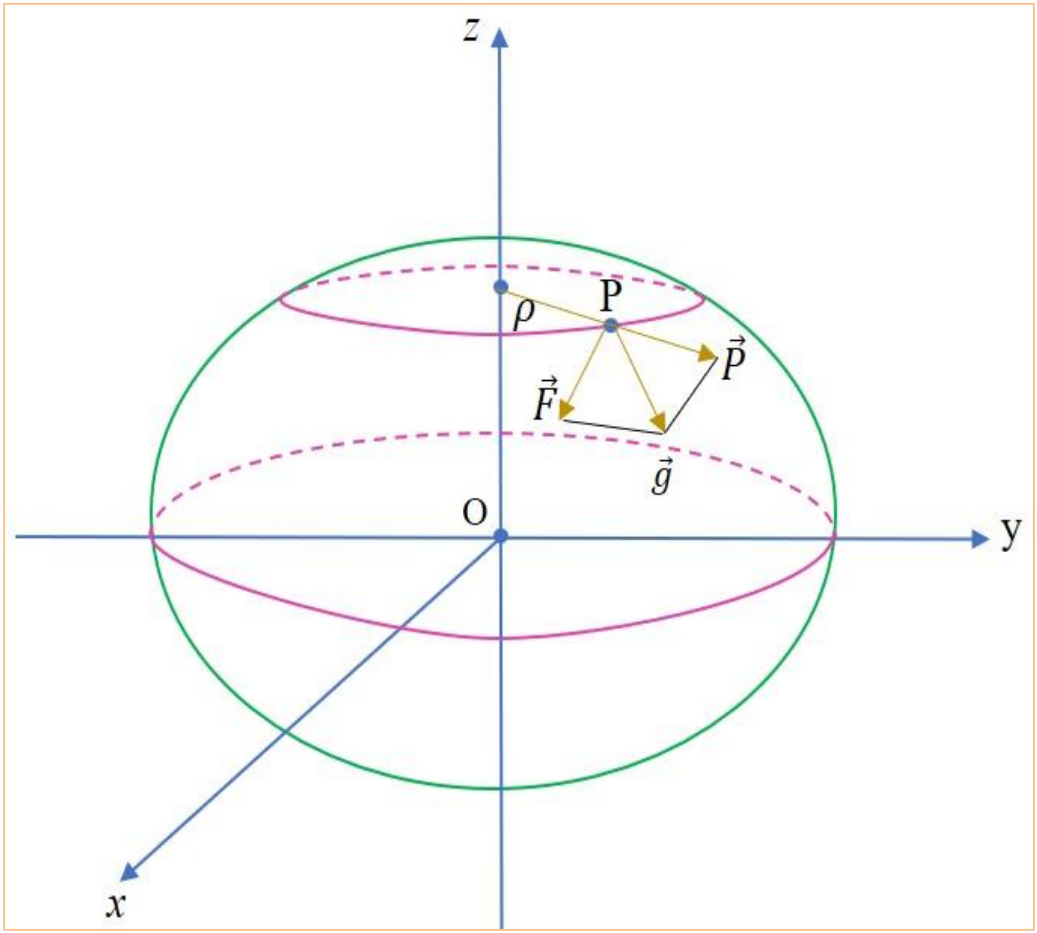
Гравиметрия

Л8. Мировая опорная гравиметрическая сеть. Государственные опорные сети. Полевые опорные и рядовые гравиметрические сети



Лектор Кенесбаева А.

Мировая гравиметрическая сеть

На первом этапе создается мировая опорная гравиметрическая сеть, которая затем поэтапно сгущается государственными или национальными опорными гравиметрическими сетями, а затем полевыми опорными гравиметрическими сетями, являющимися исходными для выполнения рядовых съемок (рис. 1).

Мировая опорная гравиметрическая сеть задает единую мировую гравиметрическую систему, к которой, должны быть отнесены все гравиметрические измерения, выполненные на Земле.

В общем случае она включает в себя все опорные сети и рядовую съемку.

Под *опорной гравиметрической сетью понимают систему гравиметрических пунктов повышенной точности, обеспечивающих исходную основу для различных видов съемок.*

Мировая опорная гравиметрическая сеть обеспечивает единство исходных абсолютных значений ускорения силы тяжести национальных гравиметрических сетей и масштаба относительных измерений.

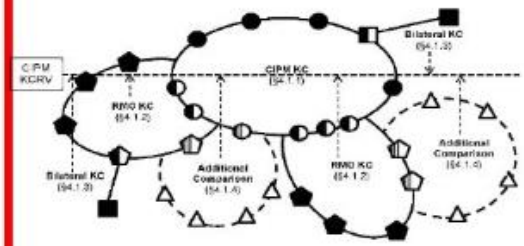
Мировая гравиметрическая сеть



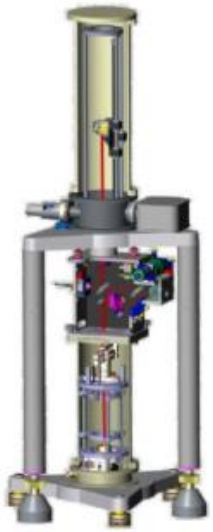
Мировая гравиметрическая система отсчета

Международная гравиметрическая система отсчета (IAG- International Association of Geodesy) призвана обеспечить долгосрочную глобальную гравиметрическую систему отсчета, основанную на абсолютных и прослеживаемых гравиметрических измерениях, таких как измерения, проводимые современными абсолютными гравиметрами (угловыми кубами или методом холодных атомов).
Эта инициатива, запущенная в 2015 году.

