

Геофизические методы
поисков и разведки
месторождений полезных
ископаемых

Лекция 3

Гравиразведка (часть 1)

Силы гравитации как основа формирования Солнечной системы

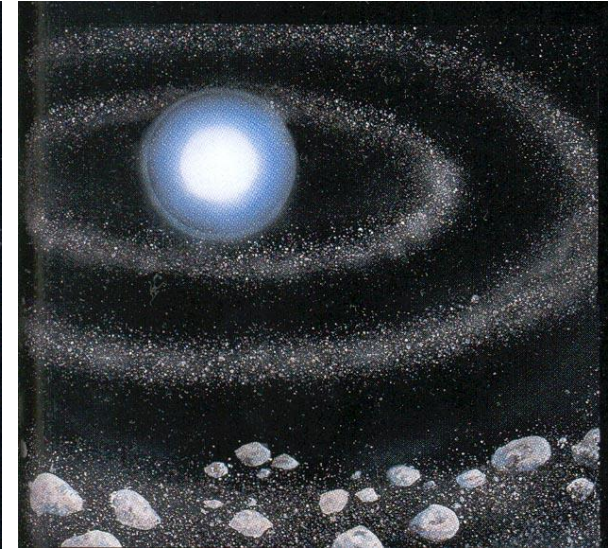
Газопылевое облако



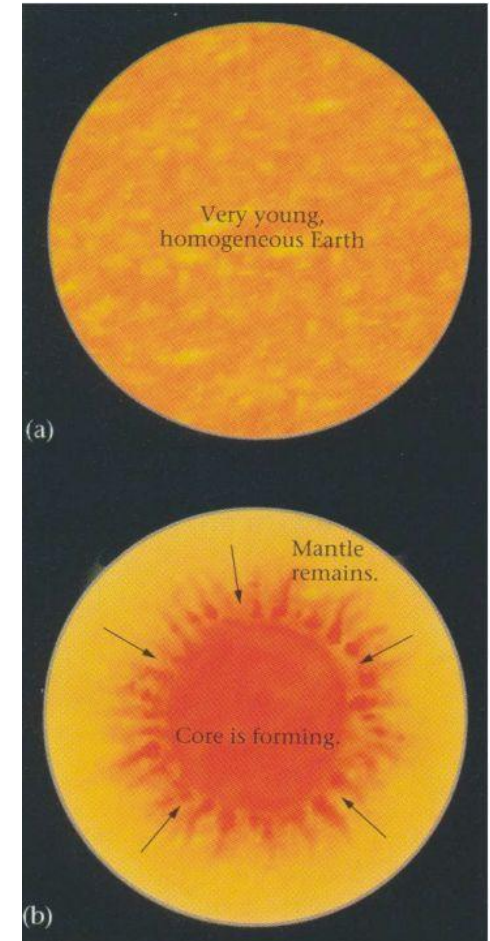
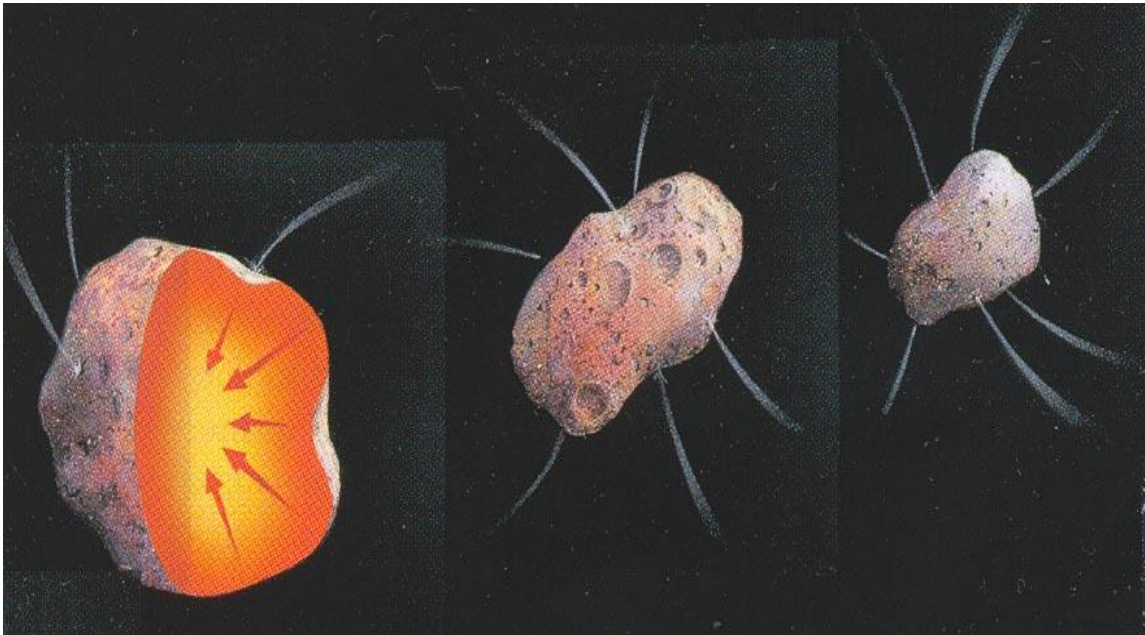
Солнечная нибула



