочных горных пород

Порода	σ , г/см ³	Порода	σ , г/см ³
Глина	1,20–2,40	Карбонатные, гидрохимические, кремнистые породы	1,50–2,80
Аргиллит	1,90–2,90	Мергель	2,50–2,80
Глинистый сланец	2,30–3,00	Известняк	1,80–2,90
Обломочные	–	Доломит	1,90–3,00
Песок	1,30–2,00	Гипс	2,10–2,50
Алевролит	1,80–2,80	Ангидрит	2,40–2,90
Песчаник	2,00–2,90	Каменная соль	2,20–2,30
Брекчия	1,60–3,00	Опока – мергель пламенный	1,00–1,60
Конгломерат	2,10–3,00	Кремний	2,30–2,60

Видно, что плотность пород изменяется от 1,20 до 3,00 г/см³, причем ее значение возрастает с уменьшением зернистости, с увеличением степени диагенеза, возраста и глубины залегания. Рыхлые разности пород, залегающие вблизи поверхности земли, обладают низкими плотностями, однако значения аномальных плотностей могут достигать существенных величин. Например, известняк по отношению к глинам имеет избыточную плотность $\Delta\sigma$, равную + 0,60 г/см³, а гипс и ангидрит – (+)0,90 и +1,20 г/см³ соответственно. Это свидетельствует о том, что изменение литологического состава пород верхней части разреза надежно обнаруживается при детальном высокоточном гравиметрических наблюдениях [11].

1.2. Оценка плотности пород по диаграммам ГГК-П

На больших глубинах (500 м и более) диапазон изменения плотностей для осадочных литотипов горных пород значительно уменьшается, что видно из табл. 1.2, значения плотностей в которой определены на основании диаграмм гамма-гамма плотностного каротажа (ГГК-П) [4]. Диаграммы ГГК-П получены при помощи аппаратуры РГП-2 и оцифрованы в значениях объемной плотности.

Точность определения плотности по оценке авторов составляет $\pm 0,03 \text{ г/см}^3$, что позволяет констатировать большую практическую значимость результатов ГГК-П, так как они дают возможность судить о плотности в естественных условиях (естественного давления, влажности, пористости и температуры) залегания пород.

Для оценки плотности горных пород были использованы каротажные диаграммы объемной плотности, полученной по данным ГГК-П для карбонатного, терригенного и хемогенного разрезов [4]. С диаграмм были сняты значения плотности для перечисленных типов разрезов, затем определены пределы изменения этих значений для основных литотипов пород и выведены наиболее вероятные средние $\sigma_{\text{ср}}$ значения.

Таблица 1.2

**Диапазон изменения плотности осадочных горных пород на глубинах
(по Гулину)**

Основные литотипы пород	$\sigma_1, \text{ г/см}^3$	$\sigma_2, \text{ г/см}^3$	$\sigma_3, \text{ г/см}^3$
Ангидрит	2,82	2,95	2,88
Гипсо-ангидрит	–	2,90	2,90
Известняк	2,75	2,60	2,68
Аргиллиты	2,60	2,72	2,66
Глинистые известняки	2,65	2,58	2,62
Алевролиты	2,53	2,55	2,54
Доломит	2,50	–	2,50
Глина	–	2,20–1,85	2,02
Соль	–	1,95–2,20	2,04

Наименования литотипов горных пород в табл. 1.2 расположены в порядке уменьшения величины σ . Величины плотности σ_1 получены для карбонатного и терригенно-карбонатного разрезов, а σ_2 – для соляного разреза. Видно, что разброс значений плотности для перечисленных литотипов пород незначительный.

Поскольку с геофизической точки зрения на территории УНБ «Предуралье» аномалиеобразующими породами целесообразно считать известняки, алевролиты, ангидриты, гипс и соль, залегающие среди глинистых разностей пород, то наибольший интерес представляют аномальные плотности, приведенные в табл. 1.3.

**Значения аномальных плотностей осадочных горных пород
для территории УНБ «Предуралье»**

Покрывающие породы	$\Delta\sigma$, г/см ³	Подстилающие породы
Ангидрит	+ 0,84 + 0,34 + 0,20	Соль Алевролит Известняк
Известняк	+0,22; +0,34	Аргиллит; алевролит
Алевролит	-0,14; -0,34	Карбонаты
Гипсо-ангидрит	+0,88; +0,86	Глина; соль
Соль	-0,15; -0,35	Терригенные породы

На основании данных табл. 1.3 видим, что наиболее вероятная аномальная плотность составляет $\pm(0,20\div 0,30)$, г/см³. Ошибка принятия аномальной плотности при интерпретации гравитационных аномалий приведет лишь к преувеличению либо преуменьшению при решении обратной задачи гравиразведки амплитуды поднятия, амплитуды разлома и т.п., но местоположение и площадные размеры плотностной неоднородности при детальном исследовании будут определены с достаточной точностью. В работе для повышения точности детальной гравиразведки при решении различных геологических задач предлагается использование производных полей от аномалий силы тяжести [13].

2. УСТРОЙСТВО, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПОДГОТОВКА ГРАВИМЕТРОВ К РАБОТЕ

2.1. Общие сведения о кварцевых астазированных гравиметрах

Разведочные гравиметры предназначены для относительных измерений ускорения силы тяжести и применяются при разведке нефтяных, газовых, рудных и других месторождений полезных ископаемых. Наиболее широкое применение получили гравиметры астазированные кварцевые. Все эти гравиметры имеют упругую кварцевую астазированную (неустойчивую) систему, построенную по принципу вертикального сейсмографа Голицына. Они являются статическими, относятся к механическим пружинным гравиметрам второго рода и имеют примерно одинаковые функциональные узлы, но различаются конструкцией этих узлов [2].

Первая модификация отечественных разведочных гравиметров ГАК-3М была выпущена в 1953 г. (табл. 2.1). До недавнего времени серийно выпускались отечественные гравиметры наземные узкодиапазонные (ГНУ), предназначенные для решения *геологоразведочных задач*, и широкодиапазонные (ГНШ) для решения *геодезических задач*. Эти приборы имеют три класса точности – А, В и С [9]. В табл. 2.2 приведены отличительные параметры для приборов ГНУК и ГНШ-К, имеющих классы точности А и В соответственно.

В настоящее время требования к точности детальных гравиметровых съемок при решении геологоразведочных задач повысились практически на порядок. Поэтому отечественные разведочные гравиметры, упомянутые выше и находящиеся в парках производственных организаций, больше используются при региональной и реже при поисковых съемках.

На современном этапе для решения разведочных задач широко используются разведочные гравиметры зарубежных производителей, имеющие микрогальный порядок точности измерений, например гравиметр CG-5 AutoGrav (производство фирмы «Scintrex», Канада). Также в производство уже запускаются и более совершенные модели этого прибора.

Технические характеристики гравиметров

№ п/п	Марка гравиметра, год выпуска, вес (кг)	Погрешность единичного измерения m_e , мГал	Техническая характеристика прибора
1	ГАК-3М, 1953, 8,5	0,10–0,40	Гравиметр астазирванный кварцевый, 3-я модель
2	ГАК-4М, 1958, 7,5	0,10–0,30	4-я модель
3	ГАК-ПТ, 1960, 7,5	0,05–0,20	Повышенной точности
4	КВГ-1М, 1961, 4,2	0,03–0,08	Кварцевый высокоточный гравиметр, 1-я модель
5	ГАК-7Т, 1963, 5,0	0,03–0,06	Точный, 7-я модель
6	ГАГ-2, 1966, 25,0	0,10–0,15	Гравиметр астазирванный геодезический, 2-я модель, широкодиапазонный
7	«Дельта», 1971, 5,0	0,06	Гравиметр узкодиапазонный разведочный
8	ГР/К2, 1967, 5,0	0,03–0,06	Гравиметр разведочный кварцевый 2-го класса. В соответствии с ГОСТ 13017-67 прибор ГАК-7Т с 1967 по 1973 г. выпускался под этой маркой
9	ГНУ-К2, 1973, 5,0	0,03–0,06	Гравиметр наземный узкодиапазонный 2-го класса (так переименован ГР-К2)
10	ГНУ-КА, 4,5 ГНУ-КВ, 5,0 ГНУ-КС, 5,0 1979–1989	0,02 0,03	Гравиметр наземный узкодиапазонный класса А, В и С
11	ГНШ-КА, 4,0 ГНШ-КВ, 5,0 ГНШ-КС, 5,0	0,02 0,03 0,06	Гравиметр наземный широкодиапазонный класса А, В, С. Приборы ГНУ и ГНШ серийно выпускались в соответствии с ГОСТ 13017-83 по 1989 г.
12	Уорден, США, 2,3; Шарп, Канада, 4,5	0,01–0,08 0,01–0,08	
13	ГНК		Гравиметр наземный комбинированный, совмещает свойства узкодиапазонного и широкодиапазонного, выпускается в 4-х модификациях: «Мастер», «Разведчик», «Ученик», «Геодезист»

Сравнительные характеристики гравиметров ГНУ-К и ГНШ-К

Параметр	ГНУ-КА	ГНУ-КВ	ГНШ-КА	ГНШ-КВ
1. Верхний предел измерения без перестройки диапазона не менее, <i>мГал</i>	80		500	
2. Верхний предел измерения с перестройкой диапазона не менее, <i>мГал</i>	6000		6000	
3. Длительность переходного процесса не более, <i>мин</i>	3		3	
4. Смещение нуль-пункта за сутки, <i>мГал</i>	0,5	2,0	1,0	2,0
5. Порог чувствительности (собственный шум прибора), <i>мГал</i>	0,006	0,01	0,006	0,01
6. Чувствительность, <i>дел/мГал</i>	7	5	7	5

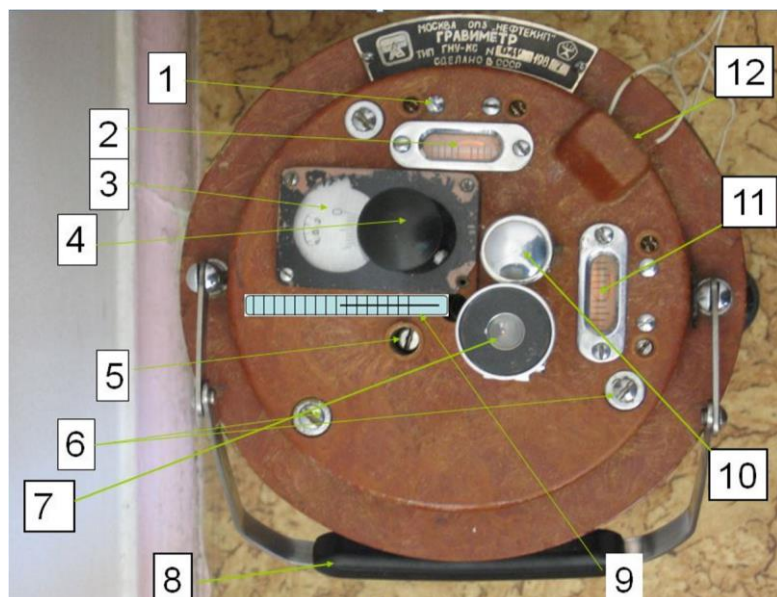
На рисунке 2.1 представлен разведочный гравиметр ГНУ-КВ, его составные части и футляр для транспортировки [16]. В процессе сборки средняя часть разведочного гравиметра, жестко соединенная с верхней панелью (рис. 2.1, А (а)), помещается во внешний кожух 1 (рис. 2.1, Б (1)), который представляет собой полый цилиндр из листовой нержавеющей стали диаметром 132 мм с зеркальной внешней поверхностью. Внутрь кожуха помещается цилиндр из пенопласта (рис. 2.1, Б (2)), в который вставляется сосуд Дьюара (рис. 2.1, Б (3)), а в него плотно входит средняя часть гравиметра (рис. 2.1, Б (5)). Уплотнение достигается с помощью шерстяного чехла (рис. 2.1, Б (4)), надеваемого на среднюю часть. Шерстяной чехол выполняет также роль теплоизолятора и предотвращает соприкосновение металла средней части гравиметра со стеклянными стенками сосуда Дьюара, предохраняя тем самым последний от поломки. Нижний торец цилиндра внешнего кожуха соединен с основанием из текстолита, на котором по окружности через 120° закреплены три установочных (подъемных) винта (рис. 2.1, Б (6)). На нижней части подъемных винтов установлены шарнирные круглые подпятники, которые увеличивают площадь опоры гравиметра на грунт. На верхней части винтов находятся головки из эбонита с нанесенными по окружности делениями.

Вид верхней панели разведочного гравиметра ГНУ-КС с указанием имеющихся на ней деталей (А) и схема расположения шкал отсчетного устройства прибора (Б) приведены на рис. 2.2.

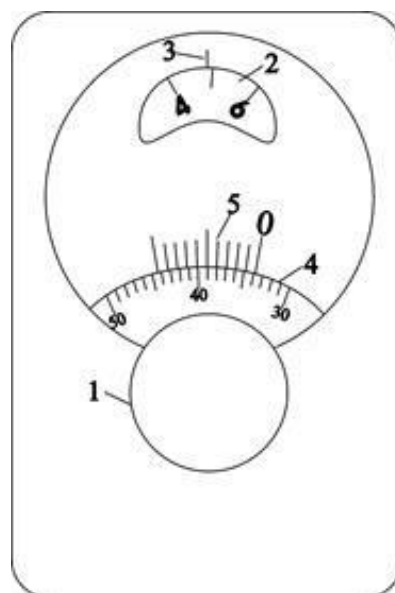
Средняя часть прибора, по сути, является теплозащитным столбом, внутри которого есть каналы для соединения пружин упругой системы с винтами микрометра 4 и диапазонного устройства 5 (рис. 2.2, А), расположенными на верхней панели. Снизу имеется основание (рис. 2.2, Б), на котором смонтирована упругая система из кварца. В рабочем состоянии гравиметра упругая система герметично закрывается металлическим колпаком. Из образовавшейся камеры через специальный клапан откачивается воздух. Следует помнить, что у разведочных гравиметров отсутствует арретир (механическое приспособление для закрепления чувствительного элемента различных приборов в определенном положении), поэтому транспортировка прибора требует особой осторожности.



Рис. 2.1. А – внутренняя (средняя) часть гравиметра с верхней панелью (а), общий вид прибора в сборе (б), транспортировочный футляр (в); Б – составные части гравиметра: 1 – внешний кожух, 2 – цилиндр из пенопласта, 3 – сосуд Дьюара, 4 – шерстяной чехол, 5 – средняя часть прибора (без верхней панели), 6 – установочные (подъемные) винты



А



Б

Рис. 2.2. Верхняя панель гравиметра ГНУ-КС (А): 1 – юстировочные винты уровня, 2 – продольный уровень, 3 – шкалы отсчетного устройства, 4 – рукоятка микрометра, 5 – винт диапазонного устройства, 6 – крепежные винты, 7 – окуляр, 8 – рукоятка для транспортировки, 9 – термометр, 10 – осветительная лампа, 11 – поперечный уровень, 12 – клеммы для подключения питания. Схема расположения шкал отсчетного устройства (Б): 1 – рукоятка микрометра, 2 – вращающаяся шкала целых делений, 3 – риска, относительно которой снимаются целые значения отсчета, 4 – вращающаяся шкала для снятия десятых и сотых долей отсчета, относительно нулевой риски средней неподвижной шкалы 5, на которой определяют тысячные доли отсчета по совпадению какого-либо ее деления с делением шкалы 4

2.2. Система нивелирования

Система нивелирования гравиметра состоит из трех установочных (подъемных) винтов 1 и двух цилиндрических уровней: продольного 2 и поперечного 3 (рис. 2.3, А), оси которых расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Подъемные винты установлены на основании из текстолита и расположены по окружности через 120° . Уровень, ось которого параллельна линии, соединяющей два подъемных винта, называется продольным. Он контролирует горизонтальное положение *нити подвеса маятника*, которая перпендикулярна оси поперечного уровня.

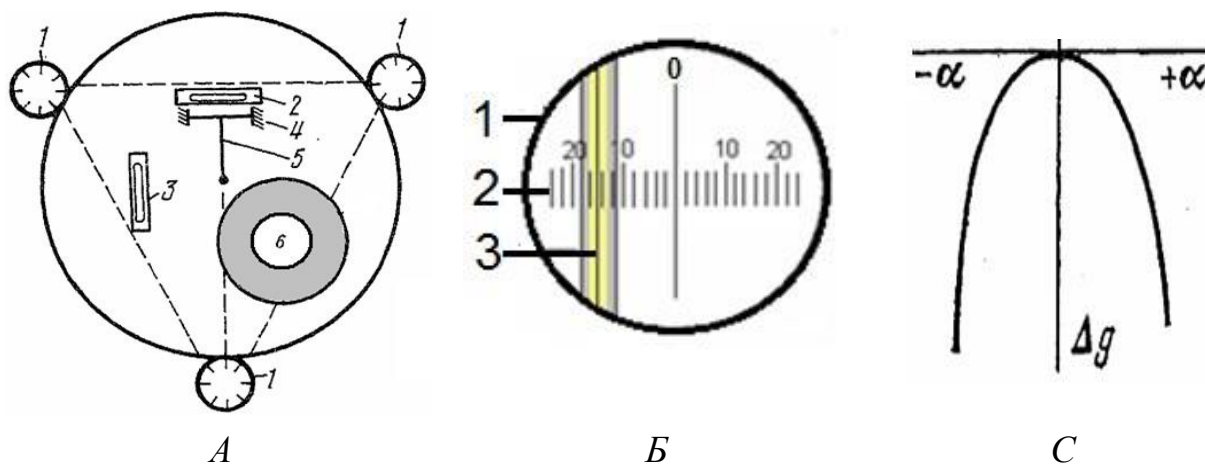


Рис. 2.3. Схема расположения уровней, рукоятки винта микрометра и установочных винтов гравиметра (А): 1 – установочные (подъемные) винты; 2 – продольный уровень; 3 – поперечный уровень; 4 – ось вращения рычага маятника (горизонтальная нить измерительной рамки); 5 – рычаг маятника; 6 – окуляр.

Поле зрения окуляра (Б): 1 – окуляр; 2 – шкала; 3 – блик индекса маятника.

График изменения силы тяжести Δg при наклоне прибора на угол α (С)

Уровень, ось которого расположена по направлению третьего винта, называется поперечным. Он ориентирован вдоль рычага маятника и контролирует его горизонтальное положение. При высокоточных измерениях силы тяжести необходимо следить за тем, чтобы при нивелировании гравиметра его отклонение от горизонтального положения было не более 3 мм, что соответствует изменению силы тяжести примерно на 1 мкГал [18, 16].

2.3. Электрическая и оптическая системы

Электрическая система гравиметра включает источник электропитания, источник света, соединительный электрический кабель. В качестве источника электропитания могут использоваться щелочные аккумуляторы, например типа СГД-5 емкостью 10 ампер-часов, плоские сухие батареи с выходным напряжением 4,5 и другие. Для увеличения емкости обычно составляют блок из двух-трех однотипных источников, соединенных параллельно. Источником света является электрическая лампочка от карманного фонаря напряжением 2,5 или 3,5 В и потребляемым током 0,15–0,2 А.

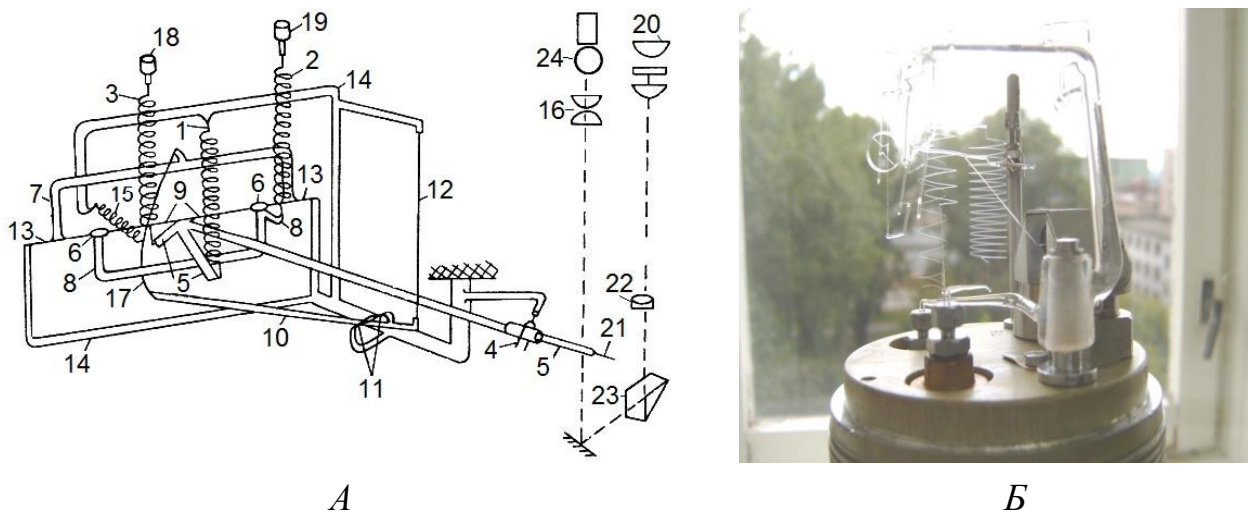


Рис. 2.4. Схемы кварцевой и оптической систем гравиметра ГНУ–КС (А) (по К.Е. Веселову) и внешний вид кварцевой системы (Б): 1 – главная, 2 – измерительная, 3 – диапазонная пружины; 4 – ограничитель; 5 – рычаг–маятник; 6 – нити подвеса измерительной рамки 8; 7 – подвижная рамка рычага 10 температурного компенсатора; 9 – нити подвеса рычага– маятника; 11 – нити подвеса рычага температурного компенсатора; 12 – медная проволока температурного компенсатора; 13 – нити подвеса подвижной рамки температурного компенсатора; 14 – каркас кварцевой системы; 15 – пружина лукообразной нити; 16 – конденсор осветителя; 17 – компенсатор криволинейности температурных изменений; 18 – диапазонное устройство; 19 – измерительное устройство; 20 – окуляр; 21 – индекс маятника, 22 – объектив; 23 – поворотная призма; 24 – осветительная лампа

Источник электроэнергии подключается к клеммам 12 (рис. 2.2, А) при помощи соединительного кабеля, поставляемого в комплекте с прибором.

Оптическая система гравиметра (рис. 2.4, А) состоит из конденсора 16, создающего равномерное распределение светового потока от электрической лампочки 24, стеклянной призмы 23, обеспечивающей поворот светового луча на 180° , объектива 22 с фокусным расстоянием около 30 см и окуляра 20 с 20-кратным увеличением, позволяющего рассматривать блик индекса 21 маятника 5. На рисунке 2.3, Б представлена схема отображения блика 3 на окулярной шкале 2.

2.4. Устройство упругой системы кварцевого астазированного гравиметра

Принцип действия упругой кварцевой системы рассмотрим на примере отечественного разведочного гравиметра ГНУ-КС [5]. Выше показано, что разведочные гравиметры имеют следующие основные узлы: 1) упругая кварцевая система (рис. 2.4, А и Б); 2) отсчетное устройство, включающее микрометрический винт и счетчик оборотов микрометра (рис. 2.2, Б); 3) диапазонное устройство (рис. 2.2, А (5)); 4) оптическая система (рис. 2.4, А (16, 20–24)); 5) система температурной компенсации (рис. 2.4, А (7,10–13,15,17)); 6) приспособление (кла-

пан) для создания вакуума; 7) альфа-излучатель, представляющий собой радиоактивный изотоп, нанесенный на внутреннюю поверхность вакуумной камеры и предназначенный для снятия электростатического электричества с ограничителей 4 хода рычага маятника 5 упругой системы (рис. 2.4, А).

Основной частью гравиметра является кварцевая упругая система, находящаяся в металлической вакуумируемой камере и монтируемая на основание средней части прибора, которая, в свою очередь, при сборке гравиметра помещается в сосуд Дьюара. Отметим, что на рисунке (рис. 2.3, Б) упругая система перевернута на 180° в вертикальной плоскости относительно рабочего положения.

