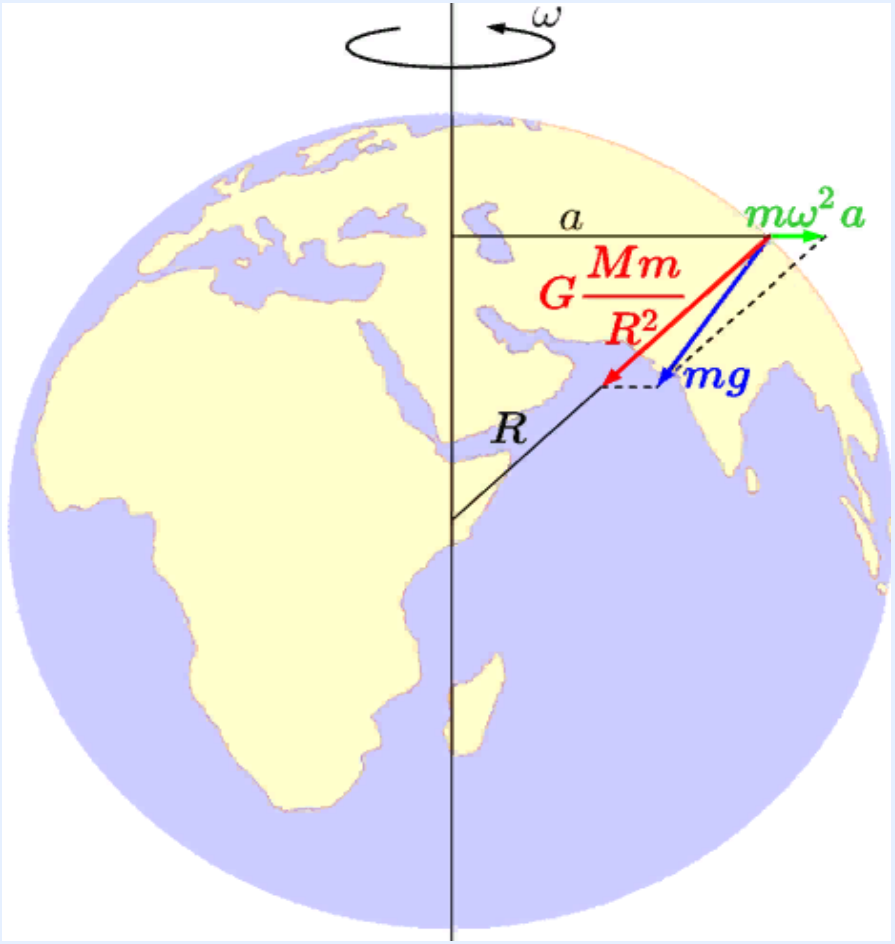
Гравиметрия

Л4. Методы измерения ускорения силы тяжести и вторых производных ее потенциала



Лектор Кенесбаева А.

Содержание

- Методы измерения ускорения силы тяжести и вторых производных ее потенциала
- Результаты современных абсолютных измерений силы тяжести
- Устройство гравиметра

5 ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ВТОРЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

5.1 Методы измерения силы тяжести. Современные абсолютные измерения

В гравиметрии при выводе формул и расчетах обычно принимают единичную массу груза, тогда сила тяжести по величине оказывается равной ее ускорению. Для краткости вместо ускорения силы тяжести принято говорить просто "сила тяжести". При этом, измерению подлежит именно ускорение силы тяжести, а не сама сила тяжести.

Способы измерения силы тяжести основаны на различных физических явлениях, отражающих действие закона всемирного тяготения. Среди них — свободное падение тел, колебания маятника, движение гироскопа, колебания натянутой струны, деформация тел под действием силы тяжести, форма поверхности вращающейся жидкости, левитация проводника в магнитном поле, капиллярный подъём жидкости и другие эффекты. Тем не менее, с развитием измерительной техники оказалось, что достаточно высокую точность

Методы измерения силы тяжести

Современные методы измерения силы тяжести (ускорения силы тяжести) делятся на *динамические и статические*.