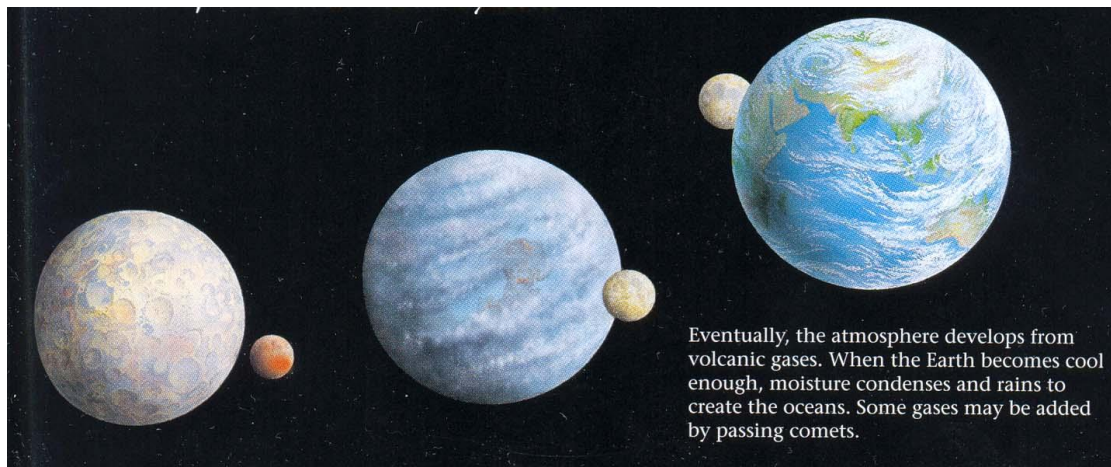
Солнечная система



Силы гравитации как основа формирования Земли и ее расслоения на оболочки



Роль сил гравитации в образовании Луны



- **Гравиметрия изучает поле силы тяжести**



- Гравиразведка основана на изучении пространственный изменений поля силы тяжести, которые обусловлены различиями в плотности горных пород и руд.

- По закону Ньютона две точечные массы m_1 и m_2 притягивают друг друга с силой f .

где: k – гравитационная постоянная

$$\text{СГС: } k = 6.673 \cdot 10^{-8} \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{с}^2}$$

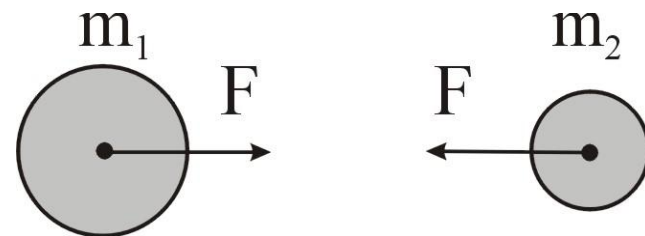
$$\text{СИ: } k = 6.673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}$$

В гравиметрии изучается не сила тяжести, а **напряженность поля силы тяжести** – сила притяжения, действующая на единичную массу = ускорению, придаваемому этой силой единичной массе $m=1$.

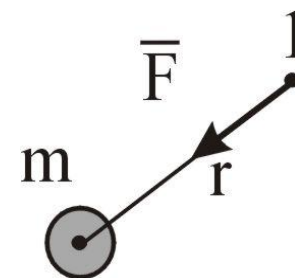
В гравиметрии «**напряженность поля с.т.**» называется «**силой притяжения**», «**силой тяжести**» или «**притяжением**».

Т.о. «**сила притяжения**» - вектор, направленный от притягиваемой точки с массой ($m=1$) к притягивающей точке.