Предположим, что при переходе из одного гравиметрического пункта, где рычаг-маятник 5 (рис. 2.4, А) упругой системы находился в горизонтальном (исходном) положении, в другой пункт значение силы тяжести уменьшилось. Тогда момент гравитационной силы уменьшится, пружины 1, 2 и 3 укоротятся и маятник 5 поднимется вверх. Следует отметить, что блик (отображение индекса) маятника в поле зрения окулярной шкалы может смещаться в зависимости от знака цены деления прибора вправо или влево от нулевого деления. Однако при наклоне системы наблюдаемое значение силы тяжести всегда будет уменьшаться (рис. 2.3, С) из-за возникающего угла между направлениями силы тяжести и оси чувствительности упругой системы, т. к. косинус угла меняется в пределах от 0 до 1. Поворачивая микрометрический винт 19 по часовой стрелке, компенсируем пружину 2, допустим, будем растягивать. Тогда рамка компенсационной пружины 8 повернется против часовой стрелки. Вращательное движение будет передаваться горизонтальной кварцевой нити 9, а затем маятнику 5 и индексу 21, блик от которого наблюдается в окуляре 20. Вращение микрометрического винта 19 продолжают до полного совмещения блика маятника с нулевым делением окулярной шкалы (рис. 2.3, Б) и в этом положении снимают показания со шкал отсчетного устройства (рис. 2.2, Б).

На каждом гравиметровом пункте (ГП) при работе с ГНУ-К для повышения точности рекомендуется снимать по 3 отсчета n и из них находить среднее арифметическое значение n_i , которое и будет считаться отсчетом на конкретном пункте наблюдения и в дальнейшем использоваться при вычислении приращения силы тяжести. Наблюдаемые приращения силы тяжести, например, между 0-м и i -м ГП вычисляются по формуле (2.1):

$$\Delta g_{0-i} = C(n_i - n_0) - \delta g_{н.п.i}, \quad (2.1)$$

где n_0 – отсчет по гравиметру (также взятый как среднее арифметическое из трех показаний) на ГП 0, $\delta g_{н.п.i}$ – поправка за смещение нуля-пункта (дрейф нуля) прибора для времени снятия отсчета на ГП i , C – цена деления прибора.

Основное уравнение гравиметра

Разведочные гравиметры предназначены для измерения приращений ускорения силы тяжести g , поэтому конструкция приборов предусматривает измерительную систему, имеющую только одну степень свободы, ориентируемую при наблюдениях вдоль измеряемой силы. Тогда при изменении силы тяжести чувствительный элемент системы (пробная масса) может совершать только поступательные (гравиметры первого рода) или вращательные (гравиметры второго рода) перемещения в вертикальной плоскости [8]. Обозначим через x деформацию упругой системы, регистрируемую некоторым индексом и связанную с перемещающейся пробной массой M . Тогда, например, для гравиметра второго рода момент массы $M(x)$ упругой системы относительно оси вращения горизонтального маятника с пробной массой M можно выразить формулой (2.2):

$$M(x) = \int_M r \cdot \cos \alpha \cdot dm \quad (2.2)$$

где r – расстояние от оси вращения до элемента массы dm , а α – угол, составленный направлением r с горизонтальной плоскостью. Если значение g в объеме системы постоянно, то момент силы тяжести будет равен $gM(x)$, которому противодействует момент $W(x)$ внутренних упругих сил системы относительно оси вращения. При измерении система должна находиться в состоянии равновесия, т. е. сумма всех внешних и внутренних сил, действующих на систему, или сумма их моментов должна быть равна нулю. Поэтому уравнение равновесия гравиметра можно записать следующей формулой (2.3):

$$gM(x) + W(x) = 0. \quad (2.3)$$

В общем случае момент W является функцией аргументов деформации x и температуры T , а момент M функцией аргументов x , T , давления p и угла β наклона системы к горизонту. Тогда уравнение равновесия гравиметра запишется выражением (2.4):

$$gM(x, T, p, \beta) + W(x, T) = 0. \quad (2.4)$$

Последующее дифференцирование полученного выражения по всем переменным дает *основное уравнение упругой системы гравиметра* (2.5):

$$\left(g \frac{dM}{dx} + \frac{dW}{dx} \right) \cdot \frac{dx}{dg} + \left(g \frac{dM}{dT} + \frac{dW}{dT} \right) \cdot \frac{dT}{dg} + \left(g \frac{dM}{dp} + \frac{dp}{dg} \right) + \left(g \frac{dM}{d\beta} + \frac{d\beta}{dg} \right) + M = 0, \quad (2.5)$$

где dx/dg – механическая чувствительность прибора; dW/dT – температурный коэффициент; dg/dp – барометрический коэффициент; $dg/d\beta$ – коэффициент, определяющий зависимость показаний гравиметра от угла наклона рычага упругой системы к горизонту.

2.5. Принцип действия температурного компенсатора

При изменении температуры коэффициент жесткости пружин 1, 2 и 3 изменяется, а маятник 5 (например, при уменьшении температуры) опускается вниз (рис. 2.4, А). С другой стороны, длина медной проволоки 12 уменьшается и правый конец рычага 10 поднимается вверх, а левый опускается вниз и тянет за собой прогнутую нить 17, которая поворачивает рамку 7 против часовой стрелки. Это вращательное движение передается горизонтальной кварцевой нити 9, и маятник 5 начинает подниматься вверх. Таким образом, в пределах небольшого температурного диапазона внутри вакуумной камеры, где смонтирована упругая система, опускание и поднятие маятника 5 компенсируют друг друга, а маятник остается в исходном положении, несмотря на изменение температуры окружающего воздуха. Для дополнительной компенсации влияния температуры служит пружина 15, которая оттягивает прогнутую нить 17 и изгибает ее.

Отметим, что полная компенсация имеет место лишь при температуре, соответствующей так называемой точке температурной компенсации, что указывается в техническом паспорте прибора. Поэтому некоторая часть температурного влияния остается все же некомпенсированной и учитывается как составная часть поправки за смещение нуля-пункта прибора.

2.6. Подготовка гравиметров к работе

Перед практическими наблюдениями обучающимся полезно ознакомиться с устройством и принципом действия гравиметра на учебном макете прибора, а также по литературным источникам.

Подготовку разведочных гравиметров к работе разделяют на предмаршрутную (ежедневную) и предполевою [15]. Предполевая подготовка гравиметров к работе представляет тщательное и длительное исследование режима работы каждого прибора и включает эталонирование гравиметра, определение нелинейности его отсчетной шкалы, настройку чувствительности, определение температурной зависимости показаний. Эти операции выполняются, как правило, опытными операторами в специализированных лабораториях с использованием дополнительного оборудования, на гравиметрических полигонах.

Предмаршрутная подготовка включает внешний осмотр гравиметра, проверку оптики прибора, работоспособности электрической и измерительной систем, настройку диапазона и проверку установки уровней гравиметра на минимум чувствительности к наклону. Перед полевыми работами проводят также дополнительные поверки – определение времени становления отсчета гравиметра и оценку люфта измерительного устройства [5].

2.6.1. Внешний осмотр прибора перед полевыми наблюдениями

Перед началом наблюдений с использованием гравиметра необходимо убедиться в том, что прибор находится в рабочем состоянии. При внешнем осмотре обращают внимание на механические повреждения корпуса, проверяют состояние подъемных винтов, рукоятки для переноса гравиметра, целостность уровней, ручки микрометричного винта, осветительной лампочки. Также необходимо проверить работоспособность электрической системы. При подключении исправного блока питания осветительная лампочка должна загораться, окулярная шкала и уровни – подсвечиваться, в противном случае лампочку нужно заменить.

Проверка оптической системы включает регулировку освещенности поля зрения микроскопа и четкости изображения индекса маятника. Это можно сделать путем изменения положения окуляра микроскопа и/или лампочки осветителя, закрепляемой в патроне на верхней панели прибора. Для получения четкого изображения индекса маятника необходимо выбирать лампочки с прямой и хорошо центрированной нитью. Если в поле зрения окуляра отмечаются пятна неправильной формы, значит он загрязнен. Для их устранения следует мягкой тряпкой протереть его линзу.

Оперативную проверку работоспособности измерительной системы также можно провести следующим образом: установить прибор по уровням, подключить питание и смотреть на реакцию маятника при вращении винта микрометра и при необходимости диапазонного винта. Если на вращение какого-либо или обоих винтов маятник не реагирует, сначала можно легким постукиваем по корпусу прибора кончиками пальцев попытаться устранить возможное влияние электростатического электричества, вызывающего залипание рычага маятника на ограничителях его хода. Если это не помогает, то, скорее всего, прибор требует ремонта в специальной лаборатории.

2.6.2. Регулировка диапазона измерений

Настройка диапазона производится в том случае, если на пункте наблюдения блик от индекса маятника при вращении в пределах хода винта (всего порядка 15 полных оборотов) микрометра не совмещается с нулевым штрихом окулярной шкалы выведенного по уровням гравиметра. В более ранних моделях гравиметров (ГАК-4М, ГАК-7Т и др.) диапазон настраивался специальным ключом,

состоящим из внутреннего, имеющего форму отвертки, и внешнего, предназначенного для сцепления с контргайкой, стержней. Путем их вращения добивались выхода блика маятника в поле зрения окулярной шкалы.

В гравиметрах марки ГНУ-К регулировка осуществляется путем поворота диапазонного винта с помощью отвертки. Устройство данного типа позволяет изменить диапазон за короткий промежуток времени и настроить его на необходимый отсчет с высокой точностью. Для этого прибор устанавливают по уровням на твердое основание, выводят счетчик оборотов микрометра ближе к среднему значению, чтобы при работе в поле была возможность компенсации возможных изменений силы тяжести как в сторону увеличения, так и уменьшения. Затем совмещают блик индекса маятника с центральным делением окулярной шкалы при помощи вращения диапазонного винта. Таким образом устанавливается диапазон на конкретном целом делении окулярной шкалы.

Заметим, что при настройке диапазона для разных целых делений отсчетного устройства и определении на этих диапазонах цены деления прибора величина ее будет несколько меняться, характеризуя нелинейность шкалы отсчетного устройства. При высокоточных наблюдениях в показания гравиметра могут вводиться специальные шкаловые поправки, которые устраняют влияние криволинейности шкалы отсчетного устройства, связанной в свою очередь с некачественной нарезкой резьбы на микрометричном винте [14].

2.6.3. Проверка юстировки уровней

Продольный и поперечный уровни гравиметра устанавливаются так, чтобы горизонтальное положение их соответствовало горизонтальному положению главной крутильной нити маятника, что в свою очередь отвечает максимальному или минимальному (в случае отрицательной цены деления) отсчету на пункте наблюдения. В таком положении продольный уровень перпендикулярен рычагу маятника, а показания прибора мало зависят от наклона на небольшие углы, характеризующие погрешности установки гравиметра по уровням.

При транспортировке гравиметра и работе с ним юстировка (настройка уровней на минимум чувствительности к наклону) может нарушиться, что вызывает изменение чувствительности упругой системы. Поэтому за настройкой уровней необходимо следить и проверять ее ежедневно перед началом полевых наблюдений.

Проверка уровней выполняется следующим образом. Прибор устанавливается на прочное основание, воздушные пузырьки уровней выводятся в центральное положение. После этого блик маятника совмещается с нулевым (центральным) (рис. 2.3, Б) штрихом окулярной шкалы.

Подъемными винтами прибора отклоняют пузырек продольного уровня на одно деление вправо и влево, наблюдая за положением блика маятника на окулярной шкале. Если при этом заметного смещения блика не произошло или в обоих случаях он отклонился на малую величину, соответствующую уменьшению силы тяжести, например, вправо, то можно считать, что юстировка данного уровня не нарушена. Необходимо помнить, что при наклоне гравиметра в плоскости одного уровня второй уровень должен оставаться в нулевом положении. Если он отклонится, то его нужно подправить с помощью соответствующего подъемного винта.

В том случае когда при отклонении пузырька уровня на одно деление вправо и влево блик маятника также переместился вправо и влево, имеет место нарушение юстировки. При юстировке уровней прибор наклоняют по делениям уровня в сторону увеличения силы тяжести, при этом на каждом делении снимают отсчет по счетчику оборотов микрометрического винта до тех пор, пока не будет обнаружен экстремум. В этом положении гравиметра уровни с помощью юстировочных винтов приводятся в горизонтальное положение. Затем необходимо убедиться, что исправление сделано верно. Для этого гравиметр наклоняют влево и вправо на 1 или 2 деления регулируемого уровня от исправленного положения. Блики маятника при этом не смещаются от нулевого индекса или отклоняются незначительно. В противном случае уровень следует дополнительно подрегулировать.

Поперечный уровень регулируется так же. Разница состоит лишь в том, что при наклоне в плоскости поперечного уровня изменение отсчета практически не ощущается. После регулировки поперечного уровня необходимо снова проверить правильность установки обоих уровней.

Нарушение юстировки уровней часто наблюдается при резком изменении температуры. Настраивать их следует при температуре, близкой к той, которая будет при полевых наблюдениях. Поэтому начинать регулировку рекомендуется по истечении некоторого времени (порядка одного часа) после выноса прибора из помещения, где температура заметно отличается от температуры места проведения настройки.

Практическая работа по проверке юстировки прибора выполняется обучающимися для того гравиметра, с которым они будут проводить полевые измерения. По результатам исследований составляется таблица полученных измерений (прил. 4) и строится график (рис. 2.5) изменения отсчетов при наклоне прибора в процессе регулировки каждого уровня. На основании полученных результатов делается обоснованный вывод о качестве юстировки уровней прибора, а также о проведенных исследованиях.

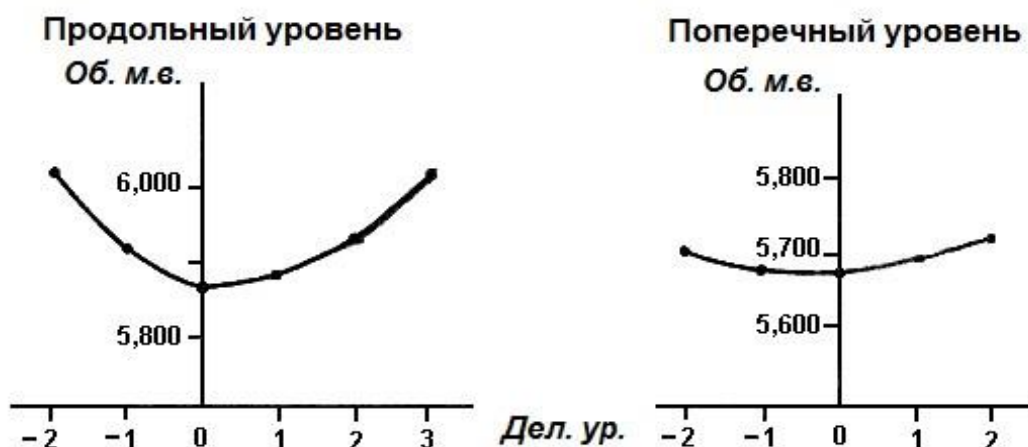


Рис. 2.5. Графики изменения отсчета при изменении угла наклона гравиметра (вертикальный масштаб дан в оборотах микрометричного винта отсчетного устройства, горизонтальный – в делениях уровня, цена деления гравиметра – отрицательная)

2.7. Определение цены деления гравиметра

Результаты измерений силы тяжести гравиметрами получают в делениях шкалы измерительного устройства. Для того чтобы их перевести в единицы силы тяжести, необходимо определить переводной (масштабный) коэффициент (цену деления) прибора. Процедура определения цены деления гравиметра называется эталонированием. Величина масштабного коэффициента отсчетного устройства гравиметра ГНУ-К показывает, сколько оборотов микрометричного (измерительного) винта нужно сделать для компенсации изменения силы тяжести в один миллигал.

Установлено, что со временем в силу разных причин (изменение угла наклона оси главной пружины к оси, направленной из точки крепления этой пружины к маятнику; частичное нарушение вакуума в герметизированном объеме гравиметра; изменение температуры и др.) величина C может изменяться [6]. На производстве обязательна проверка гравиметров на соответствие действующему стандарту (сертификация), которая производится в специализированных организациях, обладающих лицензией, т. е. специальным разрешением юридическому лицу от уполномоченных на то государственных органов осуществлять конкретные, оговоренные законом действия. Одной из обязательных процедур является определение цены деления гравиметра, т. е. эталонирование.

Определение цены деления C оборота барабана микрометра ГНУ-К проводится перед началом полевых работ, в середине полевого сезона и по окончании работ. Исследование может выполняться тремя способами: I. По пунктам с известными значениями силы тяжести.

II. Методом наклона.

III. По пунктам с различными высотами.

I. *Первый способ* проведения исследований позволяет определить цену деления гравиметра, используя пункты наблюдения, значения силы тяжести на которых или ее приращение известны заранее. Тогда, обозначив через Δg величину приращения силы тяжести в миллигалах и через ΔN разницу показаний отсчетов эталонируемого гравиметра в единицах деления отсчетного устройства на выбранных пунктах, расчетную формулу (2.6) можно будет записать следующим образом:

$$C = \frac{\Delta g}{\Delta N} . \quad (2.6)$$

Данный метод предполагает разбиение эталонного полигона, который, согласно инструкции [3], должен соответствовать следующим требованиям: а) приращение силы тяжести между эталонными пунктами должно быть не менее 30 мГал; б) эталонные пункты должны выбираться в местах, где влияние промышленных и транспортных помех несущественно и известен гидрогеологический режим подземных вод; в) для наблюдения должна быть подготовлена площадка или цементный столб, абсолютные отметки которых определяются с высокой точностью – порядка $\pm 3-5$ см.

Между двумя эталонными пунктами с высокоточными гравиметрами определяют твердое приращение силы тяжести Δg в миллигалах. Считая Δg известным, между этими же пунктами выполняют наблюдения с эталонируемым гравиметром и получают приращение силы тяжести ΔN в единицах деления отсчетного устройства. Цена деления гравиметра далее вычисляется по формуле (2.6).

Полевые организации для исследований гравиметров пользуются в основном этим способом, хотя он и обладает двумя существенными недостатками: 1) не позволяет подробно исследовать всю шкалу гравиметра; 2) является трудоемким и дорогостоящим, особенно при использовании авиатранспорта для транспортировки прибора от одного пункта к другому.

II. *Второй способ* эталонирования гравиметров называют методом наклона. Он лишен указанных недостатков, но сложность заключается в точном измерении угла наклона чувствительного элемента (рычага-маятника) гравиметра к горизонту β и необходимости знания абсолютного значения силы тяжести g в пункте измерения.

Принимая при горизонтальном положении рычага-маятника отсчет равным n_0 , а при наклоне равным n^+ (выше горизонта) и n^- (ниже горизонта), можно определить разности $\Delta n^+ = n^+ - n_0$ и $\Delta n^- = n^- - n_0$ и их среднее значение ΔN в

единицах (обороты микрометра) отсчетного устройства. При известных значениях β в радианах и g в миллигалах приращение силы тяжести Δg и, соответственно, величину C в миллигалах можно получить из группы формул (2.7):

$$\Delta g = \frac{g\beta^2}{2} \text{ или } C\Delta N = \frac{g\beta^2}{2}, \text{ где } \Delta N = \frac{\Delta n^+ + \Delta n^-}{2} \text{ и } C = \frac{g\beta^2}{2\Delta N}. \quad (2.7)$$

Более подробные сведения о возможностях этого способа и предлагаемых усовершенствованиях можно найти в монографии [7, 8].

Если на пункте настройки прибора неизвестно абсолютное значение силы тяжести, то его можно рассчитать по нормальной формуле, например Гельмерта (см. п. 3.1). Для этого нужно знать значение широты гравиметрового пункта, на котором проводятся исследования.

На учебной практике для вычисления величины C достаточно взять g с точностью 50–100 мГал. Ранее в производственных организациях для определения цены деления гравиметров применялись плиты-экзаменаторы. Они изготавливались из чугуна, базовая длина их была порядка полутора метров. На таких плитах в основании имелись два неподвижных упора и один упор в виде винта, шаг резьбы которого подбирался так, что один оборот приводил к изменению силы тяжести, измеряемой гравиметром, на заранее рассчитанную величину Δg , например на один миллигал.

Позднее для определения цены деления приборов с горизонтальной крутильной нитью [2] стали выпускаться специальные установки эталонирования гравиметров (УЭГП), обеспечивающие определение приращений Δg с точностью до 0,01 мГал. Модификации установок УЭГП-2 и УЭГП-3 оснащались термостатом, что давало возможность эталонировать гравиметры при различных температурах и с большей точностью.

III. *Третий способ* исследования позволяет определить цену деления гравиметра по пунктам с различными высотами. Для вычисления величины C также применяется формула (2.6). При этом приращение силы тяжести Δg в миллигалах между двумя пунктами, расположенными один под другим, которые определяется через поправку за высоту, и величина C будут вычисляться по следующим формулам (2.8):

$$\Delta g = 0,3086\Delta H \text{ и } C = 0,3086 \frac{\Delta H}{\Delta N}, \quad (2.8)$$

где ΔH – разность высот пунктов наблюдения в метрах.

При плановом смещении пунктов относительно друг друга величину Δg можно определить через поправку Буге по формуле (2.9):

$$\Delta g = 0,3086\Delta H - 0,0419\sigma\Delta H, \quad (2.9)$$

где σ – значение плотности пород, находящихся между пунктами наблюдения, которое выражается в $г/см^3$.

Приращение силы тяжести Δg в миллигалах целесообразно определять по методике измерения отдельных приращений (МИОП) на основании следующей формулы (2.10):

$$\Delta g = C \frac{n_3 - n_0 + 3(n_1 - n_2)}{4}, \quad (2.10)$$

где n_0 и n_2 – отсчеты по гравиметру на пункте с меньшей высотой, n_1 и n_3 – отсчеты на пункте с большей высотой. Для определения цены деления на учебной практике этот способ можно применять, располагая ГП на лестничных площадках зданий с двумя этажами и выше.

На учебной практике по итогам определения цены деления гравиметров разными операторами и разными методами составляют сводную ведомость (прил. 2, табл. 2.3), на основании которой бракуют несогласующиеся значения C и затем выводят средние значения цены деления каждого гравиметра, которые следует использовать при обработке рейсов. При этом значения силы тяжести Δg на пунктах (табл. 5.3), полученные в опорном рейсе, принимаются за твердые.

Сводная ведомость определения цены деления гравиметров

Гравиметр	Дата	Оператор	C , мГал/об	$C_{ср}$, мГал/об
ГНУ–КС № 415	30.05.98	Максимов	–7,015– лестница (метод 3)	–7,064
	31.05.98	Торсунов	–7,021 – полигон (метод 1)	
	05.06.98	Поздеев	–7,057 – полигон (метод 1)	
ГНУ–КВ № 50	30.05.98	Игнатов	–6,824* – полигон (метод 1)	–5,270
	03.06.98	Уточкин	–5,456 – лестница (метод 3)	
	06.06.98	Харузин	–5,520 – полигон (метод 1)	

Примечание. 6,824* – забракованное значение цены деления.

Из таблицы 2.3 видно, что определение величины C в 1998 г. выполнены двумя способами: на пунктах с разными высотами (лестница) и на полигоне с известным твердым приращением силы тяжести.

2.8. Определение чувствительности гравиметра

Для определения чувствительности гравиметр устанавливается на прочное основание и нивелируется по уровням. Блик маятника с помощью микрометренного винта совмещается, например, с пятым делением окулярной шкалы слева от нулевого (центрального) деления, записывается отсчет по микрометру n_1 , затем маятник также совмещается с пятым делением справа от нуля и снимается отсчет n_2 . Чувствительность будет определяться по формуле (2.11):

$$q = \frac{10}{C(n_2 - n_1)}, \quad (2.11)$$

где C – цена деления прибора.

Чувствительность получим в делениях (*дел.*) окулярной шкалы, отнесенных к одному миллигалу. Полученное значение чувствительности должно быть согласно ГОСТ 13017-83 [4] не менее 7 *дел./мГал* для гравиметров класса А, порядка 5 *дел./мГал* – для класса В и 2,5 *дел./мГал* – для класса С.

