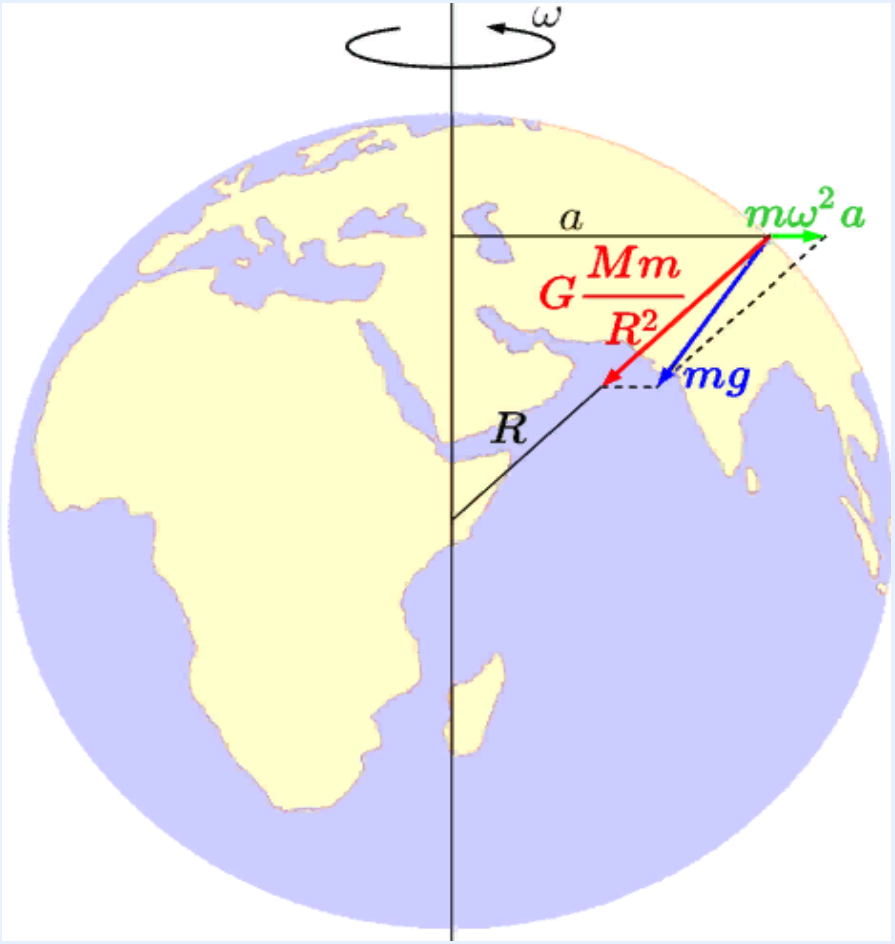
Гравиметрия

Л3. Определение поверхности и гравитационного поля Земли по измерениям силы тяжести



Лектор Кенесбаева А.

Содержание

- Определение поверхности и гравитационного поля Земли по измерениям силы тяжести.
- Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли.
- Задача Стокса и задача Молоденского.
- Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса.

Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли

Определение фигуры и гравитационного поля Земли является основной задачей высшей геодезии. Ее можно решить несколькими методами:

- ✓ астрономо-геодезическим;
- ✓ физическим или гравиметрическим;
- ✓ спутниковым геометрическим;
- ✓ спутниковым динамическим;
- ✓ путем использования наблюдений далеких космических объектов (космических летательных аппаратов, целей на поверхности Луны);
- ✓ комбинацией различных методов.

1. *Астрономо-геодезический метод*. Исходными данными в этом методе служит весь комплекс наземных геодезических измерений, то есть угловых, линейных, нивелирования, а также астрономические определения широт, долгот и азимутов. При решении задачи редуцирования и интерполирования здесь привлекают незначительный объем гравиметрических данных.

Этот метод является старейшим методом изучения фигуры Земли, известным еще с античных времен.

Однако его возможности в изучении внешнего гравитационного поля ограничены.

Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли

2. *Физический или гравиметрический метод.*
Исходными данными в этом методе являются измеренные значения ускорения силы тяжести, по всей поверхности Земли и преобразованные в аномалии силы тяжести. При изучении фигуры Земли его возможности невелики, но он является весьма эффективным при изучении внешнего гравитационного поля Земли, так как позволяет выявлять такие детали поля, которые не позволяет выявлять никакой из других методов. Однако он уступает динамическому спутниковому методу при изучении основных особенностей поля.

3. *Астрономо-гравиметрический метод* объединяет два первых подхода. Исходными данными в нем являются все виды астрономо-геодезических и гравиметрических измерений, а также результаты спутниковых наблюдений.
Этот метод лучше всего подходит для детальных исследований.

4. Спутниковый динамический метод - использует данные, полученные от спутниковых систем навигации (таких как GPS, ГЛОНАСС, Галилео) для измерения гравитационного поля Земли. Этот метод основан на использовании изменений в движении орбиты спутника, вызванных изменениями в гравитационном поле Земли.

В зависимости от поставленных целей применяются разные сочетания перечисленных методов. Например, сочетание спутникового геометрического и спутникового динамического методов, а также сочетание с РСДБ лучше всего подходят для планетарных исследований.

Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли

Рассмотрим физический или гравиметрический метод.

Действительное гравитационное поле (ДГП) Земли
может быть представлено в виде суммы двух полей: нормального (НГП) и аномального (АГП).

ДГП = НГП + АГП

При заданной нормальной Земле НГП является известным, а значит, известны все его характеристики (γ, U, U''). Для того, чтобы определить ДГП, нужно определить все характеристики АГП ($(g-\gamma), \xi, \eta, \zeta, T$).

Из перечисленных характеристик АГП аномалию силы тяжести ($g-\gamma$) можно вычислить по результатам гравиметрических измерений на поверхности Земли.

Задача сводится к определению оставшихся характеристик АГП: ξ, η, ζ, T .

