

Геофизика



2026 Лекция №8

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

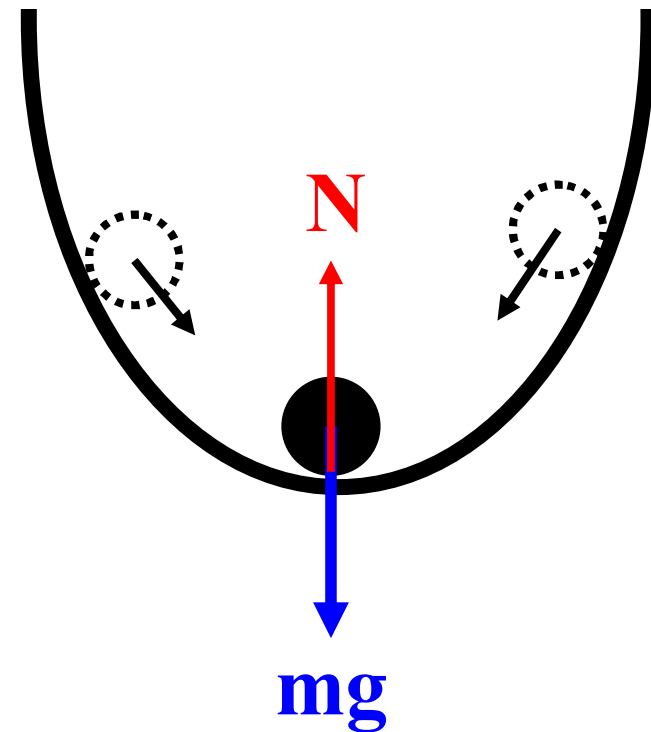
Волновые движения в гидросфере

Волны – изменения некоторой совокупности физических величин (полей), способные перемещаться (распространяться), удаляясь от места их возникновения, или колебаться внутри ограниченных областей пространства

[Физическая энциклопедия]

Волны (механические) – колебания, распространяющиеся в пространстве

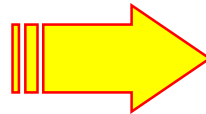
Колебания возле положения устойчивого равновесия – действие возвращающей силы



ТИПЫ ВОЛН

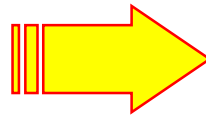
(классификация по типу возвращающей силы)

сила тяжести



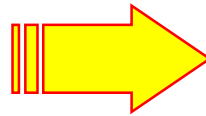
гравитационные
поверхностные и
внутренние

сила
поверхностного
натяжения



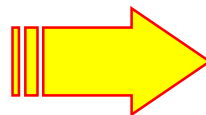
капиллярные

сила упругости



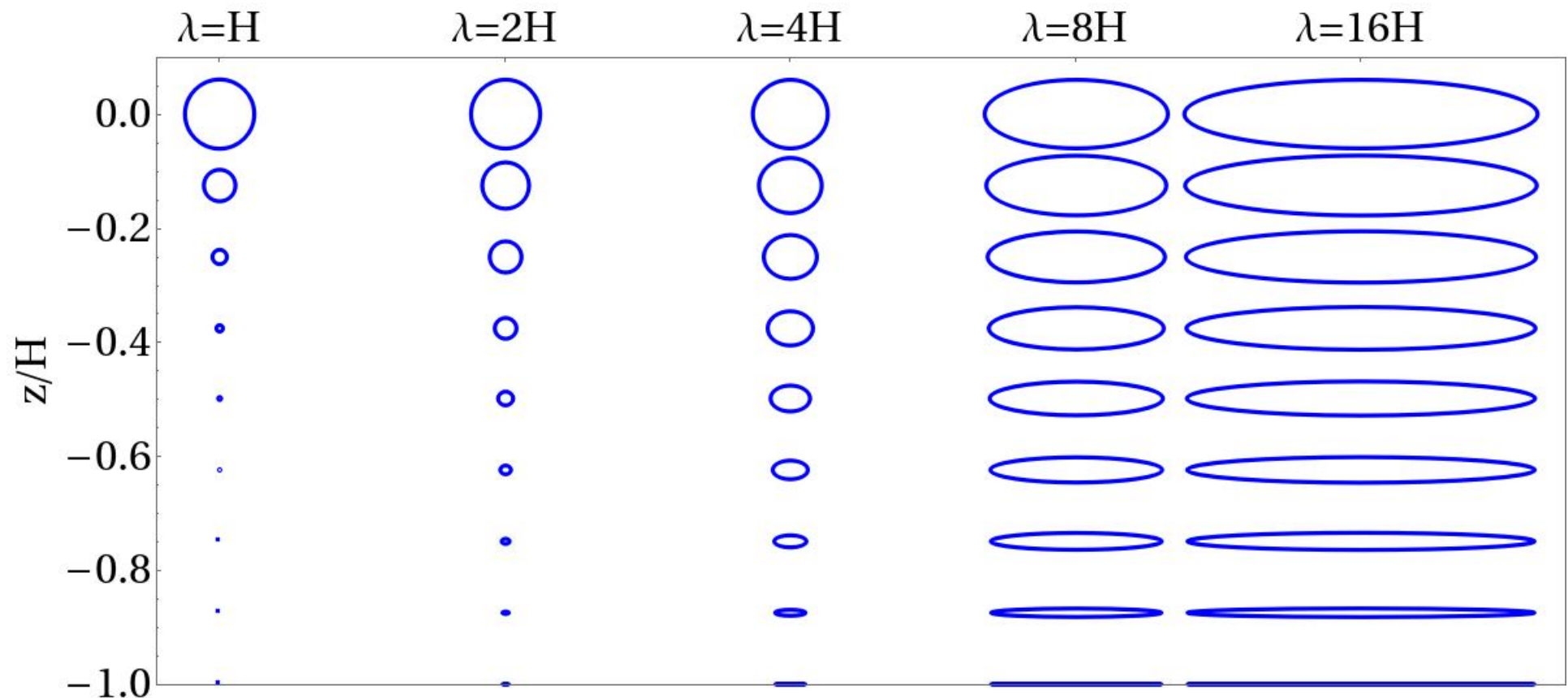
(гидро)акустические

сила Кориолиса



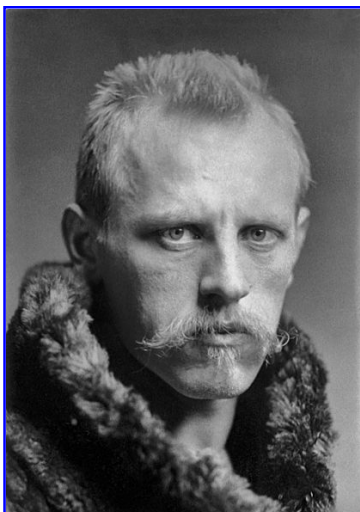
гироскопические
(инерционные)