Сила ньютонова притяжения



$$f = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



$$F = k \cdot \frac{m}{r^2}$$

Единицы поля силы тяжести

Единицы силы:

СИ – ньютон = $кг \times м/с^2$

СГС – дина = $г \times см/с^2$

Единицы притяжения:

В соответствии с решением XVI Ассамблеи Международного союза по геодезии и геофизики 1971 г. Приняты следующие единицы притяжения:

Гл (галилео) – ускорение, которое приобретает масса 1 кг под действием силы 1 ньютон ($F_{\text{Земли}} = 9.8 \text{ Гл}$),

гал - ускорение, которое приобретает масса 1 г под действием силы 1 дина (1 гал = $1 \cdot 10^{-2}$ Гл)

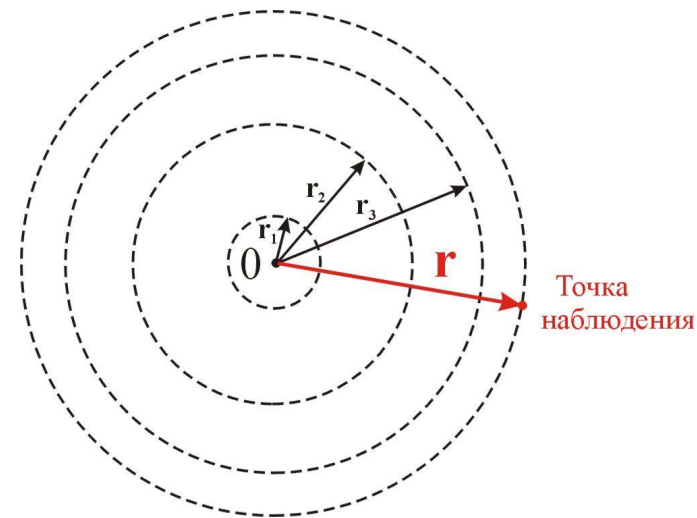
В практике

1 мгал = 10^{-5} Гл = 10^{-5} м/с²

1 мкгал = 10^{-8} Гл = 10^{-5} м/с²

Расчет массы Земли

- При условии сферической симметрии (центр масс каждой сферы помещается в точку 0 расчет сведется:



$$F_{3.нов-ть} = k \frac{m_1}{r^2} + k \frac{m_2}{r^2} + k \frac{m_3}{r^2} + k \frac{m_4}{r^2} = \frac{k}{r^2} (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) = k \frac{M}{r^2}$$

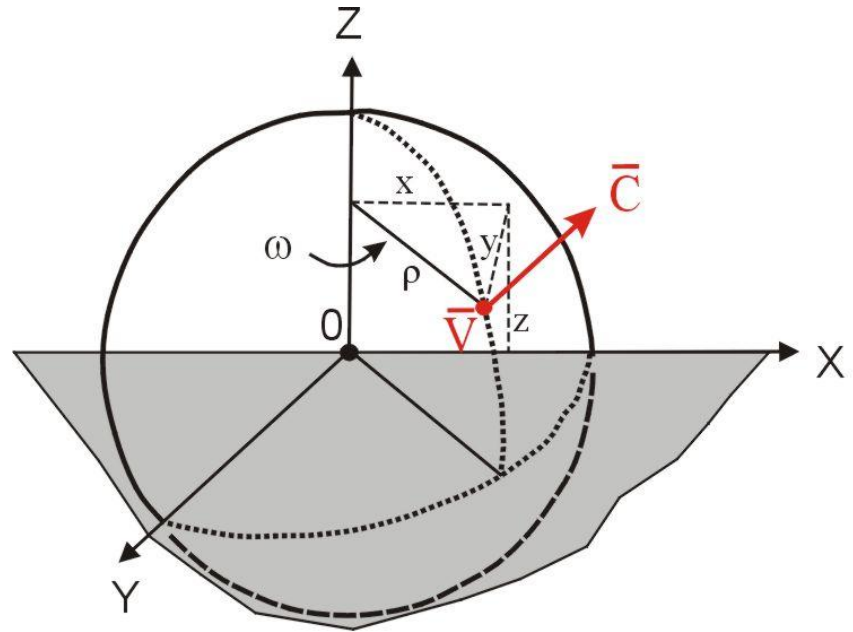
- k – гравитационная постоянная (устанавливается в лабораторных условиях).

$$k = 6.673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \quad F_{3.нов-ть} \approx 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \quad r \approx 6400 \text{ км} = 6.4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$\Rightarrow M = \frac{F}{k} r^2 = \frac{9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{6.673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}} \cdot 6.4 \cdot 6.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^2 = 5.97 \cdot 10^{24} \text{ кг}$$

Центробежная сила и ее притяжение

- Центробежная сила вызывается вращением Земли и направлена перпендикулярно оси ее вращения.
- Центробежное ускорение равно центробежной силе, действующей на единичную массу.
- V - лин. скорость вращения,
- ω - угловая скорость вращения