На учебной практике по итогам определения чувствительности также необходимо составить сводные ведомости, на основании которых выбраковываются неудачные вычисления и оценивается среднеквадратическая ошибка полученного значения q [прил. 3].

2.9. Определение длительности переходного процесса

Процесс транспортировки гравиметров связан с действием переменных нагрузок (тряска, вибрации и т.д.) на чувствительную систему. Сразу после установки прибора на ГП изображение маятника на окулярной шкале колеблется, что мешает точному наведению индекса маятника на нуль окулярной шкалы. Поэтому перед снятием отсчета по гравиметру требуется время для стабилизации системы, или «время становления отсчета».

В лабораторных условиях исследования проводят на вибрационном стенде. Гравиметр закрепляют на подвижной платформе стенда в рабочем положении и совмещают индекс маятника с отсчетным штрихом окулярной шкалы.

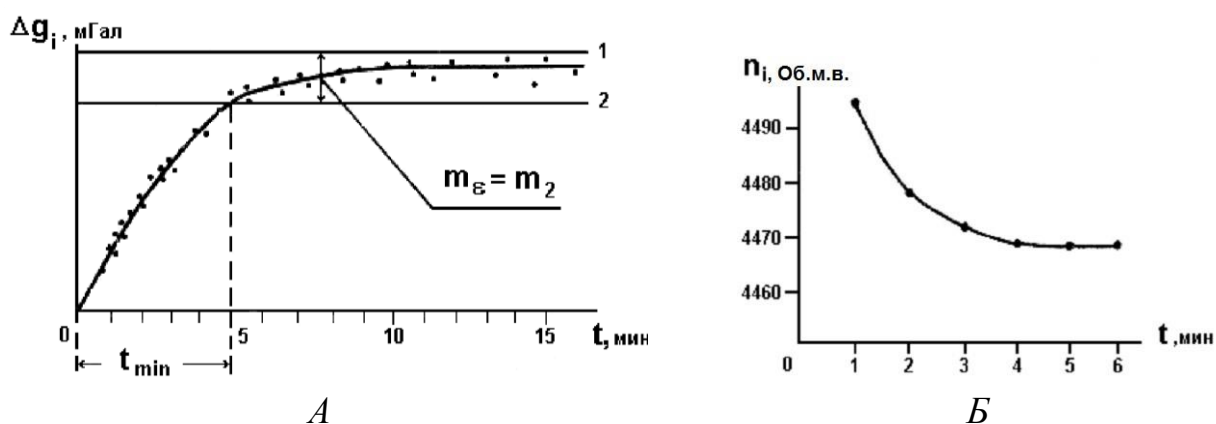


Рис. 2.6. График стабилизации отсчета в миллигалах (А) и отсчетах по гравиметру (Б)

Затем гравиметр подвергают вибрации с частотой 20 Гц и амплитудой $0,2 \div 0,5 \text{ мм}$ в течение 10 мин . После выключения вибратора с гравиметра снимают отсчеты в течении 20 мин . В первые 5 мин отсчеты снимают по минутно, далее не реже, чем через каждые 2 мин .

Для построения графика (рис. 2.6) изменение показаний гравиметра Δg_i вычисляют по формуле (2.12):

$$\Delta g_i = C(n_i - n_0), \quad (2.12)$$

здесь C – цена деления гравиметра, n_i – значение текущего отсчета в делениях микрометренного винта, n_0 – значение начального отсчета.

Далее согласно рисунку 2.6 строят график $\Delta g_i = f(t)$, где t – время снятия отсчета. На графике проводят две линии параллельно оси абсцисс. Линия 1 это асимптота, стремящаяся к значению Δg_i для времени $t = 20 \text{ мин}$. Линия 2 пересекает вертикальную ось в точке со значением, равным чистой ошибке (погрешности) гравиметра m_ϵ или m_2 [7]. Точка пересечения линии 2 с кривой $\Delta g_i = f(t)$ определит по оси абсцисс минимальную длительность переходного процесса –

t_{\min} . Согласно ГОСТ полученное значение t_{\min} не должно превышать 3 мин (табл. 2.2).

На учебной практике в полевых условиях определить длительность переходного процесса или время стабилизации отсчета можно следующим образом. Гравиметр носят в течение 3–5 мин, что должно соответствовать времени переноски гравиметра между пунктами в полевом рейсе, затем прибор ставят на прочное основание, нивелируют по уровням, выводят маятник в горизонтальное положение и снимают отсчеты через $0,5 \div 1$ мин в течение $4 \div 10$ мин. Затем строят график $n_i = f(t)$ (рис. 2.6, Б), отражающий время и характер стабилизации отсчета, которые необходимо учитывать оператору в полевых рейсах, например, брать отсчеты в одно и то же время после установки прибора на гравиметрическом пункте. При этом нет необходимости ждать полной стабилизации отсчета, нужно стараться производить снятие отсчета максимально идентично в каждой точке. В идеальном случае имеющиеся в отсчетах ошибки оператора при вычислении приращений уничтожаются.

2.10. Определение коэффициента надежности

Для выбора оптимальной методики полевых наблюдений полезно знать коэффициент надежности гравиметра $K = M/N$, т. е. отношение количества наблюдений M с ошибкой, не превышающей заданную величину, к общему числу N измерений. Для его определения предлагается [8] провести исследования по методике измерения отдельных приращений (см. п. 3.4) на рабочих профилях или между двумя отдельными пунктами, например ГП1 и ГП2 (порядка 100-200 приращений) и найти разности отсчетов ε по следующей формуле (2.13):

$$\varepsilon = 0,5(n_3 - n_2 - n_1 + n_0), \quad (2.13)$$

где n_0 и n_2 – отсчеты на ГП 1, n_1 и n_3 – отсчеты на ГП2.

Первый вид наблюдений позволяет кроме оценки качества прибора решать одновременно и производственные задачи: вычисление наблюденных приращений силы тяжести, контроль скорости смещения нуль-пункта прибора, определение величины средней квадратической ошибки отсчета и т. д.

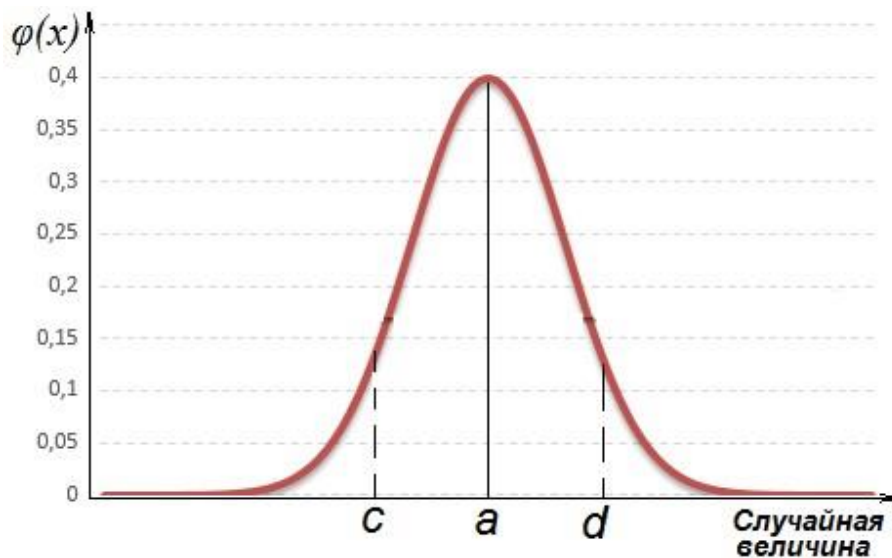


Рис. 2.7. График плотности вероятности $\varphi(x)$ нормального закона распределения (закон Гаусса) случайной величины

Известно, что непрерывная случайная величина x имеет нормальное распределение (закон Гаусса), т. е. распределение вероятностей непрерывной случайной величины, которое описывается плотностью вероятности $\varphi(x)$ (рис. 2.7).

Формула *общего нормального распределения* имеет вид (2.14):

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.14)$$

Нормальное распределение с параметрами $a = 0$ и $\sigma = 1$ называется нормированным распределением. Параметры a и σ^2 , входящие в плотность распределения, соответственно являются математическим ожиданием (центр распределения) и среднеквадратическим отклонением (дисперсия) случайной величины x [8].

Если получаемую на практике разность ε использовать в качестве функции ошибок, то истинное (свободное от ошибок) значение разности должно быть равным нулю. Тогда, принимая параметр $a = 0$, коэффициент надежности можно определить как вероятность того, что ε примет значение, принадлежащее заданному интервалу, например (c, d) (рис. 2.7). Обозначая среднюю квадратическую ошибку отсчета (чистая ошибка наблюдения) через m_2 и полагая отсчеты n равноточными, на основании формулы (2.13) можно записать: $m_\varepsilon^2 = m_2^2$. При количестве значений ε равном r имеем формулу (2.15):

$$m_2 = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{r}}. \quad (2.15)$$

Следовательно, коэффициент надежности K гравиметра можно находить как вероятность попадания P случайной величины ε в заданный интервал значений, например от c до d (рис. 2.7) [12].

Обозначая через $P(\varepsilon)$ функцию распределения величины ε , а через $\Phi^*(\varepsilon)$ – ее нормальную функцию распределения, для вычисления вероятности попадания случайной величины в заданный интервал $P(c \leq \varepsilon \leq d)$ можно воспользоваться общей формулой:

$$K = P(c \leq \varepsilon \leq d) = \Phi^* \left(\frac{d}{m_2} \right) - \Phi^* \left(\frac{c}{m_2} \right), \quad (2.16)$$

где $\Phi^*(c/m_2)$ и $\Phi^*(d/m_2)$ – функции Лапласа, значения которых приводятся в специальных таблицах (прил. 11). Для иллюстрации приведем пример расчета величины K из работы [8]. Пусть при исследованиях получена чистая ошибка наблюдения $m_2 = \pm 0,03$ мГал, а проектная точность $m_2 = \pm 0,06$ мГал. Тогда $K = P(-0,06 \leq \varepsilon \leq +0,06) = \Phi^*(-0,06/0,03) - \Phi^*(-0,06/0,03) = \Phi^*(2) - \Phi^*(-2) = 2\Phi^*(2)$. Далее из таблиц находим: $\Phi^*(2) = 0,4772$. Отсюда коэффициент надежности гравиметра будет следующим: $K = P(-0,06 < \varepsilon < +0,06) = 2 \cdot 0,4772 = 0,9544$.

Задания для самостоятельной работы

1. Под руководством преподавателя достать учебный гравиметр из транспортно-контейнера. Извлечь среднюю часть прибора из внешнего кожуха и, сняв крышку вакуумируемой камеры, открыть доступ к упругой системе прибора.
2. Ознакомиться с устройством упругой системы и изучить принцип ее действия.
3. Ознакомиться с устройством температурного компенсатора и изучить принцип его действия.
4. Произвести внешний осмотр прибора и подготовить гравиметр к наблюдениям: проверить исправность электрической лампочки и качество батарей, отрегулировать освещение шкалы и видимость блика маятника. Убедиться в работоспособности упругой системы, отсчетного устройства и подъемных винтов.
5. Отрегулировать диапазон измерений, установив отсчет порядка 6–7 полных оборотов микрометра.
6. Проверить юстировку продольного и поперечного уровней на минимум чувствительности к наклону.
7. Определить цену деления гравиметра одним из предложенных способов.
8. Определить чувствительность гравиметра и время стабилизации отсчета.
9. Рассчитать нормальное значение силы тяжести по формулам Ф. Гельмерта, Кассиниса и Морица для значений широты места проведения исследований.
10. Подготовить полученные при выполнении заданий 6, 7, 8, 9 материалы для отчета в соответствии с предъявляемыми преподавателем требованиями.

3. СОЗДАНИЕ ОПОРНЫХ И РЯДОВЫХ СЕТЕЙ

3.1. Нормальные значения силы тяжести

В гравиметрии рассматриваются три основные поверхности:

- *поверхность Земли* – определяется средним уровнем невозмущенной воды Мирового океана и поверхностью рельефа на суше;
- *поверхность геоида* – определяется средним уровнем невозмущенной воды Мирового океана, продолженного под континентами;
- *поверхность эллипсоида* – поверхность геометрически правильного тела (например, эллипсоид вращения) аппроксимирующей поверхность геоида.

Введем следующие определения:

Нормальная Земля – модель геоида, представленная геометрически правильным телом (сфероид, эллипсоид вращения и т. д.), с близкими к нему геометрическими (форма, размеры) и физическими (плотность) параметрами.

Нормальное значение силы тяжести (γ_0) – значение силы тяжести, рассчитанное на поверхности нормальной Земли;

Нормальная формула – формула для вычисления значений силы тяжести или ее градиентов на поверхности нормальной Земли.

Теорема А. Клеро, выведенная в 1743 г., позволяет определить нормальную силу тяжести на поверхности земного эллипсоида (нормальной Земли) и его сжатие α . Теорема представлена двумя формулами.

Первая формула Клеро, отражающая закон изменения нормальной силы тяжести от широты φ и с учетом величин порядка второй степени сжатия на поверхности земного эллипсоида, имеет вид (3.1):

$$\gamma_0 = \gamma_e(1 + \beta \sin^2 \varphi + \beta_1 \sin^2 2\varphi), \quad (3.1)$$

где γ_0 – значение нормальной силы тяжести на поверхности уровенного эллипсоида; γ_e – значение нормальной силы тяжести на экваторе; φ – широта точки вычисления; β – коэффициент, показывающий избыток силы тяжести на полюсе по сравнению с экватором. Коэффициент β в относительной форме можно представить следующим выражением (2.2):

$$\beta = \gamma_p - \gamma_e / \gamma_p, \quad (3.2)$$

где γ_p – значение нормальной силы тяжести на полюсе (983,2 Гал), а γ_e – на экваторе (978,0 Гал).

Коэффициент β_1 , зависящий от сжатия Земли α , записывается формулой (3.3):

$$\beta_1 = (\alpha^2 / 8) + (\alpha\beta / 4). \quad (3.3)$$

Вторая формула теоремы Клеро, позволяющая определить сжатие Земли α , с членами второго порядка представляется в следующем виде (3.4):

$$\alpha + \beta = (5q/2) - (17\alpha q/14), \text{ где } q = \omega^2 a / \gamma_e. \quad (3.4)$$

Величина q показывает отношение центробежной силы к силе притяжения Земли на экваторе, учитывая угловую скорость вращения ω и значение a большой полуоси земного эллипсоида.

В практике гравиметрических и геодезических работ широко используется первая формула теоремы Клеро, для которой численные значения коэффициентов γ_e , β , и β_1 определяются по экспериментальным данным. С повышением точности измерительной аппаратуры коэффициенты в нормальной формуле уточняются. Переход к расчетной формуле нормальной силы тяжести с уточненными коэффициентами каждый раз влечет за собой большие затраты (перевычисление огромных объемов гравиметрических данных, изменение гравиметрических карт и каталогов и др.). Поэтому, учитывая служебный характер нормальной формулы, при необходимости удобнее просто вводить поправки в конечные расчеты по ранее применяемым формулам.

В России, как и в странах бывшего СССР, при обработке гравиметрических измерений используется полученная на основе гипотезы Дарвина-Вихерта о внутреннем строении Земли формула Ф. Гельмерта (1909 г.) вида (3.5):

$$\gamma_0 = 978030(1 + 0,005302\sin^2 \varphi - 0,000007\sin^2 2\varphi). \quad (3.5)$$

Величину γ_e получаем в миллигалах. Значение сжатия Земли α по расчетам составило 1:298,2 и практически совпало со сжатием референц-эллипсоида Ф. Н. Красовского, принятого в качестве нормальной Земли (фигуры относимости) в нашей стране.

В 1930 г. на съезде Международного геодезического союза в Стокгольме в качестве международной была принята выведенная для эллипсоида Хейфорда («Международный эллипсоид 1924 года», сжатие $\alpha = 1:297$), формула Кассиниса (3.6):

$$\gamma_0 = 978049(1 + 0,0052884\sin^2 \varphi - 0,0000059\sin^2 2\varphi). \quad (3.6)$$

Отметим, что коэффициент γ_e , *мГал* в приведенных нормальных формулах вычислен в Потсдамской гравиметрической системе. На исходном пункте мировой опорной сети Потсдам со временем была выявлена ошибка в определении силы тяжести, равная +13,87 *мГал*. Таким образом, с целью исключения ошибки в настоящее время при вычислении по этим формулам в результат вводят поправку, равную -14 *мГал*.

Для перехода от формулы (2.6) к формуле (2.5) используется следующая зависимость (3.7):

$$\gamma_0^{(2.5)} = \gamma_0^{(2.6)} - (19,0 - 13,2\sin^2 2\varphi + 1,08\sin^2 2\varphi). \quad (3.7)$$

Позднее с учетом массы атмосферы и спутниковых данных была получена международная формула для геодезической референц-системы 1967 г. (при сжатии $\alpha = 1:298,247$), рекомендованная на XV Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза в Москве (1971 г.). Формула (3.8) имеет следующие коэффициенты:

$$\gamma_0 = 9780318(1 + 0,005324\sin^2 \varphi + 0,0000059\sin^2 2\varphi). \quad (3.8)$$

В 1984 г. Мориц опубликовал международную формулу (3.9) для геодезической референц-системы 1980 г. при $\alpha = 1:298,257$ со следующими коэффициентами:

$$\gamma_0 = 9780327(1 + 0,005324\sin^2 \varphi + 0,0000058\sin^2 2\varphi) \quad (3.9)$$

Все приведенные выше формулы, как и формулы других авторов (У. Гайсконен, И. Жонголович, Н. Грушинский и др.), являются первой формулой теоремы Клеро с численными значениями коэффициентов.

Для вычислений по приведенным формулам нормального значения поля силы тяжести на учебной практике можно воспользоваться данными табл. 3.1 или в опубликованными в 1961 г. Р. Ф. Бурдюковым нормальными значениями силы тяжести, которые для широт Пермского края приведены в табл. 3.2. Изменение значений γ по широтным профилям равно нулю, а вдоль меридианов на малой площади незначительно.

3.2. Абсолютные значения силы тяжести

Абсолютные значения силы тяжести – это независимые для каждого пункта наблюдения значения, полученные посредством измерения времени и пути на основе использования эталонов времени и длины. *Абсолютные значения силы тяжести* необходимы для согласования эталонов мер в принятой системе единиц длины, массы, времени; для расчета траекторий движения космических аппаратов; для определения фигуры Земли; приведения *относительных измерений* к абсолютному уровню; выделения нормального поля для целей геологической интерпретации аномалий силы тяжести. Существует два способа абсолютных измерений: *маятниковый* и *свободного падения* тела в гравитационном поле. Для получения абсолютных значений силы тяжести на пункте применяются соответственно *маятниковые приборы* и *абсолютные гравиметры*.

В практике гравиразведки абсолютные значения силы тяжести g_i для i -го пункта определяются также *относительным способом измерений* с помощью современных разведочных гравиметров и вычисляются по следующей формуле (3.10):

$$g_i = g_{on} + \Delta g_{i-on}, \quad (3.10)$$

где g_{on} – абсолютное значение силы тяжести на опорном пункте, Δg_i – приращение силы тяжести между опорным и текущим пунктами. На учебной практике значение силы тяжести для опорного пункта g_{on} можно принять равным нормальному значению γ_0 , определяемому по значению широты опорного пункта φ на основании нормальных формул.

Учитывая служебный характер величины абсолютного значения силы тяжести, при решении геологоразведочной задачи знать его значения на ГП не обязательно. Здесь важно выразить в системе одной (опорной) точки (значение силы тяжести на которой можно принять, например, за ноль) все приращения силы тяжести между ГП на площади съемки, которые и содержат геологическую информацию.

Таблица 3.1

Координаты и высотные отметки населенных пунктов

№ п/п	Населенный пункт	Северная широта, градусы, минуты секунды (десятичные градусы)	Восточная долгота, градусы, минуты секунды (десятичные градусы)	Высота над уровнем моря, м
1	г. Пермь	58° 1' 2" (58,01741)	56° 17' 7" (56,28552)	166 м
2	г. Кунгур	58° 3' 23" (58,05629)	54° 59' 8" (58,05629)	127 м
3	с. Усть-Кишерть	57° 22' 55" (57,3654)	57° 15' 58" (57,2495)	134 м

Таблица 3.2

Нормальные значения силы тяжести для широт Пермского края

Широта φ (градусы, минуты)	Нормальное значение, γ_0 , Гал	Широта, φ (градусы, минуты)	Нормальное значение, γ_0 , Гал	Широта, φ (градусы, минуты)	Нормальное значение, γ_0 , Гал
57° 00'	981, 6716	57° 21'	981, 7005	57° 42'	981, 7293
01'	6730	22'	7019	43'	7307
02'	6744	23'	7033	44'	7320
03'	6758	24'	7047	45'	7334
04'	6771	25'	7060	46'	7348
05'	6785	26'	7074	47'	7361
06'	6799	27'	7088	48'	7375
07'	6813	28'	7101	49'	7389
08'	6827	29'	7115	50'	7402
09'	6840	30'	7129	51'	7416
10'	6854	31'	7143	52'	7429
11'	6868	32'	7156	53'	7443
12'	6882	33'	7170	54'	7457
13'	6895	34'	7184	55'	7470
14'	6909	35'	7197	56'	7484
15'	6923	36'	7211	57'	7497
16'	6937	37'	7225	58'	7511
17'	6950	38'	7238	59'	7525
18'	6964	39'	7252	58° 00'	7538
19'	6978	40'	7266	01'	7552
57° 20'	981, 6992	57° 41'	981, 7279	58° 02'	981, 7565

3.3. Назначение опорной сети и ее уравнивание

Общие сведения

Под опорной гравиметрической сетью понимают систему гравиметрических пунктов повышенной точности, обеспечивающих исходную основу для различных видов съемок. Все гравиметрические сети подразделяются на *мировую, государственную (национальную) и местную (полевую)*.

Мировая опорная гравиметрическая сеть обеспечивает единство исходных абсолютных значений ускорения силы тяжести *национальных гравиметрических сетей* и масштаба относительных измерений. По данным Управления геодезических исследований к настоящему времени известны 3 мировые гравиметрические системы: Венская, Потсдамская, Международная гравиметрическая стандартная сеть (МГСС-71), или Севрская.

Венская гравиметрическая система названа по исходному гравиметрическому пункту, расположенному в Вене. Она существовала до 1909 г. Точность исходного значения силы тяжести в Вене оценивалась средней квадратической ошибкой ± 10 мГал. После 1909 г. была внедрена Потсдамская гравиметрическая система, исходное значение которой (пункт Потсдам) характеризовалось ошибкой ± 3 мГал. Для перехода от Венской к Потсдамской системе значения ускорения силы тяжести должны быть уменьшены на 16 мГал. Появление высокоточных гравиметрических приборов, позволяющих измерять абсолютное значение ускорения силы тяжести с высокой точностью – порядка 10^{-9} g, дало возможность существенно уточнить мировую опорную гравиметрическую сеть, охватывающую все континенты.

В 70-е гг. прошлого столетия была создана современная мировая гравиметрическая система, которая называется *Международной гравиметрической стандартной сетью* (МГСС-71). Для создания МГСС-71 были определены абсолютные значения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами ГАБЛ. Ускорение силы тяжести в любом пункте МГСС-71 после уравнивания характеризуется точностью порядка $\pm 0,2$ мГал.

Государственная (национальная) опорная сеть. В систему государственного геодезического обеспечения (ГГО) страны входят:

- Государственная геодезическая сеть (ГГС);
- Государственная нивелирная сеть (ГНС);
- Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть (ГФГрС);
- Система геодезических параметров Земли (СГПЗ).

СГПЗ включает геоцентрическую систему координат (ГСК), закрепленную пунктами космической геодезической сети (КГС), фундаментальные геодезические постоянные, параметры фигуры и гравитационного поля Земли (ГрПЗ), параметры связи систем координат.

Государственная опорная гравиметрическая сеть (ГОГС) СССР была создана в 1978–1983 гг. под руководством Ю. Д. Буланже (1911–1997). В 1978 г. были начаты работы по созданию высокоточных государственных гравиметрических сетей (ГГрС) двух категорий: *фундаментальной* (ГФГрС) с точностью порядка 0,008–0,010 мГал (рис. 3.1) и 1го класса (ГГрС-1) с точностью порядка 0,03 мГал. Три пункта – Москва, Санкт-Петербург и Иркутск – также включены в международную сеть абсолютных опорных гравиметрических пунктов (JFGRN).