Траектории частиц в поверхностных волнах малой амплитуды



λ — длина волны, H — глубина водоема

Эффект «мертвой воды»



**Фритъоф
Нансен
(1861 –1930)
норвежский
полярный
исследователь**

«Мы почти не двигались с места ... и будто тащили всю воду за собой. Что мы ни делали, - круто поворачивали, лавировали, описывали полный круг и пр., - все напрасно. Лишь только машина переставала работать, судно тотчас же останавливалось, точно схваченное чем-то за корму». («Фрам в полярном море»)



ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(классификация по причине возникновения)

- ветровые
- приливные
- анемобарические
- сейсмические (цунами)
- оползневые (цунами)
- вулканогенные (цунами)
- штормовые нагоны
- корабельные
- ...

Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г
оползень объемом $\sim 0.3 \text{ км}^3$

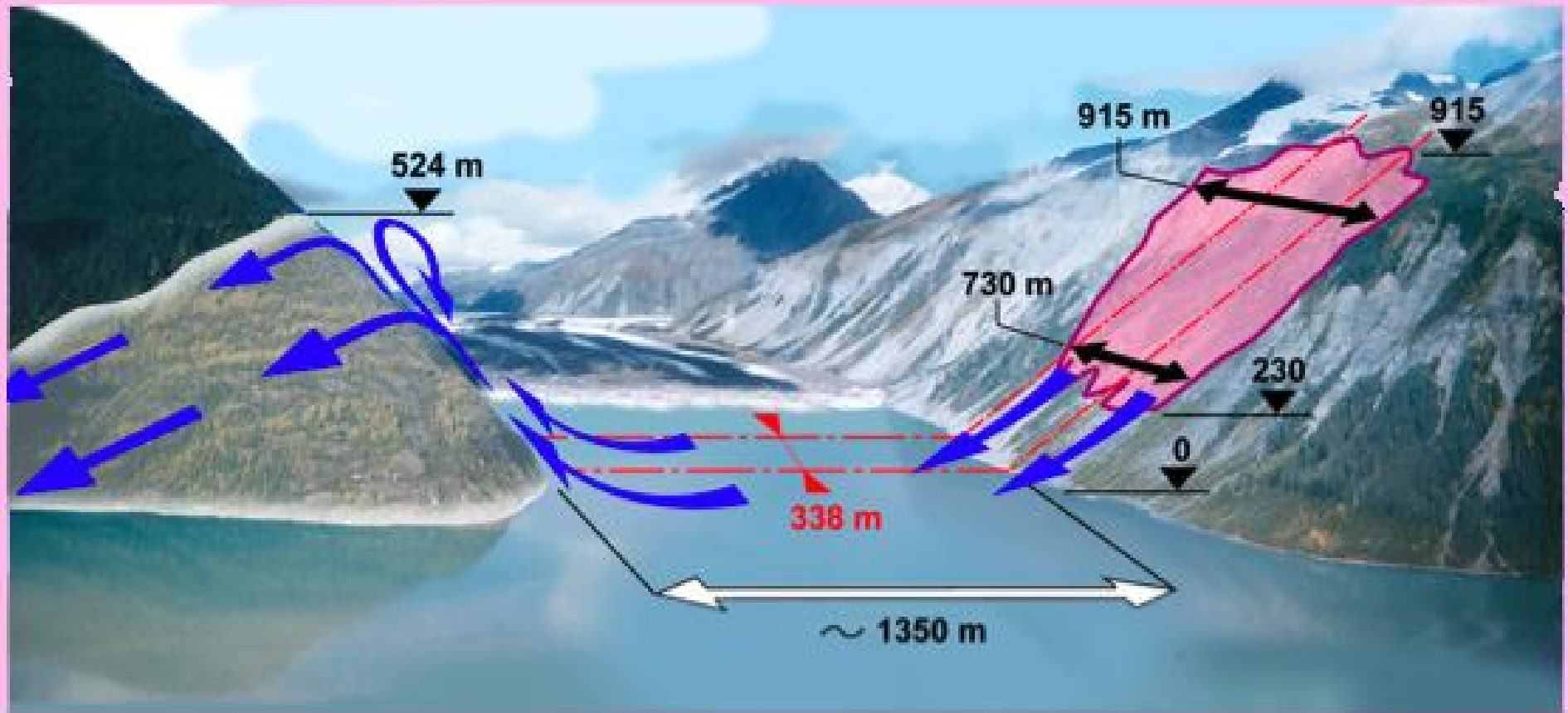


524 м

235 м



Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г
оползень объемом $\sim 0.3 \text{ км}^3$



ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(названия волновых явлений)

- зыбь (мертвая зыбь)
- сейши (стоячие волны)
- “волны-убийцы” (rogue wave, freak wave)
- цунами
- захваченные волны (рельеф дна, течения)
- приливные волны
- бор (tidal bore – приливной бор)
- поророка (Амазонка)
- риссага (о.Менорка)
- абики (о.Кюсю)
- солитон (частицеподобная волна)
- ...



Рис. 1. Фотографии повреждений, вызванных экстремальными волнами



а



б



в

Рис. 2. События с аномально высокими волнами: а — тонущий танкер «Prestige» (2002 г.); б — фотография, сделанная на танкере «Esso Languedoc» у берегов Дурбана в 1980 г; в — фотография «стены воды»

[Слюняев, 2017]

Риссага (бухта Съютаделла)