Intercomparison
of Absolute Gravimeters



Absolute Gravimeters

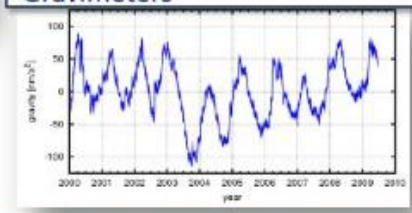


Gravity reference stations
with continuous comparison reference function



Continuous monitoring by
- Superconducting
- Repeated Absolute
- Continuous Quantum

Gravimeters





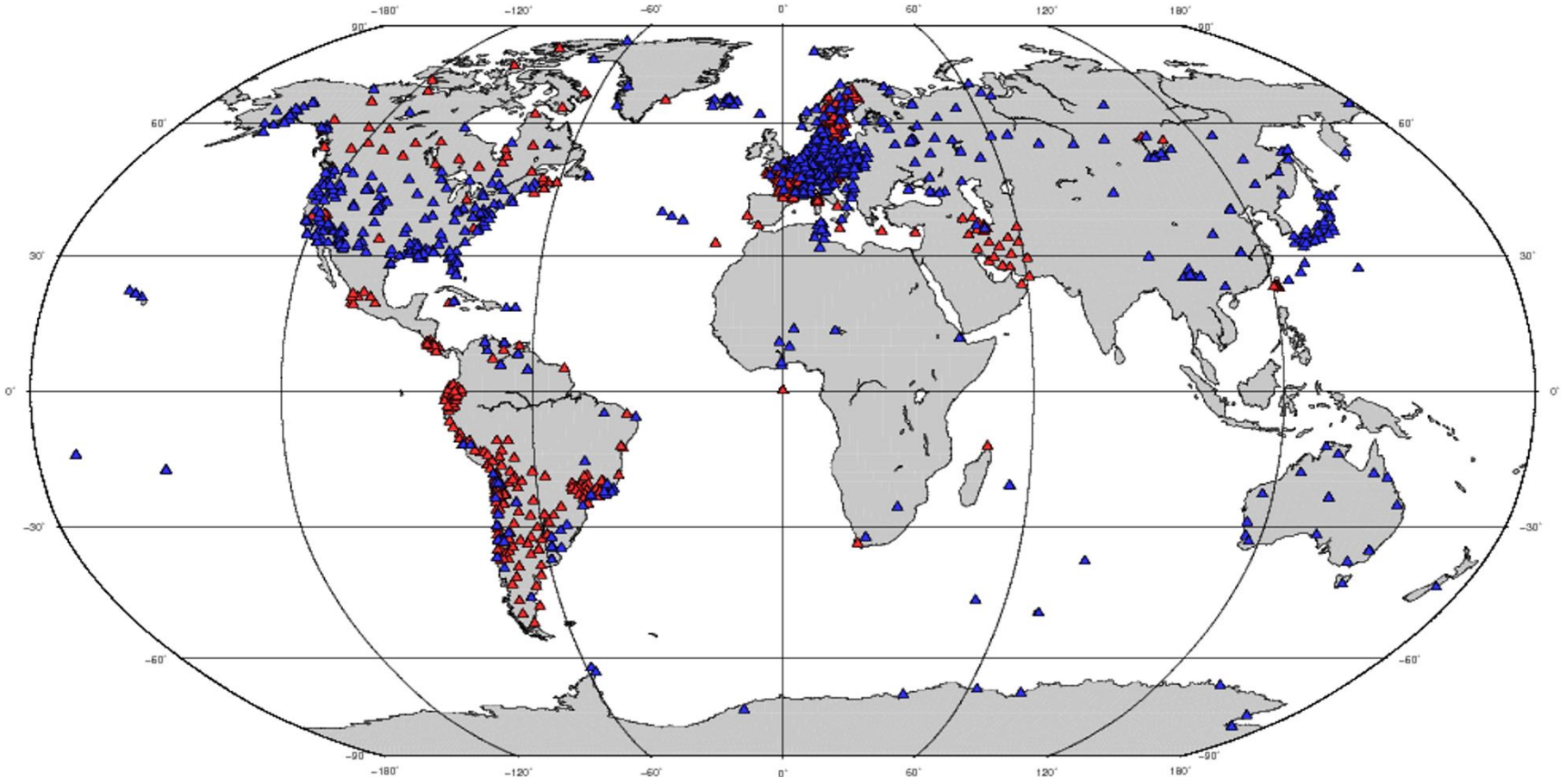


Central Inventory (Database)

Conventional models for temporal gravity changes:
Tides, Atmosphere, Polar Motion

BKG Wir geben Orientierung. BGI NLS NATIONAL LAND SURVEY OF FINLAND VIGIK

Сеть абсолютных гравиметрических станций



Мировая гравиметрическая сеть

До 1909 г. все измерения силы тяжести выражали в Венской системе, основанной на абсолютном определении силы тяжести в Вене Оппольцером и в Мюнхене Орфом. Определение Орфа было связано с Веной при помощи относительного определения в этих двух пунктах.

В 1900 г. на XIII конференции МАГ в Париже было решено считать значение силы тяжести для Вены исходным для всех гравиметрических работ.

Точность исходного значения силы тяжести была 10 мГал.

В 1909 г. на XVI Международной геодезической конференции в Лондоне была принята Потсдамская система, в основу которой положено определение силы тяжести в Потсдамском геодезическом институте.

Точность определения силы тяжести в Потсдаме оценена погрешностью 3 мГал.

Для перехода от Венской системы к Потсдамской значение силы тяжести должно быть уменьшено на 16 мГал.

В настоящее время мировая опорная гравиметрическая сеть образована и уравнена на основании многочисленных гравиметрических наблюдений в 1950—1960-х гг. и рекомендована к применению на XV Генеральной ассамблее Международного геофизического и геодезического союза (МГГС), которая состоялась в Москве в 1971 г. Сеть получила название Международной гравиметрической стандартной сети 1971 года —МГСС-71 (IGSN-71 — The international gravity standartization net).

Мировая гравиметрическая сеть

Для создания МГСС-71 использованы абсолютные определения в восьми пунктах земного шара и около 25 000 измерений разностей силы тяжести, из них почти 400 маятниковых связей.

