

## 4. МЕТОДИКА ГРАВИМЕТРОВЫХ РАБОТ

Процесс получения гравиметрических данных требует выполнения определенного объема работ, который включает их проектирование и организацию, выполнение инструментальных измерений на местности, обработку результатов измерения, оценку их качества и написание технического отчета.

В данной работе акцент сделан на методике выполнения полевых работ и обработке результатов измерений.

### 4.1. Методы измерения силы тяжести

Способы измерения силы тяжести основаны на физических процессах, связанных с проявлением закона всемирного тяготения: это падение тел, колебание маятника, прецессия тяжелого гироскопа, колебание струны, натянутой грузом, искривление поверхности вращающейся жидкости (тот же гироскоп), деформация тел под действием постоянной массы, парение проводника с током в поле постоянного магнита, подъем жидкости в капилляре и др. Однако, при современном уровне развития измерительной техники приемлемую точность определения силы тяжести можно получить из наблюдения лишь небольшого числа явлений.

Все существующие методы измерения силы тяжести подразделяются на динамические и статические (рис. 4.1).

Динамическими называются методы, в которых наблюдается движение тела под действием силы тяжести ( $g$ ), а измеряемой величиной является время ( $t$ ), необходимое телу для перехода из одного фиксированного положения ( $H_0$ ) в другое ( $H_i$ ). К динамическим методам относятся следующие.

1. Баллистический, в котором используется закон прямолинейного равноускоренного движения свободно падающего тела:

$$H = H_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}. \quad (4.1)$$

2. Маятниковый, который основан на зависимости периода свободных колебаний маятника ( $T$ ) от величины силы тяжести:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (4.2)$$

где  $l$  – длина маятника.

3. Электромеханический, который основан на зависимости частоты колебаний струны, натянутой грузом, под действием силы тяжести:

$$f = \frac{l}{2} \sqrt{\frac{m \cdot g}{\rho}}, \quad (4.3)$$

где  $f$  – частота колебаний струны, Гц;

$l$  – длина струны, см;

$m$  – масса груза, г;

$\rho$  – линейная плотность струны, г/см.

Статическими методами называются такие, в которых наблюдается изменение положения равновесия тела под действием силы тяжести и некоторой силы, уравновешивающей ее. А непосредственно измеряемой величиной является угловое или линейное смещение тела с постоянной массой:

$$Mg + F = 0, \quad (4.4)$$

где  $Mg$  – момент массы;

$F$  – уравновешивающая сила.

В качестве силы  $F$  используется упругая сила деформации нитей и пружин, а также сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.

Кроме того, методы подразделяются на абсолютные и относительные. При абсолютных определениях измеряют полное значение величины силы тяжести ( $g$ ) в данной точке.

Поскольку размерность  $g$  определяется в единицах [длина · время<sup>-2</sup>], то требуется измерение этих величин. При этом погрешность измерения ускорения силы тяжести не должна превышать  $m_g = \pm 1 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup>. Для достижения такой точности путь и время необходимо измерять с погрешностью порядка  $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ .

При относительных определениях измеряют приращение силы тяжести ( $\Delta g$ ) относительно пункта с известным значением  $g_{\text{исх}}$ :

$$g_{\text{опр.}} = g_{\text{исх.}} + \Delta g.$$

Статический метод определения силы тяжести реализован в приборах, которые называются статическими гравиметрами.