Необходимо отметить, что в гравиметрии измеряют ускорение силы тяжести. Однако при выводе формул обычно принимают единичную массу груза, тогда сила тяжести по величине оказывается равной ее ускорению, и для краткости в гравиметрии принято говорить вместо ускорения силы тяжести просто сила тяжести.

В динамических методах наблюдают за движением тела в реальном гравитационном поле.

В статическом методе наблюдают состояние равновесия тела в реальном гравитационном **поле под действием двух сил: силы тяжести и некоторой компенсирующей силы.**

К динамическим методам относятся *маятниковый и баллистический* методы.

Маятниковый метод основан на формуле Гюйгенса, приводимой ранее,

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где T – период колебаний, g – ускорение силы тяжести, l – приведенная длина.

Методы измерения силы тяжести

Баллистический метод основан на уравнении свободно падающего тела

$$S = S_0 + \vartheta_0 t + \frac{g t^2}{2},$$

где S – путь, пройденный свободно падающим телом, So – начальный путь, ϑ_0 – начальная скорость, t – время падения тела.

По видам измерения силы тяжести делятся на *абсолютные и относительные.*

При *абсолютных измерениях* силы тяжести мы получаем ее *полное значение* в точке наблюдения.

Чтобы получить абсолютное значение ускорения силы тяжести, необходимо измерить две величины: длину и время. При *относительных измерениях силы тяжести* мы получаем *ее приращение* между двумя точками. В этом случае достаточно измерить только одну величину (как правило, длину).

Абсолютные измерения ускорения силы тяжести можно выполнить только динамическими методами. С помощью баллистического метода можно получить абсолютные значения ускорения силы тяжести с точностью порядка 0,01 мГал, маятниковым методом – с точностью (0,1 – 0,3) мГал.

Поэтому маятниковый метод в настоящее время применяется для относительных измерений ускорения силы тяжести.

Методы измерения силы тяжести

Баллистический метод – это основной метод абсолютных измерений ускорения силы тяжести.

Исторически он известен раньше маятникового метода, однако наибольшее развитие получил в XX веке после появления возможности измерения длины и времени с высокой точностью.

В настоящее время эти величины определяются с относительной ошибкой порядка 10-9.

Баллистическая установка представляет собой некоторую вакуумную камеру, где свободно падает грузик, для которого с высокой точностью фиксируют *расстояния и время падения.* Затем составляются уравнения из решения которых по методу наименьших квадратов определяется ускорение силы тяжести.

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= S_0 + \vartheta_0 t_1 + \frac{g t_1^2}{2} \\ S_2 &= S_0 + \vartheta_0 t_2 + \frac{g t_2^2}{2} \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ S_n &= S_0 + \vartheta_0 t_n + \frac{g t_n^2}{2} \end{aligned}\right\},$$

Методы измерения силы тяжести

Из современных баллистических установок следует отметить баллистическую установку в Севре (абсолютный гравиметр МБМВ).

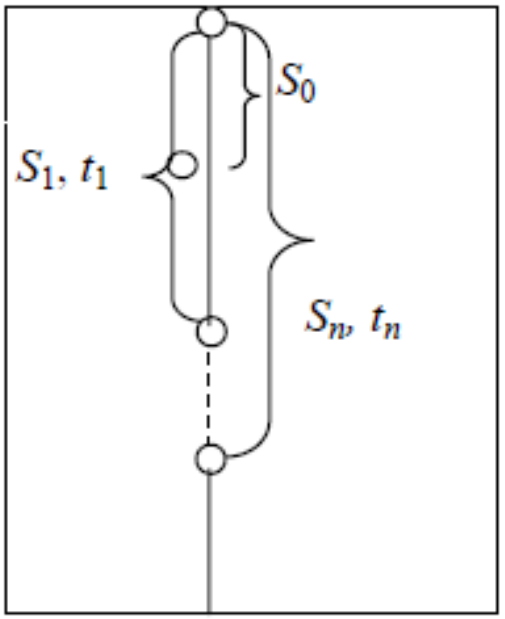
В 70-е годы там выполнялись абсолютные измерения силы тяжести под руководством профессора Сакума.