Совместное уравнивание всех наблюдений выполнено после предварительного уравнивания, которое позволило выявить измерения, имеющие значительные погрешности, и установить веса уравниваемых разностей ускорения ^илы тяжести.

Благодаря принятому при уравнивании соотношению весов МГСС-71 фактически опирается на абсолютное определение в Севре.

Масштаб системы задан абсолютными определениями в восьми пунктах, выполненных с прибором Хэммонда-Фаллера, и маятниковыми измерениями.

Точность масштаба сети МГСС-71 порядка $5 \cdot 10^{-5}$.

Абсолютные определения, задающие систему и масштаб МГСС-71, приведены в табл. 1, где даны окончательно уравненные и исправленные всеми поправками значения.

Мировая гравиметрическая сеть

Пункт	Автор, год определения	Ускорение силы тяжести, мГал
Севр (Париж)	Сакума, 1970	980 925,957±0,030
Теддингтон	Кук, 1969	981 181,84±0,13
Богота	Хэммонд-Фаллер, 1971	977 389,979±0,087
Денвер	То же	979 597,716±0,042
Вашингтон	»	980 101,271±0,055
Миддлтаун	»	980 305,318±0,041
Бостон	»	980 378,685±0,042
Севр (Париж)	»	980 925,985±0,041
Теддингтон	»	981 181,891±0,050
Фэрбэнкс	»	982 235,007±0,042

Основной объем гравиметровых связей, включенных в уравнивание для создания мировой опорной сети, выполнен в 1961 — 1969 гг.; включены также отдельные лучшие наблюдения 1949— 1960 гг.

Для измерений использованы гравиметры 18 типов, причем подавляющее большинство наблюдений исполнено с гравиметрами «Ла Косте-Ромберг», «Уорден», «Аскания», «Сев. Америка», «Уэстерн».

Окончательный каталог содержит 1854 пункта МГСС-71, распределенных по поверхности Земли следующим образом.

Мировая гравиметрическая сеть

Область	Число пунктов	
Северное полушарие	1478	80%
Южное полушарие	376	20%
Европа	482	
Азия	148	
Африка	198	
Австралия	84	
Антарктида	7	
Индийский океан	5	
И т о г о: Восточное полушарие	924	50%

Мировая гравиметрическая сеть

Северная Америка	572	
Южная Америка	229	
Атлантический океан	34	
Тихий океан	95	
И т о г о: Западное полушарие	930	50%

Используемые в настоящее время гравиметрические системы (МГСС-71 и Потсдамская) в свете новых требований к установлению систем координат и решению научных и практических задач, связанных с гравиметрией и высшей геодезией, нуждаются в серьезном совершенствовании.

Поэтому мировая опорная гравиметрическая сеть уточняется и в перспективе предполагается, что на всех пунктах, входящих в эту сеть, будут выполнены только абсолютные измерения ускорения силы яжести.

Государственные опорные сети

Государственные или национальные опорные гравиметрические сети создаются на территории отдельных государств относительным методом, то есть относительно исходного пункта, связанного с Потсдамской системой или с мировой гравиметрической системой МГСС-71.

Измерения в этих сетях выполняют, в основном, высокоточными маятниковыми и статическими гравиметрами.

Государственные опорные сети состоят из редкой сети маятниковых пунктов и привязанной к ней сети гравиметровых пунктов (пунктов, на которых выполнены измерения статическими гравиметрами) разных классов.

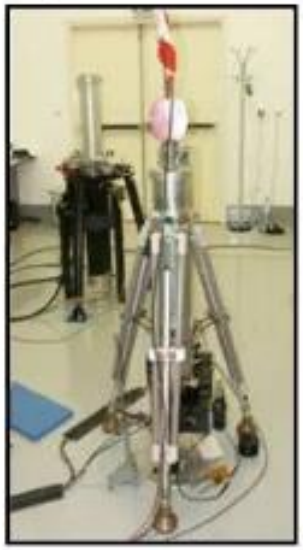
Маятниковые определения уменьшают систематические ошибки гравиметровых связей и задают масштаб национальной сети.

Сети развивают в виде полигонов и уравнивают по способу наименьших квадратов.

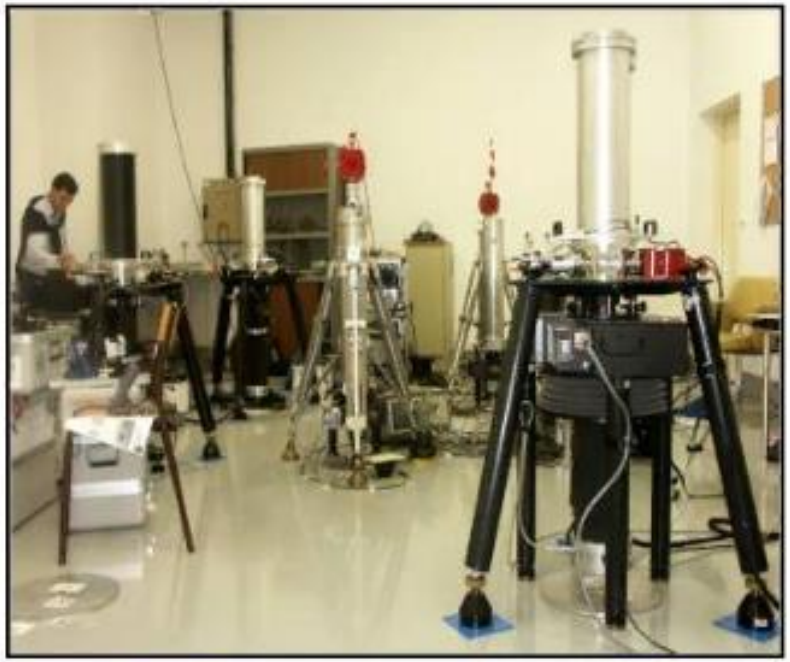
При таком подходе точность государственных сетей будет ниже, чем точность мировой опорной гравиметрической сети.