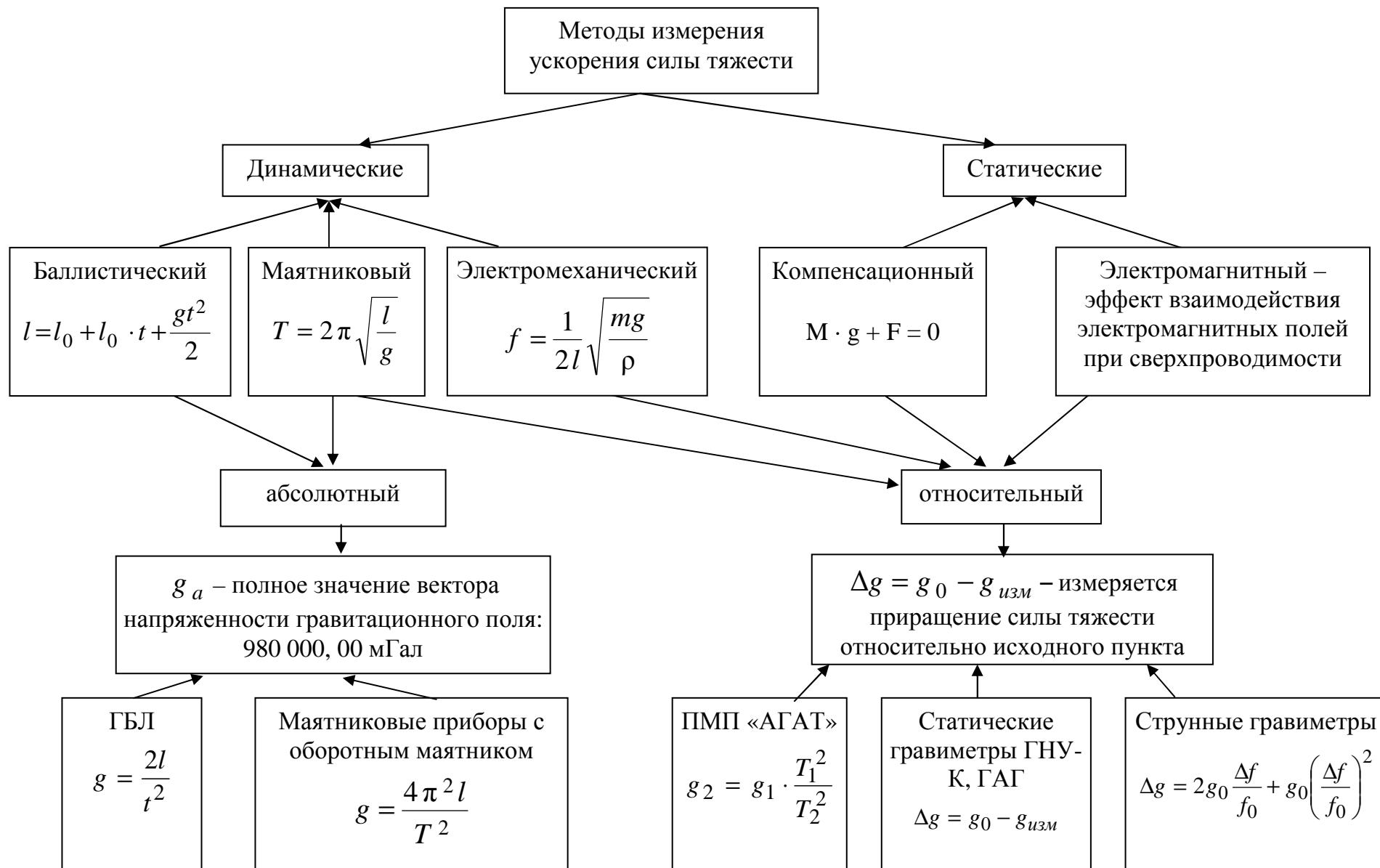


Рис. 4.1. Классификация способов определения силы тяжести

## 4.2. Виды гравиметрических съемок

Совокупность геодезических и гравиметрических измерений на местности с целью построения гравиметрической карты, называется *гравиметрической съемкой*.

В зависимости от точности, гравиметрические съемки подразделяются на следующие.

1. *Региональные* – в масштабах от 1 : 1 000 000 до 1 : 500 000. Их целью является тектоническое районирование значительных по площади геологических структур, прогноз областей, перспективных на обнаружение месторождений полезных ископаемых. Результаты мелкомасштабных съемок являются основой для изучения фигуры и внутреннего строения Земли, а также, – районаирования земной коры по типам и определения ее толщины.

2. *Среднемасштабные, или поисково-разведочные съемки*. Они проводятся в масштабах от 1 : 200 000 до 1 : 50 000 для поиска месторождений полезных ископаемых на перспективных площадях, а также для уточнения геологического строения территорий исследований.

3. *Детальные съемки в масштабах от 1 : 25 000 и крупнее* применяются для оконтуривания месторождений, определения их параметров – для последующего подсчета запасов полезного ископаемого.