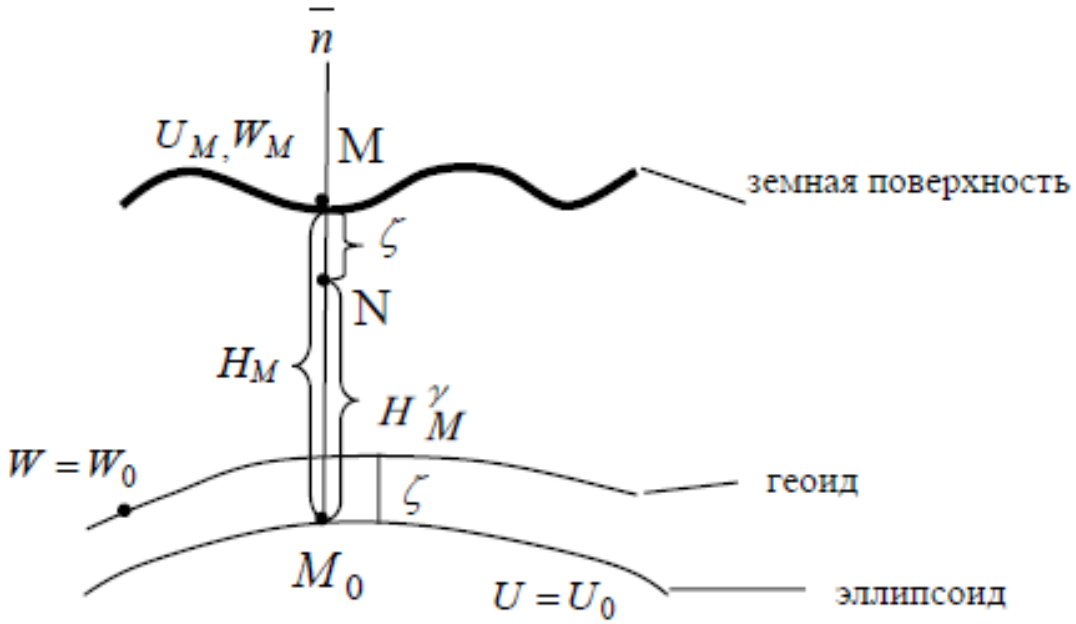
В свою очередь, возмущающий потенциал T связан математически строго со всеми характеристиками АГП.

Связь T *с* $(g-\gamma)$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial H}\right)_M - \frac{1}{\gamma_m}\left(\frac{\partial \gamma}{\partial H}\right)_N \cdot T_M = -(g_M - \gamma_N) - \frac{1}{\gamma_m}\left(\frac{\partial \gamma}{\partial H}\right)_N \cdot (W_0 - U_0), \qquad (1)$$

Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли

- ✓ W_0 – потенциал силы тяжести в исходном пункте нивелирования (на поверхности квазигеода);
- ✓ U_0 – потенциал силы тяжести на поверхности эллипсоида;
- ✓ $(g_M - \gamma_N)$ – смешанная аномалия силы тяжести;
- ✓ γ_m – среднее значение нормальной силы тяжести в промежутке от поверхности эллипсоида до поверхности Земли.



W_0 – потенциал силы тяжести в исходном пункте нивелирования (на поверхности квазигеода); U_0 – нормальный потенциал силы тяжести на поверхности эллипсоида; U_M – нормальный потенциал силы тяжести в точке M; W_M – действительный потенциал силы тяжести в точке M.

Исходные данные для определения поверхности и гравитационного поля Земли

– Связь T с составляющими уклонения отвеса гр. ξ и ηгр.

$$\xi_{гр.} = -\frac{1}{\gamma_m (R+H)} \cdot \frac{\partial T}{\partial B};$$

$$\eta_{гр.} = -\frac{1}{\gamma_m (R+H)\cos B} \cdot \frac{\partial T}{\partial L},$$

- ✓ *B, L* – широта и долгота;
- ✓ *R* – радиус кривизны нормального сечения в точке М (часто используют средний радиус Земли);
- ✓ *H* – высота точки наблюдения (геодезическая или нормальная).

– Связь T с аномалией высоты ζ может быть представлена по формуле Брунса

$$\zeta \approx \frac{T}{\gamma}.$$

Из приведенных формул прослеживается следующая *схема решения задачи*:
по результатам гравиметрических измерений определяют возмущающий потенциал T.
Далее определяют оставшиеся характеристики АГП, по их связям с T.
В результате задача определения ДГП практически сводится к определению возмущающего потенциала T.
Определением возмущающего потенциала занимались английский ученый Стокс и советский ученый Молоденский.