Однако, начиная с 70-х годов прошлого столетия, точность созданных таким образом Национальных опорных гравиметрических сетей перестала устраивать гравиметрические потребности ряда государств: США, Германии, Японии, Канады, СССР и т.д.

ГРАВИМЕТРЫ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ ПРОБНОГО ТЕЛА (free fall)



JILA-2 (Канада)



JILA, FG5 (Австрия, Канада, Испания, МБМВ)



GABL-G (Россия)



FG5-216 (Люксембург)



A10-008 (Германия)



FGC-1 (США)

Государственные опорные сети

В связи с этим в данных государствах созданы высокоточные национальные гравиметрические сети, опирающиеся на национальные пункты, на которых выполнены абсолютные измерения ускорения силы тяжести.

Схему создания этих сетей мы разберем на примере гравиметрической сети бывшего СССР.

Государственная опорная гравиметрическая сеть (ГОГС) СССР была создана в 1978 – 1983 гг. по принципу перехода от общего к частному.

Эта сеть состоит из государственной фундаментальной гравиметрической сети (ГФГС), на основе которой развивается государственная гравиметрическая сеть I класса (ГГС-I), которая затем последовательно сгущается II и III классами.

ГФГС совместно с ГГС-I образуют высокоточную государственную гравиметрическую сеть, создание которой как раз и заключает в себе принципиальное отличие от организации государственных гравиметрических сетей в большинстве стран мира.

Цели и задачи высокоточной государственной сети заключаются в следующем:

Государственные опорные сети

1. Задание единой гравиметрической системы на территорию всего государства, которая являлась бы независимой от мировой опорной гравиметрической сети, но в то же время была надежно с ней связана.
2. Распространение заданной единой гравиметрической системы на территорию 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.

Сеть представляет собой совокупность закрепленных на местности и гравиметрически связанных между собой пунктов, на которых выполняют высокоточные относительные или *абсолютные* измерения ускорения силы тяжести и осуществляют определение высот и координат этих пунктов.

Государственная фундаментальная гравиметрическая сеть (ГФГС) является высшим звеном гравиметрической сети СССР и служит для определения и уточнения гравиметрической системы страны, ее связи с Мировой и зарубежными гравиметрическими системами, для метрологического обеспечения гравиметрических сетей низших классов и гравиметрической съемки территории государства.

Государственные опорные сети

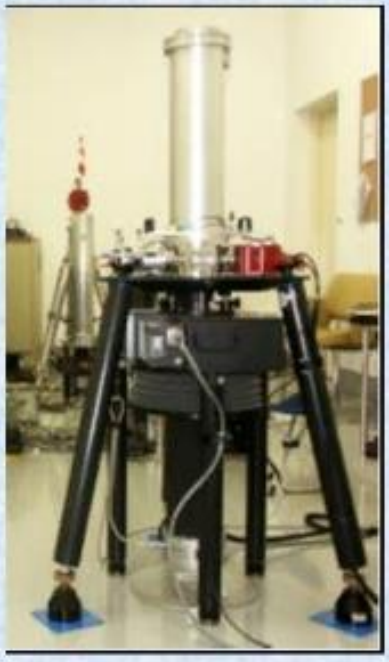
ГФГС состоит из семи пунктов, на которых выполнены *абсолютные измерения ускорения силы тяжести* баллистическими гравиметрами ГАБЛ, и связанных с ними пунктов-спутников (не менее 4-х в радиусе до 50 км), предназначенных для выявления возможных локальных вариаций силы тяжести.

Пункты ГФГС расположены в Москве (главный гравиметрический пункт), Апатитах, Полтаве, Тбилиси, Ташкенте, Новосибирске и Петропавловске-Камчатском.

Основной научной задачей, решаемой с помощью ГФГС, является изучение вариаций гравитационного поля во времени. С этой целью на фундаментальных пунктах, расположенных в различных геолого-тектонических регионах, систематически (не реже 1 раза в 5 лет) выполняются абсолютные и относительные определения ускорения силы тяжести с максимально возможной на данный момент точностью.

ГФГС надежно связана с Потсдамом и Севром путем определения приращения ускорения силы тяжести относительно пунктов мировой опорной сети.

Государственная гравиметрическая сеть I класса (ГГС-I) развивается на основе ГФГС и ее основной задачей является распространение единой гравиметрической системы на территорию всей страны с необходимой точностью. Построение ГГС-I выполняют поэтапно.



FG5-1##



FG5-2## и A10



FGL

Около 90% абсолютных гравиметров используемых в настоящее время в мире – - это коммерческие гравиметры, произведенные одной фирмой в США.

К середине 2012 г. эта фирма выпустила 59 гравиметров типа FG5 и 31 гравиметр типа A-10.

Все эти гравиметры не имеют сертификатов калибровки.

Сервисные работы и ремонт проводятся в основном на предприятиях фирмы в США.

Государственные опорные сети

На первом этапе определяют от пунктов ГФГС основные пункты I класса с густотой один пункт на 50 – 100 тыс. км2.

Результаты измерений на основных пунктах I класса и пунктах ГФГС совместно уравнивают и каталогизируют.

Затем, выполняют сгущение сети до плотности один пункт на 10 – 25 тыс. км2 путем вставки отдельных пунктов, именуемых далее пунктами I класса, в созданную на первом этапе сеть.

Пункты размещаются с учетом удобства подъезда к ним на автомашине или подлета на вертолете.

