Носов Мих. Алекс.

Основы геофизики и экологии

Геофизика (γῆ ge - земля) - комплекс наук о Земле в целом и физ. процесс, происх. в литосфере, гидросфере, атмосфере и магнитосфере

Экология (οἶκος oikos дом, родина + logos - учение) - раздел биологии, изучающ. взаимод. животных, растений и микроорганизмов между собой и окр. средой.

Разделы
- Физика атмосферы
- Физика моря
- Физика тв. земли

ВВЕДЕНИЕ В ОСНОВЫ...

European Geosciences Union
(European Geophysical Society 1970-2003 г.)

American Geophysical Union

International Union of Geodesy and Geophysics.

Лит-ра Общая Геофизика под р. Магницкого.
Основы экол. геофизики. Трухин.
Введение в физику гидросферы.
http://ocean.phys.msu.ru/

ОБРАЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И ЗЕМЛИ

20 млр. лет наз. - образована Вселенной в рез-те большого взрыва

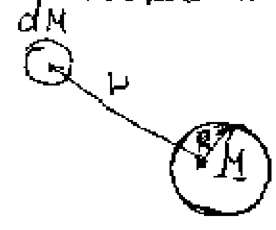
Гипотезы возникн. земли:

- Кант-Лаплас - из сжимающегося сгустка газообр. материи (XVIII в.)
- Мультон-Чемберлен - застыван. вещества выброш. солнцем в виде (XIX в.)
- Джинса - большой космич. объект вырвал из солнца часть материи (20-30 гг. XX в.)
- 1943 Шмидт - аккумуляц. планет из роя хол. тел. и частиц, захваченного солнцем. (из холодных тел, а не из сгустка раскаленной материи)
- Современ. планеты и солнце сформировал. в едином процессе.
  (все план. движ. по эллиптич. орбитам в одной плоскости, закономерное возрастание расст. от земли до солнца, закон. изменение средней плотности,

Возн. солн. сист. ~ 4,7 млрд. лет. - результат аккреации (падение вещества на космич. тело из окр. простр-ва) тверд. частиц из протуберант. газопыл. облака.

Формир. исходн. сгустков материи - результат грав-ой неустойчивости.

Образ. сгустков материи:



$$F = -G\frac{M\,dM}{r^2}$$

$$dA = \int_R^{\infty} F\,dr = G\frac{M\,dM}{R}$$

$$M = \frac{4\pi}{3}R^3\rho \qquad R = \left(\frac{M}{\rho}\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3}$$

$$A = G\rho^{1/3}\left(\frac{4\pi}{3}\right)^{1/3}\int_0^{M_з} M^{2/3}\,dM$$

$$A = G\rho^{1/3}\left(\frac{4\pi}{3}\right)\cdot\frac{3}{5}\,M^{5/3}\Big|_0^{M_з}$$

$$A \approx 2.3\cdot 10^{32}\ Дж.$$

Земля.

$\rho = 5{,}518$ кг/м³

$M = 5.978\cdot 10^{24}$ кг

Этой энергии земли достат. для испар. земли при t 30000°С.

Возр. земли 100 млн. лет.

Общ. сведения:

Расст. до Солнца	149,6 млн км
Период вращения	23 56.04 с.
Средн. радиус	6371 км.
Наклон экват. к орбите	23°27'
Сжатие	1/298.25

$$Сжатие = \frac{R_э - R_п}{R_э} \qquad R_э > R_п$$

Образование атм. и гидросферы

Гипотезы:

1. Захвачена в процессе аккреции. (нереально).
2. Дегазация мантии (состав первичн. атм. H_2O, CO_2 и др.).

Гравитационная дифференциация - источник разогрева земли - смещение материи в соотв. с плотностью.

Совр. атмосфера: H_2O CO_2 N_2 Ar.

O_2 в первичн. атм. отсутствовал.

Судьба соединений:

H_2O – гидросф, атмосфера
CO_2 – в разл. горных породах и органич. вещества
N_2 – органич. вещ-ва осадочн. породы, атмосфера
O_2 – в зам. кол. почв 1,5 млр. лет назад.

Диссипац. атмосферы:
– ускольз. газов из атмосфер космич. тел, вызв. тепловым движ. атомов и молекул.

при $T = 300\ K$
$V_{H_2} = 1{,}5$ км/с
$V_{N_2} = 0{,}5$ км/с
$\} < 11{,}2$ км/с

Время полн. улетучивания
H_2 – неск. лет
He – неск. млн. лет.

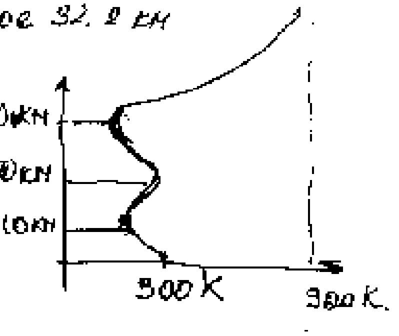
Только H_2 и He активно диссип.

⇒ ∃ источники из атм. земли (дегазация мантии

Критерий устойчивости атмосферы
– время диссипац. превышает время сущ. планеты
$v \ll v_{k2} \Rightarrow \frac{kT}{m} \ll \frac{GM}{R}$

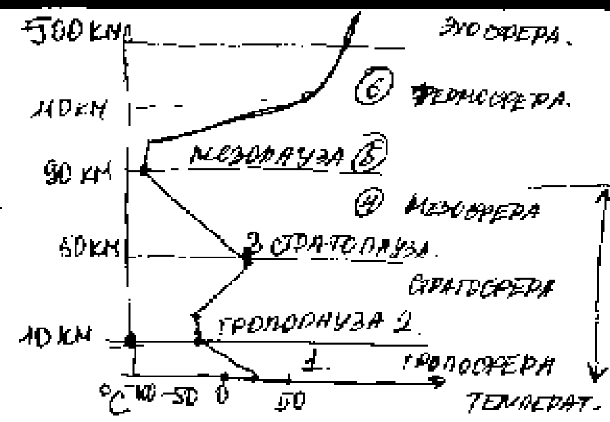
Структура и состав современн. атмосферы
Масса 5·1018 кг.
90 % массы атм. в слое 16.3 км
99. массы атм. в слое 32.2 км

Температура:



Состав
Постоянн.
N_2 Азот – 78 %
O_2 20,9 %
Ar ~ 1 %
Объемн.

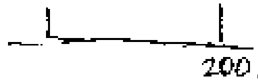
Переменное
Вода (0–7 %)
Двуокись угл.
Озон
Двуокись серы



Классификация по изменению температ. с высотой.

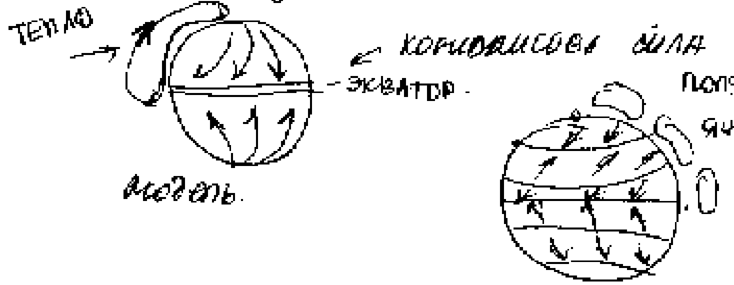
tropos (поворот, изменение)

① Убывание ~6,5 K/км.
Неустойчива, сильн. гориз. и вертик. движ-я., осадки.
② Тропопауза. (Jet stream, „наковальня")
③ Страто (настил, покр) до 50 км.
④ Мезо – средн., промежут. до –100 °С.
⑥ Высок. степень ионизации.



Слой Эплтона.
(reflected short wave radio signals)

Циркуляция атмосферы



Гидросфера
I. Условия сущ-я:
1. $t > t_{плавл}$
2. Парциальн. давл. газ. фазы $> p_{нас}$
3. $t, p < t, p$ крит. точки.
(Вода, 647,3 K, 22,12 МПа (220 атм))

2 млр. л. наз - достигн. насыщ. водой коры

Вода появ около 4 млрд л. н.
Океан возник - 3 млрд. н.
Совр. океанск. котл. - 250 млн. наз

Зона субдукции - зона погруж. коры под материк

Шельф (матер. отмель) - 7% мир. океана

Масса воды $1{,}37 \cdot 10^{21}$ кг.
Мир. запас $1{,}46 \cdot 10^{21}$ кг
Пресная вода $3{,}5 \cdot 10^{19}$ кг

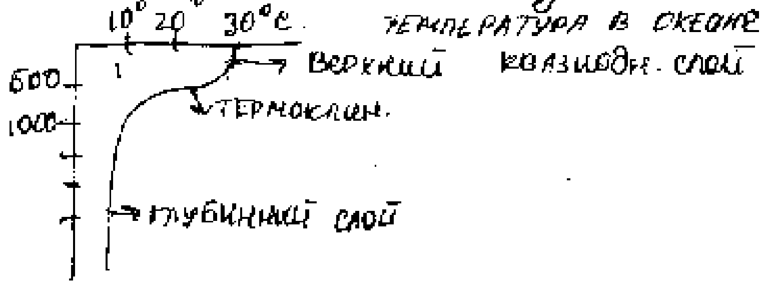
Солёность морской воды:

$$S = \frac{m_{\text{прим}}}{m_{\text{прим}} + m_{\text{чист. вода}}}$$

$S = 1000S$ [‰ промилле]

Мировой океан 35 промилле

Апвеллинг — прибрежное явление сдувания пов. слоя воды (тёплого).

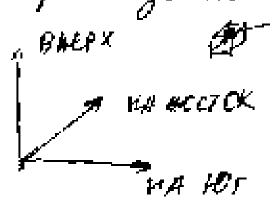


Течения

поверхностные глубинные геострофич.

Динамика атмосферы и океана

Подходы:
- Лагранжа: слежение за инд. частицей)
- Эйлера - за полями (точечно в точке



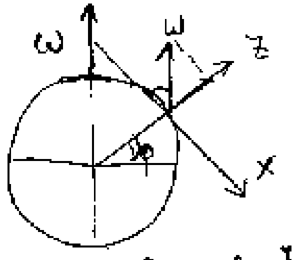
$\vec{v}\{u, v, w\}$
$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$
$p = p(x, y, z)$ - поле давление
ρ - поле плотности

Массовые силы:
$F_{мас} \sim m\, dx\, dy\, dz$.
- силы тяготения
- силы инерции

Поверхностные силы
$F_{пов} = F_1 - F_2 \sim ds = dy\, dz$
(нормальн, тангенциальные)

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m(\vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}])$$

$$\rho\, dx\, dy\, dz \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_{i=1}^{6} ds_i \tau_i$$



$\omega_x = -\omega\cos\varphi$
$\omega_z = \omega\sin\varphi$
$\omega_y = 0$
$\vec{\omega}(-\omega\cos\varphi, 0, \omega\sin\varphi)$
$\vec{v}(u, v, w)$

$$[\vec{v} \times \vec{\omega}] = \begin{vmatrix} i & j & k \\ u & v & w \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} i(v\omega_z - w\omega_y) \\ j(w\omega_x - u\omega_z) \\ k(u\omega_y - v\omega_x) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} i(\omega v \sin\varphi) \\ j(-w\omega\cos\varphi - \omega u \sin\varphi) \\ k(\omega v \cos\varphi) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} i(\omega v \sin\varphi) \\ j(-\omega u \sin\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$2[v\times\vec{\omega}] = \begin{pmatrix} fv \\ -fu \\ 0 \end{pmatrix}$ $f = 2\omega\sin\varphi$ — параметр Кориолиса.