Ускорения силы тяжести были получены с точностью 0,2 мГал. Эта баллистическая установка используется вплоть до настоящего времени. Сейчас ее чувствительность составляет 2 мкГал.

В 1975-1981 гг. в Международной широтной обсерватории в Мидзусова (Япония) был сконструирован также стационарный абсолютный гравиметр, подобный гравиметру МБМВ (Севр).

Цель создания подобных постоянных станций заключается в установлении и поддержке мировой гравиметрической системы на современном уровне, слежении за долговременными изменениями силы тяжести глобального характера.

В СССР первая баллистическая установка была сконструирована в 1956 году. Ее точность в то время составляла 1,3 мГал.



Методы измерения силы тяжести

На уровне современных мировых требований точности баллистический гравиметр был сконструирован в России в 1970 – 1972 гг. в Институте автоматики и электрометрии Сибирского Отделения АН СССР (ИАЭ СО АН).

В 1975 году этот гравиметр сделали транспортабельным.

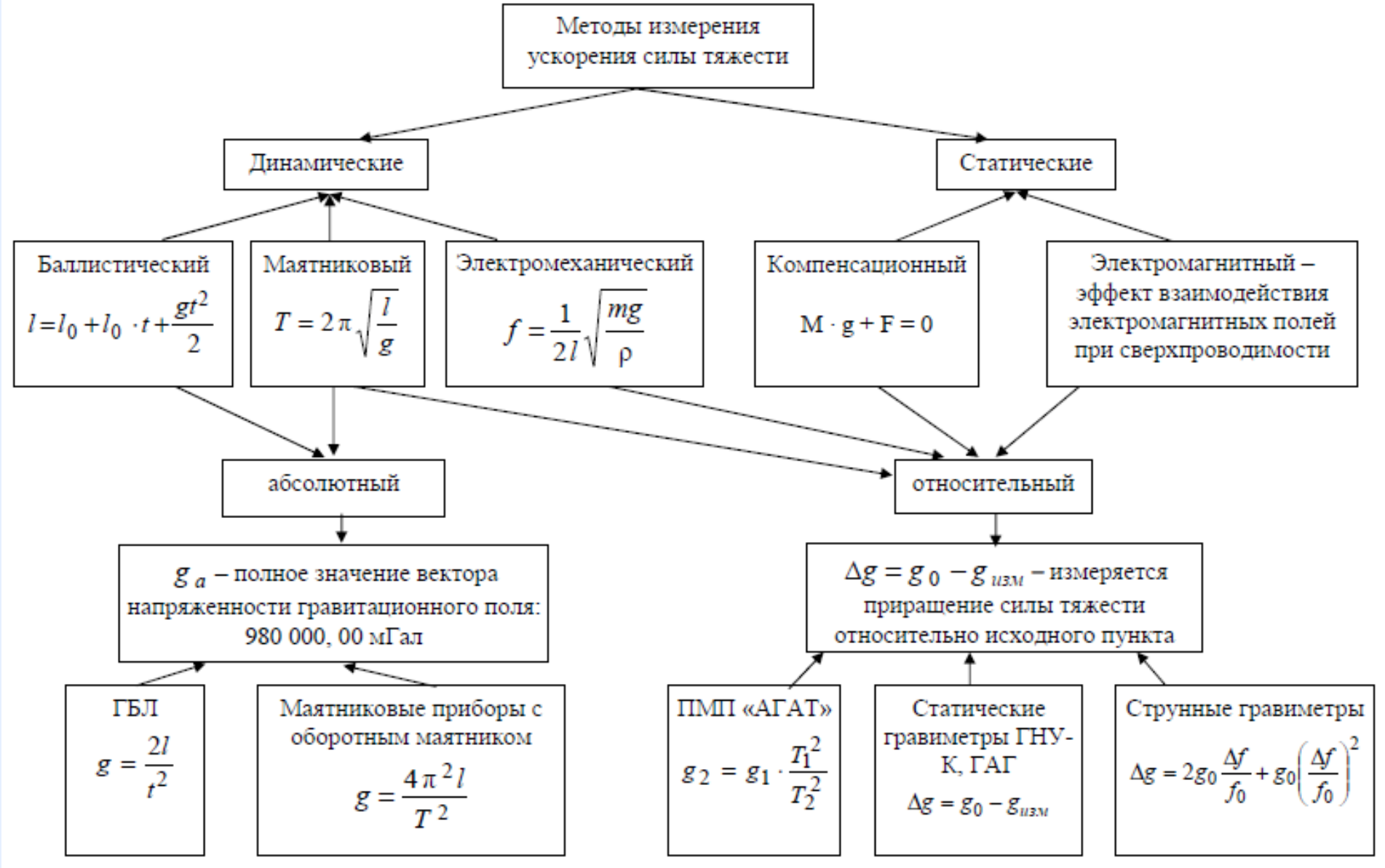
В 1976 – 1979 гг. гравиметр ИАЭ использовался при выполнении измерений ускорений силы тяжести в мировой опорной гравиметрической сети.