ω - угловая скорость вращения
 V -линейная скорость вращения $\odot A$

$$C = V^2 / \rho \quad C = \omega^2 \cdot \rho$$

$$\bar{g} = \bar{F} + \bar{C}$$

Форма Земли

- Т.к. Земля не является твердым телом, ее форма определяется соотношением сил

$$\bar{F} \text{ и } \bar{C}$$

I-е приближение – **сфера** ($r_1 = r_2$),

II-е приближение – **эллипсоид**,

$$r_2 - r_1 \approx 20 \text{ км}$$

III-е приближение – **геоид** - эквипотенциальная поверхность, которая расходится с эллипсоидом до 100 м. Эта поверхность выражается формулой Клеро.

$$g_\varphi = g_e (1 + \beta \cdot \sin^2 \varphi)$$

где: g_e - сила тяжести на экваторе,
 g_φ - сила тяжести на широте φ ,
 β - коэффициент.

- Пов-ть геоида совпадает с невозмущенной пов-ю океана «уровень моря». На континентах – мысленно проройте глубокие каналы – ур-нь воды.

Форма: на полюсах g_p увеличивается на 1/549 от g_e .

Вращение: на полюсах g_p увеличивается на 1/288 от g_e .

Суммарно: $g_e \approx 9.78 \text{ м/с}^2$ $g_p \approx 9.83 \text{ м/с}^2$

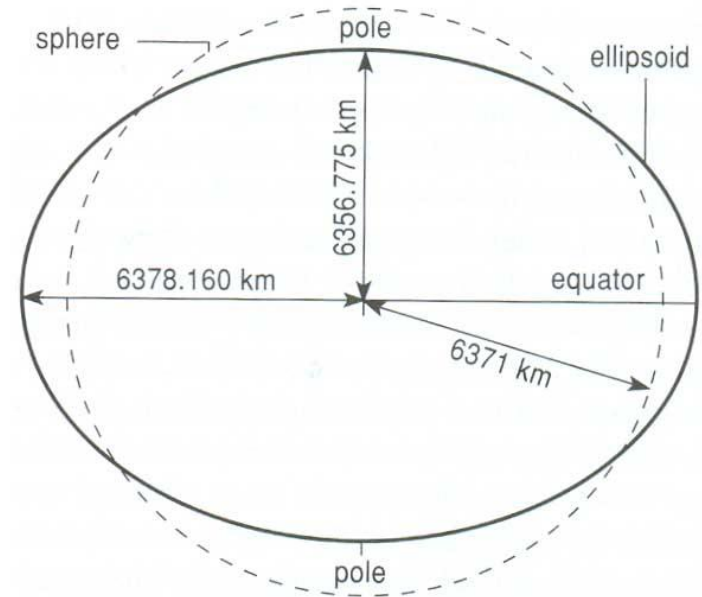
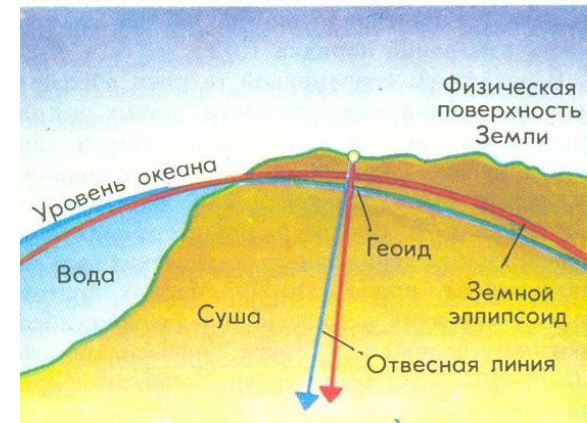


Figure 9.17 Shape of the Earth.

Взаимное положение физической поверхности Земли, геоида и земного эллипсоида.



- В теории гравиметрии введено понятие «потенциал поля силы тяжести» - W .

$$W = U + V = f \cdot \int \frac{dM}{r} + \omega^2 \frac{\rho^2}{2}$$

- Рассмотрим главную составляющую – потенциал ньютонова притяжения однородной сферической Земли в точке А

$$U_A = f \cdot \frac{M}{R}$$

- Возьмем точку В по нормали к пов-ти U_A

$$U_B = f \frac{M}{R + \Delta R}$$

- Разность: $\Delta U = U_A - U_B = fM \cdot \frac{\Delta R}{R(R + \Delta R)}$

$$\text{При } R \rightarrow 0 \quad \Delta U = fM \frac{\Delta R}{R^2} = g\Delta R \rightarrow g = \frac{dU}{dR}$$