Уклонение отвесной линии

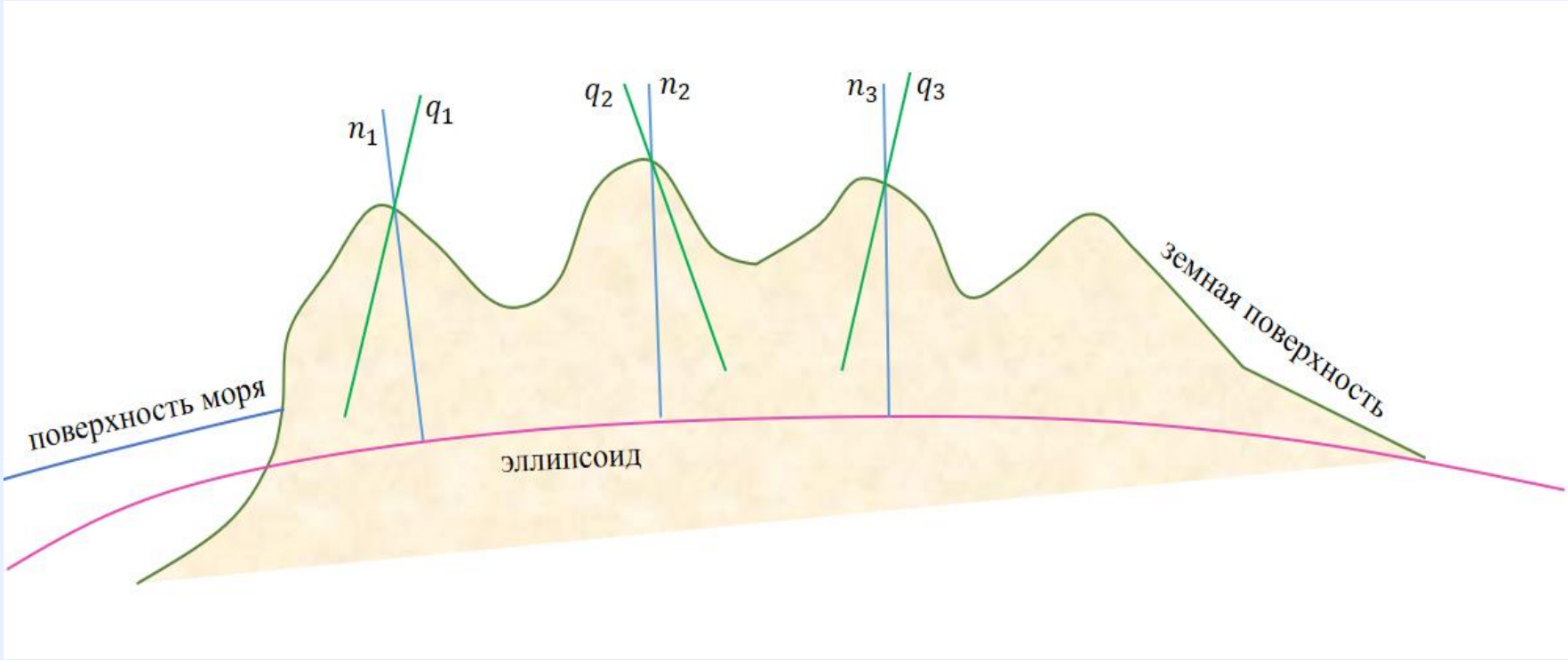


Схема решения задачи по определению гравитационного поля Земли

Возмущающий потенциал ***T*** является гармонической функцией ***f*** во внешнем пространстве относительно физической поверхности Земли.

Гармоническая функция f , в заданной области τ, может быть определена в любой точке этой области, если на поверхности σ, ограничивающей эту область, известно:

- ✓ либо само значение функции f
- ✓ либо значение ее нормальной производной $\partial f/\partial n$
- ✓ либо линейная комбинация этих величин $f+ \alpha\cdot\partial f/\partial n$, (где α – некоторый коэффициент).

Сформулированное положение с тремя условиями составляет основное содержание трех краевых (граничных) задач теории потенциала.

Эти задачи в математической физике решены и при определении возмущающего потенциала T в гравиметрии используют решение третьей краевой задачи.

В качестве граничного условия принимают выражение (1).

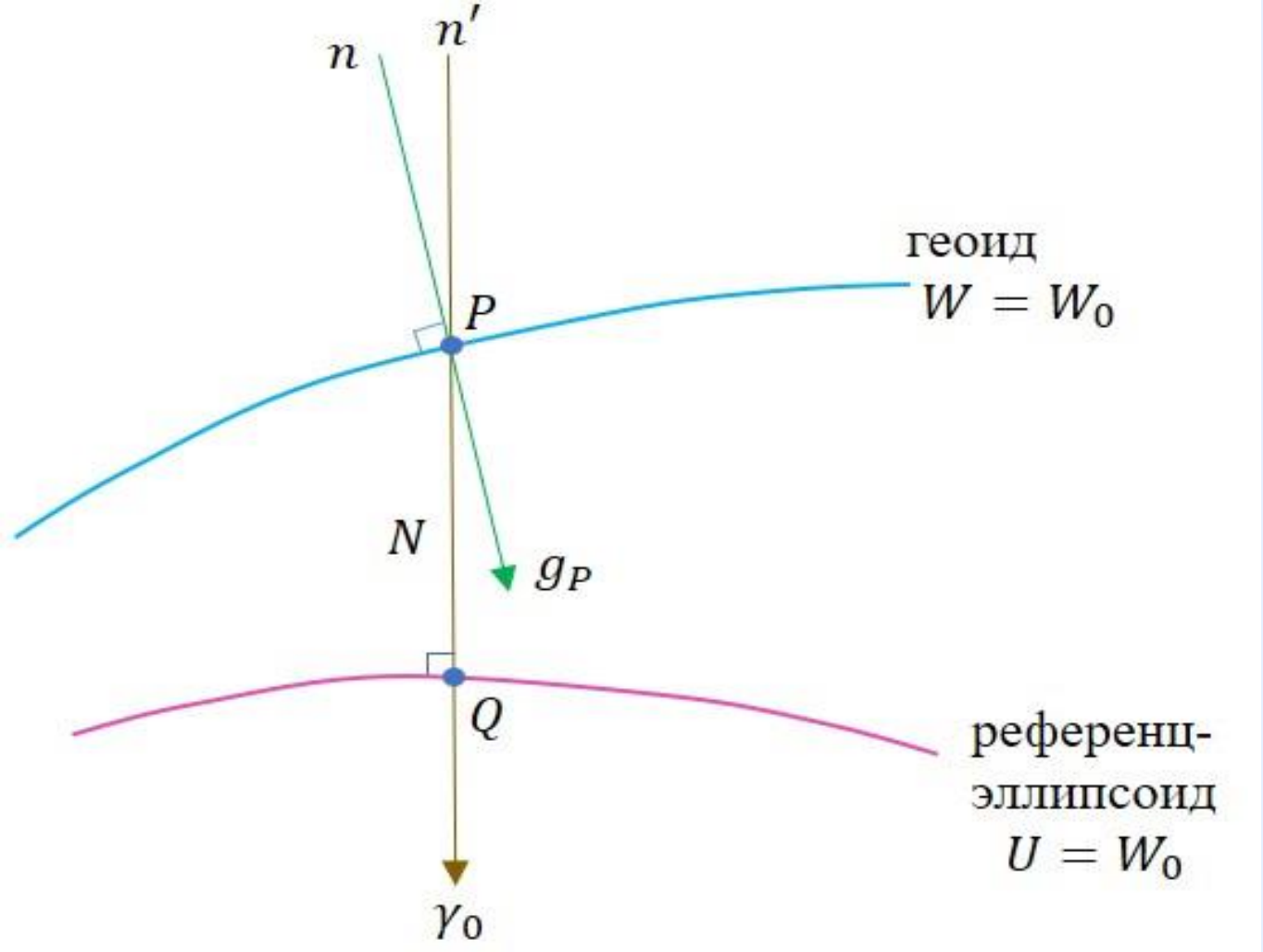
Трудность в том, что теория граничных задач требует знания поверхности, к которой отнесено граничное условие.