По внутренней сходимости точность этих измерений оценивалась величиной порядка (2 – 6) мкГал. Абсолютная точность измерений баллистическим гравиметром в то время составила 20 мкГал, в настоящее время она достигла уже 10 мкГал.

Транспортабельные баллистические гравиметры имеются также в США, Японии, Франции и Китае.

Гравиметрические пункты, на которых выполняются абсолютные измерения ускорения силы тяжести баллистическими гравиметрами, используют как исходную основу при создании мировой опорной гравиметрической сети, а в отдельных государствах и при создании государственной опорной гравиметрической сети.

Методы измерения силы тяжести



УСТРОЙСТВО ГРАВИМЕТРА

Гравиметр – прибор для измерения силы тяжести. Работа гравиметра основана на статическом методе, в котором наблюдают положение равновесия тела, находящегося под действием силы тяжести и силы, принятой за эталонную.

За эталонную силу принимают упругую силу деформации пружин и нитей.

Пружина мен жіптердің деформациясының серпімді күшін эталондық деп қабылдайды.

Устройство, с помощью которого компенсируется действие силы тяжести на тело и ее изменение преобразуется в перемещение тела, называется ***Чувствительный элемент.***

Большинство современных гравиметров являются механическими.

Чувствительный элемент такого гравиметра называется упругой системой, и является главным узлом любого гравиметра.

Существует много типов гравиметров. Все они различаются конструктивными особенностями устройства упругих систем, что влияет на их точность измерений.

Механическая часть у всех гравиметров остается практически неизменной.

Рассмотрим устройство и работу гравиметра наземного узкодиапазонного кварцевого второго класса точности ГНУ-КВ.

УСТРОЙСТВО ГРАВИМЕТРА

Этот гравиметр применяется для детальных разведочных работ.
Погрешность измерения им силы тяжести в рейсах продолжительностью не более 4 часов составляет ±0,03 мГал, порог чувствительности ±0,006 мГал. Вес прибора 4,5 кг.
На внутренней поверхности, на дне и под крышкой футляра укреплены поролоновые амортизаторы, обшитые тканью.
Средняя часть гравиметра помещена во внешний кожух *1*, который представляет собой полый цилиндр из листовой нержавеющей стали диаметром 132 мм с зеркальной внешней поверхностью.