2015-04-22 12:00:00

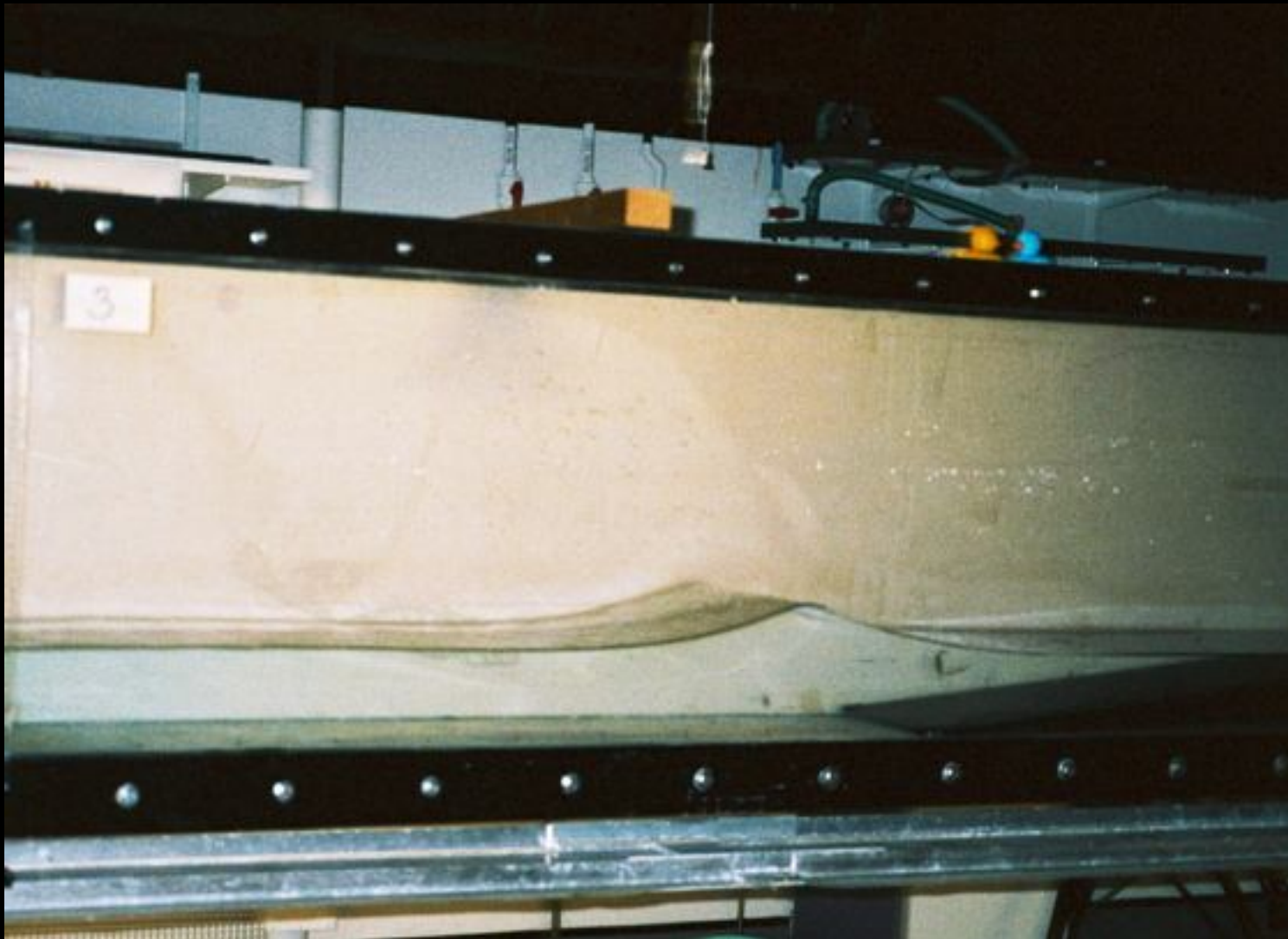
SCB-ETDCAM004



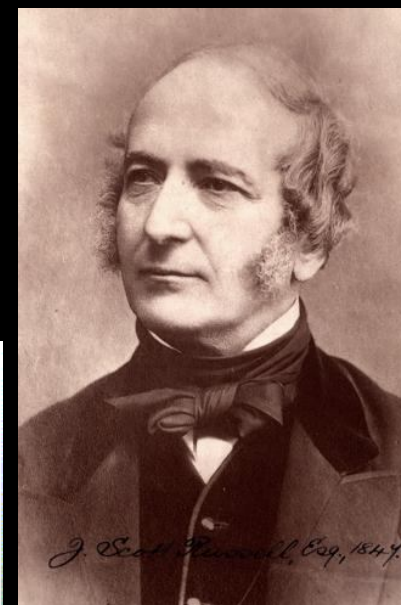
Риссага



СОЛИТОН

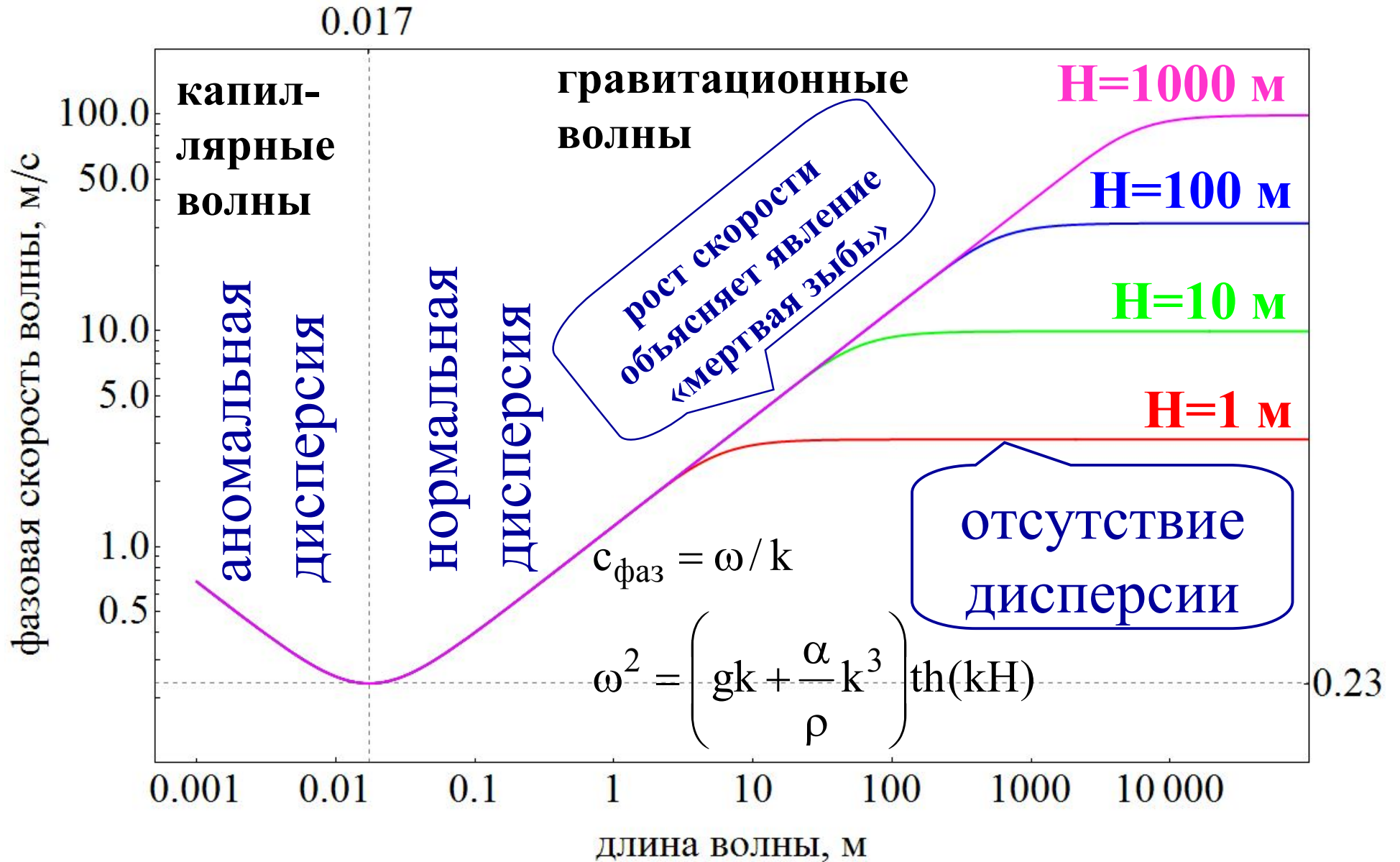