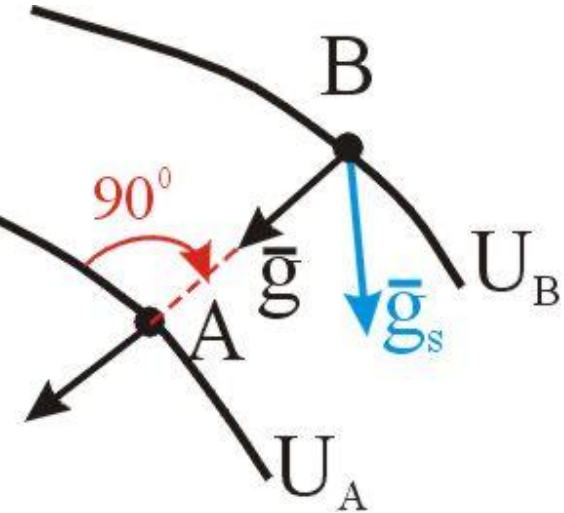
- Т.е. сила тяжести – производная потенциала с.т по направлению ее действия.

$$\text{По любому направлению } S \quad g_s = \frac{dU}{dS} = g \cdot \cos(g, s)$$

$$dU = g_s \cdot dS \quad \text{Приращение потенциала равно работе}$$

создаваемой притягивающей массой при перемещении единичной единичной массы на расстояние dS

Понятие «потенциал силы тяжести»



Уровенная поверхность. Геоид

- **Уровенная поверхность.**

Если $\bar{S} \perp \bar{g}$, то $\cos(g, s) = 0$.

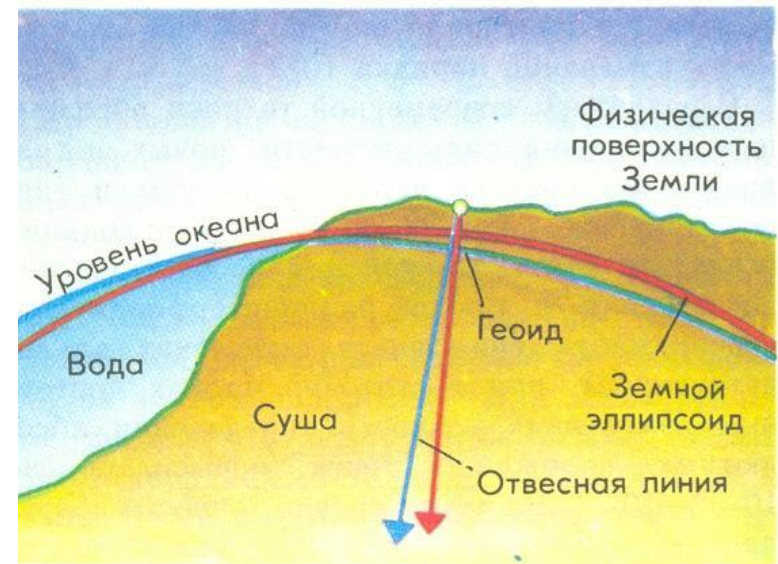
В данном направлении $U = const$

Уровенная поверхность (поверхность равного потенциала) – поверхность, в каждой точке которой потенциал одинаков.

Можно построить сколько угодно уровенных поверхностей.

- **Геоид** – уровенная поверхность, совпадающая с невозмущенной поверхностью океанов.

Взаимное положение физической поверхности Земли, геоида и земного эллипсоида.



Производные потенциала силы тяжести

- Полный вектор силы тяжести однозначно определяется производными потенциала по 3-м координатам.

$$g_x = \frac{\partial W}{\partial x} \quad g_y = \frac{\partial W}{\partial y} \quad g_z = \frac{\partial W}{\partial z}$$

Если ось Z направлена к центру Земли

$$g_x, g_y = 0 \quad g_z - \text{поле силы тяжести} = g$$

- Вторые производные силы тяжести

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} = \frac{\partial g}{\partial x} \quad - \text{ скорость изменения с.т. в горизонтальном направлении}$$