Сила градиента давления

$\rho\,dx\,dy\,dz\,\frac{du}{dt} =$

$= [p(x,y,z) - p(x+dx,y,z)]\,dy\,dz$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho}\,\frac{p(x+dx,y,z) - p(x,y,z)}{dx}$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}$$

$F_{grad\,p} = \frac{1}{\rho}\,\vec{\mathrm{grad}}\,p$

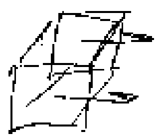
$F_{grad\,p} = -\frac{1}{\rho}\nabla\vec{p}$

Сила вязкого трения

$\tau_{xz} = \eta\,\frac{\partial u}{\partial z}$

динам. вязкость

напряжение силы трения



$\tau_{xy} = \eta\,\frac{\partial u}{\partial y}$

$\left(\eta\frac{\partial u}{\partial x}\right)_S dy\,dz$

$\rho\,dx\,dy\,dz\,\frac{du}{dt} = [\eta\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z+dz} +$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\eta}{\rho}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

$F_{тр} = \nu\Delta\vec{u}$ $\nu = \eta/\rho$ — кинемат. вязкость

$\frac{dv}{dt} = \vec{F}_{grad\,p} + \vec{F}_{мас} + \vec{F}_{тр}$

$\frac{dv}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + g + 2[v\times\omega] + \nu\Delta v$

$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v},\vec{\nabla})v$

$\frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum \frac{\partial u_i}{\partial x_j}u_j$

$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v},\vec{\nabla})\vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + 2[v\times\vec{\omega}] + \nu\Delta v$

Уравнение Навье-Стокса

Уравнение неразрывности

$\rho(x)\,u(x)\,dy\,dz$

$-[\rho(x+dx)\,u(x+dx) - \rho(x)\,u(x)]\,dy\,dz =$

$= \frac{\partial m}{\partial t} = dx\,dy\,dz\,\frac{\partial \rho}{\partial t}$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial[\rho w]}{\partial z}$$

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}[\rho v] = 0}$$

Уравнение состояния

$\rho = \rho(p, T, S)$

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} + (v,\nabla)T = \chi\Delta T \\ \frac{\partial S}{\partial t} + (v,\nabla)S = \theta\Delta S \rightarrow \text{соленость} \end{cases}$$

Уравнение состояния воздуха

$pV = \cancel{\frac{m}{\mu}}RT$

$R_a = \frac{R}{\mu} = 287\,[Дж/кг\cdot K]$

$$\boxed{\rho = \frac{p}{R_a T}}$$

Влияние водяного пара

$p_a = \rho_a R T \qquad e = \rho_w R_w T$

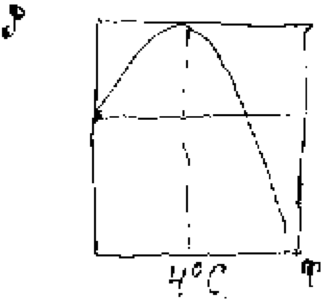
$p = \rho_a + \rho_w = \frac{p-e}{R_a T} + \frac{e}{R_w T}$

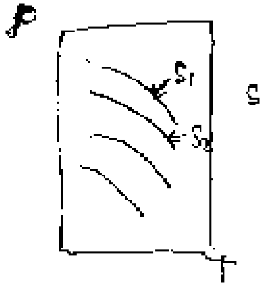
$\rho = \frac{p}{R_a T}\left(1 - \frac{e}{p}\left[1 - \frac{R_a}{R_w}\right]\right) \approx \frac{p}{R_a T}\left(1 - 0{,}38\frac{e}{p}\right)$

Уравнение состояния морск. воды

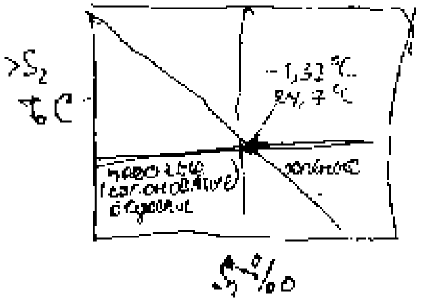
$\rho = \rho(S, T, p)$

Уравн. Цена - Миллера сод. 48 эмп. констант.





$S_1 > S_2$



Формула Ганзена и Формула Кнудсена - Крюммеля

Упрощения:

1. Несжимаемая жидкость

$\rho = \rho_0 = const$

$\frac{\partial u}{\partial x} \sim \frac{1}{L} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{V}{L} \ldots$

$|w| = \frac{H}{L}|u_0| \qquad \frac{H}{L} \ll 1$

2. Стационарное состояние

$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad \frac{d\rho}{\partial t} = 0$

3. Идеальная, невязкая жидкость

Граничное условие

- не протекания
- не прилипания

③. идеальная несж. жидкость мин приближ*

$(\vec{V}, \nabla) \vec{V}$

„Геофизическое" приближение

$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g \qquad p(z) = p_0 - \rho_0 g z$

$\frac{dp}{dz} = -g\rho(z) \qquad \rho(z) = \frac{p(z)}{R_a T}$

$p(z) = p_0 e^{-\frac{gz}{TR_a}} = p_0 e^{-H} \quad H \approx 8$ км

Неоднородная атмосфера.

$p = p_0 e^{-\int \frac{g(z^*)}{R_a T(z^*)} dz^*}$

$m = \int_0 \rho(z)\,dz \qquad \frac{dp}{d\rho} = c^2$

$\rho = \rho(p(z)) \qquad \frac{d\rho}{dz} = \frac{d\rho}{dp}\frac{dp}{dz}$

$\frac{dp}{dz} = \rho(z) \cdot g \qquad \frac{d\rho}{dz} = \frac{1}{c^2}\rho(z) g$

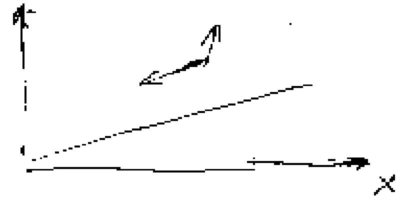
$\Rightarrow \rho(z) = \rho_0 e^{\frac{gz}{c^2}}$ ← адиаб. градиент

④ Геострофическое приближение

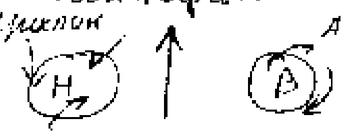
$\left(-\frac{\nabla p}{\rho_0}\right), (g)$

$-\frac{\nabla p}{\rho_0} + 2[V \times \omega] = 0$

$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y} - 2\omega u \sin\varphi = 0$



Геострофич. ветер



(3) Приближение Буссинеска
(малость вариаций T и ρ)

$$\frac{\nabla p}{\rho} = g + \frac{\nabla p'}{\rho_0} + \alpha T' g$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla)\vec{V} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0} - \alpha T' \vec{g} + \nu \Delta \vec{V} \\ \operatorname{div} \vec{V} = 0 \text{ - пренебр. вариациями плотности} \end{cases}$$

(4) Циклострофическое прибл.

$$\frac{V^2}{r} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial n} = 0$$

Виды течений:

- Градиентные
- Дрейфовые
- Геострофические
- Приливные
- Конвективные
- Приборешные

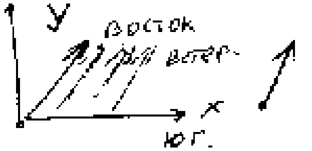
Градиентное течение
(геостр. приближение)

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + 2\omega v \sin\varphi = 0 \\ -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - 2\omega u \sin\varphi = 0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \Rightarrow u = 0.$$

$$v = \frac{1}{\rho_0 2\omega \sin\varphi}\frac{\partial P}{\partial x}$$

{Дрейфовое течение}



- $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ стационарность течения
- Однородн. и безгр. по горизонт. $\frac{\partial}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial y} = 0$
- ρ = const

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0 \Rightarrow \operatorname{div} \vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

w = const.
$w(0) = 0$.

$$\cancel{\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}} + \cancel{(\vec{V}\nabla)\vec{V}} = \frac{\nabla p}{\rho_0} + 2[\vec{V} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{V} + g.$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{cases} 2v\omega \sin\varphi + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = 0 \\ -2u\omega \sin\varphi + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) = 0 \\ -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \Rightarrow p(z) = p_{atm} - \rho g z. \end{cases}$$

ненужно для дальн. решения

$\boxed{f = 2\omega \sin\varphi}$ ← параметр Кориолиса.

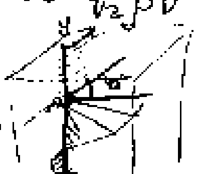
Граничные условия

$$\begin{cases} f v + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = 0 \qquad \rho\nu \frac{du}{dz}\Big|_{z=0} = 0. \qquad u_{z\to\infty} = 0 \\ -f u + \nu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) = 0 \qquad \rho\nu\frac{dv}{dz}\Big|_{z=0} = \tau \qquad u_{z\to\infty} = 0 \end{cases}$$

$$u(z) = V_0 e^{z/d}\cos(z/d + \tfrac{\pi}{4})$$
$$v(z) = V_0 e^{z/d}\sin(z/d + \tfrac{\pi}{4})$$

$$V_0 = \frac{\tau d}{\sqrt{2}\rho\nu} \qquad d = \sqrt{\frac{2\nu}{f}} = \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin\varphi}} \Rightarrow$$

Глубина Экмана
Глубина трения



Направление интегрального переноса. 90°

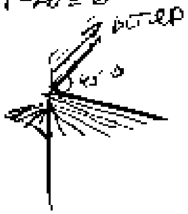
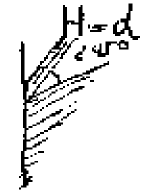
$$\int_{-\infty}^{0} u(z)\,dz = \frac{V_0 d}{\sqrt{2}} > 0.$$
$$\int_{-\infty}^{0} v(z)\,dz = 0$$

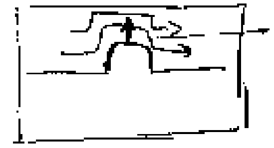
Влияние глубины на течение Экмана

Гр. усл.:

$u(-H)=0 \quad v(-H)=0$

ветер

$H=10d$  $H=d$ 

 — скор. убывает

$\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = const.$

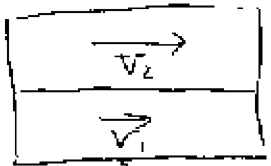
Синоптические вихри, (скор до 0,5 м/с)
Впервые обн. в 1970 в районе
Св. Доссат. теч. в Атлант. океане
(эксп. полигон-70)
1973 - США (MODE - Mid Ocean Dynamic Experiment).

Теорема Томсона:
циркуляция скорости по замкн. контуру остается постоянной при
1) идеальн. жидкость
2) давлен. зависит только плотности
3) массовые силы потенциальны.

$Ц_С = \oint \vec{V} d\vec{r} = \iint rot\,\vec{V}\, d\vec{S}$

Ринги Гольфстрима
(более скоростные до 2 м/с)

Сдвиговая неустойчивость (* Кельвина-Гельмгольца. **по имену разрывов)



Уравнение Бернулли ← Навье-Стокса.