Открытие солитона (1834 г.)

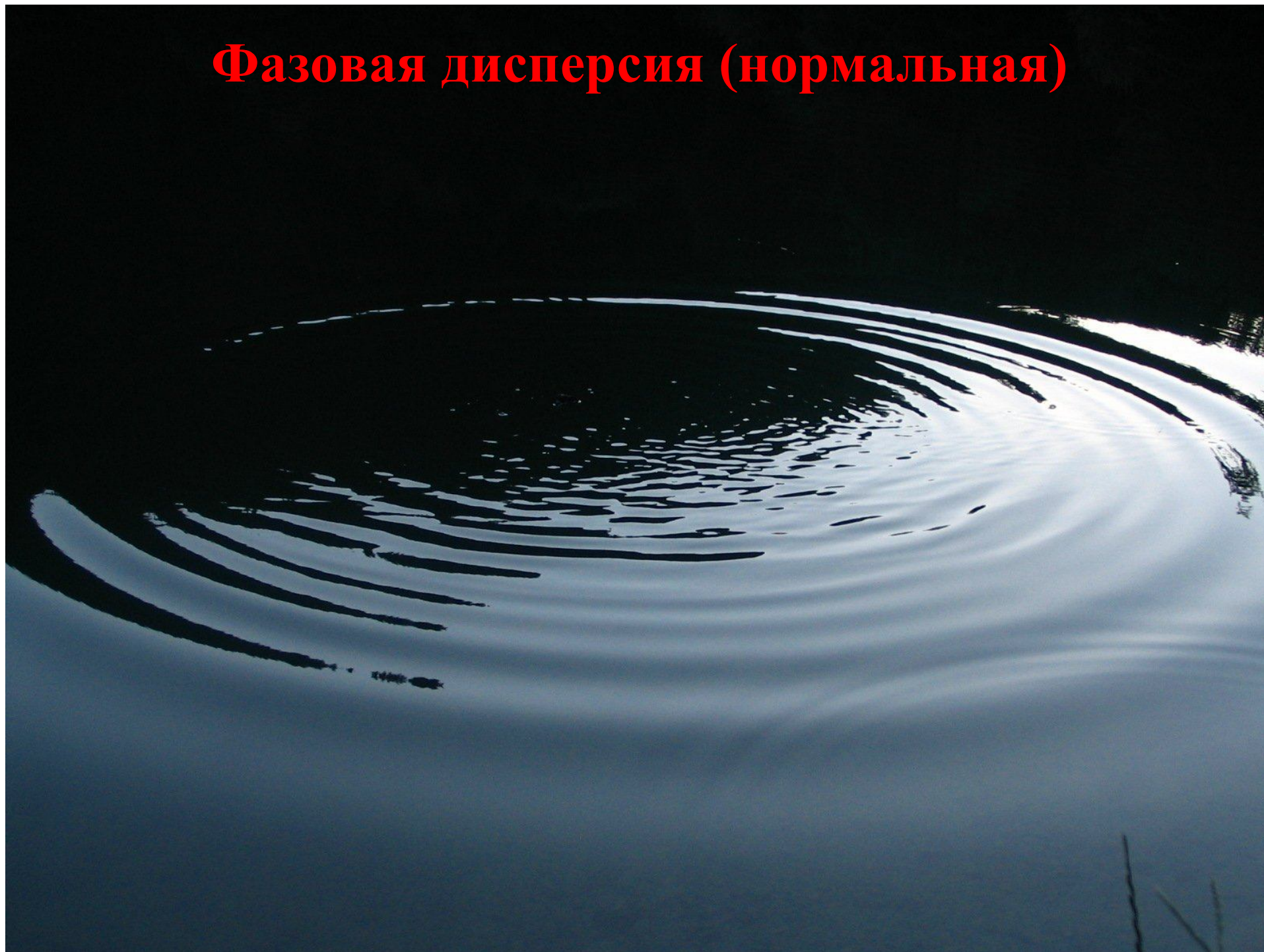


Джон
Скотт
Рассел
(1808-1882)

Фазовая скорость поверхностных волн на воде как функция длины волны и толщины водного слоя Н