В зависимости от физико-географических условий и применяемых средств транспортировки гравиметрической аппаратуры различают съемки: наземную, подземную, скважинную, морскую (донную, подводную, надводную), аэрогравиметрическую и спутниковую.

По структуре сети съемки подразделяются на следующие.

1. *Площадные*, когда расстояние между точками на профиле ( $\Delta x$ ) и между профилями ( $\Delta y$ ) находится в соответствии  $\Delta y \leq 5\Delta x$ . Если  $\Delta y = \Delta x$ , съемка называется равномерной. По результатам этой съемки можно построить карты аномалий силы тяжести.

2. *Профильные*, когда  $\Delta y > 5\Delta x$ . Эти съемки позволяют получить изменения аномалий силы тяжести вдоль линий. Съемки применяются для изучения глубинного строения земной коры (зон контактов крупных тектонических блоков и разломов) и для определения методики гравиметрической съемки в неизученных районах.

3. *Маршрутные*, выполняемые в труднодоступных районах по долинам рек или дорогам.

4. *Рекогносцировочные*, для определения характера изменения силы тяжести на участке работ.

Точка на местности, в которой выполнены измерения элементов гравитационного поля Земли называется *гравиметрическим пунктом*. На участке съемки гравиметрические пункты подразделяются на *исходные*, в которых известно абсолютное значение ускорения силы тяжести (обычно – это пункты Государственной гравиметрической сети), а также *опорные* в гравиметрических съемках.

#### 4.3. Геодезическое обеспечение гравиметрических съемок

Геодезические данные необходимы при обработке результатов измерений с гравиметрами и построения геодезической основы для гравиметрической карты.

Геодезические работы включают в себя три основных вида работ.

1. Вынос в натуру запроектированного участка съемки.
2. Определение (разбивка) положения съемочных профилей и точек (пунктов) на них.

При этом необходимо строго соблюдать условия: профили должны быть прямолинейными, а расстояния между съемочными точками – равными. Выполнение этих условий снижает объем вычислительных работ при определении координат съемочных точек. Закрепленные точки профиля и концы профилей должны хорошо опознаваться, а их нумерация – читаться.

3. Определение координат и высот съемочных точек. Требования к точности определения планово-высотного положения пунктов зависят от точности вычисляемых аномалий силы тяжести или, другими словами, от масштаба отчетной карты (см. прил. 13).

Расчет точности определения координат и высот съемочных точек рассмотрим на примере вычисления аномалий силы тяжести в редукции Буге. Продифференцировав выражение (1.23) по переменным  $B$  и  $H$  перейдем к средним квадратическим погрешностям. Получим:

$$m_{\Delta g} = \left( \frac{\delta \gamma_0}{\delta B} \right)^2 \cdot m_B^2 + (0,3086 - 2\pi \bar{\rho} f)^2 \cdot m_H^2, \quad (4.5)$$

где  $\frac{\delta \gamma_0}{\delta B}$  – горизонтальный градиент нормальной силы тяжести, мГал/м;

$f$  – гравитационная постоянная,  $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$ ;

$\bar{\rho}$  – средняя плотность пород земной коры,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$m_B^2$  и  $m_H^2$  – погрешности определения координат и высот съемочных точек, соответственно;

При  $\bar{\rho} = 2,67 \text{ г}/\text{см}^3$ ,  $R = 6,371 \text{ км}$  и  $\Delta g = 5 \text{ 200 мГал}$  выражение примет вид:

$$m_{\Delta g_B} = (0,00052)^2 \cdot m_B^2 + (0,2)^2 \cdot m_H^2. \quad (4.6)$$

Если, например, необходимо получить  $\Delta g_B$  с погрешностью порядка  $\pm 0,1$  мГал, то плановое положение гравиметрического пункта необходимо определять не грубее 40 м, а по высоте – около  $\pm 0,3$  м [16].

Геодезические работы при гравиметрических съемках по стоимости в несколько раз дороже последних. Поэтому при определении координат и высот пунктов стараются применить самые простые геодезические методы, обеспечивающие требуемую точность конечных результатов: топографические карты, различные геодезические засечки, теодолитные ходы, нивелирование – техническое или барометрическое.