Но, наша поверхность это- поверхность Земли, которая сама подлежит определению.

Поэтому задача по определению возмущающего потенциала решается способом приближений **путем отнесения граничного условия к поверхности, заменяющей земную.** При этом выражение для граничного условия (1) существенно упрощается.

По изложенной схеме решали задачу Стокс!! и Молоденский!!

Возмущающий потенциал T= W-U



Решение Стокса по определению возмущающего потенциала

Стокс решил задачу по определению возмущающего потенциала T при следующих допущениях:

1. Физическая поверхность Земли совпадает с уровнем моря и является уровенной.
2. Поверхность геоида $W = W_0$ совпадает с поверхностью сферы радиусом R .
3. Потенциал силы тяжести в исходном пункте нивелирования W_0 равен потенциалу силы тяжести на поверхности эллипсоида U_0 .

При данных допущениях граничное условие (1) в решении Стокса принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial R} + \frac{2T}{R} = -(g_M - \gamma_N).$$

Далее Стокс применяет математический аппарат третьей краевой задачи теории потенциала и находит выражение для возмущающего потенциала в виде

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\omega} (g - \gamma) \cdot S(\psi) d\omega,$$

где T – возмущающий потенциал;
$(g - \gamma)$ – аномалия силы тяжести;
$S(\psi)$ – функция Стокса;
ω – поверхность сферы радиусом R.

Решение Стокса по определению возмущающего потенциала

Функция Стокса имеет вид

$$S(\psi) = \operatorname{cosec}\frac{\psi}{2} - 6\sin\frac{\psi}{2} + 1 - 5\cos\psi - 3\cos\psi \cdot \ln(\sin\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\psi}{2}),$$

ψ −сферическое расстояние от текущей точки до точки, в которой определяется возмущающий потенциал.

Формула Стокса по определению аномалии высоты выглядит так:

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\omega}(g-\gamma)\cdot S(\psi)\,d\omega\,.$$

Формулы для составляющих уклонения отвеса в меридиане и в первом вертикале были выведены голландским ученым Венинг-Мейнесом и носят его имя:

$$\xi_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\cos A\,d\psi\,dA;$$

$$\eta_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\sin A\,d\psi\,dA,$$

где A – азимут направления на текущую точку;

$Q(\psi)$ − функция Венинг-Мейнеса вида:

Решение Стокса

$Q(\psi)$ – функция Венинг-Мейнеса вида:

$$Q(\psi)=\frac{1}{2\gamma\sin 1''}\cos^2\frac{\psi}{2}\left[\operatorname{cosec}\frac{\psi}{2}+12\sin\frac{\psi}{2}-32\sin^2\frac{\psi}{2}+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{1+\sin\frac{\psi}{2}}-12\sin^2\frac{\psi}{2}\cdot\ln\left(\sin\frac{\psi}{2}+\sin^2\frac{\psi}{2}\right)\right].$$

Стокс рассматривал интегральную формулу для возмущающего потенциала T , как формулу, которая определяет возмущающий потенциал в точках геоида, а поверхность уровенного эллипсоида ($U = U_0$) только как отсчетную поверхность, относительно которой определяется поверхность геоида.

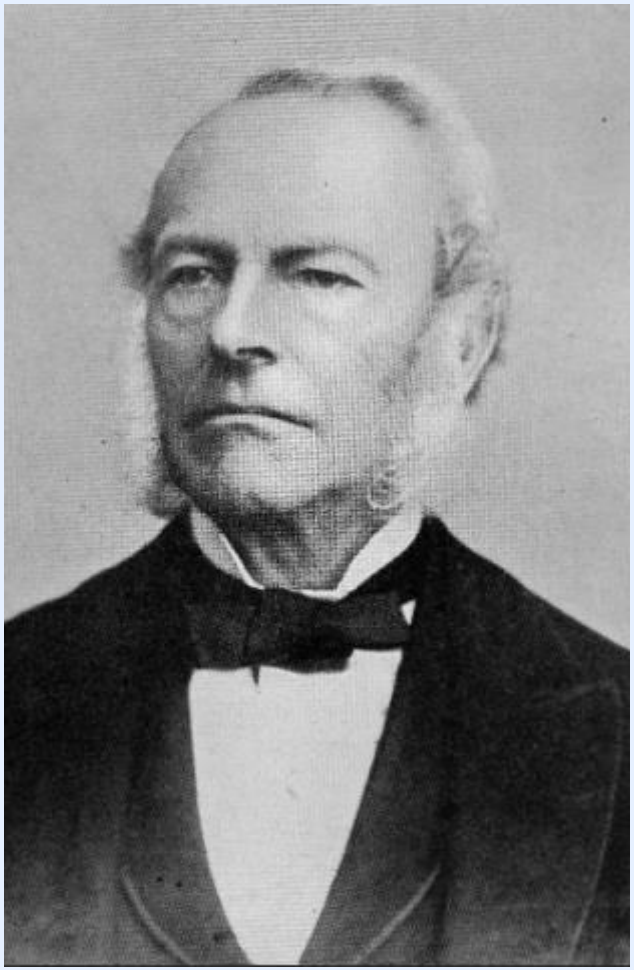
Заменяя поверхность Земли поверхностью геоида, Стокс понимал, что отступает от своей собственной теории.