M - эффективная масса
 $\Delta \sigma$ - избыточная плотность

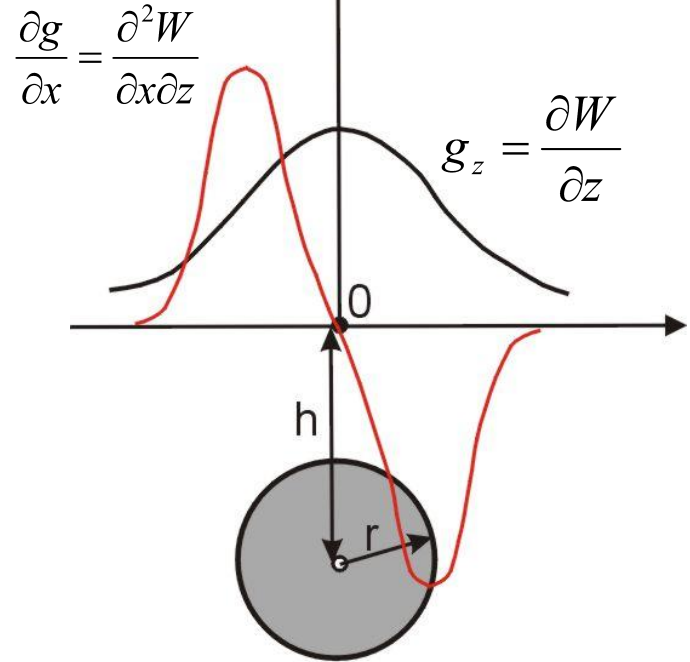
$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \quad - \text{ скорость изменения силы тяжести с высотой}$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} ; \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} ; \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad - \text{ характеризуют кривизну уровенной поверхности}$$

- За единицу изменения градиента силы тяжести

принимается 1 этвеш = изменению силы тяжести в 0.1 мгл на 1 км.

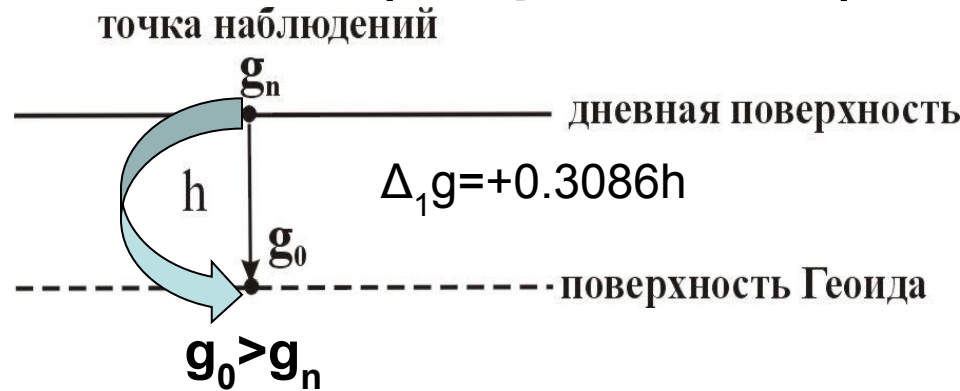
$$1 \text{ этвеш } (E) = 1 \cdot 10^{-9} \frac{1}{c^2}$$



Аномалии и редукции силы тяжести

- Гравиметрические аномалии представляют собой разность между наблюдаемым в точке значением силы тяжести g и ее «нормальным» значением γ .
- Однако, теоретическое «нормальное» значение силы тяжести рассчитано для поверхности геоида. Т.о. для получения сопоставимых аномалий необходимо:
 - привести значения к пов-ти геоида,
 - учесть, что между точкой наблюдения и геоидом есть аномальные массы,
 - учесть рельеф местности, который также искажает поле.

Поправка за высоту наблюдений (поправка Фая)



С уменьшением высоты на 1 м. g (мгл) увеличивается на 0.3086 мгл.

$$g = f \frac{M}{r^2}$$

$$\Delta g_f = g_0 - \gamma_0 = g_n + 0.3086 \cdot h - \gamma_0$$

Δg – в мгл,

h - в метрах.

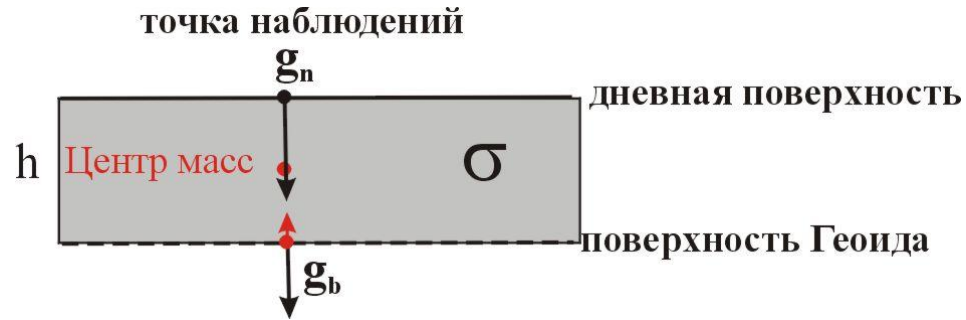
Эта поправка называется «поправкой за свободный воздух»

Поправка за промежуточный слой (поправка Буге).