## 4.4. Выполнение гравиметрических измерений

Предварительно еще раз напомним, что гравиметрические системы, в отличие от геодезических, работают в динамическом режиме: чувствительный элемент (маятник) гравиметра, удерживаемый упругими силами пружин и нитей подвеса под действием силы тяжести и других факторов, рассмотренных в разд. 3, постоянно опускается, что приводит к изменению отчета со временем. Это явление называется смещением нуль-пункта гравиметра (см. подразд. 3.4). Его приходится учитывать, что может существенно повысить стоимость гравиметровых измерений.

### 4.4.1. Опорная гравиметрическая сеть

Полевые наблюдения с гравиметрами начинаются с создания сети опорных пунктов, которые служат для учета смещения нуль-пункта гравиметра, а также для «привязки» всей сети наблюдений к единому уровню, который обеспечивается Государственной гравиметрической сетью.

Точность определения силы тяжести на пунктах полевой опорной гравиметрической сети в 1,5–2,0 раза выше, чем на рядовых. Это достигается выполнением измерений в коротких рейсах, строгим соблюдением методики наблюдений и транспортировки приборов.

Если при наблюдениях на опорной сети используется тот же гравиметр, что и на рядовой, то на каждом опорном пункте необходимо выполнить измерения в трех независимых рейсах. При применении более точных приборов допускаются двукратные независимые наблюдения [16].

Полевая опорная сеть может создаваться в начале полевых работ или в процессе проведения гравиметрической съемки.

В практике гравиметрических работ различают центральную, двухступенчатую и полигональную системы.

1. В *центральной системе* (рис. 4.1) каждый опорный пункт имеет непосредственную связь с центральным, в качестве которого может быть использован пункт Государственной гравиметрической сети [16].

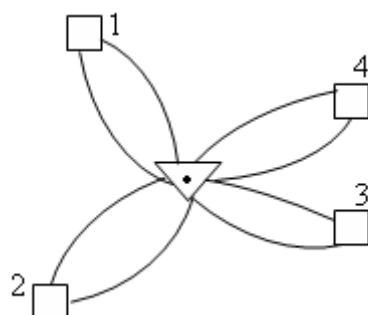


Рис. 4.1. Иллюстрация развития опорной сети по центральной системе

Оценка качества опорной сети определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{\varepsilon}{N}}, \quad (4.7)$$

где  $\varepsilon$  – средняя квадратическая погрешность единичного измерения;

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N-n}}; \quad \bar{N} = \frac{N}{n}, \quad (4.8)$$

$N$  – общее число измерений приращений силы тяжести в опорной сети;

$n$  – число пунктов;

$\delta_i$  – отклонение измеренного значения  $\Delta g_i$  от среднего;

$$\delta_i = \Delta g_i - \Delta \bar{g}; \quad (4.9)$$

$$\Delta \bar{g} = \frac{\sum \Delta g_i}{k}; \quad (4.10)$$

$k$  – количество приращений  $\Delta g$ , принятых в обработку.

2. *Двухступенчатая опорная система* (рис. 4.2) состоит из каркасной (к) и заполняющей сети (з). Каркасная опорная сеть создается по центральной системе. Рейсы заполняющей опорной сети опираются на пункты каркасной сети (к).

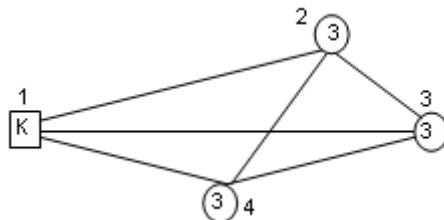


Рис. 4.2. Иллюстрация развития опорной сети по каркасной системе

Так, например, выполнив рейс 1-2-3-4-1, получим приращения  $\Delta g$  по звеньям 1-2, 1-4, 1-3. Из рейса 1-2-3-4-2-1 определим  $\Delta g$  между пунктами 2-1, 2-3 и 2-4 и, наконец, выполнив рейс 1-4-3-4-1, вычислим приращения по звеньям 4-1 и 4-3.

Оценка точности сети этого вида производится по формуле:

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \pm \sqrt{\varepsilon_k^2 + \frac{n_3}{n_k + n_3} \cdot \varepsilon_3^2}, \quad (4.11)$$

где  $n_k$ ,  $n_3$  и  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_3$  – число каркасных и заполняющих, а также средние квадратические погрешности силы тяжести на этих пунктах, вычисленные по формуле (4.1).