Согласно этой теории поверхность должна охватывать все притягивающие массы и являться по отношению к ним внешней, а поверхности геоида, наоборот находится под материками.

К тому же, сила тяжести измеряется на поверхности Земли, а не на поверхности геоида.

Стокс и его последователи надеялись, устранить эти недостатки путем введения уточняющих поправок за редуцирование силы тяжести с поверхности Земли на поверхность геоида, а также за перенесение масс материков внутрь поверхности геоида.

Сэр Джордж Габриéль Стокс



Сэр **Джордж Габриéль Стокс** (*Sir George Gabriel Stokes*; 1819 — 1903) английский математик, механик и физик-теоретик ирландского происхождения.

Работал в Кембриджском университете, внёс значительный вклад в гидро- и газодинамику (уравнения Навье - Стокса), оптику и математическую физику.

Член Лондонского королевского общества (1851), его секретарь в 1854—1885 гг. и президент в 1885—1890 гг.

Работы Стокса относятся к теоретической механике, гидродинамике, теории упругости, теории колебаний, оптике, математическому анализу и математической физике[1].

С 1849 по 1903 годы Джордж Стокс переизбирался почётным Лукасовским профессором в Кембриджском университете.

За достижения в области исследования света в 1852 году Стокс получил медаль Румфорда от Королевского Общества, а в 1893 медаль Копли. В 1889 году получил дворянский титул баронета.

Был членом многих иностранных академий, в том числе Парижской академии наук[11][15] и Военно-медицинской академии в Петербурге.

В честь него названа единица измерения вязкости в системе СГС, кратер на Луне и кратер на Марсе, минерал стокезит.

М. С. Молоде́нский



Михаил Сергеевич Молоде́нский (1909—1991) — советский геофизик, гравиметрист и геодезист. Родился 3 (16 июня) 1909 года в Туле (по другим данным — в Епифани), окончил в 1932 году МГУ, после чего работал в ЦНИИГАиК. С 1946 года — в Геофизическом институте АН СССР, с 1956 года — в ИФЗАН.

Разработал теорию использования измерений гравитационного поля Земли для целей геодезии. Предложил метод астрономо-гравиметрического нивелирования, новый метод определения фигуры Земли. Сконструировал первый в СССР пружинный гравиметр. Молоденскому принадлежат также труды по исследованию упругих свойств Земли и земного ядра.

Сталинская премия второй степени (1946) — за научный труд «Основные вопросы геодезической гравиметрии» (1945).

Сталинская премия третьей степени (1951) — за коллективную разработку и внедрение пружинных гравиметров для геофизической разведки

Ленинская премия (1963) — за создание методов определения гравитационного поля, фигуры Земли и теории земных приливов

Решение Молоденского по определению возмущающего потенциала

Изучив все трудности решения Стокса, российский ученый Молоденский предложил не связываться с фигурой геоида, так как **фигура геоида вообще неопределима** из-за необходимости знания закона детального распределения плотности между поверхностью Земли и поверхностью геоида.

Поэтому он предложил свое решение.

В 1945 году М.С. Молоденский опубликовал свою работу «Внешнее гравитационное поле и фигура Земли», в которой сформулировал и решил проблему определения фигуры Земли без привлечения каких-либо гипотез о внутреннем строении Земли.

Он дал общее решение, из которого решение Стокса получается как первое приближение.

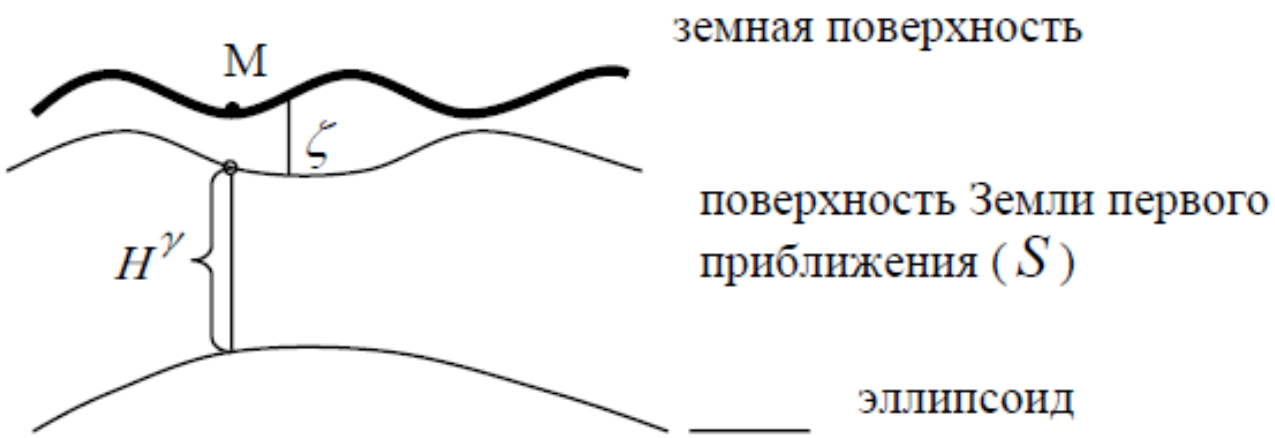
Молоденский показал теоретически, что уровенная поверхность геоида, проходящая внутри масс, неопределима и решил задачу для физической поверхности Земли, на которой фактически производятся все гравиметрические и геодезические измерения и для которой определяется аномалия силы тяжести ($g - \gamma$).

Граничное условие у Молоденского имеет практически такой же вид, как и в задаче Стокса

$$\frac{\partial T}{\partial n} - \frac{T}{\gamma}\frac{\partial \gamma}{\partial n} = -(g_M - \gamma_N).$$

Решение Молоденского по определению возмущающего потенциала

Отличие заключается в том, что и возмущающий потенциал T , и нормаль n , и аномалии силы тяжести отнесены не к геоиду, а к некоторой кусочно-непрерывной поверхности S , названной Молоденским ***поверхностью Земли первого приближения***. Эту поверхность образует система нормальных высот $H\gamma$, отложенных от нормального эллипсоида.