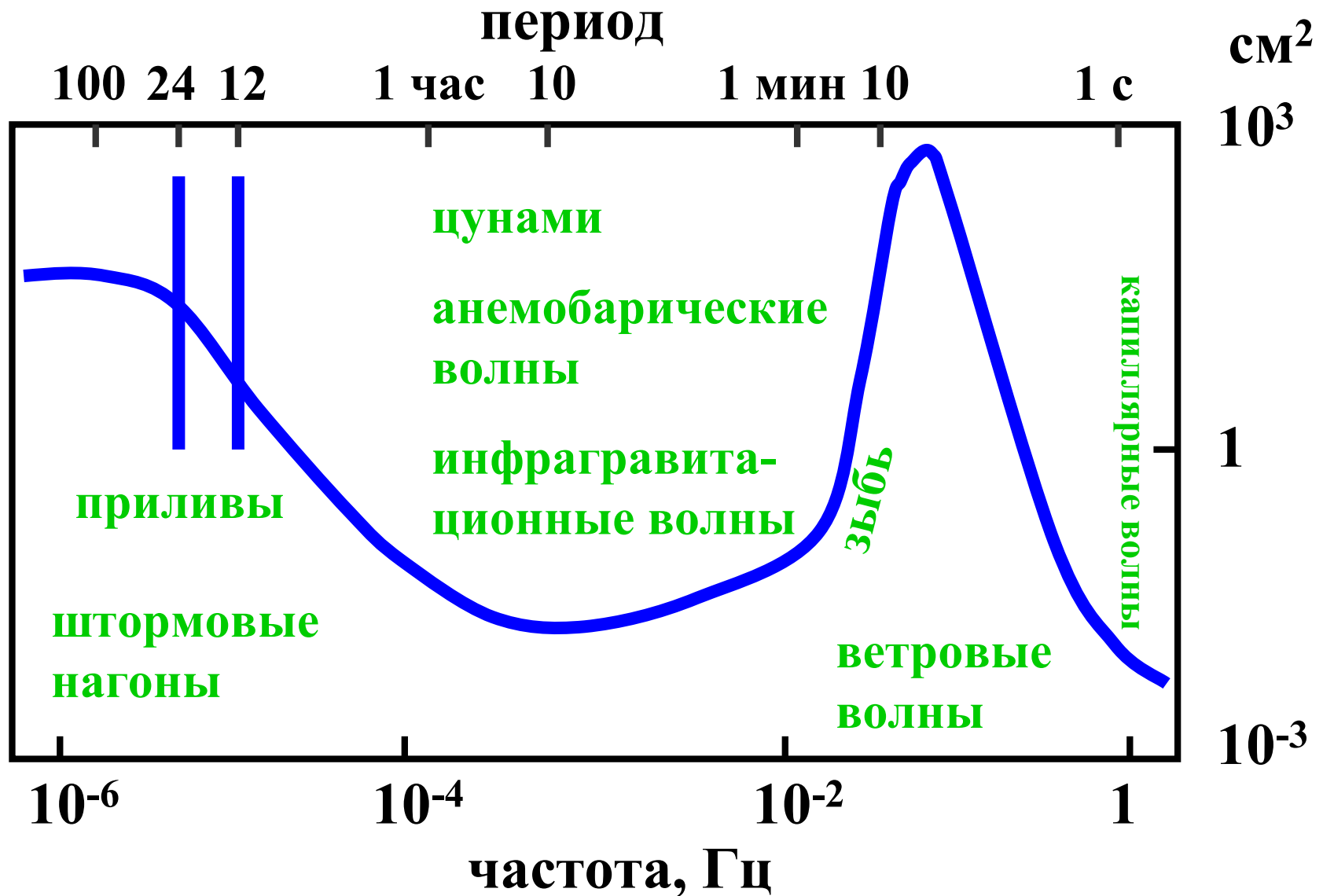
Фазовая дисперсия (нормальная)



Фазовая дисперсия (аномальная)



Спектр гравитационных поверхностных волн в океане



**Математическое
описание волновых
движений**

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \cancel{(\vec{v}, \vec{\nabla})} \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} + \cancel{2[\vec{v} \times \vec{\omega}]} \\
 \phantom{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + \nu \Delta \vec{v} + \cancel{\left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \vec{\nabla} \operatorname{div} \vec{v}} \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0
 \end{array} \right.$$

**Система уравнений для описания
линейных волн без учета вращения Земли
и сил вязкого трения**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \end{array} \right.$$

**Гравитационные
волны**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \\ \end{array} \right.$$

**Акустические
волны**

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

Постановка задачи о линейных поверхностных гравитационных волнах

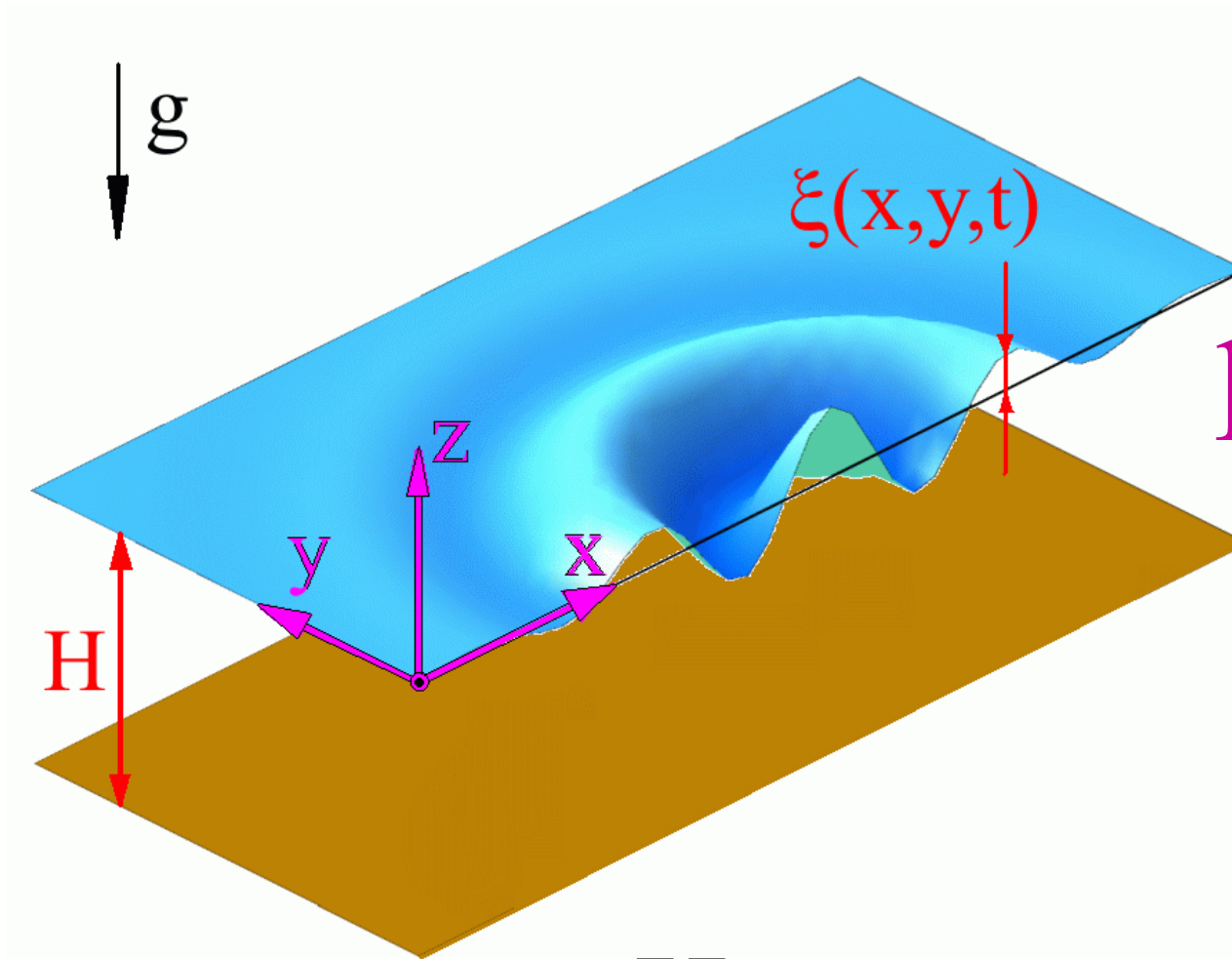
Граничные условия:

$$p|_{z=\xi} = p_{\text{атм}}$$

$$w|_{z=-H} = 0$$

$$H = \text{const}$$

$$|\xi| \ll H$$



**Линейная теория длинных ($\lambda \gg H$)
гравитационных поверхностных волн
в несжимаемой жидкости**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \Rightarrow \quad U_z \sim \frac{H}{\lambda} U_{xy}$$

$$U_z \ll U_{xy}$$

$$\cancel{\frac{\partial w}{\partial t}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

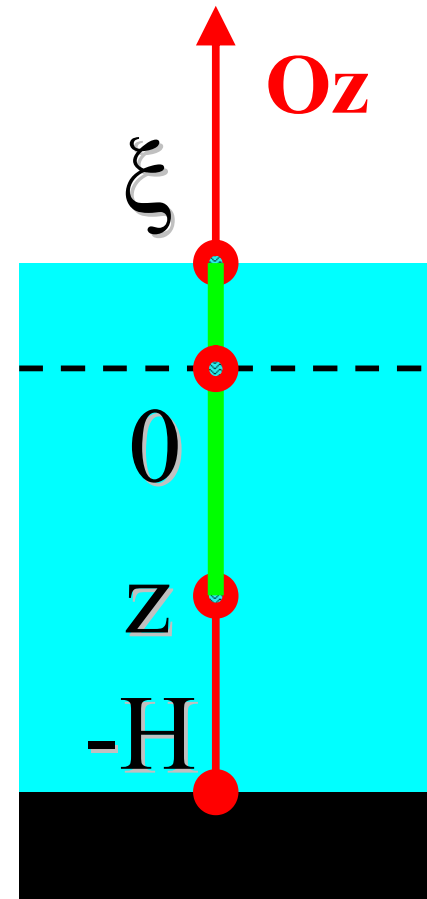
**приближение
гидростатики**

$$p(\xi) = p_{\text{atm}} = \text{const}$$

$$\int_z^\xi dz \left| \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \right.$$

$$p(\xi) - p(z) = -\rho g(\xi - z)$$

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



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

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

 \Rightarrow

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

 \Rightarrow

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

$(u, v) \neq f(z)$

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

$$\int_{-H}^{\xi} dz$$

$$|\xi| \ll H$$

$$(H + \cancel{\xi}) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \underbrace{w(\xi)}_{= \partial \xi / \partial t} - \underbrace{w(-H)}_{= 0} = 0$$

$$H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

$$H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} = -g \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t \partial y} = -g \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}$$

$$H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} \right) + \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0$$

Волновое уравнение для описания длинных гравитационных волн

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

Смещение
поверхности
воды

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \Delta \xi$$

$$c = \sqrt{gH}$$

скорость
длинных волн

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

$$u = u_0 f(x - ct)$$

$$\xi = \xi_0 f(x - ct)$$

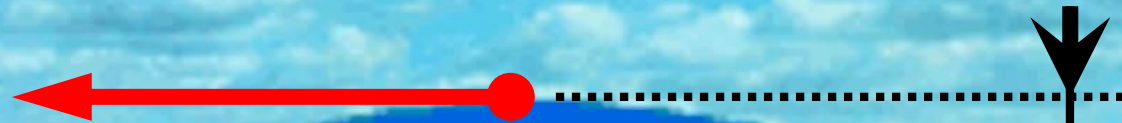
$$\frac{\partial u}{\partial t} = -cu_0 f'$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \xi_0 f'$$



$$-cu_0 f' = -g\xi_0 f'$$

$$u_0 = \xi_0 \frac{g}{c} = \xi_0 \frac{g}{\sqrt{gH}} = \xi_0 \sqrt{\frac{g}{H}}$$