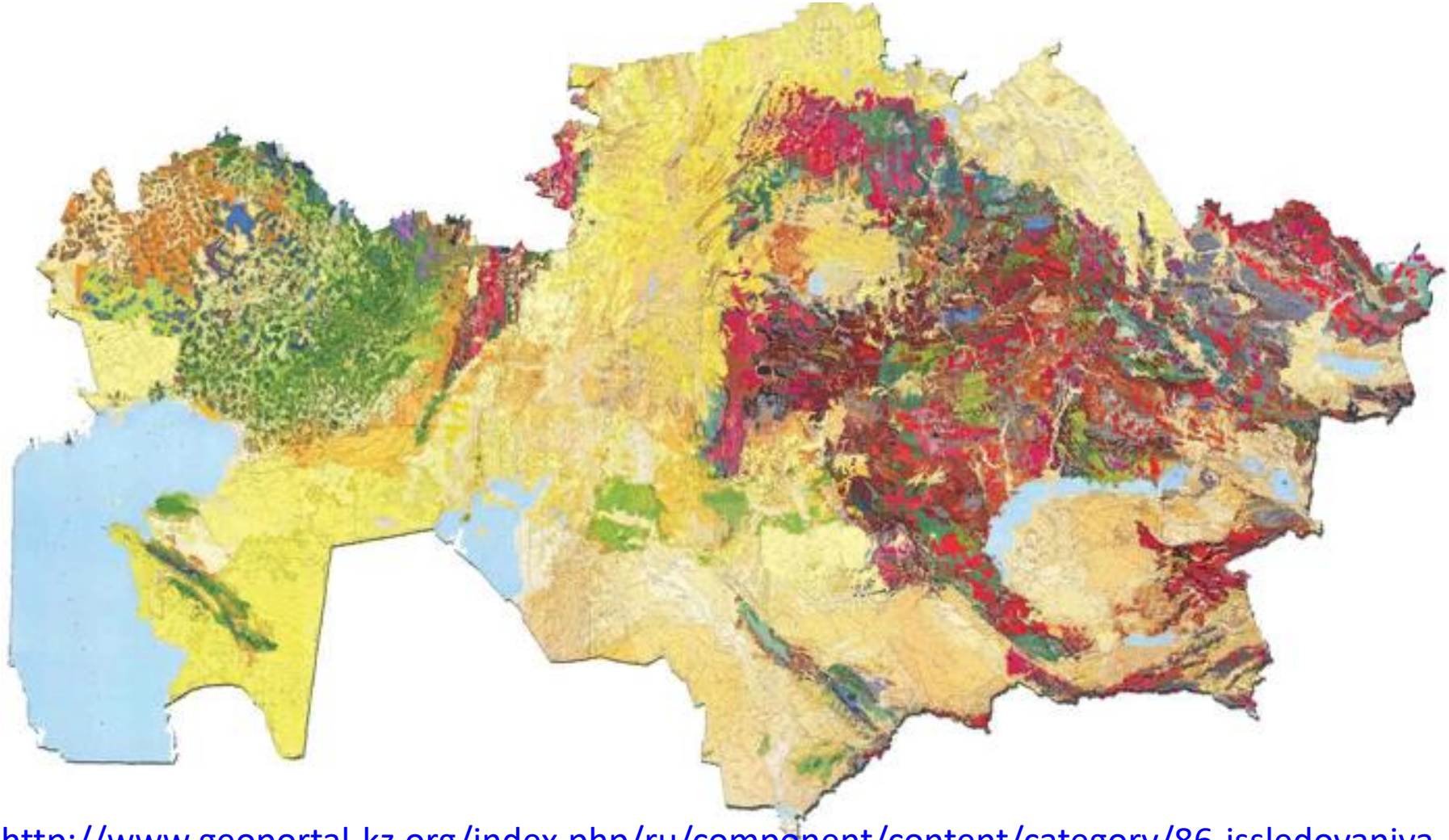
После завершения работ по сгущению ГГС-I сеть уравнивается совместно с ГФГС как единое построение и издается новый каталог, включающий все пункты ГФГС и ГГС-I. Пункты ГФГС и ГГС-I служат исходными при развитии гравиметрических сетей низших классов.

Основные характеристики высокоточной гравиметрической сети бывшего СССР

Вид сети	Средняя плотность, кол-во км^2 на 1 пункт	СКО из уравнивания, мГал	Приборы, используемые для измерений	Закрепление на местности	Класс нивелирования
ГФГС	2 000 000	≤ 0,02	Баллистические гравиметры ГАБЛ, маятниковые приборы «Агат»	Железобетонные монолиты размером (100×100) см^2	I-II
ГГС-I: основные пункты;	50000 – 100000	≤ 0,05	Маятниковые приборы «Агат»	Железобетонные монолиты размером (80×80) см^2	I-II
пункты I класса	10000 – 25000	≤ 0,05	Маятниковые приборы «Агат», высокоточные статические гравиметры типа ГАГ-2 и ГНУК-А	Железобетонные монолиты размером (60×60) см^2	IV

Точность гравиметрической сети II класса составляет (0,03 – 0,10) мГал.

Справка по изученности территории РК



http://www.geoportal-kz.org/index.php/ru/component/content/category/86-issledovaniya

Гравиметрическая съемка масштаба 1:200000	100,0%
Гравиметрическая съемка масштаба 1:50000	48,6%

Полевая опорная гравиметрическая сеть (ПОГС)

Государственные опорные гравиметрические сети служат исходной основой для различных видов съемок.

Эти съемки, сгущающие государственную гравиметрическую сеть, классифицируются как рядовые гравиметрические съемки.

Непосредственно перед началом наблюдений на пунктах рядовой сети или одновременно с ними создается *полевая опорная гравиметрическая сеть (ПОГС), под которой понимают сеть гравиметровых пунктов повышенной точности, развитая с целью учета смещения нуль-пункта гравиметра в рядовых рейсах, а также для приведения результатов гравиметрических измерений в рядовых рейсах в единую систему.*

Методика построения ПОГС изложена в Инструкции по гравиметрической разведке 1975 года.

Точность ПОГС должна быть в 1,5 – 2 раза выше точности рядовой сети.