3. *В полигональной системе* опорная сеть образуется из совокупности полигонов, в которых каждое звено определено из независимых рейсов по схеме А-Б-А.

Погрешность определения силы тяжести ( $\Delta g$ ) вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ОП}} = \pm \mu \sqrt{\frac{M}{m}}, \quad (4.12)$$

где  $M$  – средняя удаленность опорных полевых пунктов от ближайших исходных гравиметрических пунктов;

$m$  – среднее число определений  $\Delta g$  между двумя смежными пунктами;

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N - S}}, \quad (4.13)$$

$S$  – число сторон, образующих все полигоны опорной сети.

Для достижения высокой точности определения  $\Delta g$  между пунктами опорной сети используют не менее трех гравиметров и выполняют не менее шести приборосвязей по схеме А-В-А. Оценку точности определения приращения силы тяжести производят по специальной методике, изложенной в лабораторной работе № 4 данного издания, а также в изданиях [17,28].

4. В практике гравиметрических работ возможно развитие опорной гравиметрической сети в процессе выполнения измерений на пунктах рядовой сети. Этот способ (рис. 4.3) называется «*методикой разностного нуль-пункта*» и заключается в следующем [8,11].

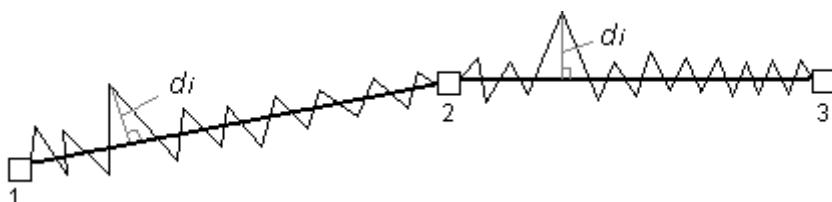


Рис. 4.3. Иллюстрация развития опорной сети методом разностного нуль-пункта

Для работы подбираются гравиметры с разными градиентами нуль-пункта. Наблюдения выполняют сразу двумя, тремя гравиметрами. Измерения по времени ограничиваются продолжительностью рабочего дня. Они начинаются и заканчиваются или на концах профилей, или в точке пересечения профилей и магистралей, которые обычно становятся опорными пунктами. На них же делаются и перерывы в работе.

По результатам измерений  $g_i$  каждым гравиметром (I, II, III) для каждой  $i$ -й точки вычисляются разности измеряемых значений:

$$\Delta g_i = (g_I)_i - (g_{II})_i. \quad (4.14)$$

Разности  $\Delta g_i$  выносят на миллиметровку – получается график изменения этих разниц. На графиках намечаются пункты, между которыми сумма квадратов отклонений  $d_i$  от осредняющей прямой не превышала бы величины, предписанной техническим заданием:

$$\varepsilon_d = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{2n}}, \quad (4.15)$$

где  $n$  – число разностей в выделенном интервале (звене).

Суть методики в том, что точки излома разностного нуль-пункта совпадают с точками излома кривых изменения нуль-пункта одного из приборов. Они-то и являются теми точками, на которых выставляются дополнительные опорные пункты. Этим обеспечивается то, что принятие линейного закона изменения нуль-пункта не несет значительной погрешности и, таким образом, итоговая погрешность может быть значительно снижена.

Опыт работы показывает, что при такой методике развития опорной сети получается меньшее количество опорных пунктов, чем при предварительной разбивке опорных пунктов для рейса продолжительностью 2-3 часа, а точность определения  $\Delta g$  рядовых пунктах возрастает.

#### 4.4.2. Рядовая сеть

Гравиметрические измерения выполняются отдельными *рейсами*. Рейс – это непрерывная последовательность измерений с гравиметром, объединенная общим смещением нуль-пункта, которая начинается и заканчивается на опорном пункте.

Часть рейса между двумя соседними по времени опорными пунктами называется *звеном*. Основным типом рейса является однодневный. Наблюдения в рейсах проводятся, как правило, по однократной методике. При наблюдениях используются, обычно, два гравиметра.

При проведении съемок в труднодоступных районах наблюдения выполняют тремя гравиметрами одновременно. Это исключает необходимость повторения рейса в случае обнаружения брака в измерениях одним из гравиметров.