$\sim 100 \text{ км}$

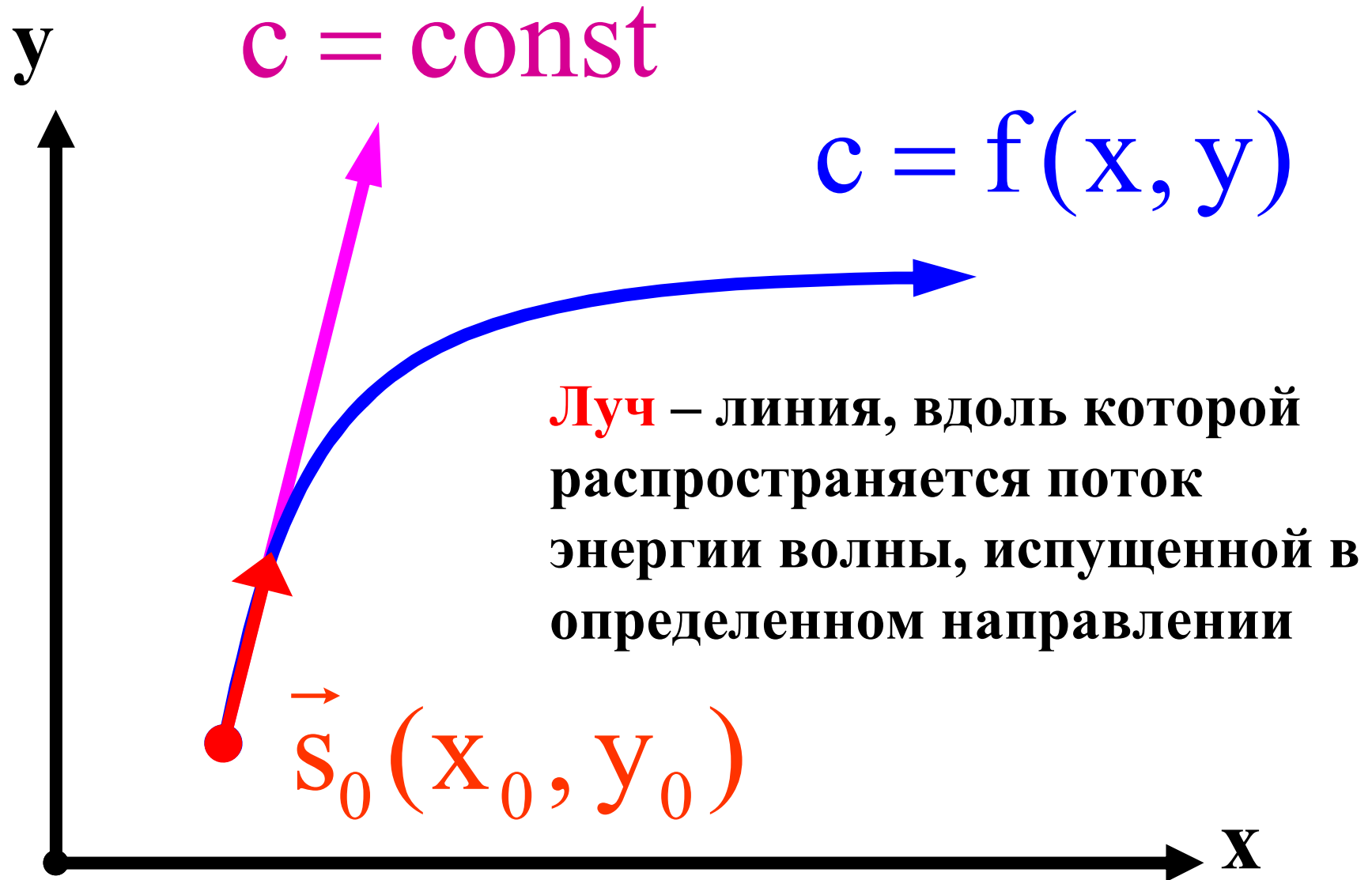
$A \sim 1 \text{ м}$

$H \approx 4 \text{ км}$

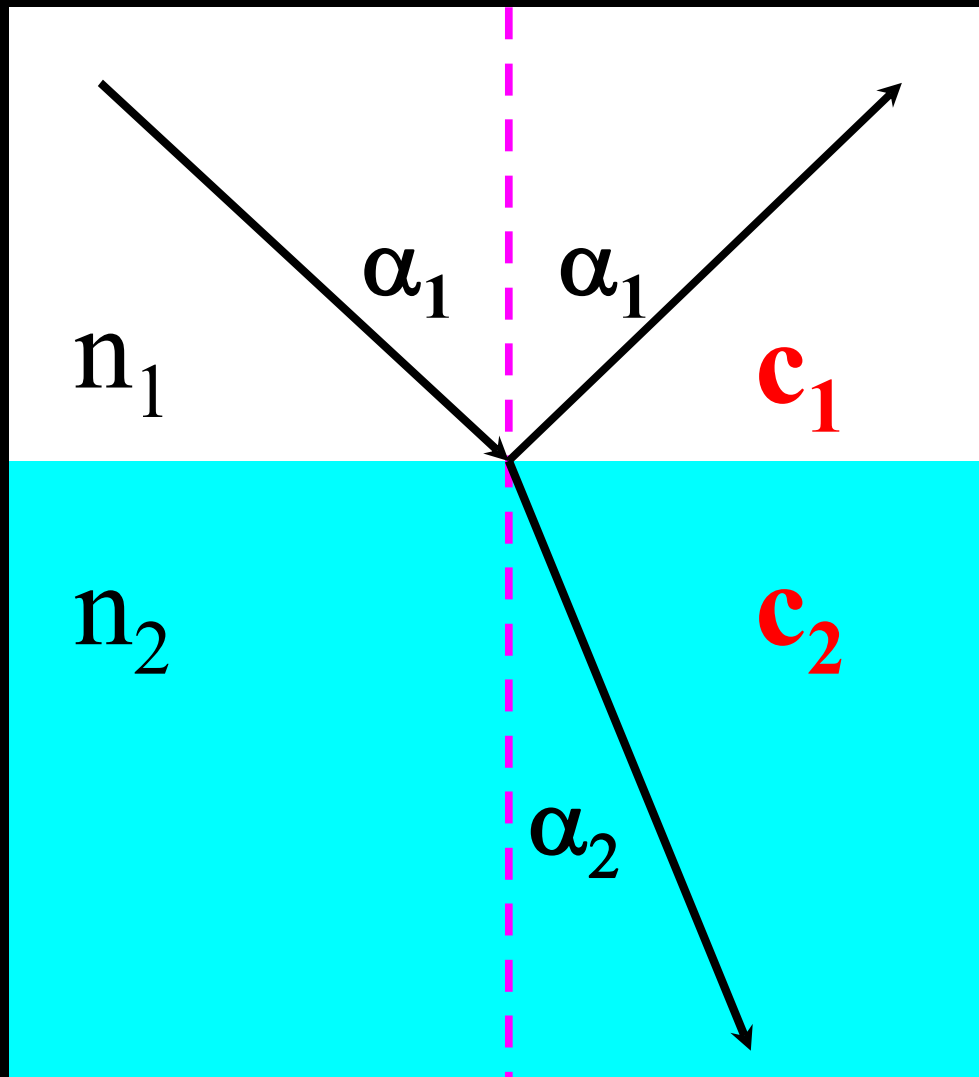
$$c = \sqrt{gH} \approx 200 \text{ м/с}$$

$$U_{\text{гориз}} = A \sqrt{g/H} \approx 0.05 \text{ м/с}$$

Приближение «геометрической оптики»