Аномалия ($g_M - \gamma_N$) – смешанная аномалия, в которой g отнесено к поверхности Земли, а γ – к точкам поверхности Земли первого приближения.

Молоденский доказал, **что замена реальной поверхности Земли на поверхность Земли первого приближения не влияет на конечную строгость результата.**

Решение Молоденского по определению возмущающего потенциала

Решение краевой задачи М.С. Молоденский находит, представляя возмущающий потенциал T через потенциал простого слоя плотности μ и принимая за простой слой - слой, расположенный между эллипсоидом и поверхностью Земли первого приближения:

$$T = \iint_S \frac{\mu}{r} dS$$

Находя производную от T по направлению координатной линии:

$$\frac{dT}{dn} = \frac{\partial}{\partial n} \iint_S \frac{\mu}{\rho} dS$$

и учитывая разрыв производной простого слоя при пересечении через поверхность S, Молоденский получает интегральное уравнение для сферической отсчетной поверхности, решение которого представляется рядом

$$\zeta = \frac{1}{\gamma} \sum_{\kappa=0}^{\infty} T_\kappa .$$

T_0 совпадает с решением Стокса. Поэтому решение Стокса в современной научной литературе называют нулевым приближением к решению Молоденского.

Решение Молоденского по определению возмущающего потенциала

Решение Молоденского получилось следующее:

$$T = \frac{R}{4\pi}\iint_{\omega}(g - \gamma + \delta g)\cdot S(\psi)\,d\omega\,.$$

Определяемые по Молоденскому характеристики аномального гравитационного поля ξ , η, ζ находятся по формулам

$$\left.\begin{aligned}\xi_{гр.} &= \xi_0 + \delta\xi_1 + \delta\xi_2 \ldots \\ \eta_{гр.} &= \eta_0 + \delta\eta_1 + \delta\eta_2 \ldots \\ \zeta_{гр.} &= \zeta_0 + \delta\zeta_1 + \delta\zeta_2 \ldots\end{aligned}\right\},$$

ξ_0 ,η_0 ,ζ_0 – полностью совпадают с решением Стокса, дальше идут уточняющие поправки $\delta\xi i$,$\delta\eta i$,$\delta\zeta i$.

Решение Молоденского является строгим. Согласно Молоденскому для определения возмущающего потенциала необходимо и достаточно знать смешанные аномалии силы тяжести на всей поверхности Земли, то есть наличие мировой гравиметрической съемки позволяет строго решить задачу по определению внешнего гравитационного поля Земли.

Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

Российский ученый Молоденский создал строгую теорию для определения возмущающего потенциала, а значит и вычисления составляющих уклонения отвеса и аномалий высот.

Однако на практике методика вычисления этих величин по формулам строгой теории пока недостаточно отработана, в частности, из-за наличия белых пятен в мировой гравиметрической съемке.

Поэтому в практической деятельности обычно используют приближенные формулы Венинг-Мейнеса и Стокса, полученные согласно решению Стокса.

Практическое применение формул Стокса и Венинг-Мейнеса.

Обратимся к формулам Стокса (1) и Венинг-Мейнеса (2).

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\omega}(g-\gamma)\cdot S(\psi)\,d\omega\,. \quad (1),$$

$$\xi_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\cos A\,d\psi\,dA;$$

$$\eta_{гр.} = -\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{2\pi}(g-\gamma)\cdot Q(\psi)\sin A\,d\psi\,dA, \quad (2)$$

Вид формул интегральный. Однако интегрирование по этим формулам не может быть выполнено аналитически, так как подынтегральная функция в нашем конкретном случае не является непрерывной, потому что в нее входят аномалии силы тяжести, которые могут быть определены только на гравиметрических пунктах, то есть в дискретных точках земной поверхности. Поэтому интегрирование по формулам Венинг-Мейнеса и Стокса выполняют численным методом.

Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

В численном интегрировании знак интеграла заменяется суммой.

Для этого площадь в пределах интегрируемой области (в нашем случае земная поверхность) делится на элементарные участки (например, трапеции 10′×15′), затем вычисляются значения подынтегральной функции для каждого элементарного участка и производится суммирование по всей площади.

На практике численное интегрирование по формулам Стокса и Венинг-Мейнеса выполняется с помощью круговой палетки Еремеева.

Эта палетка охватывает нулевую и ближнюю зоны (нулевая зона от 0 до 5,0 км, ближняя – от 5 до 48,5 км, иногда от 5 до 100 км).

Палетка Еремеева состоит из восьми зон и шестнадцати секторов.