Если гравиметры показывают стабильность в смещении нуль-пункта, обеспечивающую точность результатов наблюдения, то допускается увеличение продолжительности рейса.

При работе с гравиметром должны выполняться следующие правила.

1. За 12 часов до начала рейса необходимо установить рабочий диапазон измерения силы тяжести. Для этого используются результаты рекогносцировочной съемки или гравиметрические карты в более мелких масштабах.

2. Перед началом рейса необходимо настроить уровни гравиметра на минимум чувствительности к наклону.

3. За два часа до начала рейса следует удерживать маятник упругой системы в исходном положении: индекс маятника должен находиться на нулевом делении окулярной шкалы.

4. В начале рейса, для введения чувствительной системы гравиметра в рабочий режим, необходимо, выполнив измерения на первых трех, четырех точках профиля, возвратиться на первую точку, затем продолжить измерения в рейсе.

5. Во время рейса нельзя менять способ транспортировки гравиметра. Скорость движения от точки к точке должна быть одинаковой.

6. Гравиметры на точке устанавливают на специально изготовленную жесткую подставку.

7. На пунктах берут три независимых отсчета по шкале гравиметра при наведении каждый раз изображения маятника на нуль окулярной шкалы вращением измерительного винта по часовой стрелке. Этим исключается так называемый «мертвый ход» винта. Отсчеты по гравиметру следует брать через одинаковые промежутки времени. Расхождение между отсчетами не должно превышать 5 делений микрометра. Если цена оборота измерительного винта 8 мГал/оборот, то погрешность наведения составит 0,004 мГал. В противном случае берутся дополнительные отсчеты по гравиметру.

8. После взятия отсчетов в пунктах наблюдения записываются показания часов с точностью до 1 минуты и температура прибора с точностью до 0,5 °С. Кроме того, на каждой точке в журнале записывается название или номер рейса, профиля и пикета, дата проведения измерений, условия наблюдения (погода, сейсмичность и т. п.).

В зависимости от густоты точек опорной сети гравиметрический рейс можно выполнить по следующим методикам.

1. «Прямой ход», когда измерения на рядовых пунктах начинаются на одном, а заканчиваются на другом опорном пункте (рис. 4.4).

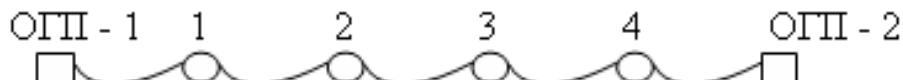


Рис. 4.4. Иллюстрация гравиметрического рейса по методике «прямой ход»

При этом коэффициент смещения нуль-пункта гравиметра вычисляется по формуле:

$$K = \frac{(g_{01}^S - g_{02}^S) - (g_{01} - g_{02})}{t_2 - t_1}, \quad (4.16)$$

где  $g_{01}^S$  и  $g_{02}^S$  – измеренные значения силы тяжести на опорных гравиметрических пунктах ОГП-1 и ОГП-2;

$g_{01}$  и  $g_{02}$  – значения силы тяжести на пунктах ОГП-1 и ОГП-2, полученные из уравнивания опорной сети;

$t_1$  и  $t_2$  – время снятия отчетов по шкале гравиметра на опорных пунктах ОГП-1 и ОГП-2.

2. «Замкнутый ход», если рейс начинается и заканчивается на одном и том же опорном пункте (рис. 4.5).

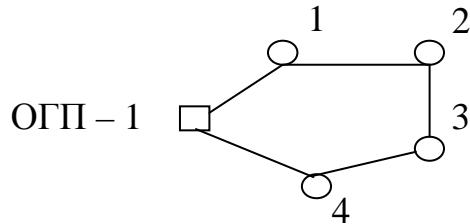


Рис. 4.5. Иллюстрация гравиметрического рейса по методике «замкнутый ход»

В таком рейсе коэффициент смещения нуль-пункта гравиметра определяется по формуле:

$$K = \frac{\left(g_1^S\right)_H - \left(g_1^S\right)_K}{t_K - t_H}, \quad (4.17)$$

где  $\left(g_1^S\right)_H$  и  $\left(g_1^S\right)_K$  – измеренное значение силы тяжести на опорном пункте ОГП-1 в начале и в конце рейса, соответственно.