$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + f\cancel{g} + 2[\vec{V}\times\cancel{\Omega}] + \nu\cancel{\Delta\vec{V}}$

$\rho = const$

$(\vec{V}\vec{\nabla})\vec{V} + \vec{\nabla}\left(\frac{p}{\rho}\right) = 0 \Rightarrow \vec{\nabla}\left[\frac{(\vec{V},\vec{V})}{2} + \frac{p}{\rho}\right]$

$(\vec{V},\vec{\nabla})\vec{V} = \nabla\frac{(\vec{V}\vec{V})}{2}$ — при $rot\,\vec{V}=0$

Стратификация - распределение по вертикали слоев воды или воздуха с различн. плотностью, температурой, соленостью

Критерий устойчивости:

Нейтральное состояние:

$\left.\frac{d\rho}{dz}\right|_{нейтр} = \left(\frac{d\rho}{dz}\right)_\eta = \left(\frac{d\rho}{dp}\right)_\eta \frac{dp}{dz}$

$\frac{dp}{dz} = \rho g \qquad \left(\frac{d\rho}{dp}\right)_\eta = \frac{1}{c^2}$

$\left.\left(\frac{d\rho}{dz}\right)\right|_{нейтр} = \boxed{\frac{\rho g}{c^2}}$

Неустойч.: $\frac{d\rho}{dz} < 0$

Устойчив.: $\frac{d\rho}{dz} > 0$

Волновые движение в океане
(по типу возвр. силы).
- гравитационные - сила тяжести
- капиллярные - сила поверх. натяжения
- акустические - сила упругости
- гироскопические или инерционные - сила Кориолиса

Гравитационные поверхн. волны:

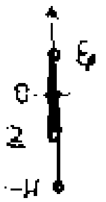
$\left\{ \begin{array}{l} \text{Навь - Стокс} \\ \text{Неразрывности} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} + g \\ \cancel{\frac{\partial \rho}{\partial t}} + div(\rho\vec{V}) = 0 \\ \rho = \rho_0 = const. \end{array} \right.$

Линейная теория длинных волн
("мелкой воды" $\lambda >> H$)

$\vec{v} \equiv (u, v, w)$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

$0 \leftarrow$



$\int_z^{\xi} dz$

$p(x, y, z, t) = p_{атм} + \rho g \xi(x, y, t) - \rho g z$.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -g\frac{\partial \xi}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -g\frac{\partial \xi}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

$p_{атм} = const$
$\lambda >> H$
$H \neq f(t)$

$$\begin{cases} \frac{\partial u^*}{\partial t} = -g\frac{\partial \xi}{\partial x} & \Big| \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial v^*}{\partial t} = -g\frac{\partial \xi}{\partial y} & \Big| \frac{\partial}{\partial y} \\ H\left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y}\right) = -\frac{\partial \xi}{\partial t} & \Big| \frac{\partial}{\partial t} \end{cases}$$

$(u^*, v^*) = \frac{1}{H}\int_{-H}^{\xi}(u, v)\,dz \approx \frac{1}{H}\int_{-H}^{0}(u, v)\,dz$

Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = gH\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}\right)$$

$c \sim 800$ км/ч при $H \approx 4$ км

$c = \sqrt{gH}$ - скорость длинных волн

Топография дна влияет на распростр гидроволн

Явления: огибание, фокусировка, де-фокусировка

Закон Грина: изменение амплитуды волн.
$\xi_0 H^{1/4} = const$

Физика Твердой Земли

Александр Олегов. Глико.

(1) III в до н.э. - Эратосфен измерил землю.
$R = 6311$ км.

(2) Кавендиш взвесил землю. (1798 г.)
$g = \gamma \frac{M}{R^2}$ $M = 5{,}97 \cdot 37 \cdot 10^{27}$ г. (с точн. до 2%)
С помощью крут весов опр γ

(3) Установление „сплюснутости" земли
1672 г - зависим. хода маятн. часов от широты

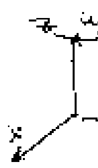
Объяснение Ньютона $\alpha = \frac{a-b}{a}$ $\alpha \approx \frac{1}{230}$

Позднее $\alpha = \frac{1}{314}$

1743: Клеро. Равновесная фигура -
- исследовал равнов. фигуры земли
$r = a(1 - \alpha \sin^2\varphi)$ ур-е сфероида.
φ - широта

1849 г Стокс - теоретические основы гравиметрии.

Неинерциальн СО.



$\vec{K} = \omega^2\sqrt{x^2+y^2}\,\vec{n}_\rho$,
центробежная сила.

$\vec{K} = (\omega^2 x, \omega^2 y, 0)$ $Q = \frac{1}{2}\omega^2(x^2+y^2)$

$Q = \frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2\varphi$ — широта

$\boxed{W = V + Q}$ — потенциал силы тяготения

Начало коорд совм. с ц.м Земли, а оси Oz, Ox и Oy с гл. осями инерции.

$$W_p = W(r,\varphi,\lambda) = \frac{fM}{r}\Big[1 - \sum_{n=2}^{+\infty} J_n \times \left(\frac{a}{r}\right)^n P_n^0(\sin\varphi) + \sum_{n=2}^{+\infty}\sum_{m=1}^{n} \left(\frac{a}{r}\right)^n \times P_n^m(\sin\varphi)\left[C_{nm}\cos m\lambda + S_{nm}\sin m\lambda\right]\Big] + \frac{1}{2}\omega^2 r^2 \cos^2\varphi$$

Наблюдения за возмущениями орбит искусств. спутников земли позв. определить ряд (более 400) $n \le 30$, $m \le 18$

Средний размер опред. особенностей поля ~ 1000

① J_2 опред. с больш. точн. $J_2 = 1{,}08265 \cdot 10^{-3}$

② Остальные коэфф. J_n, C_{nm}, S_{nm} лежат в интерв. 10^{-6} – 10^{-8}

③ Нечетн. коэф. $\ne 0$ (свидетельств. о неравнов. фигуры земли).

Астр. набл. значение пост. прецессии $H = \frac{C-A}{C} \approx 3{,}3\,10^{-3}$. C – пол. момент инерции.

$C = \frac{J_2}{H} M a_e^2 = 0{,}33\,078\, M a_e^2$

Ускорен. 1 ГАЛ = 1 см·с$^{-2}$

Аномальное поле: $\Delta g = g - g_H$ (g_H – норм. поле для данной широты)

Аномалия в св. воздухе:

$\Delta g_{св.в} = g - g_0\left(1 - \frac{2h}{R}\right)$

$g_{пол} = 983$ ГАЛ

$g_{экв} = 978$ ГАЛ

$|\Delta g_{св.в}| \le 50$ мгал

Гравитационное поле океана

Поверхность океана = эквипот. поверхность $W = const$ – геоид

Спутниковая альтиметрия

Δh – высота поверхности геоида над пов. эллипсоида

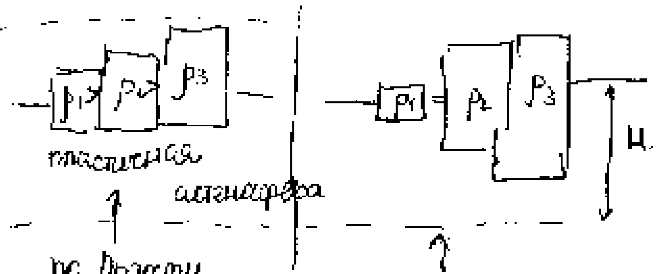
$\downarrow$

Δg

Изостазия

$\alpha < \alpha_{теор}$. Притяжение гор меньше

1855 г. – Эд. Дж. Эри } гипотезы
архидиакон Пратт } изостазии.

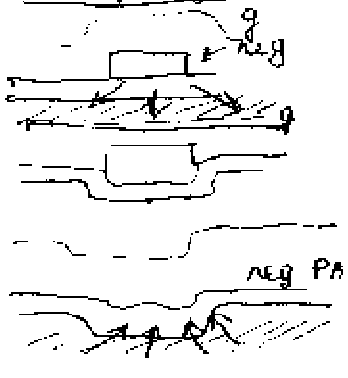


$\int_0^H \rho(z)\,dz = const.$

по Эри (в большинстве случаев)

Схема Пратта → вулкан. острова Тихого Океана (Гавайи), провинции бассейнов и хребтов (США)

Гляциоизостатические движ-я земн. коры



Морские террасы

Волновые движения в океане

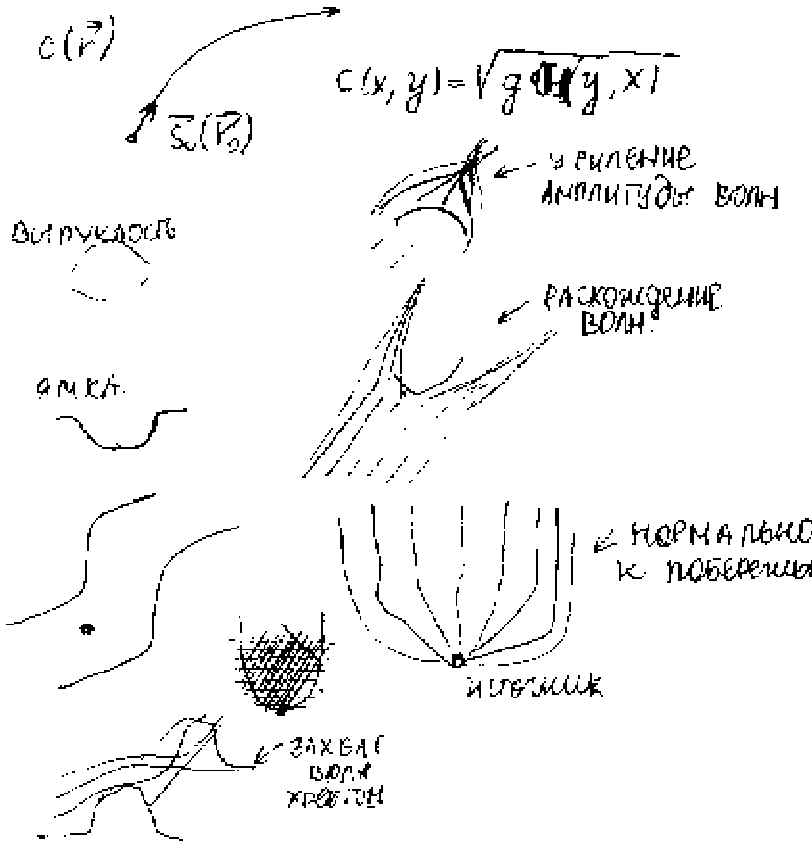
Длинные волны:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \operatorname{div}\left[gH(x,y)\operatorname{grad}\xi\right]$$

$$c = \sqrt{gH}$$

Приближение „геометрической оптики"

$c(\vec{r})$ $\quad \vec{S}_0(\vec{r}_0)$ $\quad c(x,y) = \sqrt{g H(y,x)}$



$p_{атм} = p(x, y, z, t)$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\dfrac{\nabla p}{\rho_0} + g \\ \operatorname{div}(\vec{V}) = 0 \end{cases}$$

1) $\dfrac{\partial u}{\partial t} = -g\dfrac{\partial \xi}{\partial x} - \dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p_{атм}}{\partial x}$

$p = p_{атм} + \rho_0 g\xi - \rho g z$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t} = -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial x} \\ \cancel{\dfrac{\partial w}{\partial t}} = -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial z} - g \\ \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad \int_{-H(x)+\eta(x,t)}^{\xi(x,t)} dz$$

$$H\frac{\partial u}{\partial x} + W\Big|_{z=\xi(x,t)} - W\Big|_{z=-H(x)+\eta(x,t)} = 0$$

$$W\Big|_{z=\xi} \to \frac{\partial \xi}{\partial t}, \qquad W\Big|_{z=-H+\eta} \to \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

2) $H\dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial \xi}{\partial t} - \dfrac{\partial \eta}{\partial t} = 0$ — вблизи дна

$\dfrac{\partial}{\partial x}$ 1), $\quad \dfrac{\partial}{\partial t}$ 2) $\Rightarrow \quad H\dfrac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \dfrac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \dfrac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = -g\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial^2 p_{атм}}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{H}{\rho_0}\frac{\partial^2 p_{атм}}{\partial x^2}$$

Зад: $\dfrac{\partial}{\partial t} = 0 \qquad -gH\dfrac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \dfrac{H}{\rho_0}\dfrac{\partial^2 p_{атм}}{\partial x^2}$

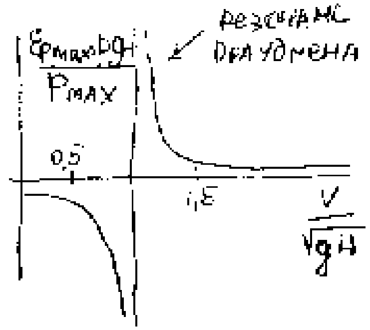
$\xi(x) = -\dfrac{p_{атм}(x)}{\rho_0 g}$ — закон обратного барометра

$p_{атм}(x,t) = p(x - Vt)$

$\xi(x,t) = A p(x - Vt)$

$AV^2 - AgH = \dfrac{H}{\rho_0}$

$$\xi(x,t) = \frac{H}{\rho_0}\frac{p(x - Vt)}{V^2 - gH}$$



Линейная потенциальная теория волн.