Сеть пунктов ГГрС-1, развиваясь со временем, дополнялась пунктами 2го и 3го классов. В совокупности пункты ГОГС образуют высокоточную государственную гравиметрическую сеть, создание которой как раз и включает в себе принципиальное отличие от организации государственных гравиметрических сетей в большинстве стран мира.

Цели и задачи высокоточной ГОГС состоят в следующем:

1. Создание единой гравиметрической системы на территории всего государства, которая была бы независима от мировой опорной гравиметрической сети, но в то же время надежно с ней связана.
2. Распространение заданной единой гравиметрической системы на территории государства с необходимой точностью и плотностью.
3. Решение научных и технических задач, требующих точного гравиметрического обеспечения, включая изучение гравитационного поля и фигуры Земли и их изменений во времени, а также метрологию всех выполняемых в стране гравиметрических работ.

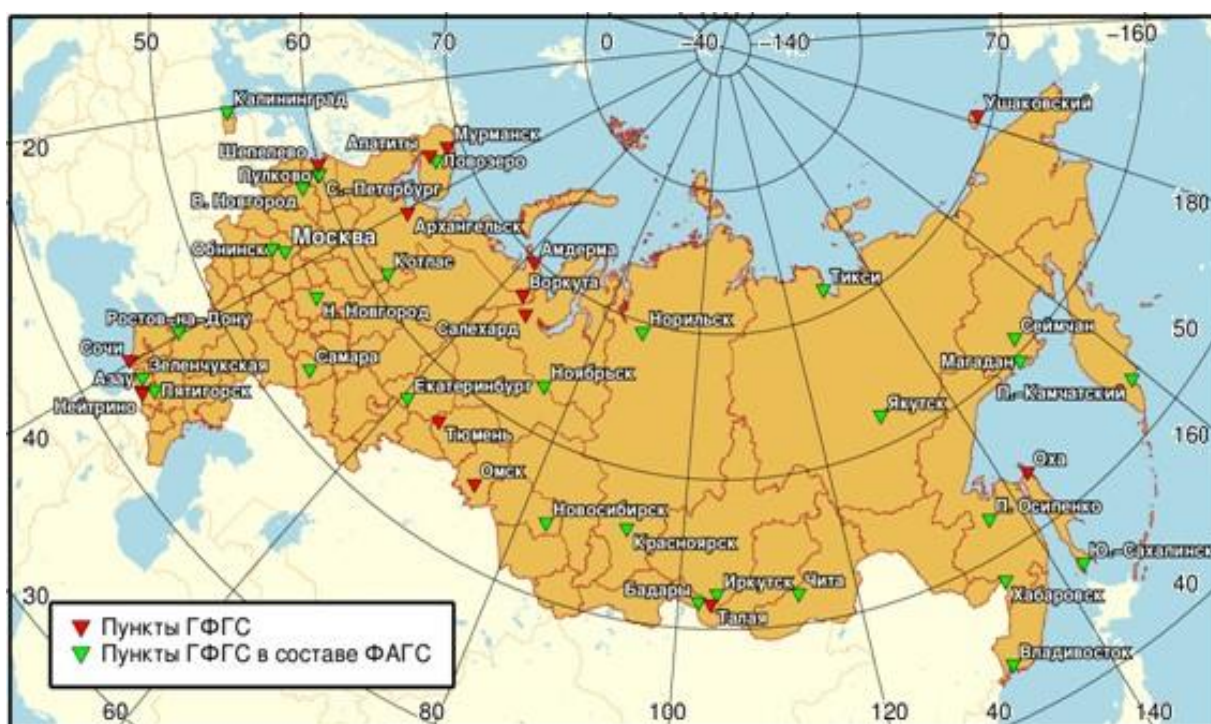


Рис. 3.1. Схема государственной фундаментальной гравиметрической сети (по Geod.ru)

Местные (полевые) опорные сети

При проведении гравиметровых съемок полевые наблюдения с гравиметрами начинаются с разбивки опорной сети 3-го класса, которая служит: 1) для привязки всей сети наблюдений к единому уровню; 2) учета смещения нуля-пункта прибора; 3) контроля за точностью наблюдений.

На площади выбирается положение *исходного опорного пункта*, с которым увязываются все пункты создаваемой сети. Согласно инструкции, исходный пункт увязывается с ближайшим пунктом ГГрС 1-го или 2-го классов, координаты которого получают в специализированных организациях.

В практике гравиметрических работ различают центральную, двухступенчатую и полигональную системы наблюдений при разбивке опорных сетей [15]. В центральной системе (рис. 3.2, А) каждый опорный гравиметрический пункт (ОГП) имеет непосредственную связь с центральным ОГП, в качестве которого может быть и пункт государственной гравиметрической сети.

Двухступенчатая опорная система (рис. 3.2, Б) состоит из каркасной (*к*) и заполняющей (*з*) сети ОГП. Каркасная опорная сеть создается по центральной системе. Пункты заполняющей опорной сети опираются на пункты каркасной сети (*к*). Выполнив наблюдения на пунктах, например, в последовательности 1– 2–3–4–1, получают приращения Δg по звеньям 1–2, 1–4, 1–3. В последовательности наблюдений 1–2–3–4–2–1 определяют Δg между пунктами 2–1, 2–3 и 2–4 и, наконец, выполнив наблюдения на пунктах 1–4–3–4–1, вычисляют приращения по звеньям 4–1 и 4–3.

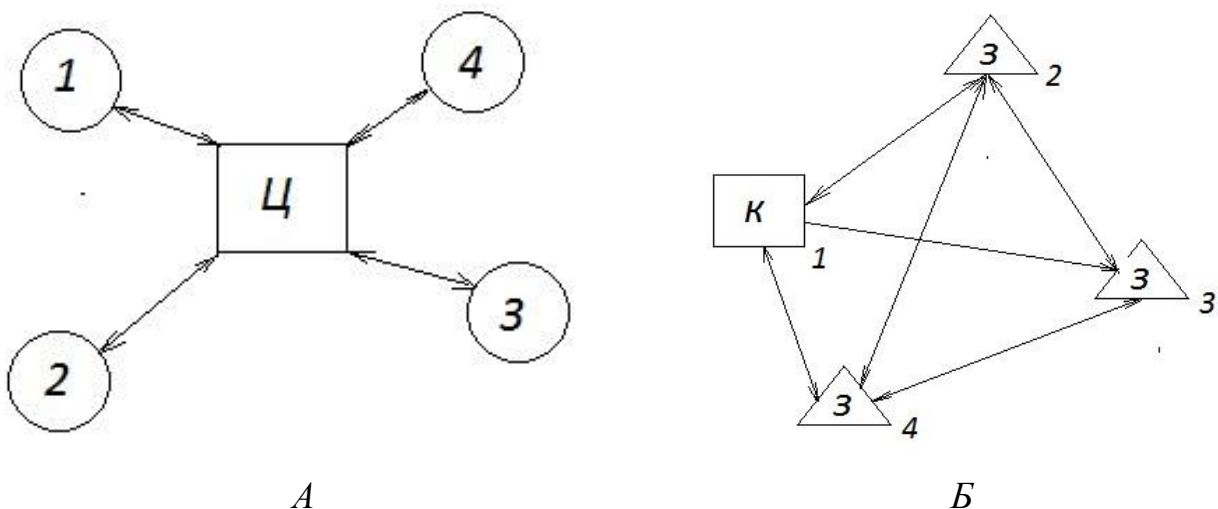


Рис. 3.2. Центральная (А) и двухступенчатая (Б) системы: ц – центральный пункт; к – каркасный; з – заполняющие пункты; 1–4 – пункты наблюдения

В наземной гравиразведке ОГП располагают в местах с прочным основанием и удобных для подъезда или подхода. Точность определения силы тяжести

на ОГП должна быть не менее чем в 1,5–2 раза выше точности измерения на пунктах рядовой сети. Повышение точности достигается тремя способами: 1) применением более точных гравиметров; 2) многократностью наблюдений и 3) использованием быстроходных видов транспорта.

При разбивке опорной сети составляют специальную ведомость, на основании которой осуществляют отбраковку получаемых приращений и вычисляют средние приращения силы тяжести между звеньями хода в маршруте. Полученные средние приращения затем уравнивают. Уравнивание опорной сети может производиться методом полигонов и методом узлов. Для этого строится схема связей между ОГП и вычисляются невязки.

Рассмотрим процесс уравнивания опорной сети на примере метода полигонов (рис. 3.3). Если суммировать приращения силы тяжести между ОГП по сторонам полигона в одном направлении, то результат из-за ошибок наблюдений будет отличаться от нуля. Эта величина называется *невязкой* полигона, а распределение ее – *уравниванием*. При уравнивании распределяем невязку в зависимости от веса стороны полигона до тех пор, пока она не станет равной нулю. За вес принимают число независимых измерений приращения силы тяжести по данной стороне полигона. Чем больше вес, тем меньшая поправка приписывается стороне и наоборот.

Согласно рисунку в центральных столбцах полигонов выписываем невязки: 0,15 мГал (I полигон), 0,22 мГал (II полигон) и 0,28 мГал (III полигон). Распределение начинаем с полигона, имеющего наибольшую невязку по абсолютной величине.

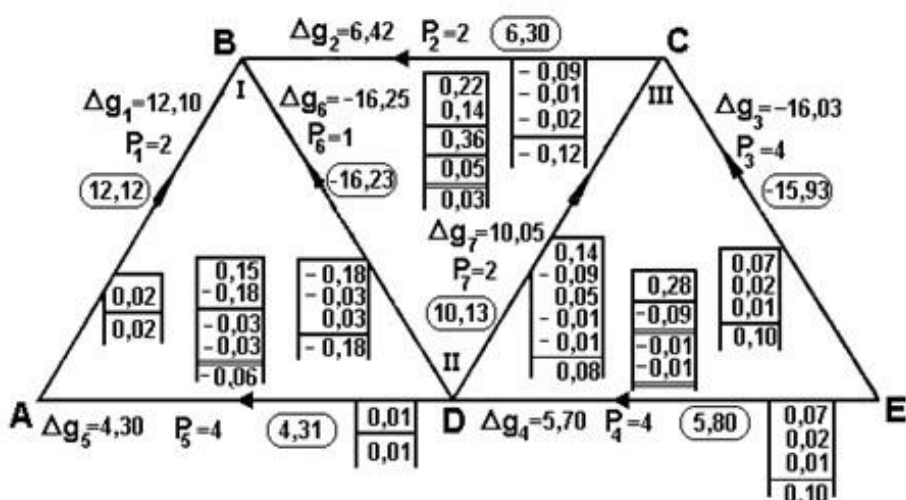


Рис. 3.3. Уравнивание опорной сети по методу полигонов (по В. И. Костицыну)

В нашем случае это полигон III с невязкой – 0,28 мГал. Распределяем ее на стороны полигона обратно пропорционально весу сторон. На стороны CE, DE и

DC соответственно приходятся поправки 0,07; 0,07 и 0,14 мГал. При распределении из полигона III в полигон II перешла невязка 0,14 мГал и суммарная невязка стала равна 0,36 мГал. Таким образом, в полигоне I получили невязку 0,15 мГал, в полигоне II – +0,36 мГал и в полигоне III – 0,00 мГал, поэтому распределяем невязку в полигоне II с учетом весов. Для сторон BC, CD и BD записываем поправки –0,09; –0,09 и –0,18 мГал. В сумме они дают невязку полигона II.

В полигоне I невязка уменьшилась на – 0,18 мГал и составила – 0,03 мГал, в полигоне II она равна нулю и в полигоне III изменилась на величину поправки и приняла наибольшее значение для полигона: – 0,09 мГал. Распределяем ее на стороны CE, DE и DC соответственно: 0,02; 0,02 и 0,05 мГал.

Аналогично производим дальнейшее распределение невязок с учетом поправок от соседних полигонов до тех пор, пока в каждом полигоне невязки не будут равны нулю. Затем суммируем поправки около каждой стороны полигона, полученные значения будут являться искомыми поправками к наблюдаемым приращениям силы тяжести. Для сторон треугольных полигонов, приведенных на рис. 3.3, поправки будут иметь значения, представленные в табл. 3.3.

Таблица 3.3

**Значения суммарной поправки
к наблюдаемым приращениям силы тяжести**

Сторона полигона	AB	BC	CE	DE	AD	BD	DC
Поправка, мГал	0,02	0,12	0,10	0,10	0,01	0,018	0,08

Складывая наблюдаемые приращения с поправками, получим уравненные приращения силы тяжести (в овалах). После уравнивания во всех полигонах невязки равны нулю, что позволяет привести во взаимно однозначное соответствие значения силы тяжести в опорных пунктах полигона с их координатами независимо от пути обхода сторон внутри полигона.

3.4. Методики гравиметрических наблюдений на рядовой сети

Все гравиметрические съемки осуществляются рейсами. *Гравиметрический рейс* – это совокупность наблюдений, объединенных единым учетом смещения нуля-пункта гравиметра. Смещение нуля-пункта кварцевых гравиметров зависит от изменения упругих свойств пружин измерительной системы. Однако следует помнить, что в поправку за смещение нуля-пункта прибора составными частями также входят влияние нескомпенсированных изменений температуры,

притяжение Луны и Солнца, неучитываемые влияния плотностных неоднородностей верхней части разреза (ВЧР) и другие факторы, что приводит к сложному виду графика отражающего дрейф нуля.

На рисунке 3.4 представлены графики смещения нуля-пункта во времени для приборов, находящихся на одном ГП. Видно, что по времени продолжительность рейса, при котором смещение нуля-пункта можно считать линейным с допустимой погрешностью, должна быть не более 1–1,5 часов, что и отражено в паспортных данных гравиметров и литературе [9, 11, 12].

Существуют различные типы рейсов: опирающийся на один ОГП («висячий рейс»), на два ОГП или включающий три ОГП, рейсы также могут быть замкнутыми или разомкнутыми и т. д.

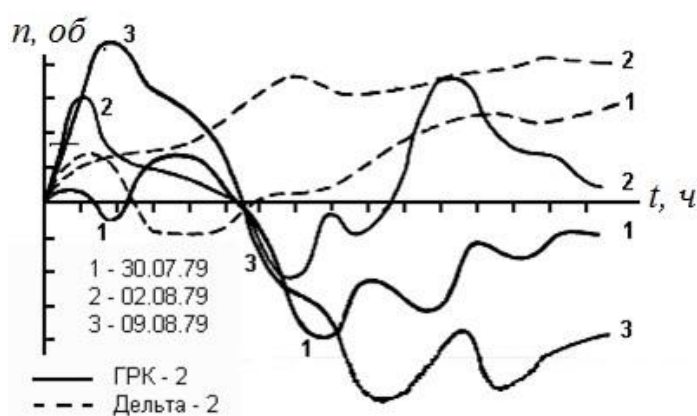


Рис. 3.4. Графики смещения нуля-пункта (по В. И. Костицыну)

В рейсах используются различные методики (последовательности) наблюдений. Отметим, что опорные пункты, включаемые в рейс, могут находиться как непосредственно на исследуемом профиле, так и поблизости, например на соседних профилях (площадная съемка), куда в случае необходимости оператор может доставить гравиметр [3, 4, 7].

Тип рейса следует выбирать на основании требований инструкции [3] и с учетом чистой ошибки прибора m_2 , его коэффициента надежности K , проектной точности наблюдаемых значений силы тяжести $m_{\text{нбл}}$, точности вычисления аномалий силы тяжести m . Точность определения аномалий силы тяжести зависит от масштаба представляемой отчетной карты (табл. 3.2). При работе с отечественными разведочными гравиметрами ГНУ-К принимается во внимание, что если вероятность ошибки прибора большая и коэффициент надежности для соответствующей точности съемки низкий (менее 0,75), то наблюдения целесообразно вести по более сложной методике, например по методике измерения отдельных приращений (МИОП). При коэффициенте надежности от 0,75 до 0,95 можно было использовать ее модификации или методику повторных измерений

(МПИ). При коэффициенте 0,95 и выше рейсы производятся по более простой, широко применяемой на производстве методике однократных измерений (МОИ) [5, 6].

Таблица 3.4

Масштаб карты	Сечение изоаномал, мГал	m, мГал	m _{нбл} , мГал	Среднеквадратические погрешности определения		Число пунктов на 1 кв. км	
				координат, м	высот, м		
1:200000	2,00	0,80	0,40	100	2,50	0,10-0,25	I
1:100000	1,00	0,40	0,30	80	1,20	0,25-1,00	
	0,50	0,20	0,15		0,70	2-30	
1:50000	0,25	0,10	0,07	40	0,35	4-50	II
	0,25	0,10	0,06		0,35	12-60	
1:25000	0,20	0,08	0,06	20	0,25	16-80	
	0,20	0,08	0,06	4	0,20	20-100	
1:10000	0,10	0,04	0,03	4	0,10	25-200	
	0,10	0,04	0,03	2	0,10	50-250	
1:5000	0,05	0,02	0,015	2	0,05	100-500	

Примечание. Данные приведены для равнинных районов из «Инструкции...» [3].

3.4.1. Методика однократных измерений (МОИ)

Наблюдения по МОИ начинаются и заканчиваются на опорных гравиметрических пунктах. Рассмотрим случай замкнутого рейса («висячий ход»), когда наблюдения начинаются в момент времени $t(A)$ на ОГП А, затем по МОИ производятся последовательно в моменты времени $t(i)$ на всех i -х пунктах профиля, а последнее наблюдение в момент времени $t(A')$ выполняется повторно на ОГП А.

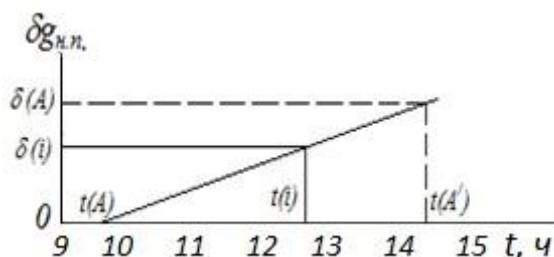


Рис. 3.5. График определения поправки за смещение нуля-пункта гравиметра при наблюдениях по МОИ (висячий ход)

Откладывая по оси абсцисс время снятия показаний, а по оси ординат значения поправок на графике (рис. 3.5) строим прямую линию, соединяющую точку на оси абсцисс, равную времени снятия первого отсчета $t(A)$ на ОГП А, и точку на оси ординат для времени повторного отсчета $t(A')$, равную разнице отсчетов при первом и повторном наблюдении на ОГП А. Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс будет характеризовать скорость смещения нуля-пункта k в рейсе. Величины поправок в наблюдения снимаются с оси ординат для точек пересечения с построенной прямой линией перпендикуляров, восстанавливаемых к соответствующим временам снятия отсчетов $t(i)$ в рейсе.

В этом случае поправка за смещение нуля-пункта может быть вычислена и аналитическим способом по формуле (3.11):

$$\delta g_{н.п.} = k \cdot \Delta t, \quad (3.11)$$

Обозначая через k , *мГал/час* скорость смещения нуля-пункта за единицу времени в рейсе и через Δt , *час* интервал времени от начала рейса до соответствующего наблюдения, поправку получим в миллигалах.

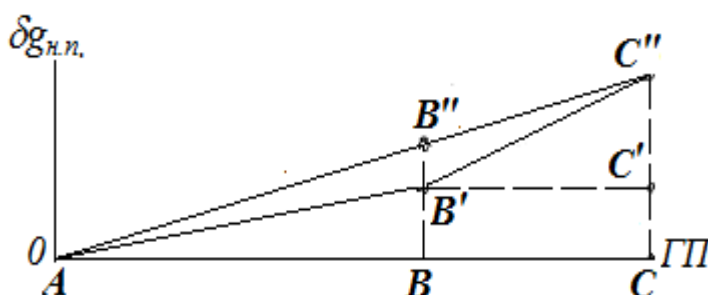


Рис. 3.6. График определения поправки за смещение нуля-пункта гравиметра при наблюдениях по МОИ в случае разомкнутого рейса, включающего три опорных пункта

В случае разомкнутого рейса, включающего два или три опорных пункта, например, ОГП А, ОГП В и ОГП С (рис. 3.6), поправку также можно находить графически и аналитически.

В этом случае величина поправки за смещение нуля-пункта будет характеризоваться невязкой P в миллигалах, вычисляемой по формуле (3.12):

$$P = C(n_k - n_n) - (g_k - g_n). \quad (3.12)$$

Здесь $C(n_k - n_n) = \Delta g^{ряд.}_{A-C}$ – приращение силы тяжести, получаемое в рядовом рейсе между начальным и конечным опорными пунктами, в данном примере между ОГП А и ОГП С, а $(g_k - g_n) = \Delta g^{он}_{A-C}$ – приращение силы тяжести, получаемое в опорном рейсе.

Если в рейсе отклонение невязки промежуточного ОГП В, определяемое на отрезке $B' B''$, меньше удвоенной ошибки наблюдения, то поправки в рядовых

пунктах наблюдения для времени снятия отсчетов на них будут равны соответствующим ординатам линии AC'' . Если отклонение невязки на ОГП В равно удвоенной ошибке наблюдения или больше нее, то поправку целесообразно определять отдельно по звеньям рейса. Для звена ОГП А – ОГП В поправки будут равны ординатам точек линии AB' , а для звена ОГП В – ОГП С – разностям ординат линий $B'C''$ и $B'C'$.

При *аналитическом способе* поправка за смещение нуля-пункта в милигаллах определяется по формуле (3.13):

$$\delta g_{н.н.} = \frac{C(n_k - n_n) - (g_k - g_n)}{(t_k - t_n)}(t_i - t_n), \quad (3.13)$$

где n_n и n_k – отсчеты по гравиметру на начальном и конечном ОГП, g_n и g_k – твердые значения силы тяжести на них, t_n и t_k – время наблюдений в рейсе на опорных пунктах, соответственно, на начальном и конечном; $t_i - t_n$ – интервал времени (в часах) от начала рейса до наблюдения в текущей i -той точке; C – цена деления прибора.

Данная методика является самой эффективной и широко применяется на производстве, но она предполагает, что смещение нуля-пункта за все время рейса происходит линейно [5, 8, 9]. Пример обработки наблюдений по МОИ и полученный график наблюденных приращений Δg представлены в табл. 3.4 и на рис. 3.7. Ведомость для обработки рейса по данной методике приведена в прил. 5.