Для повышения точности ПОГС применяют метод многократно-групповых измерений, когда в гравиметрическом рейсе сразу используют несколько гравиметров, сокращают длительность рейсов за счет использования более совершенных транспортных средств, выполняют уравнивание сети.

ПОГС развивают в виде полигонов, в виде центральной и двухступенчатой систем и по методу узловых точек.

Полевая опорная гравиметрическая сеть (ПОГС)

Значение ускорения силы тяжести опорных пунктов относительно исходного определяют как среднее арифметическое из результатов многократных измерений.

Средняя квадратическая погрешность m измерения разности силы тяжести между пунктами опорной сети, созданной по методу центральной системы, равна

$$m = \frac{\mu}{\sqrt{N_{cp}}},$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{N - n}}.$$

В формулах : Ncp – среднее для сети число наблюдений на

одном опорном пункте,

δ – уклонение измеренных значений силы тяжести от среднего арифметического,

N – общее число всех измерений в сети,

n – число определяемых опорных пунктов.

Полевая опорная гравиметрическая сеть (ПОГС)

Двухступенчатая система построения опорной сети заключается в создании каркасной опорной сети по методу центральной системы и заполняющей сети опорных пунктов, которая выполняется рейсами, опирающимися на пункты каркасной сети.

Двухступенчатая система применяется в том случае, если на площади съемки нельзя создать опорную сеть необходимой плотности с помощью одной центральной системы.

Наблюдения по методу узловых точек применяют в том случае, если

опорная сеть по каким-либо причинам не была создана до начала измерений на пунктах рядовой сети или если плотность опорной сети оказалась недостаточной.

Узловые точки образуются при пересечении в одном пункте нескольких рейсов. Сеть узловых пунктов уравнивается и используется затем для обработки наблюдений в рядовых рейсах.

Полевая опорная сеть должна иметь надежную привязку к пунктам

государственной опорной сети I и II классов. Пункты полевой опорной сети,

надежно закрепленные на местности, образуют опорную сеть III класса.

Наблюдения на пунктах рядовой сети

Рядовые сети развиваются при выполнении различных видов гравиметрических съемок, и они должны обязательно опираться на ПОГС (полевые опорные гравиметрические сети).

Наблюдения на пунктах рядовой сети выполняют статическими гравиметрами.

Методика наблюдений в рядовых сетях должна быть построена таким образом, чтобы оказалось возможным учесть смещение нуль-пункта гравиметра в результатах измерений, а также свести к минимуму влияние различного рода ошибок.

Для этого измерения организуют в виде *гравиметрического рейса*, *под которым понимают совокупность последовательных гравиметрических измерений на различных пунктах сети, объединенных общей характеристикой смещения нуль-пункта гравиметра*.

При измерениях предполагается, что смещение нуль-пункта гравиметра изменяется по линейному закону строго пропорционально времени.

Поэтому гравиметрические рейсы ограничиваются во времени (продолжительность не более 4 – 8 часов).

Кроме того, гравиметрический рейс должен прокладываться в одинаковых внешних условиях, а также в одинаковом режиме транспортировки.

Наблюдения на пунктах рядовой сети

Наблюдения на пунктах рядовой сети ведут по одной из следующих схем:

1) *по схеме прямого замкнутого хода*

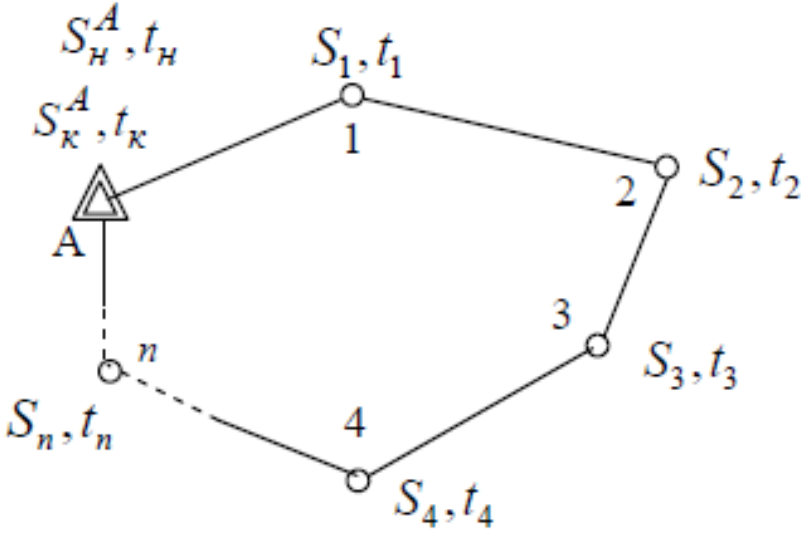


Схема замкнутого хода гравиметрических наблюдений в рядовой сети:

А – исходный пункт полевой опорной сети, на котором начинается и заканчивается гравиметрический рейс;

Sк Sн – конечный и начальный отсчеты по гравиметру на исходном пункте гравиметрического рейса, переведенные в мГалы;

tк , *tн* – моменты взятия конечного и начального отсчетов по гравиметру;

S 1, *S* 2……*S n* – текущие отсчеты по гравиметру;