$a \ll H \qquad \lambda \gg H$

$\vec{V} = \nabla F$ — потенциал скорости течения

$\vec{g} = \vec{\nabla}(-gz)$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\dfrac{\nabla p}{\rho} + \vec{g} \\ \operatorname{div}\vec{V} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\nabla F) = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nabla(-gz) \\ \operatorname{div}(\nabla F) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \nabla\left(\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz\right) = 0 \\ \operatorname{div}(\operatorname{grad} F) = 0 \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const}.$$

$$\Delta F = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 0.$$

Основн. ур-е лин. теории волн.

Гр-е условие:

Дно: $z = -H$ $\qquad W = -\frac{\partial F}{\partial z} = 0$

поверхность: $z = \xi(x, y, t)$: $p = p_{атм} = \text{const}$

$$z = 0 \quad p = p_{атм} - \text{const}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{p_{атм}}{\rho} + g\xi = \text{const} \quad \Big| \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} + g\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0;$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = W; \quad W = \frac{\partial F}{\partial z},$$

$z = 0$: $\quad \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} + g\frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad$ условие нов-сти для волн.

$$* \; F(x, y, z, t) = [A\,\mathrm{sh}(kz) + B\,\mathrm{ch}(kz)]\cos(\omega t - \vec{k}\vec{x})$$

$z = 0$: $\quad \frac{\partial^2 F}{\partial t^2} + g\frac{\partial F}{\partial z} = 0 \Rightarrow B = A\frac{gk}{\omega^2}$

$z = -H$: $\quad \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \Rightarrow \mathrm{ch}(kH) = \frac{gk}{\omega^2}\mathrm{sh}(kH)$

Дисперсионное соотношение

$$\omega^2 = gk\,\mathrm{th}(kH)$$

Предельные случаи

„Глубокая вода"

$$\frac{H}{\lambda} \gg 1 \Leftrightarrow kH \gg 1 \Rightarrow \omega^2 = gk$$

„Мелкая вода"

$$\frac{H}{\lambda} \ll 1 \qquad kH \ll 1 \Rightarrow \omega^2 = gHk^2$$

Дисперс. соотн. для гравит.-капилл. волн

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{\alpha}{\rho}k^3\right)\mathrm{th}(kH)$$

$$\Delta p = \alpha\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \text{ - формула Лапласа}$$

Фазовая и групповая скорость волн

$$\cos(\omega_1 t - k_1 x) + \cos(\omega_2 t - k_2 x) = 2\cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t - \frac{k_1 + k_2}{2}x\right)\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t - \frac{k_1 - k_2}{2}x\right) =$$

$$= 2\cos(c_{фаз}t - x)\cos(c_{гр}t - x)$$

огибающая

$$c_{фаз} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} \to \frac{\omega}{k}$$

$$c_{групп} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \to \frac{d\omega}{dk}$$

Глуб. вода.

$$c_{фаз} = 2c_{груп} = \sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

„Мелк. вода"

$$c_{фаз} = c_{гр} = \sqrt{gH}$$

Капилляр. волны:

$$c_{фаз} = \frac{2}{3}c_{гр} = \sqrt{\frac{\alpha k}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\pi\alpha}{\rho\lambda}}$$

Движение частиц в волне

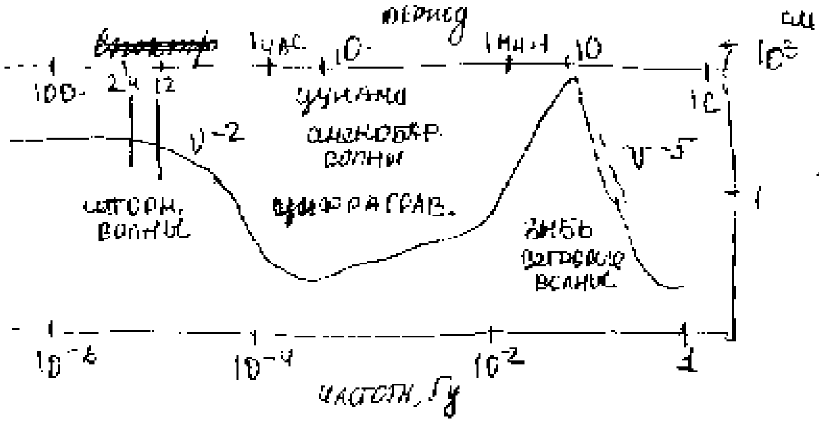
$$F(x, z, t) =$$

Поле скорости:

$u=\frac{\partial F}{\partial x}$ $w=\frac{\partial F}{\partial z}$

Поле смещений:

$x=\int_{t_0}^{t} u\,dt$ $z=\int_{t_0}^{t} w\,dt$



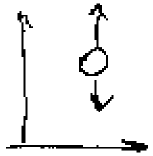
Цунами (волна в гавани) серия длиннопериодных волн, вызванная мощным импульсным воздействием на водный слой

Интенсивность волны: $\log_2 H$;
H - средняя высота волны на поверхности

Внутренние волны.

① $F = gV\left(\frac{d\rho}{dz}+\frac{\rho g}{c^2}\right)z$;

$\underbrace{\rho V\frac{d^2z}{dt^2}}_{ma} = \underbrace{gV\left(\frac{d\rho}{dz}+\frac{\rho g}{c^2}\right)z}_{\Sigma F}$



$N^2 = -\frac{g}{\rho}\left(\frac{d\rho}{dz}+\frac{\rho g}{c^2}\right)$ ← частота Вяйсяля-Брента

в океане $10^{-4}\,\text{Гц} < N < 10^{-1}\,\text{Гц}$

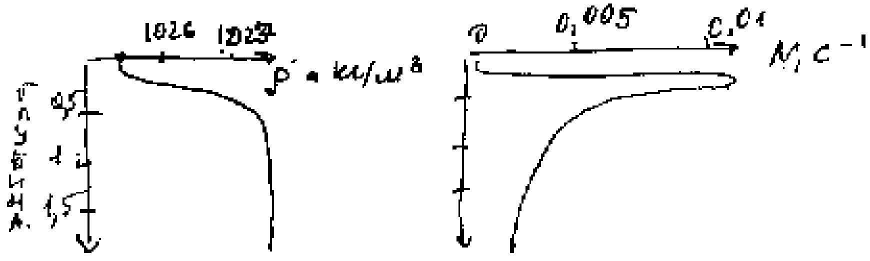
② 

$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = -N^2\cos^2\theta\,\zeta$; $z=\zeta\cos\theta$, $F_\varphi = F_z\cos\theta$

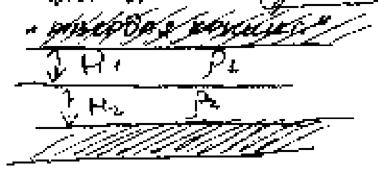
$\omega^2 = N^2\cos^2\theta$ → максим. частота внутр. волн.

Дисперсионное соотношение для внутр. волн. ($\omega^2 = N^2\sin^2\theta$)

Распред. плотности и частоты.



Скорость $\boxed{\text{длинных}}$ внутр. волн.



$V = \sqrt{\frac{g(\rho_2-\rho_1)H_2H_1}{\rho_1H_2+\rho_2H_1}}$

$V \approx 3$ м/с

$\frac{\Delta\rho}{\rho}$ → гидростатич. давление ~4% $\frac{\Delta\rho}{\rho} < 4\%$

→ вариации температуры ~0,5%

→ вариации солености ~0,2%

Основное влияние на динамич. процессы в океане

Потенциальная температура - темп. част. жидкости, мысленно перенесенн. на поверхность

Особенности страто атмосферы

- Увелич. высоты плотн. уменьш. пенсирато
- $N(z)$ не им. ярко выр. пиков
- Возможна конденсация водяных паров, что влияет на усл. стратифик. устойчивости и велич. $N(z)$

Критерий устойчивости

$$\delta Q = c_v\,dT + p\,dV$$

$$c_v\,dT + p\,dV = 0.$$

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T}$$

$$R = c_p - c_v$$

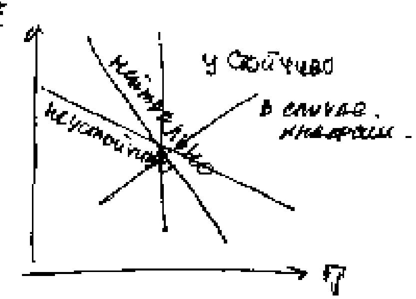
$$c_p \frac{dT}{T} = R\frac{dp}{p}$$

$$dp = -\rho g\,dz$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} \approx 0.01\ K/м \rightarrow$$ адиабатический градиент тем-ры

$\rightarrow$ сухо а.....

(прен. вл ю воздуха)



$$c_p\,dT - \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$c_p\,dT - \frac{dp}{\rho} = -L\,dq$$ уд. тепл. пар-я

$$dp = -\rho g\,dz.$$

$$c_p\,dT + \frac{\rho g\,dz}{\rho} = -L\,dq$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} - \frac{L}{c_p}\frac{dq}{dz} \leftarrow \frac{dq}{dz} = \frac{dq}{dT}\frac{dT}{dz}$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g/c_p}{1+\frac{L}{c_p}\frac{dq}{dT}}, \quad \left|\frac{dT}{dz}\right| \swarrow$$ влажноадиабат. градиент.

Акустические волны

$$\begin{cases} \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \cancel{(\vec{V}\vec{\nabla})\vec{V}} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \cancel{\vec{g}} + \cancel{\nu\Delta\vec{V}} \\ \frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho\vec{V}) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} \\ \frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathrm{div}\,\rho\vec{V} = 0 \end{cases} \qquad \begin{bmatrix} \vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{v}' \\ p = p_0 + p' \\ \rho = \rho_0 + \rho' \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \vec{V}_0 = 0 \\ p' \ll p_0 \\ \rho' \ll \rho_0 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

v', p', ρ' – давл..., связ. с акустич. волнами

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial v'}{\partial t} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0} \\ \frac{\partial\rho'}{\partial t} + \rho_0\,\mathrm{div}\,\vec{v}' = 0 \end{cases}$$

$$p' = \left(\frac{\partial p}{\partial\rho}\right)_s \rho' = c^2\rho'$$ c – скор. звука. $\Rightarrow$

$$\vec{v}' = \vec{\nabla} F$$ $\Rightarrow$ потенциал скорости.

$$\begin{cases} \frac{\partial(\vec{\nabla} F)}{\partial t} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0} \\ \frac{1}{c^2}\frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0\,\mathrm{div}\,\vec{\nabla} F = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial F}{\partial t} = -\frac{p'}{\rho_0} \\ \frac{1}{c^2}\frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0\Delta F = 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} - c^2\Delta F = 0 \quad \text{- вол-е ур-е.}}$$

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial\rho}\right)_s}$$

скорость звука в океане

$$1480\ м/с < \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial\rho}\right)_s} < 1545\ м/с.$$

$$\frac{\partial c_{зв}}{\partial T} > 0\ ; \qquad \frac{\partial c_{зв}}{\partial p} > 0$$

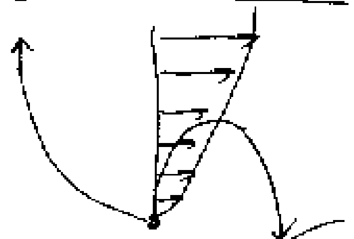
Подводный звуковой канал 1000-2000 м
зона тени.