Таблица 3.5

Пример обработки рейса, выполненного по МОИ

ГП	Время, ч. м.	Ср. отсчет n_i , дел	Δg , dn, дел	Δg , dn*С, мГал	Поправка за н-п, мГал	Исправ. приращение с. т., мГал
12	13.43	7.291	0.000	0.000	0.000	0.000
13	13.48	7.257	-0.034	0.235	0.025	0.210
14	13.52	7.276	-0.015	0.104	0.045	0.059
15	13.57	7.226	-0.065	0.450	0.071	0.379
16	14.06	7.222	-0.069	0.477	0.105	0.372
17	14.05	7.2	-0.091	0.630	0.115	0.515
18	14.09	7.06	-0.231	1.598	0.135	1.463
19	14.22	7.144	-0.147	1.017	0.205	0.812
20	14.27	7.165	-0.126	0.872	0.235	0.637
21	14.32	7.161	-0.130	0.899	0.262	0.637
22	14.37	7.219	-0.072	0.498	0.691	-0.193
12	14.48	7.241	-0.050	0.346	0.346	0.000

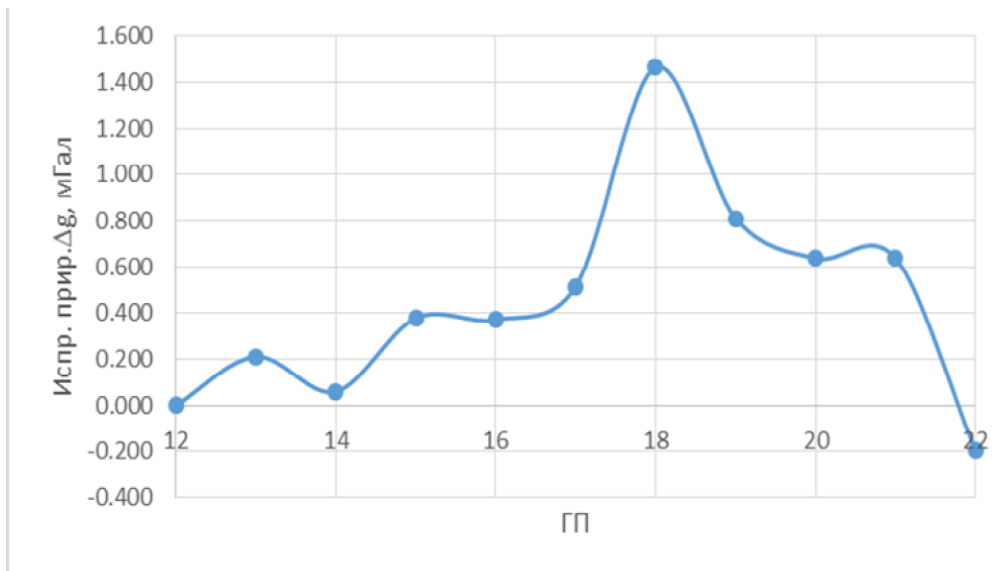


Рис. 3.7. График приращений силы тяжести вдоль профиля

3.4.2. Методика повторных измерений (МПИ)

По этой методике могут производиться с повторением наблюдений на ГП как в прямом (МПИ ПХ), так и в обратном ходе (МПИ ОХ), причем с различным процентным соотношением повторных наблюдений (100, 50, 25 % т. п.) (прил. 7). Например, наблюдения с повторением в обратном ходе начинаются с ОГП А, затем последовательно проводятся на рядовых пунктах и в прямом ходе заканчиваются на ОГП В. Через некоторое время (равное времени перехода оператора от одного пункта до другого), в течение которого гравиметр носится оператором в режиме пешеходной съемки, наблюдения на ОГП В повторяются и далее последовательно выполняются в обратном направлении вплоть до ОГП А, допустим, на каждой точке (100%-ное повторение) или через одну точку наблюдения (50%-ное повторение) и т. д. Если провести наблюдения от ОГП А до ОГП В, а затем повторить снова от ОГП А до ОГП В, то получим МПИ ПХ со стопроцентным повторением.

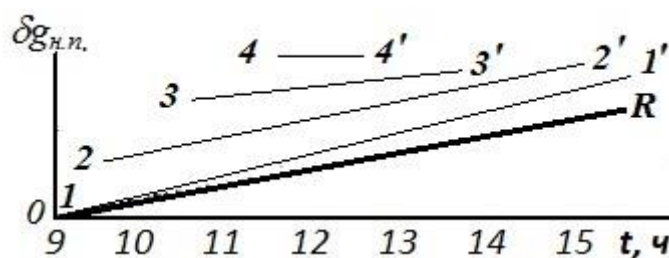


Рис. 3.8. График определения поправки за смещение нуля-пункта гравиметра при наблюдениях по МПИ. R – редуцированная прямая; 1–1'...4–4' – отрезки, характеризующие смещение нуля пункта на соответствующих указанным номерам гравиметрических пунктах по повторным (со штрихами) наблюдениям

Проведение наблюдений по МПИ позволяет более точно, чем по МОИ, учесть смещение нуля-пункта прибора, ибо в данном случае имеются пункты, на которых за относительно небольшой промежуток времени получают по 2 отсчета, что позволяет лучше контролировать погрешность измерений при их обработке.

При работе по МПИ рейс нередко выполняется в виде висячего хода. Введение поправки за смещение нуля-пункта в миллигалах графическим способом сводится к построению *редукционной прямой* (рис. 3.8). Для этого по оси абсцисс откладывается время наблюдения, по оси ординат – отсчеты, умноженные на цену деления прибора C . В результате соединения точек для одних и тех же пунктов получаются прямые, характеризующие на соответствующих пунктах изменение отсчета во времени. Далее эти прямые переносятся параллельно самим себе в начало координат на значение первого отсчета на пункте. На основании перенесенных прямых проводится *редукционная прямая*, т. е. линия со средним наклоном к оси абсцисс. Эта линия используется для определения величин поправок аналогично МОИ.

Определение поправок в этом случае можно также вести *аналитическим способом*, предварительно установив среднюю статистическую величину скорости смещения нуля-пункта k из формул (3.14):

$$\delta g_{н.н.} = k \cdot \Delta T; \quad k = \frac{C \sum_{i=1}^m \Delta n_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^m \Delta t_i^2}. \quad (3.14)$$

где ΔT – интервал времени от начала рейса до соответствующего наблюдения; Δn_i – разность отсчетов на i -том пункте между вторым и первым наблюдением, Δt_i – интервал времени между первым и вторым наблюдением на пункте, m – число пунктов с повторными наблюдениями.

Следует отметить, что эта методика отличается довольно низкой точностью наблюдений. Как внутренняя, так и внешняя сходимость наблюдений характеризуется большими ошибками, что делает МПИ малоэффективной при детальных съемках.

3.4.3. Методика измерения отдельных приращений (МИОП)

Данная методика измерений была впервые предложена в 1960 г. профессором А. К. Маловичко. Измерения n по МИОП проводятся в следующей последовательности: на пункте 1 (n_0), затем 2 (n_1), возвращаемся на пункт 1 (n_2) и вновь переходим на пункт 2 (n_3). Далее наблюдения ведутся согласно мнемоническому правилу «шаг назад, два вперед». Таким образом, в рейсе на каждом пункте, исключая первый и последний, за короткий промежуток времени получаем по три отсчета. Это позволяет подробно изучить смещение нуль-пункта и более точно исключить его влияние, а также учесть случайные ошибки, обусловленные нестабильной работой гравиметра. Рейсы по МИОП можно начинать и заканчивать на любом пункте, в том числе и рядовом.

Поправка за смещение нуль-пункта в миллигалах при линейном его изменении для отдельно взятого звена рейса из двух пунктов может быть определена по формуле (3.15):

$$\delta g_{н.п.} = C \frac{(n_3 + n_2 - n_1 - n_0)}{4}, \quad (3.15)$$

но находить ее отдельно нет необходимости, так как она включена в формулу (3.10) для определения приращения силы тяжести Δg .

Приращение силы тяжести для средних звеньев рейса может быть также вычислено по формуле, учитывающей все три отсчета на каждом пункте. Так, для звена 2–3 формула будет иметь вид (3.16):

$$\Delta g_{2-3} = C \frac{n_1 - n_8 + 8(n_6 - n_3) + 17(n_4 - n_5)}{24}, \quad (3.16)$$

где n_1, n_3, n_5 – отсчеты на пункте 2; n_4, n_6, n_8 – отсчеты на пункте 3; C – цена деления гравиметра.

Способ Чадаева

Располагая наблюдениями, выполненными по МИОП, можно построить график *фактического смещения нуль-пункта* по способу Чадаева [12]. Менее подробные графики получаются при использовании наблюдений по модификациям МИОП.

Пусть n_1, n_2 и n_3 – отсчеты на одной и той же точке. Разности Δn между отсчетами на пункте наблюдения, например $n_2 - n_1$ и $n_3 - n_2$, зависят от величины смещения нуль-пункта и ошибок самих отсчетов. За начало координат примем точку 0 (рис. 3.9). При построении графика по горизонтальной оси будем откла-

дывать время наблюдения, а по вертикальной – разности Δn отсчетов, умноженные на цену деления C гравиметра для перевода показаний микрометра в миллигалы: $\Delta n \cdot C = \Delta g$.

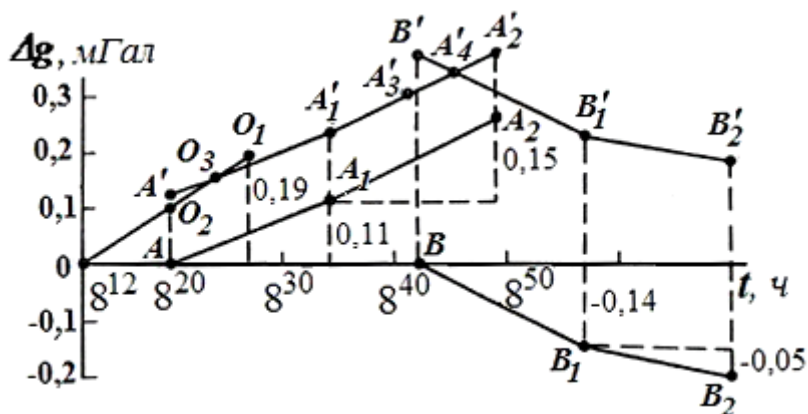


Рис. 3.9. Построение графика фактического смещения нуля-пункта по способу Чадаева

Будем считать, что в точке 0 первое наблюдение проведено в 8 ч 12 мин и второе (после возвращения из пункта А) – в 8 ч 27 мин. По интервалу времени 15 мин и разности отсчетов 0,19 мГал наносим точку O_1 и проводим прямую OO_1 , характеризующую смещение нуля-пункта за указанный интервал времени.

На втором пункте первое наблюдение выполнено в 8 ч 20 мин, второе – в 8 ч 34 мин и третье – в 8 ч 49 мин; на пункте наблюдения разности отсчетов $n_2 - n_1 = 0,11$ мГал и $n_3 - n_2 = 0,15$ мГал. По этим данным на рисунке построены линии AA_1 и A_1A_2 . Чтобы получить непрерывный график, ломаную линию AA_1A_2 переносят параллельно самой себе вверх до средней точки O_3 интервала перекрытия отрезков O_2O_1 . Новое положение линии AA_1A_2 изображено линией $A'A_1A'_2$. Теперь фактическое смещение нуля-пункта будет характеризоваться ломаной линией $OO_3A'_1A'_2$.

По данным третьего пункта построена линия BB_1B_2 и затем перемещена вверх в положение $B'B_1B'_2$. Смещение нуля-пункта за интервал времени от начала маршрута теперь характеризуется ломаной $OO_3A'_1A'_4B'_1B'_2$. Аналогичные построения производятся для пунктов С, D и т. д.

Представленная схема наблюдений на ГП позволяет при обработке вычислять смещение нуля-пункта одновременно с вычислением приращений силы тяжести Δg в каждом звене рейса.

Пример обработки рейса методики измерения отдельных приращений представлен в таблице 3.5 (прил. 8).

Таблица 3.5

Ведомость обработки рейса по МИОП (фрагмент)

Звенья хода	Средние отчеты, дел.				dN , дел	$dN \cdot C$, мГал	Наблюд. знач. с. т., мГал	ε , дел.	ε^2 , дел. ²
	n_0	n_1	n_2	n_3					
12–13	7.374	7.312	7.291	7.257	– 0.014	0.093	0.000	0.014	0.000
13–14	7.312	7.378	7.257	7.276	0.082	–0.566	0.093	–0.023	0.001
14–15	7.312	7.273	7.378	7.272	– 0.089	0.614	–0.472	–0.033	0.001
15–16	7.273	7.251	7.272	7.259	– 0.019	0.133	0.142	0.004	0.000
16–17	7.251	7.243	7.259	7.207	– 0.023	0.159	0.275	–0.022	0.000
17–18	7.243	7.281	7.207	7.152	0.033	–0.227	0.434	–0.046	0.002

На учебной практике полезно также рассчитать скорость смещения нуля-пункта для каждого ГП в рейсе (прил. 9).

3.4.4. Модификации и достоинства МИОП

При стабильной работе гравиметра или сложных условиях местности наблюдения можно проводить по модификациям МИОП, исключая необходимость третьего отсчета на каждом пункте, но вместе с тем обеспечивающим высокую точность измерений и текущий контроль. Например, в звене рейса наблюдения можно вести по однократной методике (методика секционных измерений МСИ) по схеме 1–2–3–4–1–5–6–7–8–5 и т. д. Отметим, что в предельном случае МСИ будет представлять МИОП. Достоинства различных модификаций МИОП и специфика обработки полученных результатов подробно рассмотрены в монографиях [8, 12].

Наибольшего внимания заслуживает методика печорских геофизиков, предусматривающая наблюдения на ГП по схеме 1–2–1–3–2–4–3–5 и т. д., с применением мнемонического правила «шаг назад, через пункт вперед». Тогда приращение силы тяжести в миллигалах для звена, например, ГП 1–ГП 2, с учетом смещения нуля-пункта будет определяться по формуле (3.17):

$$\Delta g_{1-2} = C \frac{7(n_1 - n_2) + (n_3 - n_0)}{8}, \quad (3.17)$$

где n_0 и n_2 – отсчеты на ГП 1; n_1 и n_3 – отсчеты на ГП 2.

Обработка рейса по методике, предложенной печорскими геофизиками, выполняется по такой же схеме, как в МИОП (табл. 3.5).

В специальной литературе отмечается, что МИОП психологически трудоемкий метод, так как приходится по три раза подходить к пункту наблюдения [6]. Однако затраты времени на рейс по МИОП лишь в 1,5 раза больше по сравнению с рейсом со 100%-ным повторением наблюдений в обратном ходе, а в сравнении с МИОП в модификации печорских геофизиков затраты времени одинаковы. В других источниках также отмечается, что трудоемкость и большие затраты времени при МИОП в значительной степени кажущиеся, если сравнить с методикой двукратных наблюдений на каждом рядовом пункте одновременно двумя приборами, сложившейся в производственной практике проведения детальных съемок с отечественными гравиметрами.

Опыт наблюдений с отечественными гравиметрами позволяет отметить следующие достоинства МИОП: 1) высокая точность наблюдений на уровне чистой ошибки приборов и даже на уровне чувствительности гравиметров; 2) непрерывный учет смещения нуль-пункта; 3) изучение характера фактического смещения нуль-пункта, что позволяет судить о надежности работы гравиметра (такие исследования следует обязательно проводить в начале полевых работ); 4) возможность закончить рейс на любой рядовой точке профиля, причем следующий рейс желательно начинать с последнего звена предыдущего рейса; 5) более качественные наблюдения даже при отсутствии опыта у оператора; 6) внешняя сходимость рейсов по МИОП, выполненных независимо, сохраняется на уровне чистых ошибок приборов; 7) МИОП позволяет уменьшить количество опорных пунктов и даже вести съемку без разбивки опорной сети [8].

Учитывая указанные преимущества, применять МИОП при работе с отечественными гравиметрами рекомендуется не только в начале полевого сезона (с целью обоснования рациональной методики съемки), но и при наблюдениях на интерпретационных профилях, когда оцениваются разведочные возможности каждого геофизического метода, при составлении рационального комплекса исследований.

3.5. Определение точности полевых наблюдений

Разность наблюдений на пункте в пределах одного рейса назовем *внутренней сходимостью*. Она зависит от точности прибора, навыков оператора и методики учета смещения нуль-пункта. Наиболее полный учет смещения нуль-пункта, как уже отмечалось, обеспечивает МИОП, и она же позволяет определить чистую ошибку m_2 *единичного* наблюдения и ошибку $m_{\Delta g}$ определения *приращения* силы тяжести, которые в миллигалах вычисляются по формулам (3.18):

$$m_2 = m_\varepsilon = \pm C \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{r}}, \quad \dots\dots m_{\Delta g} = \pm 1,12 m_\varepsilon \approx m_{\text{нбл}}, \quad (3.18)$$

где C – цена деления прибора, r – число разностей ε в оборотах микрометра, определяемых по формуле (3.13); $m_{\text{нбл}}$ – средняя квадратическая ошибка наблюдения.

При разбиении опорной сети по центральной системе наблюдений качество съемки в миллигалах определяется формулами (3.19):

$$\overline{N} = \frac{N}{k}; \quad m_{\text{он}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{N-k}}; \quad \delta_i = \Delta g_i - \overline{\Delta g_i}; \quad \overline{\Delta g_i} = \frac{\sum \Delta g_i}{l}, \quad (3.19)$$

где N – общее число измерений приращений силы тяжести Δg , $mGal$ в опорной сети; k – количество пунктов; δ_i – отклонение измеренного значения Δg_i от среднего $\Delta g_{\text{ср}}$ из принятых в обработку; l – количество приращений Δg , принятых в обработку [7].

В случае наблюдений на пунктах рядовой сети при малой величине ошибки m_ε и небольших отклонениях фактического смещения нуль-пункта от линейного массовые полевые наблюдения осуществляют короткими (1,5–2 ч) рейсами по методике однократных наблюдений. Точность наблюдений при МОИ не может быть оценена по всем пунктам и контролируется на основании независимых контрольных рейсов, что предусматривается проектом работ согласно инструкции на выполнение гравиметровой съемки, в объеме 5–10% от общего количества наблюдений.

При использовании МПИ обратный ход внутренняя сходимость определяется средней квадратической ошибкой наблюдений $m_{\text{нбл}}$ по формуле (3.20):

$$m_{\text{нбл}} = \pm \sqrt{\frac{\sum d^2}{2k}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{k}}, \quad (3.20)$$

где d – разность наблюдаемых приращений при прямом и обратном ходе; δ – отклонение от среднего; k – количество повторенных пунктов в обратном ходе. Контрольные рейсы характеризуют *внешнюю* сходимость наблюдений. Для анализа точности результатов различных рейсов составляют контрольные ведомости, в которых отмечают тип рейса, дату, оператора, тип и номер гравиметра и полученные абсолютные либо относительные значения силы тяжести на каждой контролируемой точке. Для каждого пункта выводят среднее значение силы тяжести, затем вычисляют отклонения от среднего δ и находят среднюю квадратическую погрешность наблюдений по формуле (3.21):

$$m_{\text{нбл}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}, \quad (3.21)$$

где n – количество контрольных пунктов.

Если число измерений на контрольных пунктах больше двух, то средняя квадратическая погрешность вычисляется по формуле (3.22):

$$m_{\text{нбл}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{\varpi - n}}, \quad (3.22)$$

где ϖ – общее количество измерений на контрольных пунктах; n – число контролируемых пунктов; а δ – отклонение от среднего каждого измерения на пункте.

Получаемая по формулам (3.21) и (3.22) погрешность наблюдений зависит от типа рейсов, опытности операторов, точности приборов и корректности учета смещения нуль-пункта. Исследования показали, что внешняя сходимость контрольных наблюдений, выполненных различными операторами, по МИОП значительно выше, чем сходимость, получаемая по МОИ и МПИ при одной и той же опытности оператора.

В процессе учебной практики обучающиеся могут оценить точность определения цены деления, чувствительности, приращений силы тяжести, составляя сводные ведомости (прил. 2, 3, 6). Пример сводной ведомости приведен в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Фрагмент сводной ведомости приращений силы тяжести

Звено ОГП	Тип рейса	Оператор	Дата	Гравиметр	Δg_i , мГал	$\Delta g_{ср}$, мГал	$\delta =$ $\Delta g_i -$ $\Delta g_{ср}$, мГал	δ^2 , мГал ²
13	МИОП	Трефилов	11.06.2010	ГНУ–КС 395	-0.278	-0.093	0.185	0.034
13	МИОП	Тляшев		ГНУ–КС 354	-0.896		0.803	0.645
13	МИОП	Неронов		ГНУ–КС 395	-0.153		0.060	0.004
13	МИОП	Львовский		ГНУ–КС 395	-0.116		0.023	0.001
13	МИОП	Филимон- чиков		ГНУ–КС 354	-0.052		0.041	0.002
13	МОИ	Трефилов		ГНУ–КС 395	-0.050		0.043	0.002
13	МОИ	Тляшев		ГНУ–КС 354	-0.052		0.041	0.002
13	МОИ	Неронов		ГНУ–КС 395	-0.012		0.081	0.007
13	МОИ	Львовский		ГНУ–КС 395	-0.072		0.021	0.000
13	МОИ	Филимон- чиков		ГНУ–КС 354	0.001		0.094	0.009

Задания для самостоятельной работы

1. Провести наблюдения по методике измерения отдельных приращений на опорной сети.
2. Выполнить уравнивание опорной сети.
3. Провести наблюдения в рядовом рейсе в объеме, установленном преподавателем. Каждый обучающийся обязан выполнить наблюдения по одной из методик, работая оператором. При выполнении наблюдений в качестве вычислителя обучающийся ведет полевой журнал и оформляет его для отчета.
4. Провести обработку данных, построить графики смещения нуля-пункта и вычислить приращения силы тяжести по данным, полученным обучающимся при работе оператором.
5. Подготовить полученные материалы для отчета в соответствии с предъявляемыми преподавателем требованиями.

4. РЕДУКЦИИ И АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

4.1. Определение поправок за высоту и промежуточный слой

Нормальное значение силы тяжести γ_0 определяется для поверхности эллипсоида, аппроксимирующего геоид. При наблюдениях гравиметрические пункты имеют отличия по высоте от уровня моря, относительно которого (на территории России это уровень Балтийского моря) в классической постановке задачи вычисляются аномалии силы тяжести. Поэтому для определения нормального значения силы тяжести в точке наблюдения, допустим на высоте H , используя значение нормального вертикального градиента силы тяжести $d\gamma_0/dH = 0,3086 \text{ мГал/м}$, в наблюдаемое значение силы тяжести следует ввести поправку в свободном воздухе (поправка за высоту), выражаемую формулой (4.1):

$$\delta g_{св.в.} = 0,3086H. \quad (4.1)$$

Предполагая, что интересующие геолога с точки зрения наличия полезного ископаемого части разреза находятся ниже уровня моря, имеет смысл освободить наблюдаемые значения силы тяжести от влияния масс, заключенных между пунктом наблюдения и *уровнем относимости*, в частности уровнем моря. Для этого означенные массы в каждом ГП моделируют в виде плоскопараллельного пласта со средней плотностью пород σ , нижняя граница которого совпадает с уровнем относимости, а верхняя – с уровнем пункта наблюдения на высоте H . Этот слой называют *промежуточным*. Предельное значение притяжения плоского слоя V_z и соответствующая ему величина поправки за влияние промежуточного слоя $\delta g_{пр.сл.}$ определяются выражениями (4.2):

$$V_z = 2\pi G \sigma H; \delta g_{пр.сл.} = 0,0419 \sigma H. \quad (4.2)$$

Здесь во второй формуле для получения поправки $\delta g_{пр.сл.}$ в миллигалах σ берется в г/см^3 и H в метрах, а присутствие в выражении величин с единицами из разных метрических систем учтено численным коэффициентом.

Разность поправок за высоту и промежуточный слой дает поправку Буге (4.3):

$$\delta g_B = 0,3086H - 0,0419 \sigma H. \quad (4.3)$$

При плотности σ , равной $2,30 \text{ г/см}^3$, поправка Буге будет определяться выражением (4.4):

$$\delta g_B = 0,2122 H. \quad (4.4)$$

Следует обратить внимание на то, что при решении поисково-разведочных задач с учетом размеров изучаемых площадей нижняя граница промежуточного слоя, совпадающая с уровнем моря, с допустимой погрешностью может быть принята за плоскую, а такая аппроксимация верхней границы не всегда может

быть оправдана, например, в горных областях. Поэтому при вычислении аномалий силы тяжести вводится поправка за влияние рельефа местности, по сути являющаяся дополнением к поправке за промежуточный слой (прил. 10).

4.2. Учет влияния рельефа

К настоящему времени для вычисления поправки за влияние рельефа δg_p , в наземной гравиразведке учитываемой, как правило, со знаком плюс, разработаны различные способы расчета палеток, номограмм и компьютерные технологии. Смысл поправки за рельеф сводится к тому, чтобы представить рельеф местности в виде горизонтальной плоскости, проходящей через точку наблюдения, что, в свою очередь, делает правомерной аппроксимацию масс, находящихся между точкой наблюдения и уровнем моря, моделью в виде плоскопараллельной пластины при введении поправки за промежуточный слой.

В общем случае в цилиндрических координатах влияние рельефа выражается формулой (4.5):

$$\delta g_p = G\sigma \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^h \frac{\rho z}{(\rho^2 + z^2)^{3/2}} d\rho d\alpha dz, \quad (4.5)$$

где G – гравитационная постоянная; σ – плотность пород, слагающих рельеф.