- В реальных условиях между точкой наблюдения и поверхностью геоида залегают реальные физические массы. Для их учета введем поправку «за притяжение промежуточного слоя», исходя из предположения, что аномальный эффект создается бесконечным плоскопараллельным слоем со средней плотностью:

$\sigma = 2.30 \text{ г/см}^3$ - в осадочных бассейнах,

$\sigma = 2.67 \text{ г/см}^3$ - в складчатых областях.



Аномальный эффект плоскопараллельного бесконечного слоя выражается:

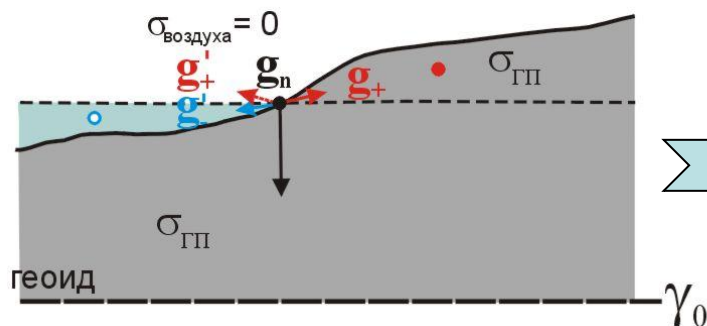
$$\Delta_2 g = -0.0419 \sigma h$$

σ - в г/см^3 , h – в метрах.

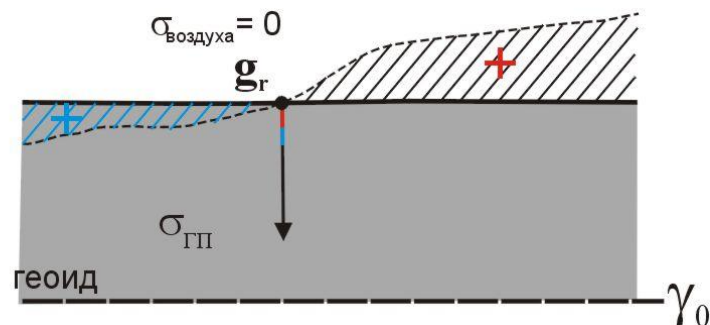
Вектор силы тяжести слоя направлен вверх (см. центр масс). При наземной съемки поправка вычитается

Поправка за рельеф

Распределение векторов силы тяжести в природных условиях



Вектор силы тяжести идеализированного разреза



- Смысл поправки: В наблюдаемое значение силы тяжести добавляется поправка, которая таким образом изменяет ее значение, как если бы измерения были проведены на горизонтальной плоскости.
- Поправка за рельеф всегда положительна, т.к.:
 - массы расположенные выше точки наблюдений уже уменьшили наблюдаемое значение g_n за счет вертикальной составляющей силы притяжения этих масс, направленной вверх;
 - объем воздуха расположенный ниже точки наблюдений также уменьшил наблюдаемое значение g_n за счет отрицательной избыточной плотности по отношению к вмещающей среде.
- В отечественной гравиметрии в качестве стандартных значений «плотности вмещающей среды» принимаются $\sigma = 2.30 \text{ г/см}^3$ - в осадочных бассейнах, $\sigma = 2.67 \text{ г/см}^3$ - в складчатых областях.

Аномалии силы тяжести в редукции Буге

- Под поправкой Буге понимается сумма поправок:

$$\Delta_1 g + \Delta_2 g + \Delta_3 g$$

где: $\Delta_1 g$ – поправка за высоту наблюдений (Фая),

$\Delta_2 g$ – поправка за промежуточный слой,

$\Delta_3 g$ – поправка за рельеф.

- Под аномалией силы тяжести в редукции Буге понимается:

$$\Delta g_B = g_n + \Delta_1 g + \Delta_2 g + \Delta_3 g - \gamma_0$$

или, после подстановки значений поправок:

$$\Delta g_B = g_n - \gamma_0 + (0.3086 - 0.0419\sigma) \cdot h + \Delta_3 g$$

Плотность горных пород и руд

- **Плотность вещества** $\sigma = m/V$
- **Избыточная плотность** $\Delta\sigma = \sigma_{\text{тела}} - \sigma_{\text{вещ.среды}}$
- Единицы измерения: в СИ $\text{кг}/\text{м}^3$, чаще используется единица СГС $\text{г}/\text{см}^3$.
- $\sigma = f$ (мин. состав, пористость, влажность) = φ (условия первичного формирования + последующих преобразований). Плотность – индикатор геологических процессов.
- Плотность большинства породообразующих минералов земной коры изменяется в пределах от $2.5 \text{ г}/\text{см}^3$ до $3.2 \text{ г}/\text{см}^3$.
- Горные породы в общем случае состоят из 3-х фаз: твердой, жидкой, газообразной.