Акустические волны в воздухе

$$c \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{ad}} = \sqrt{\frac{C_p R T}{C_v \mu}} \approx 340\ м/с$$

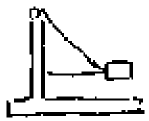
- В ид. газах при $T = const$ скорость звука не зависит от давления

Влияние ветра на распространение звука

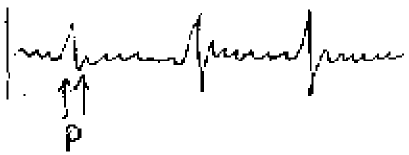


частицы

Сейсмология

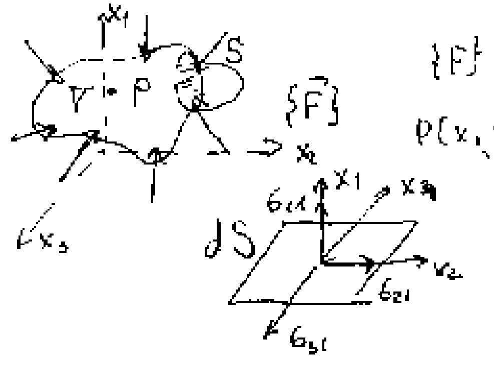


Горизонтальные маятники:



Цуги различных волн (сейсмических фаз)

Напряжение



$\{F\}$ - сил. внешних. сил.

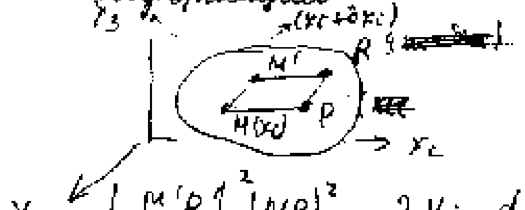
$P(x_1, x_2, x_3)$.

Напр. состоян. сплошн. среды хар-ся тензором (напр.) напр. σ_{ik}.

К диагональному виду

$$\begin{pmatrix} \sigma^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^{(3)} \end{pmatrix}$$

Деформации



$$[M'P']^2 - [MP]^2 = 2u_{ik}\,dx_i\,dx_k$$

$$u_{ik} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right)$$

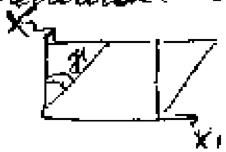
Свойства тензора деформации.

1. Диаг. эл-ты $\frac{\partial u}{\partial x_1}$ - отн. удл. по оси x_i.
2. Сумма диаг. эл-тов.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \theta = \frac{dV' - dV}{dV}$$

$$dV' = dx_1\left(1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right) dx_2\left(1 + \frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right) dx_3\left(1 + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right)$$

3. Недиагон. эл-ты. u_{ik}.



$$\frac{\partial u_1}{\partial x_2} = tg\,\varphi \approx \varphi.$$

среда: Однородная. Изотропная. Безграничная

Ур-е движения.

$$\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}$$

$$\sum \frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \left(K - \frac{2}{3}\mu\right)\frac{\partial \theta}{\partial x_i} + 2\mu\frac{\partial u_{ik}}{\partial x_k}\right\} dV$$

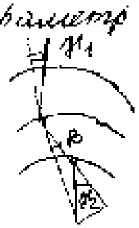
$$\frac{\rho\,\partial^2\theta}{\partial t^2} = \left(K + \frac{4}{3}\mu\right)\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial x_3^2}\right) - \text{волновое уравнение}$$

$$c_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

$\theta = f(x - c_p t)$

Определение скоростного разреза на основе данных по годографам объемных волн

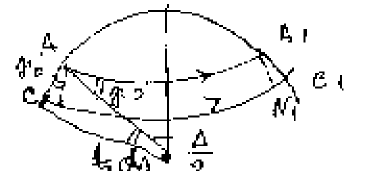
1. Параметр сейсмич. луча p



$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2}$$

$$\frac{r \sin i}{c} = const = p. \text{ (параметр луча).}$$

2. Параметр луча, как производ. годографа



AA_1 и CC_1 — два близких луча

$dt = 2\frac{|CM|}{c_0}$; $|CM| = |CA| \sin i_0$

$|CA| = r_0 \frac{1}{2} d\Delta$ $\quad dt = r_0 \sin i_0 \frac{d\Delta}{c_0}$;

$$\frac{dt}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{c_0} = p$$

3. Метод Герглотца – Вихерта.

Условие применимости.

$\frac{dc}{dr} < \frac{c}{r} \Rightarrow$ Годограф $t = t(\Delta)$ – одн.-з. ф-я.

Известна $p = \frac{dt}{d\Delta} = p(\Delta)$

$\{p(\Delta)\} \to c(r_m) = \frac{r_m}{p_m}$ $\quad \Delta \le \Delta_m$

$\eta(r_i) = \frac{r_i}{p_i}$

$$\ln(r_i) = \ln r_0 - \frac{1}{\pi}\int_0^{\Delta_i} \operatorname{arch}\left[\frac{p(\Delta)}{p_i}\right] d\Delta$$

Поверхностные волны

а) Реш. волн. ур-е в виде суп. плоск. волн

$\theta = A e[i(k_j x_j - \omega t)] \Rightarrow$ объемн. волны (P, S)

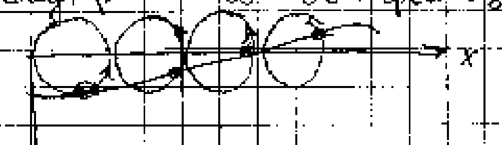
б) # в виде неодн. пл. волн.

$u_i^{(P,S)} = B\, e^{\left[-z\sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_{P,S}^2}}\right]} \times e^{[i(kx - \omega t)]}$

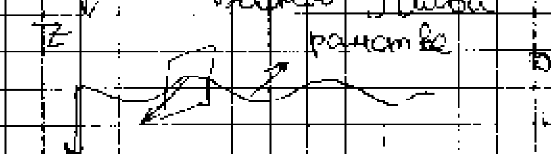
$k > \frac{\omega}{c_{P,S}}$ Сочетание и сдвиговых деформ. из-за усл. на границах

Пов. волны возб. при наличии в упр. среде границы раздела

Полупр-во со св. границей – волны Рэлея



Волны Лява – слой на полупространстве

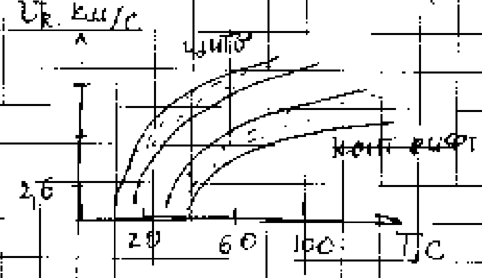


Деформации – чистый сдвиг, смещения ⊥ напр. ~~распространения~~

Поверхностные волны обл. дисперсией.

$v = f(T)$

Новый метод использ. данных по волн Венея и Лява — расчет дисперсионных кривых для разл. разрезов $v_p = v_p(r)$, $v_s = v_s(r)$ сравн. с данн. набл. и выбор оптим. модели.



Собственные колебания Земли

Сильные землетр. → СКЗ.

Три типа:

1) Радиальные $\vec{u} = u\,\vec{n}_r$
2) Крутильные $u_r = 0$, $\operatorname{div}\vec{u} = 0$
3) Сфероидальные

Период $\propto$ 60 мин $f_0 \sim 1$ ч.

Земная кора по сейсм. данным

1909 г. — Мохоровичич обн. границу раздела на глубине ~50 км

$v_P = 5{,}6$ км/с

$v_P = 7{,}8$ км/с — граница Мохо.

Распределение плотн. в Земле

Из сейсм. данн. $v_P = \sqrt{\dfrac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$ $v_S = \sqrt{\dfrac{\mu}{\rho}}$

$\Rightarrow \Phi(r) = \dfrac{K}{\rho}$

$\Phi = \dfrac{K}{\rho} = v_P^2 - \dfrac{4}{3} v_S^2$ — сейсм. пар-р.

Опред. $\rho(r)$ непоср. невозм., т.к. K меняется с глуб.

Факторы изменения плотн.:

1) Давл. и темп.
2) Фаз. переходы.
3) Измен. химич. состава.

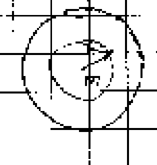
Урав. Адамса — Вильямса.

$$\frac{1}{K_S} = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_S = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_S$$ — адиабат. модуль.

$$dP = -\rho g(r)\,dr,$$

$$\frac{1}{\Phi(r)} = \frac{\rho}{K_S} = \frac{1}{\rho g}\frac{d\rho}{dr},$$

$$g = \frac{\gamma}{r^2}\underbrace{\int_0^r 4\pi\rho(r')r'^2\,dr'}_{m}$$

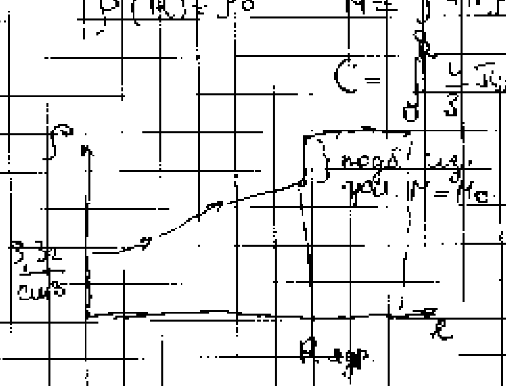


В рез-те получ.

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{\gamma}{r^2}\frac{\rho(r)}{\Phi(r)}\int_0^r 4\pi\rho(r')r'^2\,dr'$$

$\rho(R) = \rho_0$ $\quad M = \int_0^R 4\pi\rho(r')r'^2\,dr' \approx 6\cdot 10^{27}$

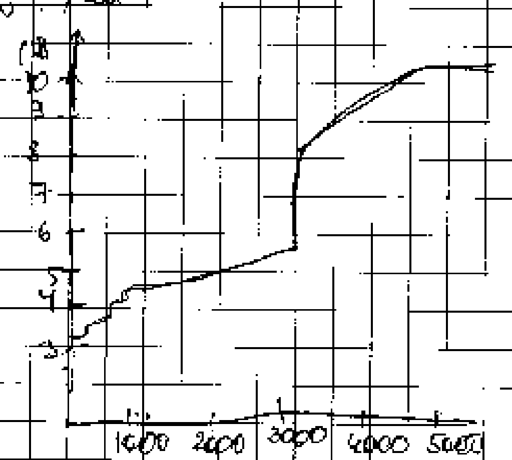
$$C = \int_0^R \frac{4}{3}\pi\rho(r')r'^4\,dr' = 8\cdot 10^{38}\ \text{г}\cdot\text{см}^2$$



Модель однородной мантии не проходит, т.к. $C_{\text{эксп. пол.}} < 0{,}4\,ma^2$

Оливин $(Mg, Fe)_2 SiO_4$ 57%
Пироксены 29%
(Гранат (пироп) 14%
} ниже .... до ....