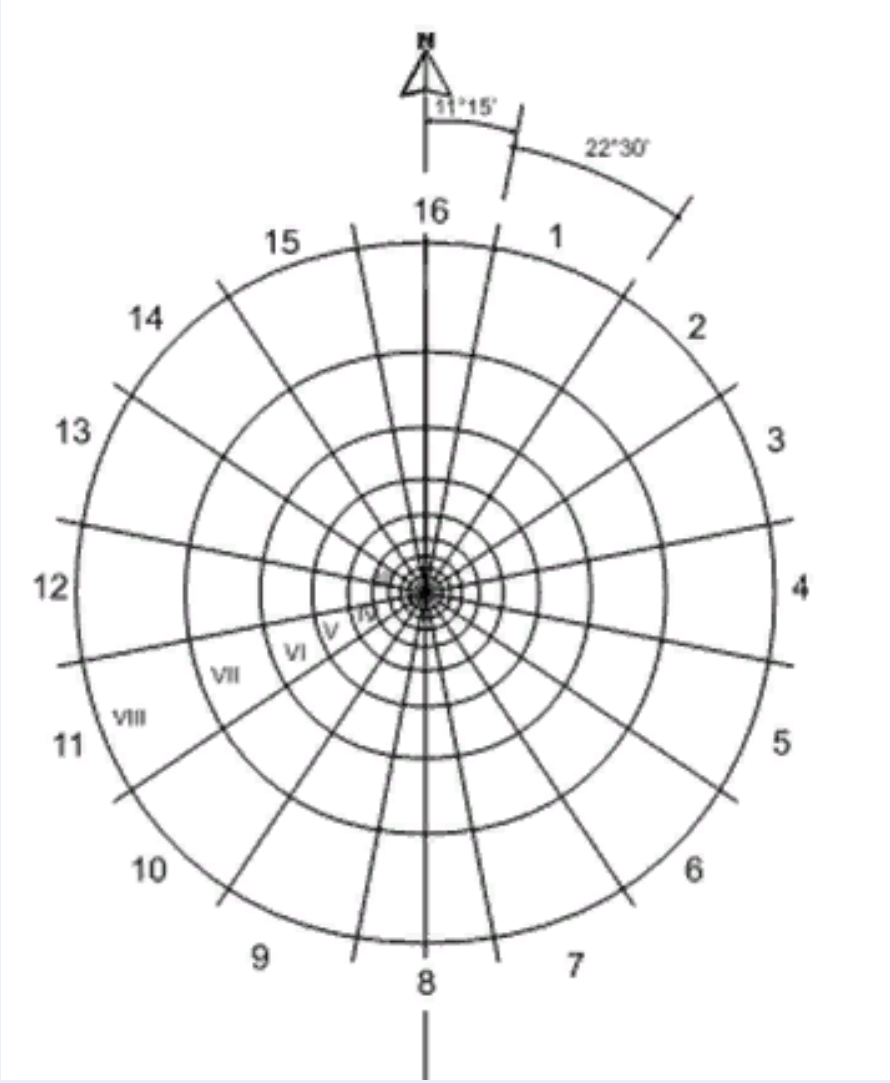
Каждое отделение палетки принимается как элементарный участок интегрирования, в котором определяется по гравиметрической карте среднее значение аномалии силы тяжести для участка, а затем по формулам Стокса и Венинг- Мейнеса, преобразованным для численного интегрирования, вычисляются составляющие характеристики гравитационного поля ξ, η, ζ .

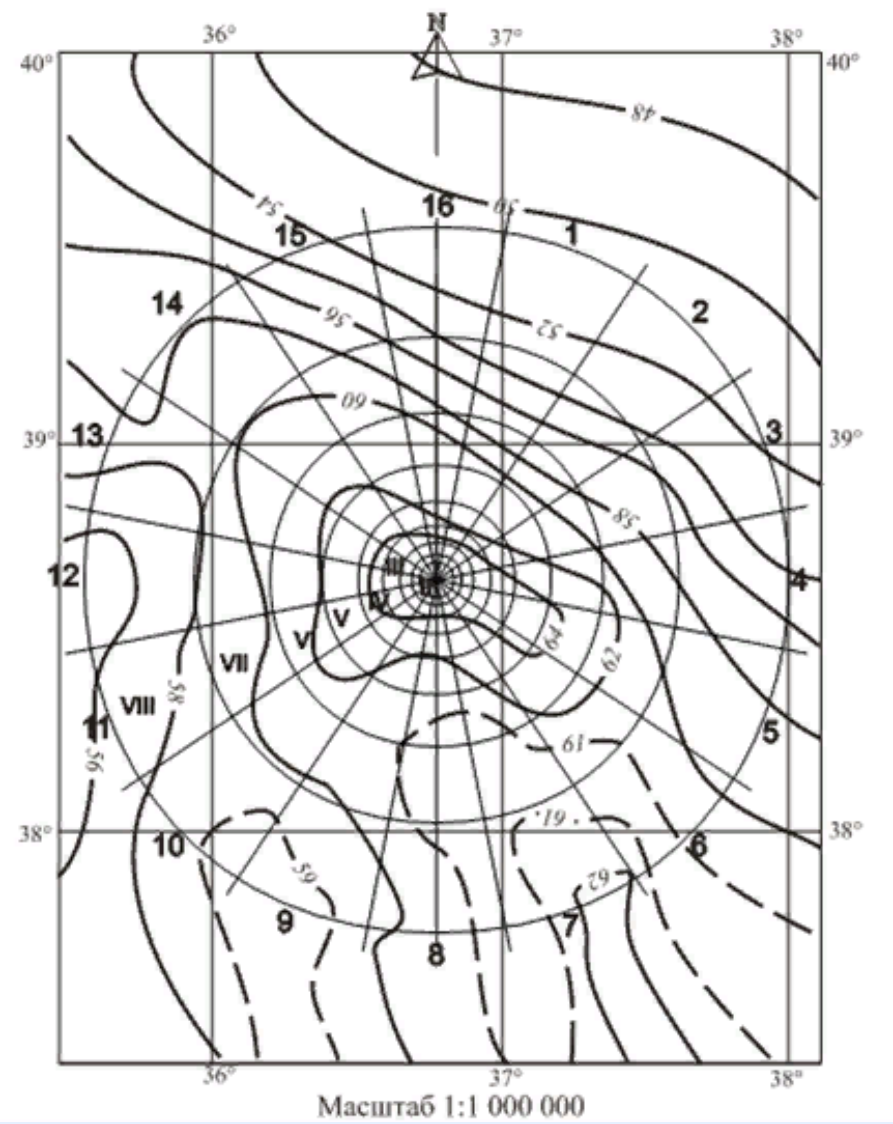
Запишем указанные формулы для палетки Еремеева:

– для нулевой зоны (от 0 до 5 км):

$$\begin{Bmatrix} \xi''_{(0-5)} \\ \eta''_{(0-5)} \end{Bmatrix} = -0,02628 \cdot \sum_{k=2n}^{16} \Delta g_k \begin{Bmatrix} \cos A_k \\ \sin A_k \end{Bmatrix}, \qquad (3)$$

Палетка Еремеева и Фрагмент гравиметрической карты с палеткой





Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

где ξ(″0−5) , η(″0−5)– составляющие уклонения отвеса в меридиане и в первом вертикале, вызванные влиянием аномальных масс, расположенных в центральной зоне;

Δ *go* – значение аномалии силы тяжести на пункте, для которого мы вычисляем составляющие уклонения отвеса и аномалию высоты,

Δ *gk* – среднее значение аномалии силы тяжести нулевой зоны четного сектора, *n* =1,2……8.