Плотность:

$$\sigma = \frac{m_{\text{тв}} + m_{\text{жид}} + m_{\text{газ}}}{V_{\text{тв}} + V_{\text{жид}} + V_{\text{газ}}} = \frac{m}{V}$$

- **Объемная плотность:**

$$\sigma_V = \frac{m_{\text{тв}}}{V}$$

- **Минералогическая плотность:**

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{m_{\text{тв}}}{V_{\text{тв}}}$$

Пористость и влажность

- **Коэффициент пористости:**

(отношение объема пор, заполненных водой и газом к общему объему породы).

$$k = \frac{V_{\text{жид}} + V_{\text{газ}}}{V_{\text{тв}} + V_{\text{жид}} + V_{\text{газ}}} = \frac{V_{\text{жид}} + V_{\text{газ}}}{V}$$

- **Объемный коэффициент влажности:**

(отношение объема воды к объему твердой фазы).

$$\omega_V = \frac{V_{\text{жид}}}{V_{\text{тв}}}$$

- **Коэффициент влажности:**

(отношение массы жидкой фазы к массе твердой фазы).

$$\omega_M = \frac{m_{\text{жид}}}{m_{\text{тв}}}$$

1. Если пористость пород мала (изверженные, метаморфические), то:

$$\sigma = \sigma_{\text{тв}} \quad \text{т.к.} \quad m_{\text{жид}} + m_{\text{газ}} \ll m_{\text{тв}}$$

2. Если пористостью пренебречь нельзя:

$$\sigma = \sigma_{\text{мин}} \cdot (1 - k_{\Pi}) + k_{\Pi}$$

Плотность пород

• Магматические породы:

σ - определяется соотношением легких (полевые шпаты, кварц, нефелин) и тяжелых (амфиболы, пироксен, оливин) минералов.

а) σ - повышается с основностью,

б) σ – определяется кристалличностью:

$\sigma_{\text{крист. пород}} > \sigma_{\text{аморфных пород}}$ того же состава.

в) пористость – невелика.

• Метаморфические породы:

- σ под воздействием метаморфизма как увеличивается, так и уменьшается:

Увеличение $P \Rightarrow$ уменьшение $V \Rightarrow$ увеличение σ .

Алмаз (глубина 150 км) $\sigma=3.5 \text{ г/см}^3$,

графит (низк. темп. метам-ма) $\sigma=2.1 \text{ г/см}^3$,

Серпентинизация у.осн. Г.П. (привнос H_2O SiO_2).

Оливин – $\sigma = 4.1-4.4 \text{ г/см}^3$,

Серпентинит – $\sigma = 2.6 \text{ г/см}^3$.

Породы	Плотность σ (г/см ³)	
	$\sigma_{\text{ср}}$	Интервал значений σ
гранит	2.6	2.5-2.7
гранодиорит	2.75	2.7-2.8
диорит	2.8	2.7-2.9
габбро	2.9	2.8-3.0
пироксенит, перидотит	3.2	2.9-3.4
гнейс	2.75	2.6-3.0
серпентинит	2.6	2.6-3.0

Плотность осадочных пород

- Плотность в осадочных породах в значительной степени зависит от пористости.
- С глубиной происходит уменьшение пористости пород в связи с их частичной перекристаллизацией под влиянием увеличивающихся температуры и давления и соответствующее увеличение плотности.
- Уменьшение пористости и соответствующее увеличение плотности обусловлено метаморфизмом.

Породы	Пористость (%)	Плотность σ (г/см ³)	
		$\sigma_{\text{ср}}$	Интервал значений σ
почвы	23-69	2.0	1.5-2.4
пески	20-42	2.1	2.0-2.4
песчаники	2-55	2.3	2.1-2.8
известняки, доломиты	2-40	2.5	2.1-2.9
мергели	2-31	2.2	2.0-2.6

Плотность полезных ископаемых

Тип полезного ископаемого	Плотность σ (г/см ³)	
	$\sigma_{\text{ср}}$	Интервал значений σ
Рудные		
Железные руды	4.0	3.7-4.3
Хромиты	4.0	3.3-4.3
Полиметаллические руды	4.0	3.2-5.5
Нерудные		
Газ	-	0.001-0.002
Нефть	0.9	0.7-1.1
Уголь каменный		1.3-1.4
Торф	0.7	-
Каменная соль	2.1	2.1-2.2