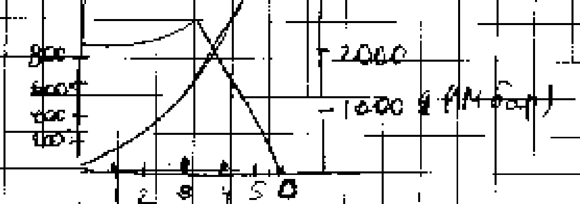
Фазовые переходы в оливине
400 км, 650 км, 1050 км.



Распределение ускорения силы тяжести и давления в Земле

$$g = \frac{4\pi\gamma}{r^2}\int_0^r \rho(r) r^2 dr$$

$$p = \int_0^h g(h')\rho(h')\,dh'$$



ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

- неупорядоченное во времени и пространстве поведение диссипативной среды (или поля), детали кот. не могут быть воспроизвед. на больших интервалах времени при сколь угодно точном задании нач. и гран. условий.

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{V}$$

U - масшт. скор.
L - масштаб длины

$$\frac{(\vec{V}\nabla)\vec{V}}{\nu \Delta \vec{V}} = \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

$Re < Re_c$ - теч. ламинарное
$Re > Re_c$ - течен. турбулентное
$Re_c \sim 10^2 - 1000^?$

$$Re_{океан} = \frac{UL}{\nu} \sim \frac{1[м/с] \times 10^3 [м]}{10^{-6} [м^2/с]} = 10^9$$

$Re_{атм} = 10^9$

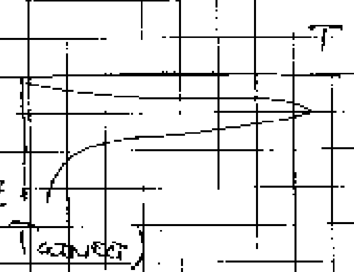
Источники турбулентности
- Поверхностные волны
- Внутренние волны
- Течения

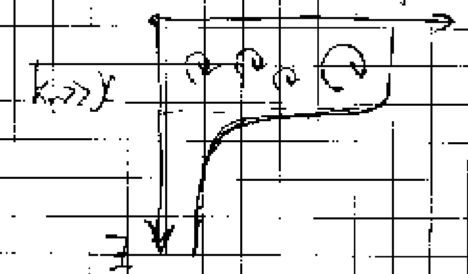
Масштабы турб. вихрей
$L_{гориз} \gg L_{верт}$
1 мм $< L <$ 1000 км

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z)$$

$Q(z) \sim e^{z/z_0}$

$z = 0: \quad \chi \frac{\partial T}{\partial z} = B(T_{вод.} - T_{атмос})$





$\nu = 1{,}4 \cdot 10^{-5}\ м^2/с$

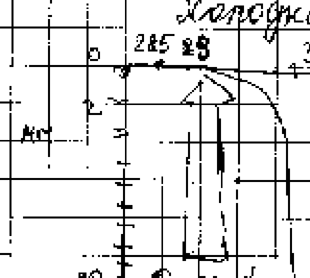
$K_t \sim L\sqrt{b}$

$b = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2}$

L – масшт. турбулент.
b – энерг. турбул. (удельная)

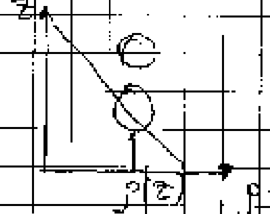
Турбул. коэффициенты
$k^{верт} < 10^{-2}\ м^2/с$
$k^{гор} < 10^{4}\ м^2/с$

Холодная пленка



$Q = [K(z) + \nu]\frac{\partial T}{\partial z}$

мал у поверхн. $\ae \cdot 1000 \frac{к}{м}$



$F = V g \frac{d\rho}{dz} z$

$A \sim \int_0^z F(z)\,dz$

$\rho V b = A$

$\frac{1}{\frac{g}{\rho}\frac{d\rho}{dz}}\frac{b}{} = z^2 \Rightarrow L \sim \frac{\sqrt{b}}{N}$

частота Брента Вяйсяля

Масшт. турб. в стратиф. жидкости

Масштаб турбул. в однород. жидкости при наличии среднего течения

$l \sim \left(\frac{du}{}\right) / \left(\frac{d^2\bar{u}}{}\right)$

Диссипация энергии турбулентности

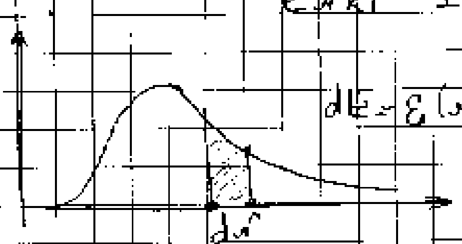
$\frac{db}{dt}\ \left[\frac{м^2}{с^3}\right]$

$\frac{db}{dt} = f(b, L) \Rightarrow \frac{db}{dt} \sim \frac{b^{3/2}}{L}$

ЗАКОНЫ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Испуск. спос. λ, T

$\mathcal{E}(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1}\quad \left[\frac{Дж}{м^2 с}\frac{1}{м}\right]$



$dE = \mathcal{E}(\lambda, T)\,d\lambda\ \left[\frac{Дж}{м^2 с}\right]$

$\underbrace{\mathcal{E}(\lambda, T)\,d\lambda}_{dE} \Rightarrow \left\{\lambda = \frac{c}{\nu}\right\} \Rightarrow \mathcal{E}^*(\nu, T)\,d\nu$

$d\lambda = -\frac{c}{\nu^2}d\nu$

$\mathcal{E}(\lambda, T)\,d\lambda = \mathcal{E}^*(\nu, T)\frac{c}{\nu^2}(-d\nu)$

$\mathcal{E}(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}\quad \left[\frac{Дж \cdot с}{м^2 \cdot с}\right]$

$h\nu \ll kT$
$\boxed{\mathcal{E}(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2}kT}$ – Закон Рэлея–Джинса

~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~ ~~[illegible]~~

Закон смещения Вина:

$\varepsilon(\lambda,T)\,d\lambda = \frac{E(\alpha)}{\alpha^5}\,d\alpha$

$\frac{\partial}{\partial \alpha}\left(\frac{E(\alpha)}{\alpha^5}\right) = 0 \Rightarrow$

$\lambda_{max} = 2{,}898 \cdot 10^{-3}\ [м \cdot К]$ - пост. Вина.

$\boxed{\lambda_{max} T = \lambda_{max}}$

Закон Стефана-Больцмана.

$\boxed{E = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda,T)\,d\lambda = \sigma T^4}$

$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}\right]$

Серое тело - тело коэфф. поглощения котор. меньше 1 и не зав. от длин. волны, ... и абсол. температ.

β - коэфф. серости

$E = \beta \sigma T^4$

Солнечн. постоян. (S_0) - суммарн. поток солн. излучения, проходящий через ед. пл. 1 кв. м, перпенд. направ. лучей и наход. вне земной атмосферы на средн. расст. Земли от Солнца, т.е. 1 а.е. ($149{,}6 \cdot 10^9$ м)

$S_0 \approx 1367\ Вт/м^2$

$\Delta S_0 < 0{,}01\%$ - солн. пятна

$\Delta S_0 < 0{,}1\%$ - 11 летн. цикл.

Светимость Солнца

$L_\odot = S_0 4\pi r^2 \approx 3{,}84 \cdot 10^{26}$ Вт. ($T = 5770\ К$)

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

~75% энергии всех землетр. приход-ся на Тихоокеанский пояс.

Зоны Беньофа - зоны возможн. землетр.

Землетряс.:

+ Взброс (сдвиг в вертик. плоскости).
+ сдвиг (в горизонт. пл-ти)

① Шкала бальности (12 баллов) - характ. разр. эффект.

② Шкала магнитуд

① Шкала Меркалли

② 1935 г. Рихтер

A - амплитуда записи сейсмографа. Эта шкала определ. земл. стандарт. масштаба и ср. с ними другие землетр. по их максим. амплит.

$M = \lg[A(\Delta)/A_0(\Delta)]$.

A_0 - нек. станд. земл. на расст. 100 км от станции. При изм. исп. один и тот же прибор.

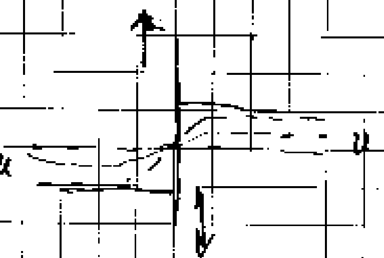
Связь магнитуды и энергии.

$x = A \cos(2\pi t/T)$.

$E \sim \int_0^t v^2 dt \sim (A/T)^2$.

Модель очага землетрясения

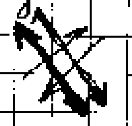
Теория упр. отдачи (Рейд)

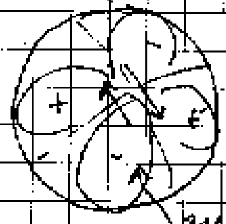


1. Накопление напряжений в процессе упр. деф. ни.

2. Разрыв и смещение блоков

Модельное приближение.





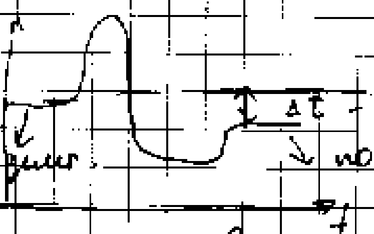
+ - растяжение
- - сжатие.

знак первого вступления

По амплитудам нов. ых волн определяют M_0 - сейсмич. момент землетряс.

$M_0 = \mu \bar{v} \cdot S$.

$\bar{v}$ - смещ. по разлому
μ - модуль сдвига
S - площадь разлома



$\Delta\tau$ - величина сброса напр. (Артемьев)

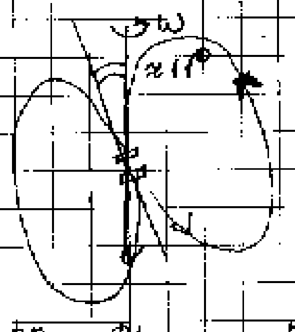
$M_0 = C\,\Delta\tau \cdot S^{3}$ Можем оценить $\Delta\tau$

Лавинно - неуст. трещинообразование

Долгосрочное прогнозирование

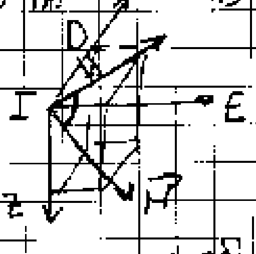
а) ∃ Сейсм. циклы. Сильн. землетр. ~ 100-150 лет
б) Сущ. миграция сейсмич. активности, вдоль разломов.

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ



$|\vec{H}| = 0{,}69$ Гс — Гаусс
1 Гаусс $= 10^{-4}$ Тл.

I - наклонение
D - склонение



1600 г. - Уильям Гильберт сделал подобн. приближение.

1835 Гаусс - разложение геомагн. поля по сферическим ф-ям. Первые члены соотв. полю магн. диполя

$H_Z = \frac{2M}{a^3}\cos\Theta$

$H_\Theta = \frac{M}{a^3}\sin\Theta$

$M = md$ - магн. момент.