Для условий Пермского края влияние окружающего рельефа местности в точках наблюдения достигает 0,50 мГал, а чаще не превышает 0,20÷0,30 мГал. При этом влияние *центральной зоны* (область карты, ограниченная относительно пункта наблюдения радиусом 0,4÷0,5 см в масштабе карты) составляет 60–70 % и т. к. эта область расположена наиболее близко к прибору, требует особого внимания.

До недавнего времени для определения влияния рельефа *центральной зоны* $\delta g_{ц.з.}$ (входящего составной частью в поправку за влияние рельефа δg_p) на показания гравиметра проводились специальные топографические работы (в зависимости от сложности рельефа в радиусе до 50÷200 м). Затем рельеф по направлениям максимального изменения его высот аппроксимировался двумя наклонными плоскостями (рис. 4.1) и поправка определялась по формуле (4.6):

$$\delta g_{ц.з.} = \frac{1}{4} \pi G \sigma_0 \rho_0 \left[tg^2 \beta_1 \left(1 - \frac{9}{16} tg^2 \beta_1 \right) + tg^2 \beta_2 \left(1 - \frac{9}{16} tg^2 \beta_2 \right) \right], \quad (4.6)$$

где σ_0 – плотность слагающих рельеф пород принимаемая равной $2,3 \text{ г/см}^3$ на территории пермского Прикамья; ρ_0 – радиус центральной зоны.

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{h_1}{\rho_0} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\beta_2 = \frac{h_2}{\rho_0},$$

где h_1 и h_2 – превышения рельефа по первой и второй плоскостям на расстоянии ρ_0 относительно положения гравиметрического пункта (рис. 4.1). Выражая ρ_0 в метрах и поправку в миллигалах, получим $\frac{1}{4}\pi G = 0,52 \cdot 10^{-2}$.

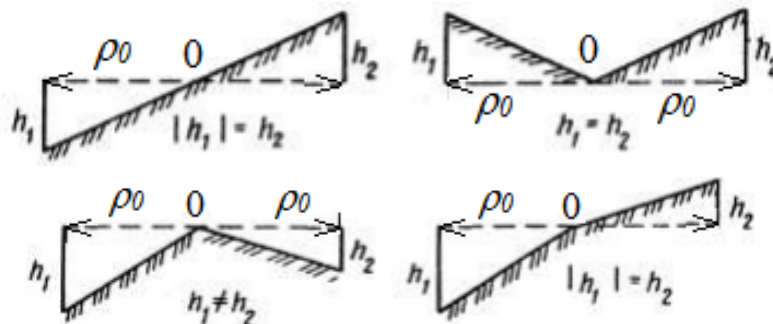


Рис. 4.1. Варианты изменения рельефа в пределах центральной зоны.
0 – положение гравиметрового пункта

Если рельеф представить одной плоскостью, проходящей через точку наблюдения с максимальным углом наклона β к горизонту, то влияние центральной зоны выразится формулой (4.7):

$$\delta g_{ц.з.} = \frac{1}{2}\pi G\sigma_0 \cdot \rho_0 \operatorname{tg}^2 \beta \left(1 - \frac{9}{16}\operatorname{tg}^2 \beta\right) = 1,05 \cdot 10^{-2} \sigma_0 \cdot \rho_0 \operatorname{tg}^2 \beta \left(1 - \frac{9}{16}\operatorname{tg}^2 \beta\right). \quad (4.7)$$

Для применения формул (4.11) и (4.12) на практике измерялись углы наклона рельефа местности в направлении максимального изменения высот.

Ранее эти формулы представлялись через табулированные функции $F(\beta)$ (прил. 11), отсюда поправка за центральную зону выражалась более простой формулой (4.8):

$$\delta g_{ц.з.} = 0,065\rho_0 [F(\beta_1) + F(\beta_2)], \quad \delta g_{ц.з.} = 0,053\rho_0 F(\beta). \quad (4.8)$$

Чтобы получить поправку в миллигалах, коэффициенты в формулах должны быть вычислены при $\sigma = 2,0 \text{ г/см}^3$, ρ_0 – в метрах и гравитационной постоянной $G = 2/3 \cdot 10^{-7}$ ед. СГС.

Для вычисления поправки за влияние рельефа было предложено множество способов, которые в общем случае предполагают моделирование масс, слагающих рельеф, однородными по плотности и простыми по форме моделями [2, 9 и др.]. Для принимаемых модельных представлений путем решения прямой задачи вычисляются поправки, которые затем вводятся в наблюдаемые значения на этапе вычисления аномалий силы тяжести.

К классическим способам ручного учета влияния рельефа, по мнению К. Е. Веселова [2], относятся палеточные способы Немцова – Пришивалко, Лукавченко, Дергачева, а также способ Березкина, где используются превышения рельефа по радиальным профилям в характерных точках (впадины, поднятия) и способ Маловичко, основанный на применении функционального изображения рельефа местности, и др.

Влияние *дальней* зоны для удалений порядка 100–200 км от ГП до сравнительно недавнего времени в большинстве случаев учитывалось по палетке Лукавченко, состоящей из концентрических окружностей и радиальных линий. При наличии разрезов рельефа по радиальным линиям (схема «звездочка») относительно точки наблюдения использовались двухмерные палетки, например Дергачева, и при этом точность вычисления поправок определялась только масштабом представления графического материала.

С теоретическими основами классических способов учета поправок за влияние рельефа, применением на практике палеточных и других способов можно подробно ознакомиться в работах [8, 9 и др.]. При детальном съеме на местности с незначительным изменением высот и сравнительно небольшим шагом наблюдений вдоль профилей влияние рельефа *дальней* зоны можно не учитывать, т. к. оно войдет в фоновую составляющую наблюдаемого поля и будет учтено при разделении поля на региональную и локальную составляющие.

В настоящее время на производстве используется специализированное программное обеспечение для обработки и интерпретации данных гравиразведки, в том числе и для вычисления поправки за рельеф. Например, в лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН разработан и широко применяется в практике гравиразведки способ вычисления поправки, основанный на построении цифровых моделей рельефа (ЦМР) с использованием данных спутниковой навигации и применением кусочно-призматической аппроксимации рельефных форм [2].

Ниже представлено объемное изображение земной поверхности (рис. 4.2, А) и соответствующая этому изображению ЦМР (рис. 4.2, Б).

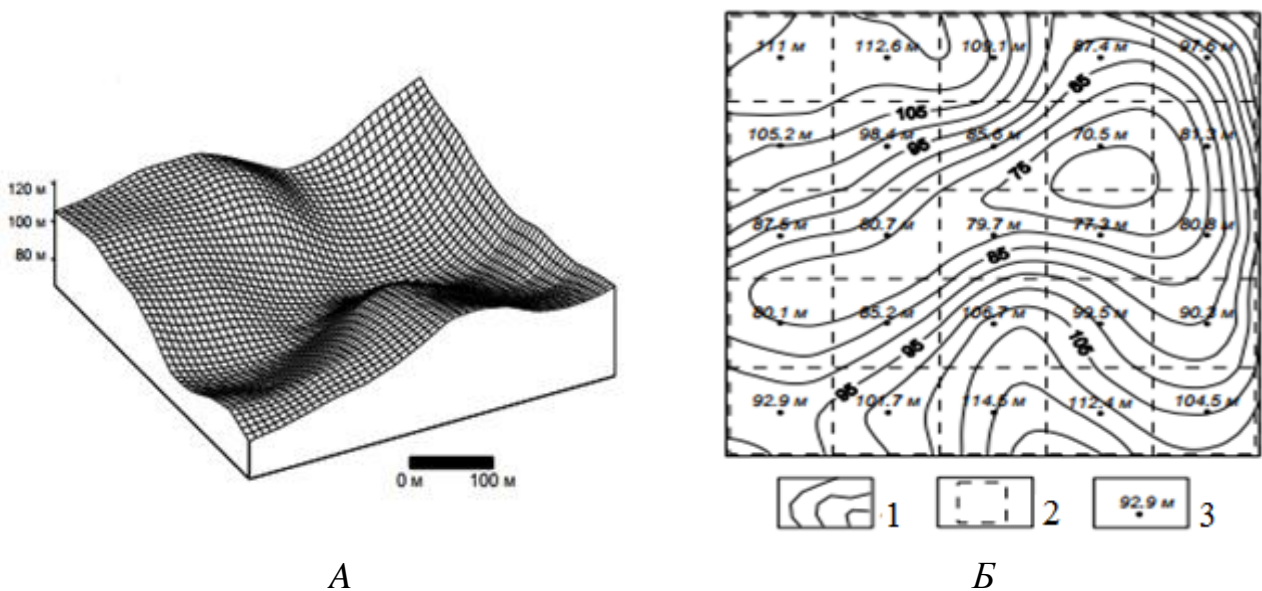


Рис. 4.2. Объемное изображение земной поверхности (А) и соответствующая ему цифровая модель рельефа (Б) (по А. С. Долгалю): 1 – изогипсы рельефа, м; 2 – основания призм, аппроксимирующих рельеф; 3 – отметки высот

4.3. Вычисление аномалий силы тяжести

Аномалия силы тяжести – это разность наблюдаемого значения в точке измерения и нормального значения силы тяжести, вычисленного для высоты этой точки. В соответствии с этим определением, учитывая необходимые редукции, применяемые в гравиметрической практике, *аномалия силы тяжести в свободном воздухе* $\Delta g_{св.в.}$ вычисляется по формуле (4.9):

$$\Delta g_{св.в.} = g_{н\acute{o}л} + 0,3086H - \gamma_0, \quad (4.9)$$

аномалия Фая Δg_{ϕ} – по формуле (4.10):

$$\Delta g_{\phi} = g_{н\acute{o}л} + 0,3086 \cdot H + \delta g_P - \gamma_0 \quad (4.10)$$

и аномалия Буге Δg_B – по формуле(4.11)

$$\Delta g_B = g_{н\acute{o}л} + 0,3086 \cdot H - 0,0419 \cdot \sigma \cdot H + \delta g_P - \gamma_0 \quad (4.11)$$

Эти классические определения аномалий силы тяжести (например, аномалия Буге) верны лишь для общих съемок (масштаба 1:200000, 1:100000). При детальнх съемках аномалиями могут служить наблюдаемые приращения силы тяжести, исправленные за условный уровень приведения (*аномалия в редукции Буге*), которые не нужно приводить к уровню моря.

Как правило, аномалии, вычисляемые по формулам (4.9) и (4.10), применяются для решения геодезических задач, а вычисляемые по формуле (4.11) – для решения геологоразведочных задач. Следует помнить, что вычисляемые по

указанным формулам аномалии относятся к точкам наблюдения. Согласно инструкции вычисление аномалий Буге необходимо производить с тремя значениями плотности промежуточного слоя, равными 2,30 и 2,67 г/см³, а также со значением, наилучшим образом подходящим к исследуемой местности. С целью определения данного значения в практике гравirazведки широко используется метод Нетлетона. Ведомость для расчета аномалий представлена в приложении 10.

4.4. Сглаживание аномалий

При необходимости аномалии силы тяжести трансформируют, используя различные вычислительные процедуры (пересчеты аномалий в производные различных порядков, на высоту, в нижнее полупространство и т. п.) с целью получить больше полезной для интерпретатора информации и ослабить помехи. Так, для ослабления влияния случайных ошибок целесообразно полученные аномалии подвергать сглаживанию. Сглаживание (особенно аналитическое) можно осуществлять, если профиль прямолинейный и выполняются следующие требования: во-первых, профиль должен быть небольшим (менее 0,5t, если t – проектная глубина исследований) и, во-вторых, шаг наблюдений – постоянным. Способы сглаживания аномалий разделяются на графические и аналитические.

1. *Графическое сглаживание.* Наблюденный (ломаный) график заменяется сглаженной кривой вручную. При этом площади, ограниченные ломаной линией по разные стороны от сглаженной кривой, должны быть одинаковы.

2. *Аналитическое сглаживание.* Основывается на приближении аномального графика в целом. Приближение можно производить при помощи гармонического анализа, с использованием алгебраических полиномов Чебышева и т. п.

Наиболее часто в гравirazведке применяется *аналитическое сглаживание с использованием аномалий в ближних точках*. Этот способ позволяет оценить точность полученных аномалий по их наблюдаемым и сглаженным значениям в точках наблюдения. На практике широкое распространение получила пятиточечная формула. Если обозначить аномалии в 5 равноотстоящих пунктах профиля через y_{-2} , y_{-1} , y_0 , y_1 , y_2 , то сглаженное значение y_0^{cgl} в средней точке пятиточечного «окна» будет определяться по формуле (4.12):

$$y_0^{cgl} = y_0 + \frac{12}{35}(y_{-1} + y_1 - 2y_0 - \frac{3}{35}(y_{-2} + y_2 - y_0)). \quad (4.12)$$

Точность наблюдаемых аномалий оценивается по формуле (4.6), при этом процедура сглаживания наблюдаемых аномалий повышает их точность. Считается, что соотношение ошибок определения сглаженных m и наблюдаемых $m_{нбл}$ значений силы тяжести можно выразить соотношением $m = 0,7m_{нбл}$. Подробнее о сглаживании аномалий можно прочитать в учебнике [14] и монографиях [12, 13].

4.5. Оценка точности аномалий силы тяжести

Теория ошибок гравиметрических наблюдений лежит в основе методики съемки, она используется для определения норм и допусков при проведении различных измерительных операций. А. К. Маловичко и В. И. Костицын предлагают различать, во-первых, инструментальные ошибки, обусловленные несовершенством применяемых приборов и методов работ с ними, во-вторых, ошибки, обусловленные влиянием внешних условий, и, в-третьих, ошибки, зависящие от личных качеств оператора [11]. Значения ошибок принято характеризовать их средними квадратическими величинами. Следует разграничивать средние квадратические ошибки гравиметрических наблюдений $m_{нбл}$, аномалий m и съемки m_c .

Ошибка $m_{нбл}$ учитывает влияние всех ошибок, которыми сопровождаются наблюдения с гравиметрами, ошибка m – всех операций, связанных с определением аномалий Буге (в том числе и $m_{нбл}$), а ошибка m_c , включающая в себя $m_{нбл}$ и m , учитывает также несоответствие структуры съемочной сети характеру исследуемого аномального поля, иными словами, характеризует эффективность выбираемого шага наблюдений по гравиметрическим профилям и расстояния между ними.

Для указанных ошибок, а также для элементарных (не зависящих по своему действию друг от друга) ошибок в инструкции [3] приводятся допустимые значения. С ними сопоставляются фактические ошибки, полученные на основании анализа практических результатов гравиметровой съемки, делается вывод о качестве выполняемых работ и соответствии их проектному заданию.

Оценка точности аномалий силы тяжести

После обработки полевых наблюдений вычисляются аномалии силы тяжести, в частности аномалия Буге и ошибка ее определения m . Являясь средней квадратической суммой как минимум трех погрешностей, величина m , вычисляемая по результатам съемки, не должна превышать проектную погрешность аномалий m , указанную в табл. 3.2 в столбце 3. Как видим из таблицы, эта погрешность при разведочных съемках (ч. II) на порядок меньше, чем при общих съемках (ч. I).

Чтобы обеспечить построение кондиционной отчетной карты с сечением изоаномал $\Delta = 0,10$ мГал, погрешность аномалий не должна превышать

$$m = \frac{\Delta}{2,5} = \frac{0,10}{2,5} = 0,04 \text{ мГал},$$

а погрешность наблюдений $m_{\text{нбл}} = 0,03$ мГал.

Необходимость согласования независимых источников погрешностей (определения высот, координат, привязки к опорным пунктам и др.) с погрешностью аномалий m подробно описывается в монографии [12].

Еще более широким понятием, чем погрешность m аномалий, является погрешность съемки m_c . Эту погрешность, характеризующую достаточность съемочной сети для решения поставленных геологических задач, можно оценить различными способами, например:

- по разностям наблюдаемых и сглаженных значений аномалий;
- по разностям наблюдаемых и интерполированных значений аномалий.

В первом способе погрешность определяется по формуле (4.13):

$$m = \pm 1,39 \sqrt{\frac{\sum e^2}{k}}, \quad (4.13)$$

где e – разности на пунктах между наблюдаемыми и сглаженными значениями аномалий, k – количество разностей e .

По второму способу погрешность аномалий будет определяться, например для трех равноотстоящих на профиле точек, по формуле (4.14):

$$m = \pm 0,82 \sqrt{\frac{\sum v^2}{S}}, \quad v = \Delta g_2 - \frac{\Delta g_1 - \Delta g_3}{2}, \quad (4.14)$$

где S – количество разностей v . Заметим, что интерполированным значением здесь будет являться полуразность $0,5(\Delta g_1 - \Delta g_3)$, численно равная среднему арифметическому из предположения линейной интерполяции аномалий от пункта 1 до пункта 3.

4.6. Разделение наблюдаемого поля силы тяжести на региональное и локальное

При гравиметрической съемке получаем суперпозицию, т. е. суммарное гравитационное поле от различных источников (различных по размерам, интенсивности, направлению простирания). Поэтому возникает вопрос о разделении аномалий силы тяжести на региональную и, интересующую интерпретатора, локальную составляющие поля.

Часто региональный фон определяют графическим способом, проводя линию фона по точкам с асимптотическими значениями аномалий силы тяжести. Затем строят график локальных аномалий путем вычитания значений регионального фона из наблюдаемых аномалий Буге.

Эффективнее избавляться от регионального фона путем применения численного дифференцирования аномалий. Обозначим аномалию Буге Δg_B через V_z , $мГал$, тогда от линейного фона можно избавиться, используя вычисление градиента первого порядка V_{zx} , $мгал/м$ и, так называемой *конечной разности* qV_{zx} , $мГал$, например, по двухточечным формулам (4.15):

$$V_{zx}(0) = y_x = \frac{1}{2q} [y_q - y_{-q}] \text{ и } qV_{zx}(0) = y = \frac{1}{2} [y_q - y_{-q}], \quad (4.15)$$

где q – шаг выборки значений $y = V_z$ в точках наблюдения по профилю, 0 – точка на оси абсцисс относящаяся к середине участка от q до $-q$.

От регионального фона второго порядка можно избавиться путем вычисления градиента силы тяжести второго порядка V_{zxx} , $мгал/м^2$ и *конечной разности* qV_{zxx} , $мГал$ по трехточечным формулам (4.16):

$$V_{zxx}(0) = y_{xx} = \frac{1}{q^2} [\overline{y_{\pm q}} - 2y_0] \text{ и } q^2V_{zxx}(0) = y = [\overline{y_{\pm q}} - 2y_0]. \quad (4.16)$$

где $\overline{y_{\pm q}}$, $мГал$ – среднее значение аномалии, вычисляемое как

$$\overline{y_{\pm q}} = \frac{y_{-q} + y_{+q}}{2}.$$

При постоянном шаге наблюдений Δx , $м$ вдоль профиля значение q удобно брать кратным Δx .

4.7. Интерпретация аномалий силы тяжести

Общие сведения

Интерпретация – это процесс толкования и разъяснения смысла чего-либо неясного или сложного для понимания с каких-либо позиций (например, геометрическая, геофизическая, геологическая интерпретация и т. п.). В практике геофизических работ процесс интерпретации полученных результатов разделяется на следующие этапы: качественная, количественная и геологическая интерпретация. Условно принимается, что после обработки полевых данных и вычисления аномалий силы тяжести приступают к *качественной интерпретации*. По результатам качественной интерпретации аномалий $\Delta g_{\text{Буге}}$ на площадях распространения положительных / отрицательных аномалий выявляются участки, сложенные соответственно более-менее плотными горными породами. Для этого строятся отчетные карты изоаномал (линий равных значений аномалий силы тяжести), графики, карты графиков, 3D-модели $\Delta g_{\text{Б}}$ и их производных. Анализируются форма аномалий, их простирание, амплитуды, и устанавливается связь гравитационных аномалий с геологическим строением района. Оцениваются местоположение, примерные размеры и геометрическая форма выявляемых плотностных неоднородностей (аномальных объектов), варианты моделей для их аппроксимации (замены), региональный фон, выбираются положение и размеры интерпретационного (расчетного) профиля.

Расчетный профиль прокладывается через *эпицентр* (проекция центра аномальных масс на плоскость наблюдения) вкост простирания изоаномал изучаемого поля. Вдоль него для получения максимально полной информации об аномальном поле проводятся дополнительные высокоточные наблюдения, которые также обрабатываются и далее используются для уточнения регионального фона и моделей аномальных объектов, решения прямых и обратных задач при количественной интерпретации.

Региональные аномалии $\Delta g_{\text{рег}}$ связаны со строением земной коры (региональные структуры, тектонические зоны и т. п.), на фоне которых проявляются влияния более мелких (локальных) структур (объектов). Снятие регионального фона – это процесс разделения поля аномалий $\Delta g_{\text{Б}}$ на региональную $\Delta g_{\text{рег}}$ и локальную $\Delta g_{\text{лок}}$ составляющие. Данная процедура производится вдоль расчетного профиля. Значение региональной составляющей поля может быть получено *графическим* или *аналитическим* способами, например аналогично процессу построения сглаженной кривой и т. п. Далее путем вычитания значений $\Delta g_{\text{рег}}$ из $\Delta g_{\text{Б}}$ получают локальные аномалии $\Delta g_{\text{лок}}$: $\Delta g_{\text{лок}} = \Delta g_{\text{Б}} - \Delta g_{\text{рег}}$. Собственно локальные аномалии $\Delta g_{\text{лок}}$ и представляют интерес для интерпретатора.

Далее приступают к *количественной интерпретации* аномалий силы тяжести. По конфигурации изоаномал подбираются модели аномалиеобразующих

частей геологического разреза. Геологические объекты можно аппроксимировать простыми однородными по плотности телами, например сферой (шаром), горизонтальным цилиндром, вертикальным или наклонным уступами и др. Такие тела, как изометричные солянокупольные структуры, рудные залежи гнездообразной формы, рифовые структуры и подобные им по форме, удобно заменять сферой (шаром), а вытянутые или крутопадающие дайки, диапиры и т. п. – двухмерными моделями: бесконечными горизонтальными или вертикальными цилиндрами соответственно. Сбросы с крутым падением, плоскости сбрасывателя, вертикальные контакты в толще крутопадающих пород (в кристаллическом фундаменте), различающиеся по плотности контакты глин и известняков, контакты интрузий целесообразно в первом приближении аппроксимировать вертикальным уступом, т. е. телом бесконечного простираения, ограниченного двумя горизонтальными и одной вертикальной плоскостями.

Причем подобрав модель аномального объекта, влияние которых с допустимой погрешностью совпадает с интерпретируемыми аномалиями силы тяжести, мы получаем результаты геофизической интерпретации. Далее их необходимо истолковать с геологических позиций.

Модель в виде однородного шара

Если график локальной составляющей силы тяжести $\Delta g_{\text{лок}}$ имеет вид «максимума» или «минимума», в зависимости от знака избыточной (аномальной) плотности аномалиеобразующей части разреза $\Delta\sigma$, то геологический (аномалиеобразующий) объект, создающий локальную аномалию $\Delta g_{\text{лок}}$ в первом приближении удобно представить моделью в виде однородного шара.

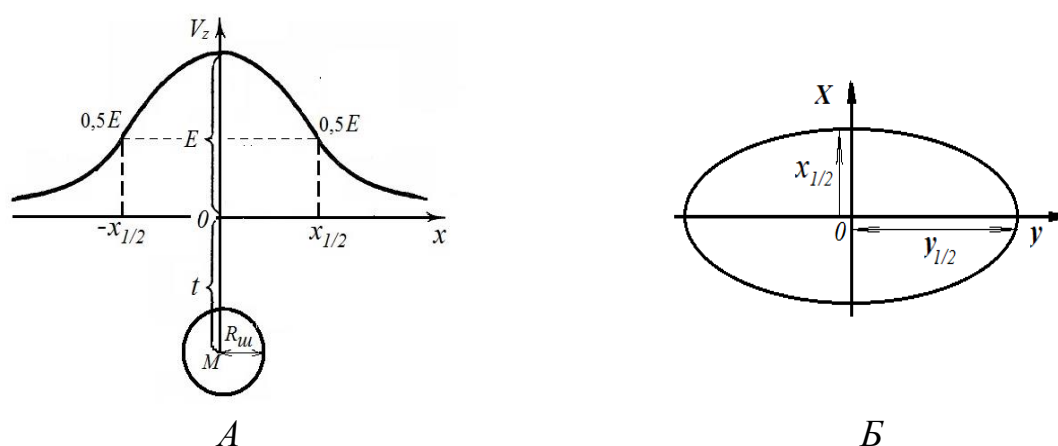


Рис. 4.3. График притяжения V_z однородным шаром (А) и вид замкнутой изоаномалы в виде овала с полуосями $x_{1/2}$ и $y_{1/2}$ (Б)

Общий вид графика притяжения $V_z = f(x)$ представлен на рис. 4.3, А. Для определения глубины залегания $t_{ш}$ центра аномальных масс M и геометрических параметров модели $R_{ш}$ поступаем следующим образом.