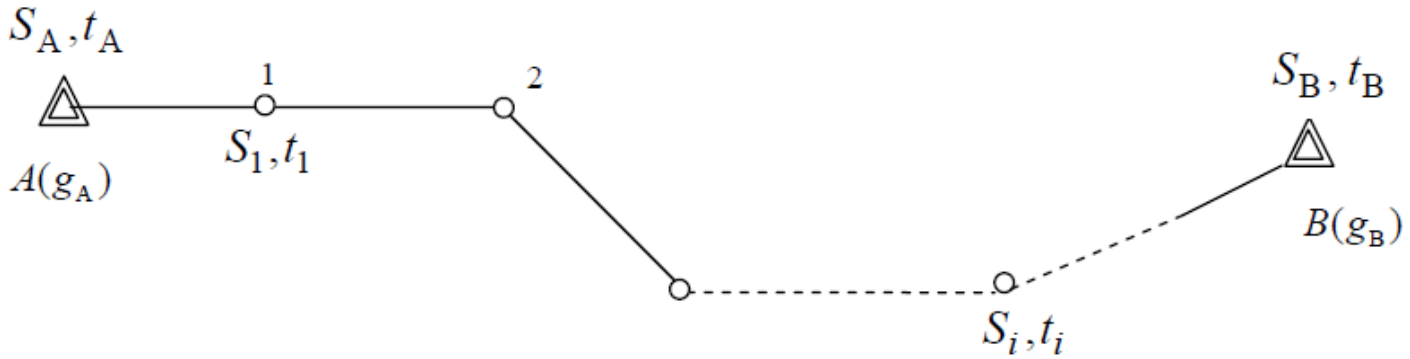
*t*1,*t*2.....*tn* – время взятия текущих отсчетов.

Наблюдения на пунктах рядовой сети

Скорость смещения нуль-пункта гравиметра k в этом случае определяется по формуле

$$k = \frac{(S_к - S_н)_{мГал}}{t_к - t_н}.$$

2) *по схеме прямого хода, опирающегося на два исходных пункта*



Прямой ход, опирающийся на два исходных пункта:

$g A$, gB – значения ускорения силы тяжести на исходных пунктах.

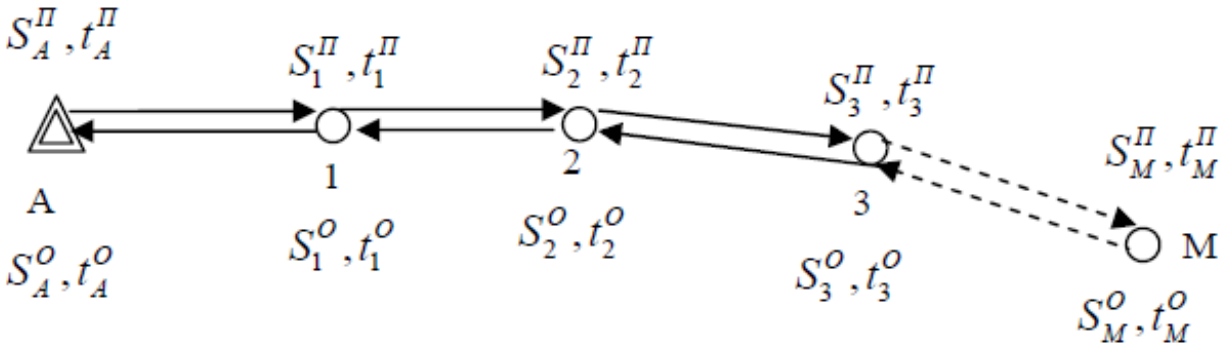
Скорость смещения нуль-пункта гравиметра в данной схеме наблюдений вычисляется по формуле

$$k = \frac{(S_B - S_A)_{мГал} - (g_B - g_A)}{t_B - t_A},$$

где S_B, S_A, t_B, t_A – отсчеты по гравиметру на исходных пунктах в миллигалах и время их взятия.

Наблюдения на пунктах рядовой сети

3) *схема прямого и обратного хода*



$S_A^П, t_A^П$, $S_1^П, t_1^П$, …, $S_M^П, t_M^П$ – отсчеты по гравиметру и временные отсчеты в прямом ходе;

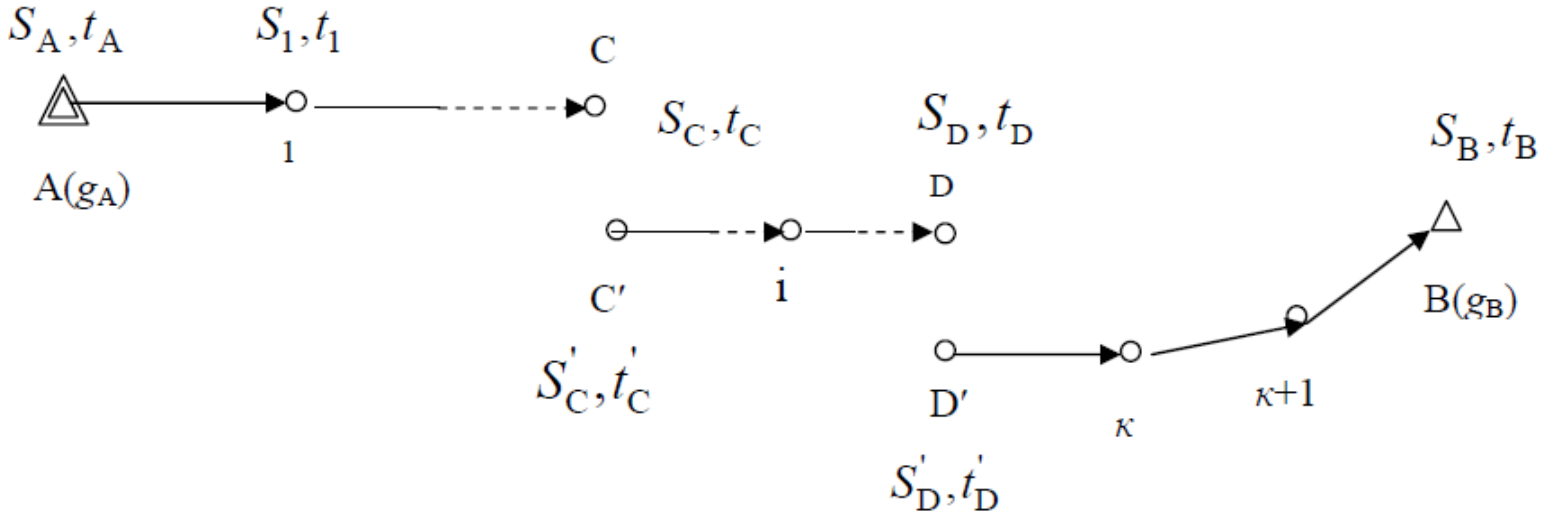
S_A^O, t_A^O , S_1^O, t_1^O , …, S_M^O, t_M^O – отсчеты по гравиметру и временные отсчеты в обратном ходе

Графики этих отсчетов в пределах рейса должны быть параллельными между собой и служат дополнительным контролем линейного характера смещения нуль-пункта используемого в рейсе гравиметра.