$M \sim 8 \cdot 10^{25}$ СГСМ.

Недипольное поле $\sim 0{,}02$ Гс. $\sim 3\%$ от дип. поля.

Внешнее поле:
ионосферное происх. $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ Гс,
а во время магн. бурь до $2 \cdot 10^{-3}$ Гс.
ионосф. вариации имеют период от минут до суток.

Главн. часть геомагн. поля - это обл. постоянной

Конец широк. поле
Ср. частота ~ 3000 т. лет.
Граи частота Т ~ 100 ~ 5000 лет.

Палеомагнетизм –
изучение истории магн поля земли

Магнитн. минералы рассеяны в силикатн массе горн. пород.
(от 0,1 до 10%)

Магнетит Fe_3O_4 многодом. зерно
Маггемит γ. Fe_2O_3.
Гематит Fe_2O_3 - однодом. зерна
Пирротин FeS

Горн. породы:
Осадочные (восстан. осадков, при разрушен. горн пород)
Магматические (при остывании лавы, магмы)
Метаморфические (в обл. выс. давлен, температ)

Намагнич. изверженных пород является термоостаточн. (TRM).

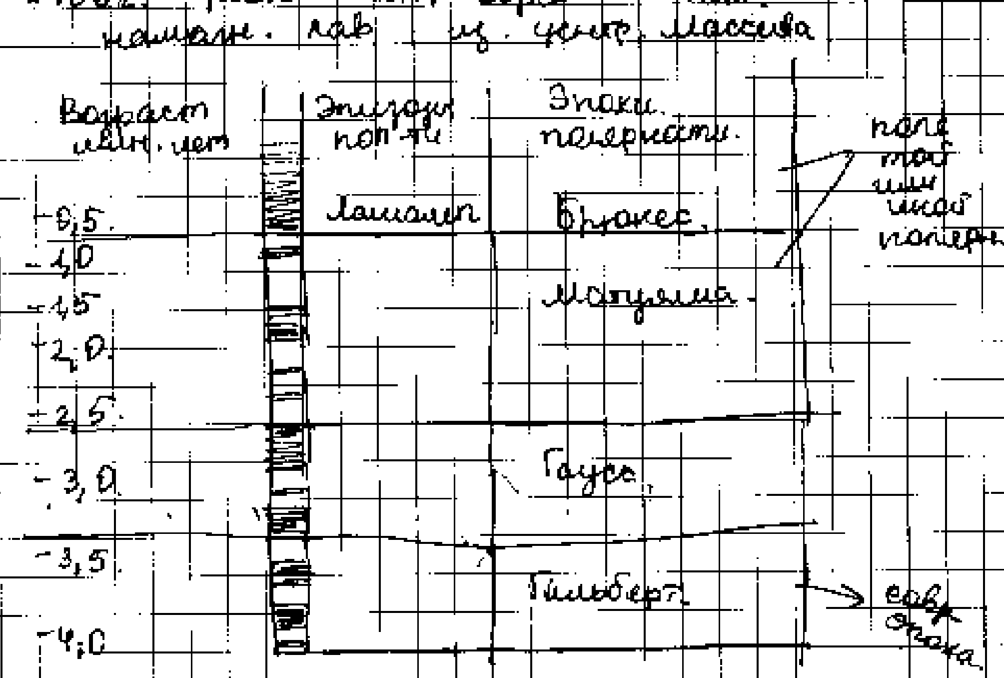
TRM приобр при охлажд. породы ниже Tc и сохр. при охлажд ниже блокир. температ. $T_b \approx T_c - \delta$

Осад. породы обл. химическ остаточн. намагн. (CRM) (блокирован. размер растущих однодоменных зерен гематита)

Т.е породы „запомин" древнее магн. поле

TRM ~ J ~ $10^{-3} \div 10^{-2}$ СГСМ CRM ~ $10^{-6} \div 10^{-5}$ СГСМ

1906 г. Брюнес обн. обратн. остат. намагн. лав из центр. Массива



Киаман - период спокойного поля (300-250 млн лет наз)

Состав ядра

Плотн. внешн. ядра от 9,9 г/см³ до 12,2 г/см³
-//- внутр. ядра от 12,6-13,0 г/см³

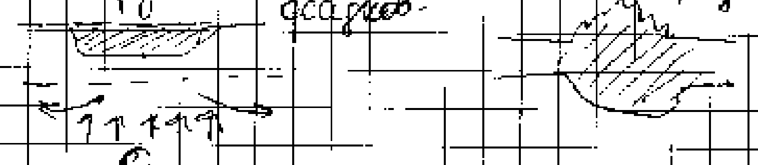
Экспер. с ударными волнами (давл до 3,6 М бар) показали
ρ ж. - желез. ~ 10,6 г/см³ > ρ вн. ядра
а в усл. вн. ядра
$\rho_{Fe} <$ ρ внутр. ядра.

Внутр 80% Fe.
20% Ni

Синтез геофизич. данных.
Современная геодинамич. теория.

① Исходные рубежи. Геосинклинальная теория.

Сорбция и насаж. осадков. прогрев, инверсия и образование гор



Альфред Вегенера:
континенты могут образов. в рез-те движения плит, преобладание горизонтальных движений.

② Геотермические данные Литосфера и атмосфера

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

$\bar{Q}_{конт} = 56{,}5$ мВт/м² $\bar{Q}_{океан} = 78{,}2$ мВт/м²

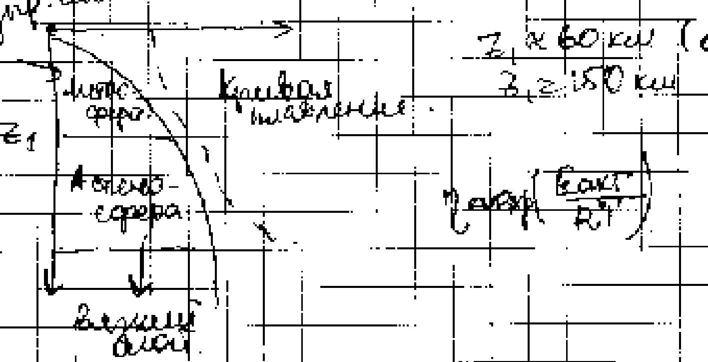
Северная часть Тих. океана
$\bar{Q} = 95{,}4$ мВт/м²
Африка $\bar{Q} = 49{,}8$ мВт/м

В конт. коре существенна генерация тепла радиоакт. изотопами
U^{238}, U^{235}, Th^{232}, K^{40}
Горн. породы - кислые, основные, ультраосновн.
Граниты - $4 \cdot 10^{-6}$
$2{,}7 \cdot 10^{-6}$

Перидотит $U \approx 0{,}01 \cdot 10^{-6}$
$Th \approx 0{,}04 \cdot 10^{-6}$

③ В контин. коре до ~50% Q - вклад радиоакт. изотопов.

Тепл. поток, идущ. через океан. выше больше тепл. потока, идущ. через конт.

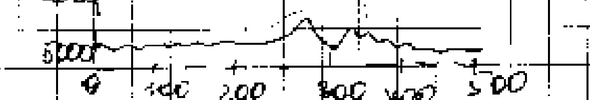


$Z_1 \approx 60$ км (океан).
$Z_1 \approx 150$ км (конт).

$\eta \sim \exp\left(\frac{E_{акт}}{RT}\right)$

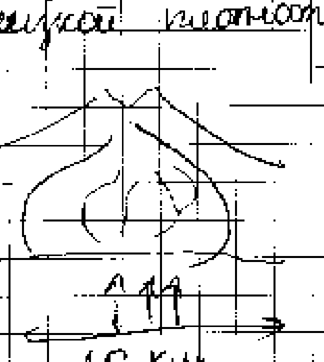
④ Исследование дна океанов

Срединно-океанич. хребты → сейсм. зона.



Примерная изостазия хребтов указ. на присутств. в осевой зоне горяч. вещ-ва с низкой плотностью

$Q \approx 200 - 400$ мВт/м²



Магматическая камера.

[2] Магнитные полосовые аномалии.

Гипотеза Вайна Мэттьюза и разрастание океанич. дна.

ось хребта

участки сонаправл. и антинапр. направл. совр. магн. поля.

~ % от велич.

Идея "магнитной записи"

растекание с тех времени

С помощью этого можно опр скорость растекания

Поперечные разломы - трансформные разломы

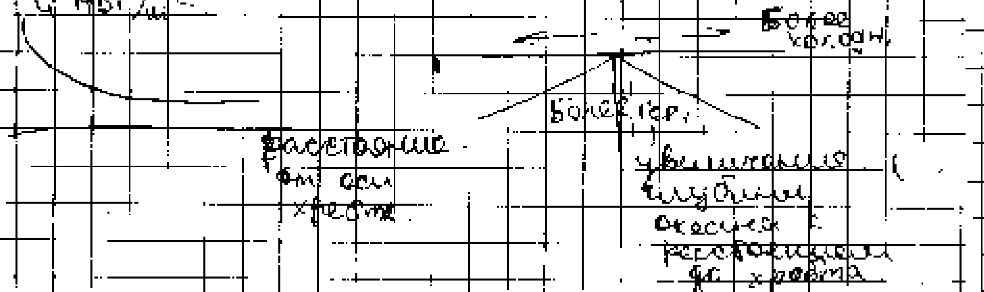
[3] Глубоководное бурение.

Возраст уч-ков закономерно увелич. с расстоян. от оси хребтов

Самые древние на перифер. Т. Океана (возраст юра, 190 млн. лет)

[4] Тепловой поток и глубина дна

Q мВт/м²



более холодн.

более гор.

расстояние от оси хребта

увеличение глубины океанск. с расстоянием до хребта

[5] Зоны субдукции

Континентальные окраины → пассивного типа (атлант. океана) / активного типа (зап. побер. Америки, вост. побер. Азии)

Зоны Беньофа - зоны, в кот выдел. 80% выделен. энергии.

литосфера

астеносфера

г литосфера тянет-толкает

Континентальные рифты и "горячие точки"

Конт. рифты - узкие впадины, ширина, связаны с вулка-

Байкальский рифт, Рифт Рио Гранде, Вост.-Афр. рифт. система, Рейнск. грабен.

Красное море и Афар

Физический механизм тектоники плит

При больш. временах - при пов. темпер. горн. породы - как вязкая жидкость

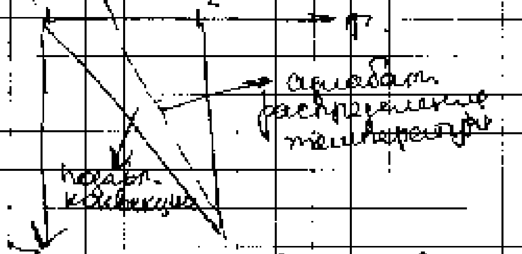
Тепловая конвекция

В воздухе

теплее

плавучая струя

Идеальная жидкость -



$$\rho = \rho_0(1-\alpha(T-T_0))$$

Условие конвекции:

$$\frac{dT}{dz} > \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ад} = \frac{g\alpha T}{C_p}$$ α - темпер. расширение.

Вязкая жидкость

$$R_a = \frac{\alpha\,\Delta T\,g\,l^3}{\nu\cdot\chi}$$ l - толщ. слоя жидк. χ - температуропр. ν - кинемат. вязкость

число Релея

$R_a \geq R_{a_{кр}}(\lambda)$ λ - длина волны возмущен.