В случае наличия на интерпретационном профиле локальной аномалии силы тяжести $\Delta g_{лок}$, подобной графику на рис. 4.3, *A*, находим экстремальное, а в данном случае максимальное, значение аномалии E и совмещаем с абсциссой этой точки начало прямоугольной системы координат. Принимая $\Delta g_{лок} = E = V_z^{max}$, на графике аномалии $\Delta g_{лок}$ определяем точки, в которых $\Delta g_{лок}$ в два раза меньше E . Найденные точки проецируем на ось абсцисс и находим точки $-x_{1/2}$ и $+x_{1/2}$ слева и справа от эпицентра (проекция центра аномальных масс на плоскость наблюдения). Глубины t_u от поверхности наблюдения (с учетом поправки за высоту) до центра аномальных масс и $z_{ш}$ до верхней кромки объекта, количество аномальной массы M и радиус R_u для шара определяем, решая обратную задачу, на основании формул (4.17):

$$t_u = 1,305 \cdot \frac{|-x_{1/2}| + x_{1/2}}{2}; \quad M = E \frac{t_u^2}{G}; \quad R_u = 3,3 \cdot \sqrt[3]{\frac{E \cdot t_u^2}{\Delta\sigma}}; \quad (4.17)$$

где G – гравитационная постоянная, в СГС равная $(2/3) \cdot 10^{-7}, \text{ см}^3 / \text{г} \cdot \text{с}^2$; $\Delta\sigma$ – аномальная плотность, равная разности объемных плотностей $\sigma_{об}$ изучаемого объекта и вмещающих пород $\sigma_{вм.п.}$: $\Delta\sigma = \sigma_{об} - \sigma_{вм.п.}$. Значения плотностей подбираются на основании априори имеющейся информации о плотностных и других физических свойствах пород, слагающих разрез изучаемой площади. Если взять E в миллигалах, t – в метрах и σ в $\text{г}/\text{см}^3$, то в формуле для вычисления радиуса величину R_u получим в метрах.

Для проверки качества выполненного моделирования полезно вдоль интерпретационного профиля вычислить теоретическую кривую $V_z^{Теор.ш} = V(x)$ путем решения прямой задачи для шара с параметрами, полученными при решении обратной задачи, воспользовавшись формулами (4.18), а затем построить разностную кривую $\Delta g_{разн} = \Delta g_{лок} - V_z^{Теор.ш}$.

$$V_z(x) = \frac{Et_u^3}{(x^2 + t_u^2)^{3/2}}; \quad V_z(x) = GM \frac{t_u}{(x^2 + t_u^2)^{3/2}}; \quad E = \frac{GM}{t_u^2} \quad (4.18)$$

Модель в виде бесконечного однородного горизонтального цилиндра

Для однородных и равных по плотности моделей в виде шара и бесконечного горизонтального цилиндра при равных радиусах ($R_u = R_c$) и совмещении в разрезе центра масс шара с осью цилиндра графики $V_z = f(x)$ по своей форме вдоль поперечного профиля, проходящего через эпицентр, будут похожими. В силу большего количества масс, действующих на гравиметр, для модели цилиндра величина E будет отличаться в сторону увеличения, форма графика будет менее локализованной, а площадь, ограничиваемая графиком функции $V_z = f(x)$ и осью абсцисс, для цилиндрической модели также будет больше.

Используя обозначения, принятые для рис. 4.3, А и заменяя индекс (ш) на индекс (ц), для цилиндра глубины залегания его оси t_u , m , z_u верхней кромки и радиус R_u , m поперечного сечения находим по формулам (4.19):

$$t_u = x_{1/2}; R_u = \sqrt{\frac{E \cdot t_u}{2\pi G \Delta \sigma}} \text{ или } R_u = 1,54 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot t_u}{\Delta \sigma}}; z_u = t_u - R_u. \quad (4.19)$$

Для получения R_u в миллигалах в формуле с коэффициентом 1,54 нужно брать E в $mGal$, $x_{1/2}$, в m и σ в g/cm^3 . Количество аномальной массы для данной модели находить нет смысла. Для проверки качества выполненного моделирования вдоль интерпретационного профиля вычисляем теоретическую кривую $V_z^{Teor.ц} = V(x)$ путем решения прямой задачи для цилиндра с параметрами, полученными при решении обратной задачи, воспользовавшись формулами (4.20), а затем строим разностную кривую $\Delta g_{разн} = \Delta g_{лок} - V_z^{Teor.ц}$.

$$V_z(x) = \frac{E \cdot t_u^2}{x^2 + t_u^2}; V_z(x) = 2GM \frac{t_u}{x^2 + t_u^2}; E = 2GM \frac{1}{t_u}. \quad (4.20)$$

В практике гравиразведки нулевой уровень выделяемой аномалии силы тяжести определяют по последней замкнутой изолинии отчетной карты. Если на карте аномалий силы тяжести отношение полуосей $y_{1/2}$ к $x_{1/2}$ (рис. 4.3, Б) овалов замкнутых изоаномал равно от 1 до 3, то для решения обратной задачи лучше воспользоваться моделью шара. В случае отношения от 3 до 5 ошибка определения глубины t по формулам и для шара, и для цилиндра может составить порядка 3 %. В случае отношения равного 5 и более при интерпретации аномальное поле целесообразно считать двухмерным.

Модель в виде бесконечного вертикального уступа

В случае получения вдоль интерпретационного профиля графика $\Delta g_{лок}$, близкого к графику V_z (в виде гравитационной ступени), аномальное тело целесообразно аппроксимировать вертикальным уступом (рис. 4.4).

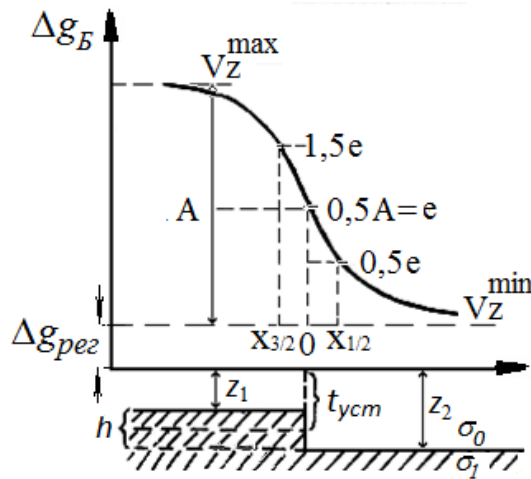


Рис. 4.4. График аномалий силы тяжести над вертикальным уступом и определение его параметров

Для определения положения уступа по формуле (4.21) согласно рисунку находим значение $\Delta g_{лок} = A/2$ при $x = 0$, где помещаем начало прямоугольной системы координат.

$$V_z(0) = e = \frac{V_z^{\max} - V_z^{\min}}{2} = \frac{A}{2}. \quad (4.21)$$

Далее находим на графике точки с аномалией равной $0,5e$ и $1,5e$, отмечаем отвечающие им абсциссы $x_{1/2}$ и $x_{3/2}$ и тогда глубины t_{ycm} залегания середины вертикальной грани вертикального уступа, Z_1 и Z_2 его кровли и подошвы, а также мощность h будут выражаться формулами (4.22):

$$t_{ycm} = \frac{x_{1/2} + x_{3/2}}{2}; \quad Z_1 = t - \frac{h}{2}; \quad Z_2 = t + \frac{h}{2}; \quad h = \frac{e}{\pi G \Delta \sigma}. \quad (4.22)$$

Например, если принять $\Delta \sigma = 0,4 \text{ г/см}^3$, а e брать в миллигалах, то величина h , м будет определяться из выражения $h = 119,4 e$.

При интерпретации графиков горизонтальных градиентов V_{zx} силы тяжести для уступа используются следующие формулы (4.23):

$$t_{ycm} = x_{1/2} \quad \text{и} \quad h = 75 \cdot 10^{-3} \frac{\Gamma \cdot t_{ycm}}{\Delta \sigma}, \quad (4.23)$$

где $\Gamma = V_{zx}^{\text{экстр}}$, мГал/км – экстремальное значение горизонтального градиента силы тяжести.

В случае графика градиента силы тяжести второго порядка V_{zxx} для оценки значений указанных выше величин можно использовать формулы (4.24):

$$t_{уст} = 2x^{экстр} \text{ и } h = 115,5 \frac{\Gamma_x \cdot t_{уст}^2}{\Delta\sigma} \quad (4.24)$$

где $\Gamma_x = V_{zxx}^{экстр}$, мГал/км² – экстремальное значение горизонтального градиента силы тяжести второго порядка при значении $x^{экстр}$; $\Delta\sigma$, г/см³ аномальная плотность; $t_{уст}$, км – глубина середины вертикальной плоскости уступа; h , м – мощность.

Более подробно с использованием при интерпретации формул градиентов силы тяжести различных порядков для моделей в виде простых тел можно ознакомиться в учебном пособии [10]. Там же описана методика построения контактной поверхности по градиентам с использованием формул (4.23) и (4.24).

Самостоятельная работа

1. Обработка рейсов и вычисление наблюдаемых значений силы тяжести по данным, полученным обучающимся при работе оператором.
2. Вычисление средних квадратических погрешностей по сходимости наблюдений внутри рейса и по контрольным измерениям.
3. Определение поправок за относительные изменения высот, промежуточный слой, влияние рельефа центральной зоны.
4. Вычисление и построение графиков наблюдаемых приращений силы тяжести, аномалий в свободном воздухе и аномалий Буге.
5. Разделение наблюдаемого поля на региональное и локальное.
6. Проведение качественной интерпретации.
7. Количественные расчеты по оценке глубины и параметров аномальных масс.
8. Построение схематического геолого-геофизического разреза.

5. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ УНБ «ПРЕДУРАЛЬЕ»

В 1989–1990 гг. на территории УНБ под руководством профессора В. И. Костицына был создан геодинамический полигон для изучения гидрогеологического режима и влияния изменений уровня подземных вод на значения силы тяжести. Полигон включал в себя 55 гравиметрических пунктов, в виде заглубленных в землю бетонных монолитов и 12 гидрогеологических скважин. Схема расположения пунктов полигона и скважин представлена на рис. 5.1. Каждый пункт имеет бетонную площадку для наблюдений размером $0,7 \times 0,7$ м. В силу разных объективных причин гравиметровые пункты полигона со временем частично разрушаются и нуждаются в реконструкции. По результатам регулярных наблюдений за уровнем грунтовых вод в скважинах и значениями силы тяжести на гравиметровых пунктах были построены корреляционные зависимости [5, 13], свидетельствующие о влиянии колебаний уровня грунтовых вод на гравитационное поле (рис. 5.2).

В 2015 г. полигон был частично восстановлен. В результате реконструированы 26 пунктов. В этом же году силами кафедры геофизики на этих ГП произведены гравиметровые измерения приращений силы тяжести с использованием гравиметра Autograv CG-5 (оператор – доцент А. В. Пугин).



- основные строения
1 - скважина и ее номер
 - восстановленные гравиметрические пункты
 - предполагаемое местоположение утерянных гравиметрических пунктов согласно предыдущей схеме

Рис. 5.1.1. Схема расположения гравиметрических пунктов и скважин геодинамического по лигона

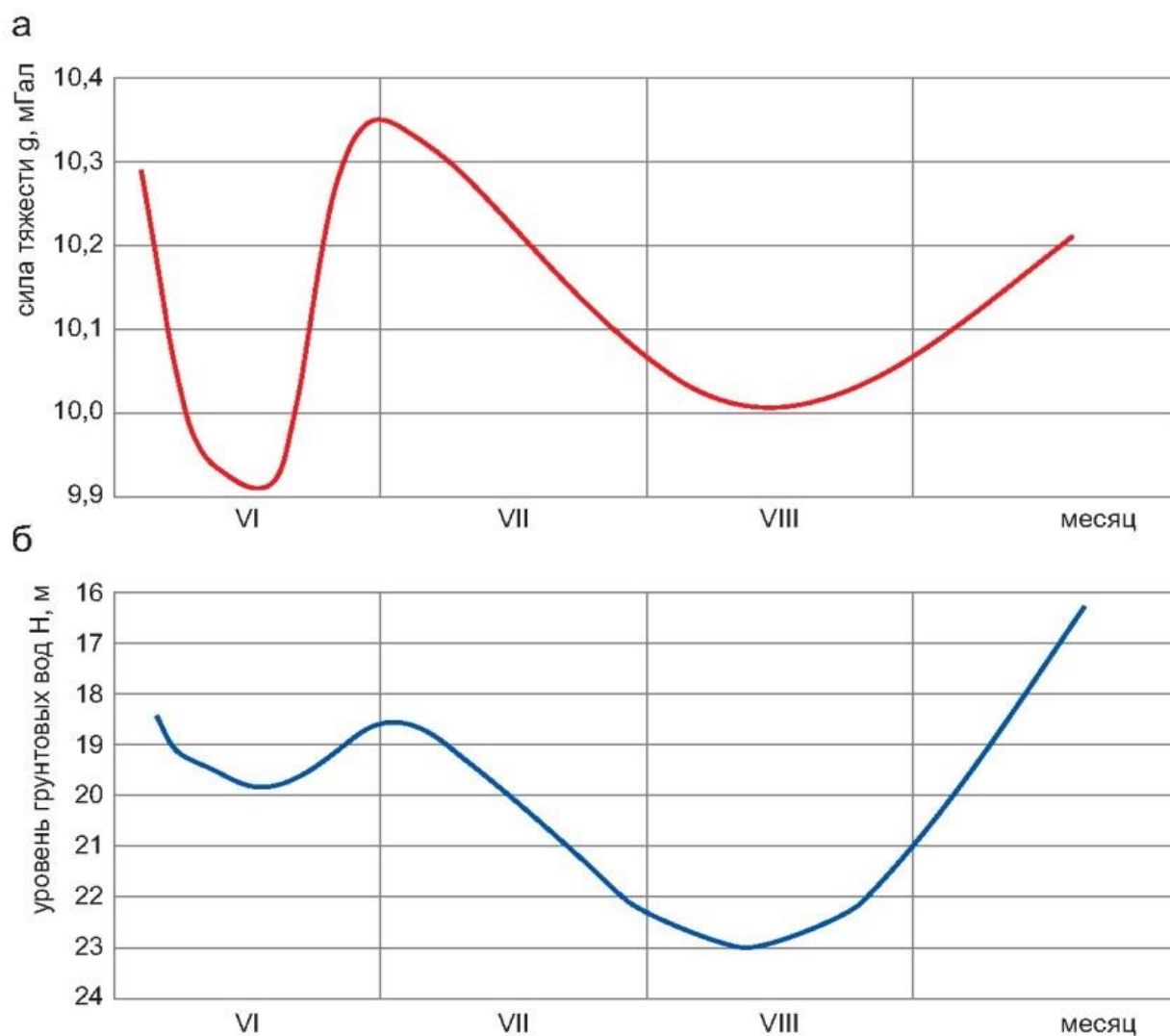


Рис. 5.2. Графики изменений силы тяжести на ГП 21 (а) и уровня грунтовых вод в скважине 11 (б) (по В. И. Костицыну) [13]

В гравиметрах нового поколения, разработанных компанией Scintrex, используется чувствительный емкостный индикатор малых перемещений, что позволило разработчикам упростить кварцевую систему, уменьшить ее в размерах, сделать неастигматической и на порядок повысить точность измерений. Оснащение гравиметра блоком компьютерной обработки дало возможность корректировать показания прибора и существенно ослабить влияние определенных помех при измерениях в режиме реального времени. Основные характеристики гравиметров ГНУ-КВ и Autograv CG-5 приведены в табл. 5.1.

Основные характеристики гравиметров ГНУ КВ и Autograv CG-5

Внешний вид		
Тип системы	Астазированная	Неастазированная
Компьютерный блок	Не имеется	Имеется
Разрешение при считывании показаний	0,006 мГал	0,001 мГал
Дрейф нуля	Менее 0,2 мГал/сутки	Менее 0,02 мГал/сутки
Достижимая на практике среднеквадратическая погрешность единичного измерения	0,03 мГал	0,005 мГал
Диапазон измерений без перестройки	80–120 (500) мГал	8000 мГал

Съемка выполнена в условном уровне значений силы тяжести по методике однократных измерений (МОИ), которая является основной при наземных гравиметрических работах.

В качестве опорного пункта принят ГП 14, условное значение силы тяжести на нем равно 0 мГал. В результате повторных независимых наблюдений проконтролированы значения силы тяжести на 19 из 26 гравиметрических пунктов. Среднеквадратическая погрешность единичного измерения, рассчитанная согласно инструкции по гравirazведке [3], составила $\pm 0,004$ мГал, а среднеквадратическая погрешность съемки – $\pm 0,003$ мГал. Ведомость контрольных наблюдений представлена в табл. 5.2.

В 2016 г. сотрудниками ГИ УрО РАН была проведена топографическая съемка, в результате которой определены высоты и координаты восстановленных гравиметрических пунктов. Измерения выполнялись с использованием современных тахеометров и GPS/ГЛОНАСС-аппаратуры. На основании этих данных получены значения поправок и аномалий силы тяжести в неполной редукции Буге (без учета влияния рельефа местности). Значение плотности промежуточного слоя в расчетах принято равным $2,30$ г/см³. Аналогично наблюдаемым значениям силы тяжести аномальное значение поля в редукции Буге на ГП 14 принято равным нулю (табл. 5.3).

В табл. 5.3 представлены каталог значений силы тяжести, координаты и высоты пунктов, на которых в 2015–2016 гг. проводились гравиметровые наблюдения. Координаты приведены в системе СК42 (референц-эллипсоид Красовского, локальный датум – Пулковое, проекция Гаусса–Крюгера, зона 10), высоты – в балтийской системе.

При высокой точности определения значений силы тяжести на территории УНБ «Предуралье» гравиметрические пункты, оборудованные бетонными постаментами, используются в качестве опорной сети для съемок с разведочными гравиметрами, которые, как правило, проводятся в процессе учебных полевых и научно-исследовательских практик.

Результаты высокоточных гравиметрических исследований, ориентированные на изучение карстующегося массива пород в пределах УНБ «Предуралье», указывают на необходимость восстановления утраченных пунктов и скважин геодинамического полигона, а также существенную детализации сети наблюдений путем закладки новых пунктов с расстоянием между ними не более 10 метров. Также, учитывая наличие высокоточной измерительной аппаратуры, полезно проведение площадной микрогравиметрической съемки с шагом не более 10–20 метров для предварительной оценки плотностного строения территории.

Ведомость контрольных наблюдений силы тяжести на гравиметрических пунктах геодинимического полигона УНБ «Предуралье»

Процент проконтролированных пунктов от общего числа =						76%
Среднеквадратическая погрешность (СКП) единичного измерения (мГал) =						±0.004
Среднеквадратическая погрешность съемки (мГал) =						±0.003
Количество проконтролированных пунктов						19
Полное количество контрольных наблюдений						38
№ пр	№ пк	G набл, мГал	Число контрольных измерений на пункте	G средн, мГал	СКП пункта, мГал	Примечание
0	1	2.363	2	2.359	±0.003	контроль
		2.356				
0	2	2.321	2	2.317	±0.004	контроль
		2.313				
0	3	2.303	2	2.301	±0.003	контроль
		2.298				
0	5	2.127	2	2.122	±0.005	контроль
		2.117				
0	7	0.636	2	0.635	±0.001	контроль
		0.635				
0	10	-0.069	2	-0.073	±0.004	контроль
		-0.077				
0	12	-0.053	2	-0.059	±0.005	контроль
		-0.064				
0	13	-0.089	2	-0.091	±0.001	контроль
		-0.092				
0	15	0.570	2	0.570	0	контроль
		0.570				
0	17	0.351	2	0.350	±0.001	контроль
		0.349				
0	18	0.484	2	0.486	±0.002	контроль
		0.488				
0	19	0.821	2	0.822	±0.001	контроль
		0.823				
0	20	0.772	2	0.778	±0.006	контроль
		0.784				
0	27	1.999	2	1.999	±0.001	контроль
		2.000				
0	31	2.232	2	2.232	±0.001	контроль
		2.233				
0	33	2.356	2	2.356	±0.001	контроль
		2.357				
0	39	2.925	2	2.925	±0.001	контроль
		2.924				
0	40	2.905	2	2.903	±0.002	контроль
		2.901				
0	41	2.894	2	2.897	±0.002	контроль
		2.899				

Таблица 5.3

**Данные гравиметрической и топографической съемки 2015–2016 гг
на территории УНБ «Предуралье»**

№ ГП	Наблюденное значение силы тяжести, мГал	X, метры	Y, метры	H, метры	Нормальное значение силы тяжести, мГал	Поправка за высоту, мГал	Поправка за промежуточный слой (плотность 2.30 г/куб.см), мГал	Аномалия силы тяжести в неполной редукции Буге (без поправки за влияние рельефа), мГал
1.000	2.359	10509279.098	6359497.378	122.316	981686.893	37.747	11.788	-0.346
2.000	2.317	10509327.372	6359486.784	122.387	981686.885	37.769	11.794	-0.365
3.000	2.301	10509376.761	6359476.337	122.537	981686.878	37.815	11.809	-0.342
5.000	2.122	10509474.474	6359452.912	123.578	981686.860	38.136	11.909	-0.282
7.000	0.635	10509572.513	6359466.349	131.304	981686.870	40.520	12.654	-0.139
10.000	-0.073	10509717.682	6359494.054	135.140	981686.890	41.704	13.023	-0.053
12.000	-0.059	10509765.303	6359507.612	135.156	981686.900	41.709	13.025	-0.046
13.000	-0.091	10509814.403	6359519.174	135.544	981686.909	41.829	13.062	-0.004
14.000	0.000	10509864.981	6359527.617	135.163	981686.915	41.711	13.026	0.000
15.000	0.570	10509921.087	6359526.035	132.091	981686.913	40.763	12.730	-0.081
17.000	0.350	10510022.960	6359570.024	133.746	981686.946	41.274	12.889	0.018
18.000	0.486	10510065.474	6359584.930	133.253	981686.957	41.122	12.842	0.038
19.000	0.822	10510107.415	6359597.333	131.277	981686.966	40.512	12.651	-0.054
20.000	0.778	10510147.377	6359624.469	131.620	981686.986	40.618	12.684	-0.045
25.000	1.774	10509893.726	6359468.686	125.337	981686.871	38.679	12.079	-0.268
27.000	1.999	10510096.633	6359536.617	124.593	981686.921	38.449	12.007	-0.250
28.000	1.899	10510170.390	6359580.465	124.918	981686.953	38.550	12.038	-0.314
31.000	2.232	10509904.327	6359418.090	122.236	981686.834	37.722	11.780	-0.430
32.000	2.278	10510021.457	6359456.187	122.509	981686.862	37.806	11.806	-0.355
33.000	2.356	10510118.079	6359491.372	122.268	981686.887	37.732	11.783	-0.353
36.000	2.307	10510413.324	6359795.050	123.182	981687.112	38.014	11.871	-0.433
38.000	2.863	10509990.480	6359397.692	118.640	981686.818	36.612	11.433	-0.547
39.000	2.925	10510041.043	6359410.693	118.368	981686.828	36.528	11.407	-0.553
40.000	2.903	10510091.521	6359427.249	118.429	981686.840	36.547	11.413	-0.574
41.000	2.897	10510136.588	6359445.854	118.507	981686.854	36.571	11.421	-0.577
53.000	-8.480	10509879.435	6359817.397	180.360	981687.129	55.659	17.381	0.898

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На заключительном этапе практики по гравirazведке каждая рабочая бригада обучающихся перед комиссией, состоящей из руководителей, защищает отчет об учебной полевой практике по гравirazведке в рамках текущего контроля знаний. Форма проведения защиты определяется руководителями.