3. «Прямой и обратный ход» выполняют, соответственно в прямом и обратном направлении (рис. 4.6). В прямом ходе измерения выполняют последовательно на всех пунктах, а в обратном – только на некоторых.

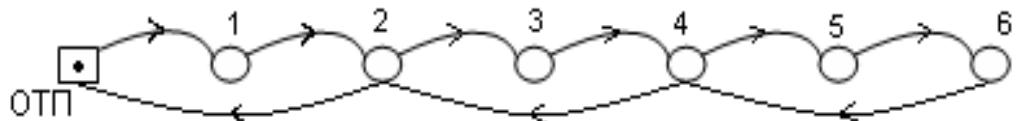


Рис. 4.6. Иллюстрация гравиметрического рейса по методике «прямой и обратный ход»

При этом число пунктов, на которых выполняются повторные измерения, должно быть не менее 20 %. Коэффициент смещения нуль-пункта гравиметра вычисляется по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m (\Delta g_i^S \cdot \Delta T_i)}{\sum_{i=1}^m \Delta T_i^2}, \quad (4.18)$$

где  $\Delta g_i^S$  и  $\Delta T_i$  – разность измеренных значений силы тяжести и времени на одноименных пунктах в прямом ( $\Pi$ ) и обратном ( $O$ ) ходе;

$$\begin{aligned}\Delta g_i^S &= \left( g_i^S \right)_\Pi - \left( g_i^S \right)_O; \\ \Delta T_i &= \left( t_i \right)_O - \left( t_i \right)_\Pi.\end{aligned}\quad (4.19)$$

#### 4.5. Обработка результатов гравиметровых измерений и оценка их точности

Обработка результатов гравиметровых наблюдений разделяется на два этапа: предварительный (полевой) и окончательный (камеральный).

В конце рабочего дня проводят обработку результатов измерений с гравиметрами в рейсе в следующей последовательности.

1. Время взятия отсчета в минутах переводят в доли часа.
2. Вычисляют средний отсчет на точке в оборотах измерительного винта  $Si$ , обор.
3. Вычисляют цену оборота измерительного винта, соответствующую температуре прибора в момент измерений  $C_{T_i}$ .
4. Вычисляют отсчет по гравиметру в миллигалах – эффективное значение силы тяжести  $g_i$ .
5. По результатам измерений строят графики смещения нуль-пункта гравиметров.
6. Производится вычисление приращений силы тяжести по каждому гравиметру на рядовых точках относительно опорных пунктов.
7. Оценивается погрешность определения приращения силы тяжести по каждому звену.

Качество выполненных гравиметровых измерений оценивается величиной средней квадратической погрешности определения значений силы тяжести на пункте:

$$\epsilon_g = \sqrt{\epsilon_u^2 + \epsilon_{on}^2 + \epsilon_{ряд}^2}, \quad (4.20)$$

где  $\epsilon_u$  – погрешность привязки полевой опорной сети к Государственной гравиметрической,

$\epsilon_{оп}$ ,  $\epsilon_{ряд}$  – погрешность определения силы тяжести на пунктах опорной и рядовой сети, соответственно.

Для оценки качества съемки проводятся независимые контрольные наблюдения в объеме 5–10 %. Количество контрольных измерений должно быть не менее 50.

Рейс считается качественным, если уклонение измеренных значений силы тяжести от контрольных не превышает утроенную величину ошибки  $\epsilon_0$ , предусмотренную техническим проектом. Этот же принципложен в основу

отбраковки наблюдений  $g_n$  на пункте, если количество измерений  $g > 3$ . Если  $g_n = 2$  и максимальное уклонение превышает  $3\sqrt{2} \cdot \varepsilon_0$ , то необходимо выполнить дополнительные измерения  $g$  и отбраковку. Число забракованных наблюдений должно быть менее 2 % от общего количества измерений.

Камеральная обработка материалов выполняется после завершения полевых работ и предусматривает:

1. Повторное исследование гравиметров, включая определение цены оборота измерительного винта;
2. Переобработку результатов наблюдений и вычисление аномалий силы тяжести;
3. Составление каталогов опорных и рядовых пунктов;
4. Построение карт аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе;
5. Составление и защита отчета о выполненных работах.