Гравиметр: а) внутренняя часть прибора;
б) общий вид прибора;
в) транспортировочный футляр цилиндрической формы, изготовленный из жести



УСТРОЙСТВО ГРАВИМЕТРА



Внутрь кожуха помещен цилиндр из пенопласта *2*, в который вставляется сосуд Дьюара *3*, а в него плотно входит средняя часть гравиметра *5*. Уплотнение достигается с помощью шерстяного чехла *4*, одеваемого на среднюю часть.
Шерстяной чехол выполняет также роль теплоизолятора и предотвращает соприкосновение металла средней части гравиметра со стеклянными стенками сосуда Дьюара, предохраняя, тем самым от разбиения.

Нижний торец цилиндра внешнего кожуха соединен с массивным основанием из текстолита, на котором по окружности, через 120°, укреплены три установочных винта. На нижней части подъемных винтов укреплены шарнирные круглые подпятники, которые увеличивают площадь опоры гравиметра на грунт.

Типы гравиметров

Модель, страна-изготовитель	Год выпуска	Порог чувствительности,мГал	Точность измерения, мГал	Диапазон безперестройки, мГал	Измерения сперестройкой, мКал	Увеличение окуляра	Высота, мм	Наружный диаметр, мм	Масса, кг	Примечания
ГАК-3М, СССР ГАК-4М, СССР	1953 1958	0,05 0,03–0,05	0,05–0,4 0,05–0,2	100–150 80–120	3 000 3 000	200 200	488 465	188 175	8,5 7,5	ГАК – гравиметр астазированный кварцевый. Первый отечественный астазированный кварцевый гравиметр
ГАК-ПТ, СССР	1960	0,03–0,05	0,05–0,2	100–150	5 000	250	480	180	7,5	ГАК-ПТ – гравиметр астазированный кварцевый, повышенной точности
КВГ-1М, СССР	1961	0,01	0,02–0,08	70–100	3 000	800	390	133	4,2	КВГ – кварцевый высокоточный гравиметр.
ГАК-7Т, СССР ГАК-7н, СССР ГАК-7ш, СССР	1963 1963 1963	0,02 0,03–0,05 0,01–0,05	0,03–0,06 0,04–0,05 0,03–0,06	80–120 80–120 80–100 1 000	5 000 3 000	200 200 200	425–470 425 425	210 210 210	5,0 5,0 5,0	С 1967 по 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–67 выпускался под названием ГР-К2; с 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–73 носит название ГНУ-К2, отличается от ГАК-7Т менее совершенной температурной компенсацией.
ГАГ-2, СССР «Дельта», СССР	1966 1971	0,005 0,01	0,1–0,15 0,06	5 000 80	– 5 000	15 600	450 550	350 × 250 250	25 5,0	
ГР-К-1, СССР «Уорден», США «Шарп», Канада	1972 1948	0,01 0,01 0,01	0,03 0,02–0,08 0,02–0,08	 80 80–100	 5 000	400 600	425–470 290 400	210 120 140	5,0 2,3 4,5	С 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–73 называется ГНУ-К1

Относительные маятниковые измерения и их результаты

Относительные методы позволяют определить только приращения ускорения силы тяжести Δg между гравиметрическими пунктами.

Для вывода Δg сравнивают показания одного и того же прибора на двух пунктах (исходном и определяемом).

При относительных измерениях ускорения силы тяжести достаточно измерить только одну величину: либо длину (например, деформацию пружины), либо время (период или частоту колебаний маятника или струны).

До 30-х годов прошлого столетия относительные измерения выполняли исключительно маятниковым методом.

В последние несколько десятилетий относительные измерения производятся, в основном, статическими гравиметрами, которые значительно проще в обращении, компактнее и удобнее при транспортировке.

Однако маятниковые относительные измерения используются вплоть до настоящего времени, так как они обладают такими важными преимуществами перед статическими гравиметрами, как независимость результатов измерений и их точности от продолжительности гравиметрического рейса, от сложности гравитационного поля и от расстояния и диапазона изменения ускорений силы тяжести между пунктами. Маятниковые относительные измерения очень стабильны и надежны.

Относительные маятниковые измерения и их результаты

В настоящее время маятниковые относительные измерения используются:

1) для создания редкой сети опорных пунктов с целью осуществления контроля измерений статическими гравиметрами и их приведения в единую систему;

2) для эталонирования статических гравиметров.