$\min R_{a_{кр}} \sim 1000.$

Число Рэлея для мантии Земли

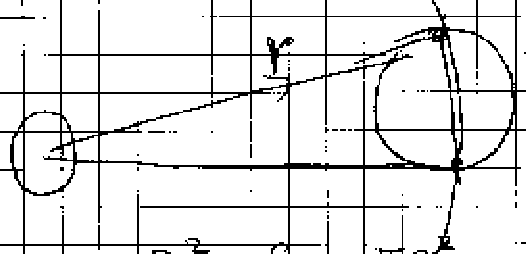
$R_a \approx 2{,}4\cdot10^7$

Ранняя эволюция Земли

Доархей	Архей	протерозой	палеозой	мезозой	кайнозой
4600	4000	2500	600	225	60 млн лет

3700 самые древние породы

Радиационный баланс в системе Солнце-Земля-Космос



$S_{пов.с} = 4\pi R_c^2$ $S_{сеч} = \pi R_з^2$ $S_{пов.з} = 4\pi R_з^2$

1) $E = \sigma T^4 \left[\frac{Дж}{м^2 с}\right]$

2) $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

$L_c = \sigma T^4 S_{пов.с}$

полная энергия, излуч. пов. солнца

$$\Phi_{c/з} = L_c\frac{\pi R_з^2}{4\pi r^2} = \pi\sigma T_c^4 R_c^2\frac{R_з^2}{r^2}$$

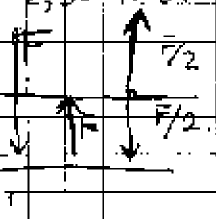
$$\Phi_з = \sigma T_з^4 S_з = 4\pi\sigma T_з^4 R_з^2$$

$\Phi_{c/з}(1-A) = \Phi_з$ (A — альбедо Земли)

$$T_з = T_c\sqrt{\frac{R_c}{2r}}(1-A)^{1/4} \approx 255\,K \approx -18^\circ C$$

$A = 0{,}3$ $R_c = 6{,}96\cdot10^8$ м $T_c = 5770$ K $r = 149.6\cdot10^9$ м

Опытн. данн. 288 K



$\Phi_c(1-A) = B\Phi_з$ Вк

$B \approx 0{,}6$

$T_з = 288\,K \approx 15^\circ C$

A (T_3) B (T_3)

Космическая погода

Солнечная активность – совокупность местных процессов на Солнце (пятна, протуберанцы, возрастание УФ, рентген. и радиоизлуч. вспышки)

Явл. внешн. солнечн. активности:
- Магнитн. поле солнца
- Магн. цикл 11 лет
- При смене ~ 27 сут (видим с земли)
  цикла активн. меняется полярность магн. поля солнца

Темпер. пятен ниже на 1000–1500 К.

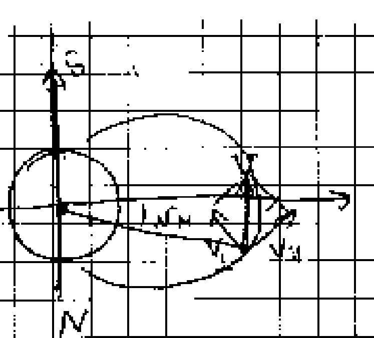
Солнечный ветер – поток разр. плазмы из внешних областей солн. короны в межпланетное пр-во

Причина: $\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr} = -G\frac{M}{r^2}$ нет

$$V_r\frac{dV_r}{dr} + \frac{1}{\rho}\frac{dp}{dr} = -G\frac{M}{r^2}$$

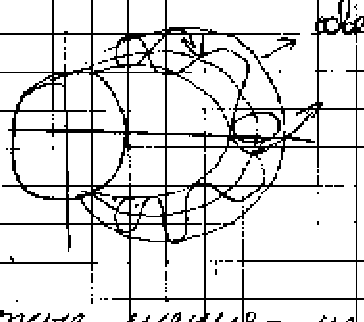
Свойства С.В.:
- запол. косм. прост-во до 100 а.е.
- Осн. сост.: протоны и эл-ны
- Скорость част. 300–700 км/с
- концентр. $r = 1$ а.е. $n \sim 10$ част/см³
- $\sim n \sim r^{-2}$
- число Маха $\downarrow$

Причины: На Солнце происходят ударные волны, приход к земле которых вызывают возмущен. магнитосферы – магнитные бури



$$\frac{m(V_\perp^2 + V_\parallel^2)\sin\theta}{H} = const$$ адиаб. инвариант

H – напр. магн. поля



совершает колебание, а также меридиональный дрейф

Т.о. время магн. бури могут вози. пол-е сияния

Полярные сияния – излучение атомов атмосферы, возбуждаемых в рез-те столкн. с частицами, высыпающимися из радиационного пояса

Атомы O_2 – зеленое и красное свеч.
Ионизир. молекулы азота – инфракр. и фиолетовое

Атмосферное электричество

- Отрицат. заряд земли ~ $3 \cdot 10^5$ Кл.
- Атмосф. зар. положит.
- $\Delta\varphi$ (Земля – ионосфера) ~ 300000 В.

Зоны:
- хорошей погоды: отсутствие [illegible], проводимость и [illegible]
- нарушен. погоды: разряды гроз и др., осадки; в вариации поля [illegible]

В нов-ти земли $E \sim 130$ В/м, с высотой уменьшается.

Вариации напряж. эл. поля во времени

Унитарные (изменение зар. земли в целом) = Локальные $V/-//$ в отдельн., лок. районах

Электропров. атмосф.

$\lambda = \sum q_i n_i u_i$

q_i - заряд

n_i - конц.

u_i - подвижн.

1) У поверхн. Земли $\lambda \approx 2\text{-}3 \cdot 10^{-14}$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$

$n \approx 20$ ион/см^3

2) $n \sim 10$ ион/см^3

$\lambda \uparrow$ (незначительно)

3) выше слоя перемеш. $\lambda \uparrow$ экспон.

$\lambda \sim 30 \cdot 10^{-14}$ Ом. м

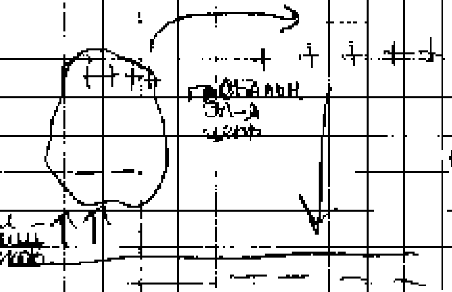
Источники ионизации:

- космич. лучи
- Изл-е радиоакт. вещ-в.

Плотность тока, тек на пов Земли $\sim 10^{-12}$ А/м^2

Генерат. эл-ва.

- облака и осадки
- пыл бури.
- изв. вулканов
- метели и т.д

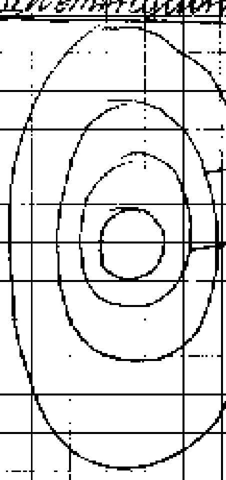


Дистанционное зондирование Земли

36000-40000 Геостационарные спутники

500-2000 - Ресурсн. и метеорол.

пилотир. спутники



Оптические явления в атмосфере и океане

В атмосфере

1. Преломление
2. Поглощение и рассеяние.
3. Ядрами конденсации

1.
   1) Миражи
   2) Фата - моргана
   3) Мерцание
   4) Смещение пол-я неб. тел

2.
   1) Зеленый луч
   2) Голубой цвет неба
   3) Сумерки

3.
   1) Радуга, белая радуга
   2) Гало
   3) ложные солнца и луны
   4) Световые столбы

4. Рефракция - изменение направл. световых лучей в с. реде с (плавно)

изменяющимися в простр-ва показ. преломления

Фор-ла Лоренц-Лоренца

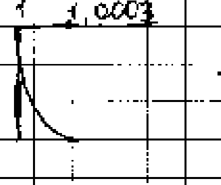
$\frac{n^2-1}{n^2+2}\cdot\frac{1}{\rho}=r$ r - пок. вещ-ва
n - пок. пр-я
ρ - плотность среды

$\rho(z)=\rho_0 e^{-z/H}$ - изм. плотн. с высотой

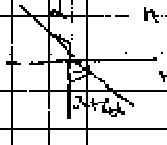
$n=1+\Delta n \approx 2\frac{\Delta n}{3}$

$\frac{\Delta n}{\rho}=const$ $\Delta n(z)=\Delta n_0\frac{\rho(z)}{\rho_0}$

$n(z)=1+(n_0-1)e^{-z/H}$



1   1,0003



$\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+\Delta\alpha)}=\frac{n+\Delta n}{n}$

$\Delta\alpha \ll \alpha$

$\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+\Delta\alpha)}=\frac{1}{1+\Delta\alpha/tg\,\alpha}$

$-\frac{\Delta\alpha}{tg\,\alpha}=\frac{\Delta n}{n} \Rightarrow -\frac{d\alpha}{tg\,\alpha}=\frac{dn}{n} \Rightarrow \int_{\alpha_0}^{\alpha}\frac{d\alpha}{tg\,\alpha}=-\int_1^n\frac{dn}{n}$

$\frac{\sin\alpha_0}{\sin\alpha(z)}=n(z)$ — угол под. на верхн. гр. атм.

Влияние
- искажение формы (солнца)

ЗЕЛЕНЫЙ ЛУЧ

Миражи - опт. явл. состоящ. в том, что вместе с предметами его мнимое изображение

Причина - Полн. внутр. отр. света на границах разд. слои воздуха с разн. температурой

Типы: верхний, нижний, боковой.

Фата-Моргана - отдаленные предметы видные многократно.

Мерцание звезд - быстр. изменения блеска и цвета звезд, вызываемые преломлением лучей в быстро пробегающих струях воздуха разн. плотности.

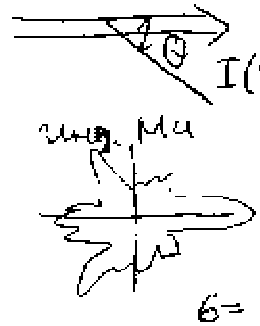
(2) Закон Бугера

$I(x)=I_0 e^{-\sigma x}$ $\sigma[м^{-1}]$
$\sigma(\nu)$ - завис. коэфф. поглощ.

Ослабл. электр. волн
- поглощение (переход энер. в тело)
- Рассеяние (переизлуч.)

Ми -
- крупн. част. (неоднор.)
$D \gg \lambda$

Релея
мелкие част.
$D \ll \lambda$



$I(\theta)$ индикатрисса рассеяния

инд. Ми

Индик. Релея

$I\sim\frac{1}{\lambda^4}[1+\cos^2\theta]$

Определяет цвет неба и солнца на закате.

$\sigma=k+\varepsilon$
k - пок. поглощ.
ε - пок. рассеяние

	k, $м^{-1}$	ε, $м^{-1}$	Пок. ослаб. ε, $м^{-1}$
Океан	0,07	0,16	0,23
Атмосф.	0	$2\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-4}$

Саргассово море, 0,06 б.

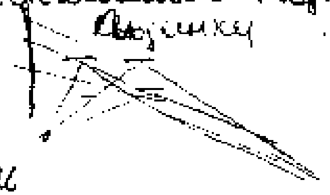
Цвет океанов, морей и вод. суши
1) отр. пов. воды (цвет неба)
2) рассеян. в толще воды

1) Коэф. ~~отражения~~ рассеян. на пов-ти возд - вода $R \neq R(\lambda)$
2) коэфф. отражения $R \neq R(\alpha)$

F - трофные - желтые вода (болота)

(3) Эффекты, выз. кристаллами льда:

Свет. столбы



http.// ocean.phys msu.ru
„Учеба“