По окончании учебной практики по гравirazведке обучающиеся должны:

- сформировать представление о роли и месте гравirazведки в общем комплексе геологических наук, о влиянии данного метода на окружающую среду;

- знать физико-геологические основы гравirazведки, устройство и принцип действия упругой кварцевой системы разведочного гравиметра;

- уметь использовать гравиметры по назначению, проводить поверки прибора и полевые наблюдения с ним, обрабатывать полевые измерения и вычислять аномалии силы тяжести, оценивать их точность, интерпретировать аномалии и геологически истолковывать полученные данные, делать обоснованные выводы и критически оценивать результаты, составлять и оформлять полевую и отчетную документацию;

- приобрести опыт контроля за соблюдением техники безопасности при проведении гравиметрических работ, переговоров и регулирования возникающих в процессе практики конфликтов интересов, установления рабочих контактов в процессе решения учебных задач.

Индивидуальные результаты текущего контроля для обучающихся являются одной из составляющих промежуточного контроля результатов профильной геофизической практики, отражают успешность выполнения запланированного объема работ и освоения изучаемого материала.

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

После выполнения полевых и камеральных работ каждая рабочая бригада представляет отчет об учебной практике, который составлен по плану, согласованному с руководителями, и имеет следующие элементы: титульный лист, оглавление, введение, геолого-геофизическую характеристику участка проведения практики, разделы содержательной части отчета (за основу можно взять структуру пособия), заключение, список литературы, приложения.

Во введении формулируется цель и определяются задачи учебной практики. Указываются место проведения, объем и содержание работ, состав бригады и авторы разделов отчета.

В геолого-геофизической характеристике приводятся сведения об орографии, геофизической изученности, литологии и стратиграфии, тектоническом строении, полезных ископаемых и физических свойствах горных пород.

В основной части отчета приводятся теоретические положения рассматриваемого метода, описываются устройство и принцип действия разведочных гравиметров, методики измерений, способы обработки полевых наблюдений и выявления аномалий в поле силы тяжести с оценкой их точности, даются приемы качественной, количественной интерпретации и истолкования результатов с геологических позиций. Представляемый материал должен сопровождаться практическими результатами, полученными обучающимися на учебной практике.

Рисунки, графики и таблицы оформляются в соответствии с размерами листа А4 и приводятся в тексте по ходу его изложения. Приложения по объему более 1 страницы и полевые журналы в бумажном виде или переведенные в электронный вид на CD-диске вкладываются в специальный карман в конце отчета.

В заключении указывается, с какой аппаратурой, методами ее проверки, методиками наблюдений, способами выявления неоднородностей геофизических полей, приемами обработки и интерпретации обучающиеся ознакомились и какой приобрели практический опыт на учебной практике. Приводятся выводы по результатам проведенных гравиметрических работ в соответствии с целью и задачами практики, также могут быть внесены предложения по ее усовершенствованию.

В список литературы включаются использованные при прохождении практики и написании отчета источники (учебники, книги, инструкции, статьи и т. п.).

При составлении и оформлении отчета следует учитывать следующее:

- вид титульного листа согласовывается с руководителем;
- помимо специализированных программных средств при оформлении отчета целесообразно использовать стандартные офисные программы Microsoft Office Word и Excel;
- текст представляется на листах формата А4;

- основной текст печатается в редакторе Microsoft Office Word шрифтом Times New Roman, размером 14 п. через 1,0 интервал; ○ в списке литературы указываются использованные при составлении отчета источники, оформленные в соответствии с требованиями, приближенными к действующему ГОСТ;

- расчетно-графические материалы (таблицы, рисунки, графики, диаграммы, карты и т. д.) должны иметь название, содержать условные обозначения, оси графиков должны быть подписаны (обозначения параметра и единицы измерения);

- размеры графиков, рисунков, карт и т. д. целесообразно выбирать исходя из информативности («читаемости») представляемых данных. При этом акцент делается на изменяемые части графиков.

Отчет о практике проверяется руководителем, далее обучающиеся исправляют полученные замечания, и, оформленный в соответствии с предъявляемыми требованиями, он представляется комиссии, которая оценивает отчет в целом и принимает индивидуальный зачет (текущий контроль) у всех участников рабочей бригады.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вахромеев Г. С., Ерофеев Л. Я., Канайкин В. С., Номоконова Г. Г.* Петрофизика: учебник для вузов. Томск: Изд-во ТГУ, 1997.
2. *Веселов К. Е.* Кварцевые астазированные гравиметры: Теория приборов, их устройство и работа с ними. М.: Гостоптехиздат, 1961. 176 с.
3. Гравиметры наземные, общие технические условия. ГОСТ 13017-83 / СТ СЭВ 5576-86 Мин-во геол. СССР, исполнители М. С. Евдокимов, Б. М. Землемеров, Л. С. Воробьев. М.: Изд-во стандартов, 1987. 59 с.
4. *Гулин Ю. А., Головацкая И. В.* Временное методическое руководство по проведению гамма-гамма-каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой РГП-2 и интерпретация результатов измерений / ВНИИГИС. Калинин: Бюро КМП ВЦ Облстатуправления, 1978. 101 с.
5. *Долгаль А. С., Костицын В. И.* Гравиразведка: способы учета влияния рельефа местности: учеб. пособие / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. 88 с.
6. Инструкция по гравиразведке. М.: Недра, 1980. 80 с.
7. *Костицын В. И.* Методы и задачи детальной гравиразведки. Иркутск: Издво Иркут. ун-та. 1989. 128 с.
8. *Костицын В. И.* Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки. Пермь: Изд-во ПГУ, ПСИ, ПССГК, 2002. 224 с.
9. *Костицын В. И., Горбушина О. Л., Горожанцев А. В.* Гравиразведка: метод. руководство по учебной полевой практике и лабораторным работам / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2000. 44 с.
10. *Кузьмин В. И.* Практикум по гравиметрии: метод. пособие к выполнению лабораторных работ для студентов геодезических специальностей всех форм обучения. Новосибирск: СГГА, 2010. 170 с.
11. *Маловичко А. К., Костицын В. И.* Гравиразведка: учебник для вузов. М.: Недра, 1992. 357 с.
12. *Маловичко А. К., Костицын В. И., Тарунина О. Л.* Детальная гравиразведка на нефть и газ. 2-е изд. М.: Недра, 1989. 224 с.
13. *Маловичко А. К., Тарунина О. Л.* Использование высших производных при обработке и интерпретации результатов геофизических наблюдений. М.: Недра, 1981. 186 с.
14. *Огородова Л. В., Шимбирев Б. П., Юзефович А. П.* Гравиметрия: учебник для вузов. М.: Недра, 1978. 325 с.
15. Подготовка гравиметров к работе. URL: <http://helpiks.org/3-99528.html> (дата обращения: 05.01.2018).

16. *Потапова А. С., Андреева Н. В.* Устройство гравиметра. Принцип действия // Материалы VII Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум». URL: <http://www.scienceforum.ru/2015/881/13429> (дата обращения: 10.03.2018).

17. *Пугин А. В., Горожанцев А. В., Огородова И. В., Костицын В. И.* Гравиметрические работы на территории учебно-научной базы «Предуралье» // Геология Предуралья (геология, геохимия и геофизика УНБ «Предуралье»): монография / авт. колл.: Г. Ю. Пономарева, Т. В. Филимонова, О. Л. Коссовая и др.; отв. ред. Г. Ю. Пономарева, И. Ю. Герасимова, И. С. Хопта; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. С. 122–133.

18. *Хмелевской В. К.* Основы геофизических методов: учебник для вузов / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2010. 400 с.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ РАБОТ

Общие положения

1. Перед началом учебной (производственной) практики все студенты проходят инструктаж об условиях работы, технике безопасности, трудовой дисциплине в соответствии с правилами, установленными в учебном заведении. Допуск к практике производится только после инструктажа, проверки знаний правил безопасного ведения работ, что должно быть подтверждено документально (допуск по медицинским показаниям, наличие командировочных документов, подпись в журналах необходимых инструктажей).

2. При переезде к месту практики по железной дороге запрещается находиться у открытых дверей вагонов, на подножках, садиться и выходить из вагона на ходу поезда.

3. При передвижении на грузовых автомобилях категорически запрещается стоять в кузове, висеть на подножках. Среди пассажиров на время переезда назначается старший, его фамилия записывается в путевой лист.

4. При переправах через реку на лодке суммарный вес людей и грузов не должен превышать ее допустимой грузоподъемности. При посадке, высадке и во время движения необходимо соблюдать строгую очередность, дисциплину и порядок. Нельзя во время движения переходить с одного места лодки на другое, делать резкие движения, вставать во весь рост, сидеть на бортах, так как это может привести к затоплению лодки или падению в воду.

5. Обучающиеся обязаны строго соблюдать правила личной и общей гигиены и санитарии, поддерживать чистоту и порядок в местах проживания, проведения учебных занятий и т. д.

6. Самовольная отлучка обучающихся из лагеря или с места работ без разрешения руководителя практики запрещается.

7. Перед выездом на практику (не менее чем за месяц) все студенты должны сделать профилактические прививки против клещевого энцефалита.

8. Для предотвращения укуса клеща необходимо через каждые 2-3 часа проводить тщательный само- и взаимоосмотр. Присосавшихся клещей надо снимать осторожно, стараясь не оторвать хоботок, для чего место присасывания клеща смазывают маслом или керосином, а после удаления насекомого – спиртом или йодом. По окончании осмотра руки тщательно моют с мылом. Собранных клещей помещают в банку и сжигают или доставляют в специальные лаборатории на предмет определения заражения.

9. Перед входом в помещение следует осматривать одежду, а также принесенные цветы, свежие веники, дрова, хворост.

10. Не разрешается использовать для питья воду из заброшенных колодцев, болот и мелких поверхностных водоемов.

11. Запрещается сбор и употребление в пищу неизвестных грибов и ягод, так как они могут оказаться ядовитыми и послужить причиной пищевых отравлений.

12. Запрещается во время грозы укрываться под высокими одиноко стоящими деревьями.

13. В случае проведения работ на территориях, имеющих статус заказников, заповедников, обучающиеся обязаны ознакомиться с соответствующими правилами поведения, действующими на этих территориях, и неукоснительно выполнять их.

Техника безопасности при работе с разведочным гравиметром

1. Характеристика прибора

Гравиметрическая съемка осуществляется с использованием гравиметра ГНУ-КС (или Autograf CG-5), состоящего из термостата и помещенной в него кварцевой упругой системы для снятия отсчетов при определении величины силы тяжести. В корпусе гравиметра установлена шкала, подсвечиваемая изнутри лампой накаливания. Номинальное питающее напряжение лампы подсветки – 3,5 В. Питание осуществляется от батареи типа «Планета». Вес гравиметра – 3 кг, в нерабочем состоянии гравиметр хранится в специальном футляре.

2. Требования безопасности перед работой

Перед началом работ следует:

- осторожно вынуть гравиметр из футляра и осмотреть на предмет наличия внешних повреждений;
- подключить батарею и проверить работу лампы подсветки шкалы;
- проверить работоспособность чувствительной системы прибора;
- выставить необходимый диапазон измерений.

3. Требования безопасности во время работы с гравиметрами

- при переходе с одной точки наблюдения на другую переносить гравиметр за ручку в вертикальном положении; о питание подсветки следует отключать, чтобы не допустить преждевременного разряда элемента питания;
- оберегать прибор от ударов и сильных сотрясений, чтобы не повредить хрупкую кварцевую систему;

- при наблюдениях в солнечную погоду следует использовать солнцезащитные очки;
- при производстве отсчетов не закрывать второй глаз, чтобы не допустить переутомления первого глаза вследствие неравномерной нагрузки;
- в процессе работы оператора с целью уменьшения влияния сейсмических помех и сохранности гравиметра в непосредственной близости от прибора, кроме помощника оператора, не должно находиться посторонних лиц, животных, работающих механизмов.
- запрещается разбирать в полевых условиях хрупкую кварцевую систему гравиметра.

4. Требования безопасности после окончания работ

После окончания наблюдений следует:

- вытереть гравиметр сухой ветошью;
- отключить и вынуть элементы питания из держателей;
- поместить гравиметр и элементы питания в футляр для транспортировки;
- поместить футляр с гравиметром в установленное место.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

ЖУРНАЛ полевых гравиметрических наблюдений

Дата: _____ Гравиметр: _____
 Место практики: _____ С = _____ мГал/об
 Профиль: _____ Вычислитель: _____
 Оператор: _____

ГП	Время, ч, м	Темпера- тура, °С	Отсчеты, об.			Средний отсчет n _i , об.	Примечание
			n _i	n'' _i	n''' _i		

Приложение 2

СВОДНАЯ ВЕДОМОСТЬ определения цены деления гравиметра

Дата: _____ Гравиметры: _____
 Место практики: _____ Вычислитель: _____

Грави- метр: марка, №	Оператор	Дата	C _i ,	C _{ср} ,	δ = C _i -	σ ² (мГал/об) ²	Примеча- ние
			мГал/об	мГал/об	C _{ср} , мГал/об		

$$m_C = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{r}}, \text{ где } r - \text{ количество } \delta^2, \text{ принятых в обработку.}$$

Приложение 3

СВОДНАЯ ВЕДОМОСТЬ
определения чувствительности гравиметра

Дата: _____ Гравиметры: _____
Место практики: _____ Вычислитель: _____

Грави- метр: марка, №	Оператор	Дата	q_i , дел/мГал	$q_{ср}$, дел/мГал	$\delta = q_i - q_{ср}$, дел/мГал	δ^2 , дел/мГал ²	Примечание

$m_c = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{r}}$, где r – количество δ^2 , принятых в обработку

Приложение 4

ПРОВЕРКА ЮСТИРОВКИ УРОВНЕЙ
на минимум чувствительности к наклону

Дата: _____ Гравиметр: _____
Место практики: _____ $C =$ _____ мГал/об
Профиль: _____ Вычислитель: _____
Оператор: _____

Продольный уровень		Примечание	Поперечный уровень		Примечание
Деление уровня	Отсчет, п об.		Деление уровня	Отсчет, п об.	
0			0		
-0,5			-0,5		
-1,0			-1,0		
0			0		
0,5			0,5		
1,0			1,0		

Приложение 5

ВЕДОМОСТЬ
обработки рейса по однократной методике

Дата: _____ Гравиметр: _____
 Место практики: _____ С = _____ мГал/об
 Профиль: _____ Вычислитель: _____ Оператор: _____

ГП	Время, t, ч	Средний отсчет n_i , об.	Приращение, Δn , об.	Δn С, мГал	Поправка за n-n, мГал	Исправленное приращение с. т., мГал	Абсолютное значение с. т., мГал

Приложение 6

СВОДНАЯ ВЕДОМОСТЬ
определения приращений силы тяжести

Дата: _____ Гравиметры: _____
 Место практики: _____ Вычислитель: _____

Звено ГП $i - i+1$	Тип рейса	Дата	Оператор	Гравиметр	Δg_i , мГал	Δg_{cp} , мГал	$\delta = \Delta g_i - \Delta g_{cp}$, мГал	δ^2 , мГал ²
0-1 1-2								

$m_{\Delta g} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{r}}$, где r – количество δ^2 , принятых в обработку.

Приложение 7

ВЕДОМОСТЬ
обработки рейса по методике повторных наблюдений (МПИ)

Дата _____ Гравиметр _____
 Место практики _____ С= _____ мГал/об
 Профиль _____ Вычислитель _____
 Оператор _____

ГП	Время <i>t, ч</i>	Средний отсчет <i>n, об</i>	$\Delta n = n_2 - n_1, об$	$\Delta n \quad C = \Delta g, мГал$	Поправка за нуль- пункт, $\delta_{0-n}, мГал$	$\Delta g + \delta_{0-n}, мГал$	$\Delta g_{ср}, мГал$	$\delta, мГал$	$\delta^2, мГал^2$	При- меч.

Приложение 8

ВЕДОМОСТЬ
обработки рейса по методике измерения отдельных приращений (МИОП)

Дата _____ Гравиметр _____
 Место практики _____ С= _____ мГал/об
 Профиль _____ Вычислитель _____
 Оператор _____

Звенья хода	Средние отсчеты				$\Delta N, об$	Приращ. с. т. в звене ΔN С, мГал	При- ращ. с. т. от ОГП $\Delta g,$ мГал	ε	ε^2
	n_0	n_1	n_2	n_3					
ОГП-0 0-1 1-2									

$$\varepsilon = 0,5(n_3 - n_2 - n_1 + n_0); m_\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{r}}; m_{\Delta N} = \pm 1,12m_\varepsilon,$$

где r – количество ε^2 , принятых в обработку.

Приложение 9

ВЕДОМОСТЬ

определения величины и скорости смещения нуля-пункта в МИОП

Дата _____ Гравиметр _____
 Место практики _____ С= _____ мГал/об
 Профиль _____ Вычислитель _____
 Оператор _____

ГП	Время t , ч	Средний от- счет n_i	Смещения нуля-пункта		Скорость смещения K , мГал/ч
			Δn_1	Δn_2	
ОП-1 1-2					

Приложение 10

ВЕДОМОСТЬ

вычисления аномалий силы тяжести в свободном воздухе и Буге

Дата _____ Место практики _____
 Профиль _____ Вычислитель _____
 _____ Плотность промежуточного слоя _____

ГП	$\Delta g_{нбл}$, мГал	ΔH , м	γ , мГал	Поправка за св. воздух $\delta g_{св.в.}$ мГал	Аномалия в св. воздухе $\Delta g_{св.в.}$ мГал	Поправка Буге, δg_B , мГал	Поправ- ка за ре- льеф, $\delta g_{ч.з.}$ мГал	Аномалия Буге, Δg_B , мГал

Таблица значений функции Лапласа

X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$	X	$\Phi^*(X)$
0,00	0,0000	0,32	0,1255	0,64	0,2389	0,96	0,3315	1,26	0,3962	1,59	0,4441	1,92	0,4726	2,50	0,4938
0,01	0,0040	0,33	0,1293	0,65	0,2422	0,97	0,3340	1,27	0,3980	1,60	0,4452	1,93	0,4732	2,52	0,4941
0,02	0,0080	0,34	0,1331	0,66	0,2454	0,98	0,3365	1,28	0,3997	1,61	0,4463	1,94	0,4738	2,54	0,4945
0,03	0,0120	0,35	0,1368	0,67	0,2486	0,99	0,3389	1,29	0,4015	1,62	0,4474	1,95	0,4744	2,56	0,4948
0,04	0,0160	0,36	0,1406	0,68	0,2517	1,00	0,3413	1,30	0,4032	1,63	0,4484	1,96	0,4750	2,58	0,4951
0,05	0,0199	0,37	0,1443	0,69	0,2549	1,01	0,3438	1,31	0,4049	1,64	0,4495	1,97	0,4756	2,60	0,4953
0,06	0,0239	0,38	0,1480	0,70	0,2580	1,02	0,3461	1,32	0,4066	1,65	0,4505	1,98	0,4761	2,62	0,4956
0,07	0,0279	0,39	0,1517	0,71	0,2611	1,03	0,3485	1,33	0,4082	1,66	0,4515	1,99	0,4767	2,64	0,4959
0,08	0,0319	0,40	0,1554	0,72	0,2642	1,04	0,3508	1,34	0,4099	1,67	0,4525	2,00	0,4772	2,66	0,4961
0,09	0,0359	0,41	0,1591	0,73	0,2673	1,05	0,3531	1,35	0,4115	1,68	0,4535	2,02	0,4783	2,68	0,4963
0,10	0,0398	0,42	0,1628	0,74	0,2703	1,06	0,3554	1,36	0,4131	1,69	0,4545	2,04	0,4793	2,70	0,4965
0,11	0,0438	0,43	0,1664	0,75	0,2734	1,07	0,3577	1,37	0,4147	1,70	0,4554	2,06	0,4803	2,72	0,4967
0,12	0,0478	0,44	0,1700	0,76	0,2764	1,08	0,3599	1,38	0,4162	1,71	0,4564	2,08	0,4812	2,74	0,4969
0,13	0,0517	0,45	0,1736	0,77	0,2794	1,09	0,3621	1,39	0,4177	1,72	0,4573	2,10	0,4821	2,76	0,4971
0,14	0,0557	0,46	0,1772	0,78	0,2823	1,10	0,3643	1,40	0,4192	1,73	0,4582	2,12	0,4830	2,78	0,4973
0,15	0,0596	0,47	0,1808	0,79	0,2852	1,11	0,3665	1,41	0,4207	1,74	0,4591	2,14	0,4838	2,80	0,4974
0,16	0,0636	0,48	0,1844	0,80	0,2881	1,12	0,3686	1,42	0,4222	1,75	0,4599	2,16	0,4846	2,82	0,4976
0,17	0,0675	0,49	0,1879	0,81	0,2910	1,13	0,3708	1,43	0,4236	1,76	0,4608	2,18	0,4854	2,84	0,4977
0,18	0,0714	0,50	0,1915	0,82	0,2939	1,14	0,3729	1,44	0,4251	1,77	0,4616	2,20	0,4861	2,86	0,4979
0,19	0,0753	0,51	0,1950	0,83	0,2967	1,15	0,3749	1,45	0,4265	1,78	0,4625	2,22	0,4868	2,88	0,4980
0,20	0,0793	0,52	0,1985	0,84	0,2995	1,16	0,3770	1,46	0,4279	1,79	0,4633	2,24	0,4875	2,90	0,4981
0,21	0,0832	0,53	0,2019	0,85	0,3023	1,17	0,3790	1,47	0,4292	1,80	0,4641	2,26	0,4881	2,92	0,4982
0,22	0,0871	0,54	0,2054	0,86	0,3051	1,18	0,3810	1,48	0,4306	1,81	0,4649	2,28	0,4887	2,94	0,4984
0,23	0,0910	0,55	0,2088	0,87	0,3078	1,19	0,3830	1,49	0,4319	1,82	0,4656	2,30	0,4893	2,96	0,4985
0,24	0,0948	0,56	0,2123	0,88	0,3106	1,20	0,3849	1,50	0,4332	1,83	0,4664	2,32	0,4898	2,98	0,4986
0,25	0,0987	0,57	0,2157	0,89	0,3133	1,21	0,3869	1,51	0,4345	1,84	0,4671	2,34	0,4904	3,00	0,49865
0,26	0,1026	0,58	0,2190	0,90	0,3159	1,22	0,3883	1,52	0,4357	1,85	0,4678	2,36	0,4909	3,20	0,49931
0,27	0,1064	0,59	0,2224	0,91	0,3186	1,23	0,3907	1,53	0,4370	1,86	0,4686	2,38	0,4913	3,40	0,49966
0,28	0,1103	0,60	0,2257	0,92	0,3212	1,24	0,3925	1,54	0,4382	1,87	0,4693	2,40	0,4918	3,60	0,49984
0,29	0,1141	0,61	0,2291	0,93	0,3238	1,25	0,3944	1,55	0,4394	1,88	0,4699	2,42	0,4922	3,80	0,49992
0,30	0,1179	0,62	0,2324	0,94	0,3264			1,56	0,4406	1,89	0,4706	2,44	0,4927	4,00	0,49996
0,31	0,1217	0,63	0,2357	0,95	0,3289			1,57	0,4418	1,90	0,4713	2,46	0,4931	4,50	0,49999
								1,58	0,4429	1,91	0,4719	2,48	0,4934	5,00	0,49999

Учебное издание

Горожанцев Андрей Владимирович
Огородова Ирина Владимировна
Пугин Алексей Витальевич

**ПРОФИЛЬНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА
(ГРАВИРАЗВЕДКА)**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Н. И. Стрекаловская*
Корректор *А. В. Цветкова*
Компьютерная верстка: *И. В. Огородова*

Объем данных 2,78 Мб
Подписано к использованию 26.12.2022

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