Маятниковый метод относительных измерений силы тяжести основан на последовательных наблюдениях свободных колебаний одного и того же маятника неизменной приведенной длины на разных пунктах.

Поясним это на примере двух пунктов А и В. Примем А за исходный



Выполним измерения периода колебаний одного и того же маятника вначале на пункте А и получим T_A, а затем на пункте В и получим T_B.

Относительные маятниковые измерения и их результаты

Выполним измерения периода колебаний одного и того же маятника вначале на пункте А и получим *T*А, а затем на пункте В и получим *TB*.

Запишем формулу Гюйгенса для каждого пункта в виде уравнений

$$\left.\begin{aligned} T_{\mathrm{A}} &= 2\pi\sqrt{\frac{l}{g_{\mathrm{A}}}} \\ T_{\mathrm{B}} &= 2\pi\sqrt{\frac{l}{g_{\mathrm{B}}}} \end{aligned}\right\}.$$

Возводя в квадрат и деля первое уравнение на второе, получим

$$\frac{T_{\mathrm{A}}^2}{T_{\mathrm{B}}^2} = \frac{g_{\mathrm{B}}}{g_{\mathrm{A}}},$$

$$g_{\mathrm{B}} = g_{\mathrm{A}} \cdot \frac{T_{\mathrm{A}}^2}{T_{\mathrm{B}}^2}.$$

Относительные маятниковые измерения и их результаты

Маятниковые относительные измерения получили широкое распространение еще в начале XIX века.

Вслед за появлением относительных маятниковых приборов фон Штернека (1887 г.) с 1890 г. по 1950 г. были выполнены обширные работы для создания национальных гравиметрических сетей и связи их с пунктами абсолютных измерений.

В России первые маятниковые измерения выполнены в 1826 – 1830 гг.

знаменитым путешественником Литке (1797 – 1882), гидрографом Рейнеке

и физиком Парротом.

Их результаты использованы при выводах величины сжатия Земли, в том числе в 1884 г. Гельмертом.

Наибольшее развитие маятниковые измерения получили в

Советском Союзе с 1932 г. после выхода в свет постановления о проведении в стране всеобщей гравиметрической (маятниковой) съемки плотностью

1 пункт на 1000 км2.

К 1938 году по программе съемки было определено 8400 маятниковых пунктов. Эта съемка была выполнена в единой Потсдамской системе.

В дальнейшем пункты этой съемки были разделены по точности на три класса: 1 класс – ± 1 мГал; 2 класс – ± 2 мГал; 3 класс – ± 3 мГал.

Относительные маятниковые измерения и их результаты

Из современных маятниковых приборов отметим маятниковый гравиметр «Агат» (ЦНИИГАиК) и ОПВМ ЦНИИГАиК (Москва);

четырехмаятниковый прибор фирмы «Аскания» (Берлин); Кембриджский двухмаятниковый прибор с инварными маятниками и катушкой Гельмгольца; термостатированный двухмаятниковый прибор Обсерватории доминиона (Оттава).

Точность относительных измерений современными маятниковыми

приборами составляет (0,02 – 0,04) мГал.

Маятниковые гравиметры примерно этого класса использовались при создании мировой опорной гравиметрической сети IGSN-71.

К использованию гравиметра «Агат» мы вернемся чуть ниже при рассмотрении государственной гравиметрической сети СССР.

Полезные ссылки

- Кузьмин, В.И. Гравиметрия [Текст]: учеб. пособие / В.И. Кузьмин. – Новосибирск: СГГА, 2011. – 193 с.
- Гравиметрия : учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия»/сост. и общ. ред. Г. А. Шароглазовой. – Новополоцк : ПГУ, 2006 – 196 с.

- https://youtu.be/-iJhJ2LkeR0 **Космическая гравиметрическая миссия Grace**
- https://youtu.be/XIvZmCpWgNA Импорт данных в матлаб, 6