Схема применяется только в том случае, если смещение нуль-пункта гравиметра недостаточно линейно и неустойчиво.

Наблюдения на пунктах рядовой сети

Схема прямого хода с разрывами. Используется в труднодоступных районах, когда рейс нельзя выполнить в течение одних суток.



A, B – исходные пункты; C и D – точки, на которых устраивают перерывы в наблюдениях. На точках C и D по гравиметру берут отсчеты с фиксацией соответствующих моментов времени два раза: до перерыва (S_C, t_C, S_D, t_D) и после перерыва (S'_C, t'_C , S'_D, t'_D).

Скорость смещения нуль-пункта гравиметра в этом случае определяется по формуле

$$k = \frac{(S_B - S_A)_{мГал} - (g_B - g_A) - (S'_C - S_C)_{мГал} - (S'_D - S_D)_{мГал}}{(t_B - t_A) - (t'_C - t_C) - (t'_D - t_D)}.$$

Наблюдения на пунктах рядовой сети

В рядовых рейсах часто используют методику разностного нуль-пункта (когда рейс прокладывают двумя гравиметрами), а также по схеме с узловыми точками.

Методика разностного нуль-пункта. Суть этой методики заключается в том, что с одного или нескольких опорных пунктов выполняют рейсы одновременно двумя гравиметрами.

Для каждого гравиметра находят смещение нуль-пункта, используя редкую сеть опорных пунктов. Затем строят график разности скорости смещения нуль-пункта и определяют точки перегиба кривой.

В этих точках образуют дополнительные опорные пункты. Поправку за смещение нуль-пункта гравиметра вводят с учетом дополнительных наблюдений на опорных пунктах.

Узловой метод. Если местная опорная сеть по каким-либо причинам не была создана до начала полевых работ, наблюдения можно вести по схеме, представленной на рис.6

Наблюдения на пунктах рядовой сети

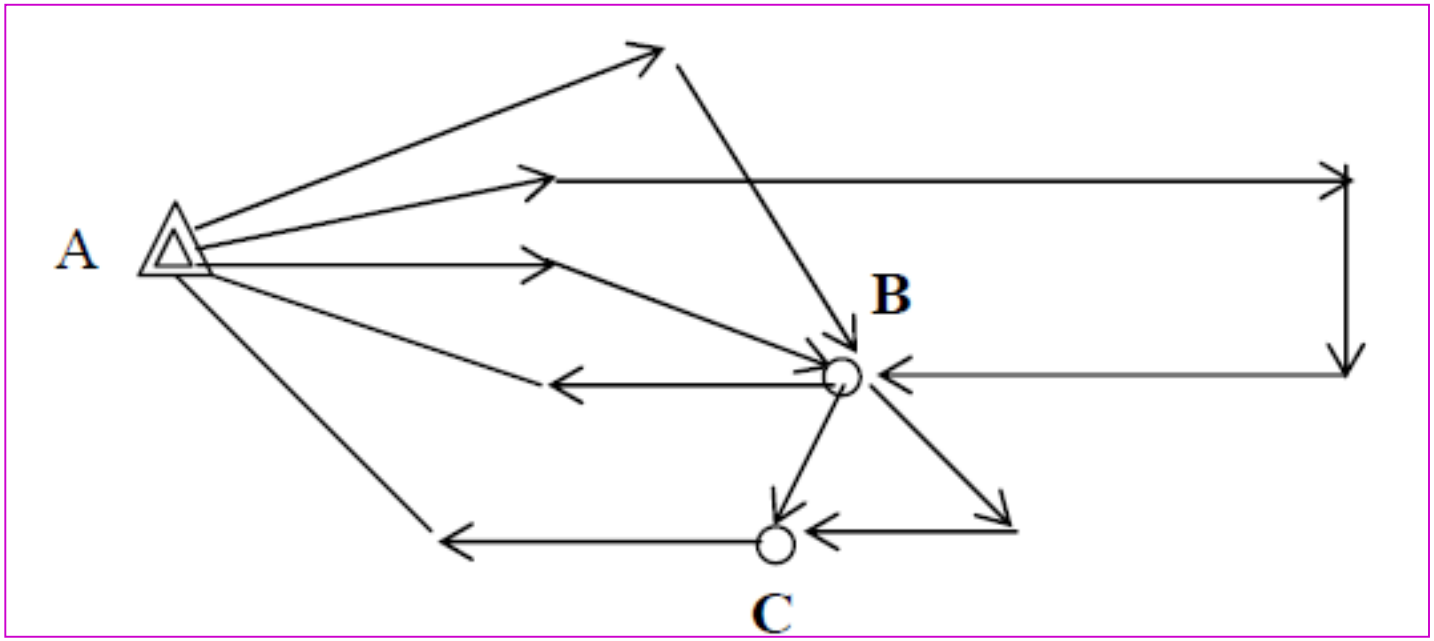


Рис. 6. Схема наблюдения по узловому методу

Точка А является пунктом опорной сети, точки В и С, в которых пересекаются несколько рейсов, – дополнительные опорные или узловые точки.

После завершения полевых работ сеть узловых пунктов уравнивают и в дальнейшем узловые пункты используют как опорные для вычисления поправок за смещение нуль-пункта.