– ближние зоны (от 5 до 100 км):

$$\begin{Bmatrix} \xi''_{(5-100)} \\ \eta''_{(5-100)} \end{Bmatrix} = -0,005 \cdot \sum_{k=2n}^{16} \sum_{i=1}^{VIII} \Delta g_{ki} \begin{Bmatrix} \cos A_k \\ \sin A_k \end{Bmatrix}, \qquad (4)$$

где ξ (″5−100) , η(″5−100) – значения составляющих уклонения отвеса в меридиане и в первом вертикале, вызванные влиянием аномальных масс ближних зон.

$$\xi^{(м)}_{(5-100)} = 15 \cdot (\sum_{1}^{16} \Delta g_{Ik} + 22 \sum_{1}^{16} \Delta g_{IIk} + 32 \sum_{1}^{16} \Delta g_{IIIk} + 47 \sum_{1}^{16} \Delta g_{IVk} + 69 \sum_{1}^{16} \Delta g_{Vk} + \qquad (5)$$

$$+ 101 \sum_{1}^{16} \Delta g_{VIk} + 149 \sum_{1}^{16} \Delta g_{VIIk} + 219 \sum_{1}^{16} \Delta g_{VIIIk}) \cdot 10^{-5};$$

Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

$$\left.\begin{aligned} \xi_{0-100} &= \xi_{0-5} + \xi_{5-100} \\ \eta_{0-100} &= \eta_{0-5} + \eta_{5-100} \\ \zeta_{0-100} &= \zeta_{0-5} + \zeta_{5-100} \end{aligned}\right\}. \qquad (6)$$

Зоны, расположенные от пункта наблюдения далее 100 км, называются дальними зонами.

Порядок вычисления по формулам (3) – (6) следующий:

- центр круговой палетки Еремеева совмещается с центром геодезического пункта, нанесенным на гравиметрическую карту; ориентируют палетку по меридиану на север;
- выбирают среднее значение аномалий силы тяжести для каждого
- отделения палетки, расположенного на пересечении сектора и зоны (для
- центральной зоны – только для четных секторов);
- производится вычисление по формулам в специальной таблице.

Вычисленные значения ξ и η подставляют в формулу для вычисления поправок за уклонение отвесных линий в результаты геодезических измерений.

Формулы Стокса и Венинг-Мейнеса дают удовлетворительные результаты только для пунктов, расположенных на равнине. Уклонение отвеса по ним на равнине получается с точностью (0,3 – 0,4)″, в горах – с точностью (1,0 – 1,4)″.

Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

Чтобы в горах получить такую же точность, как и на равнине, необходимо учесть влияние топографических масс на аномалии силы тяжести.

В простейшем случае **это достигается путем использования метода косвенной интерполяции аномалий в свободном воздухе через аномалии Буге.**

Поле аномалий Буге имеет плавный характер, что делает более правомерной линейную интерполяцию этих аномалий между гравиметрическими пунктами, а значит, повышает точность составления гравиметрических карт. В этом случае мы используем формулы Стокса и Венинг- Мейнеса в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \xi_{гр.} &= -\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}((g-\gamma)_Б + 2\pi f\,\delta H)\cdot Q(\psi)\cos A\,d\psi\,dA \\ \eta_{гр.} &= -\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}((g-\gamma)_Б + 2\pi f\,\delta H)\cdot Q(\psi)\sin A\,d\psi\,dA \end{aligned}\right\}$$

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\omega}((g-\gamma)_Б + 2\pi f\,\delta \mathrm{H})\cdot S(\psi)\,d\omega\,.$$

Дальше используют два типа карт: гравиметрическую карту в аномалиях Буге и гипсометрическую карту, то есть карту рельефа.

Современная методика вычисления аномалий высот и уклонений отвеса

Затем переходят к численному интегрированию с использованием палетки Еремеева: снимают с гравиметрической карты аномалии Буге, а с гипсометрической карты – средние значения отметки (H) в каждом отделении палетки, которые умножают на $2\pi f \delta$.

Далее по приведенным выше формулам вычисляются значения ξ , η и ζ отдельно по гравиметрическим картам и от дельно по гипсометрическим картам.

Окончательные искомые величины получают как суммы:

$$\xi = \xi_{Б} + \xi_{гипс.};$$

$$\eta = \eta_{Б} + \eta_{гипс.};$$

$$\zeta = \zeta_{Б} + \zeta_{гипс.}$$

Однако в высокогорных районах вместо аномалий Буге желательно все же использовать топографические аномалии.

Сравнение гравитации планет Солнечной системы

Если принять вес тела на Земле равным 65 килограммам, а земную гравитацию за 1, то гравитация на других планетах Солнечной системы и вес этого тела на их поверхности будут следующими:

Планета	Гравитация на её поверхности	Вес тела в килограммах
Солнце	27,9	1 813,5
Меркурий	0,38	24,7
Венера	0,9	58,5
Земля	1	65
Марс	0,38	24,7
Юпитер	2,64	171,6
Сатурн	1,16	75,4
Уран	1,17	76,05
Нептун	1,2	78
Плутон	0,06	3,9

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.
- http://univerhelper.ru/vish_geod/vychislenie-uklonenij-otvesnyh-linij-i-vysoty-kvazigeoida-metodom-chislennogo-integrirovanija-po-gravimetricheskoj-karte/ Палетка Еремеева
- https://ok.ru/video/40718830194 Гравитационные волны
- **https://youtu.be/tY4wzIUzw8w Черные дыры - тайны космоса**