Закон Снеллиуса

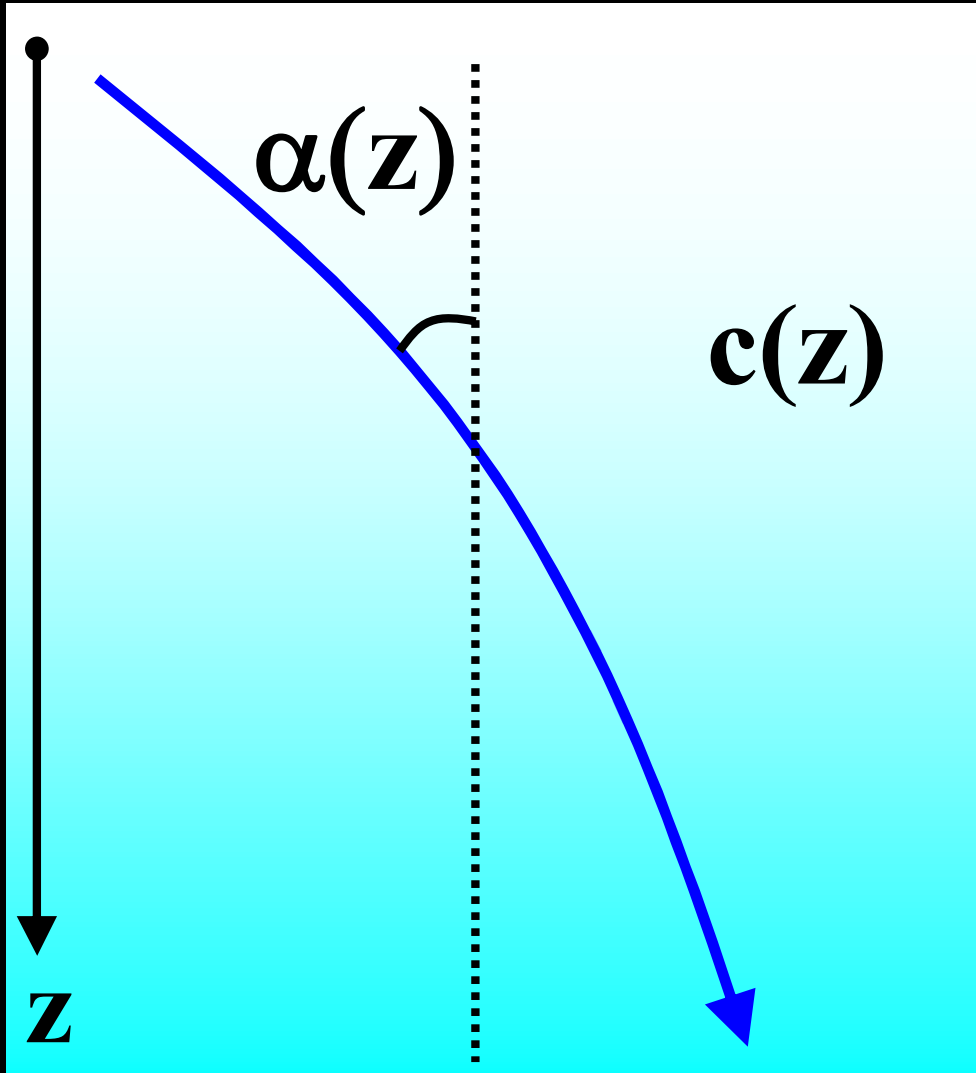


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n = c_0 / c$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

Рефракция

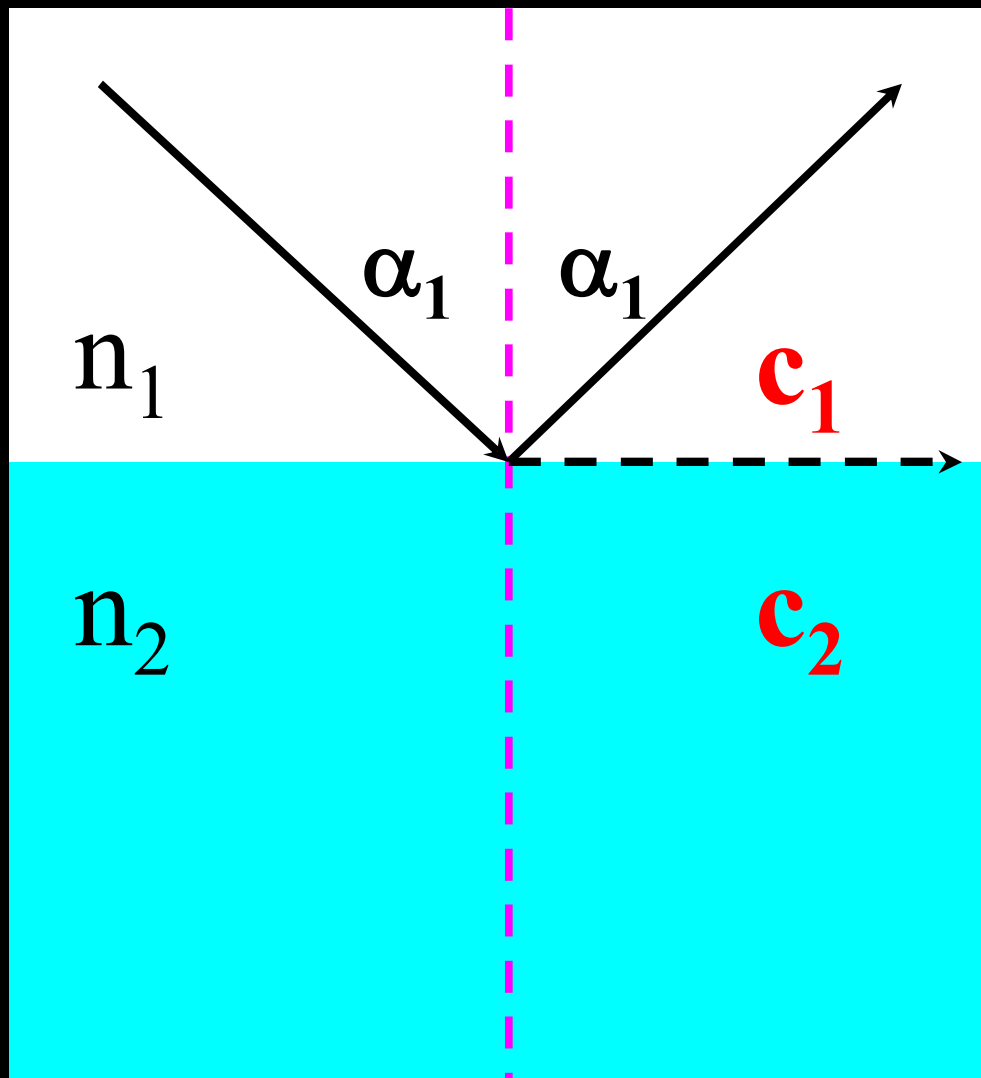


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\frac{\sin \alpha(z)}{c(z)} = \text{const}$$

Рефракция – изменение направления волновых лучей в среде c (плавно) изменяющейся в пространстве скоростью

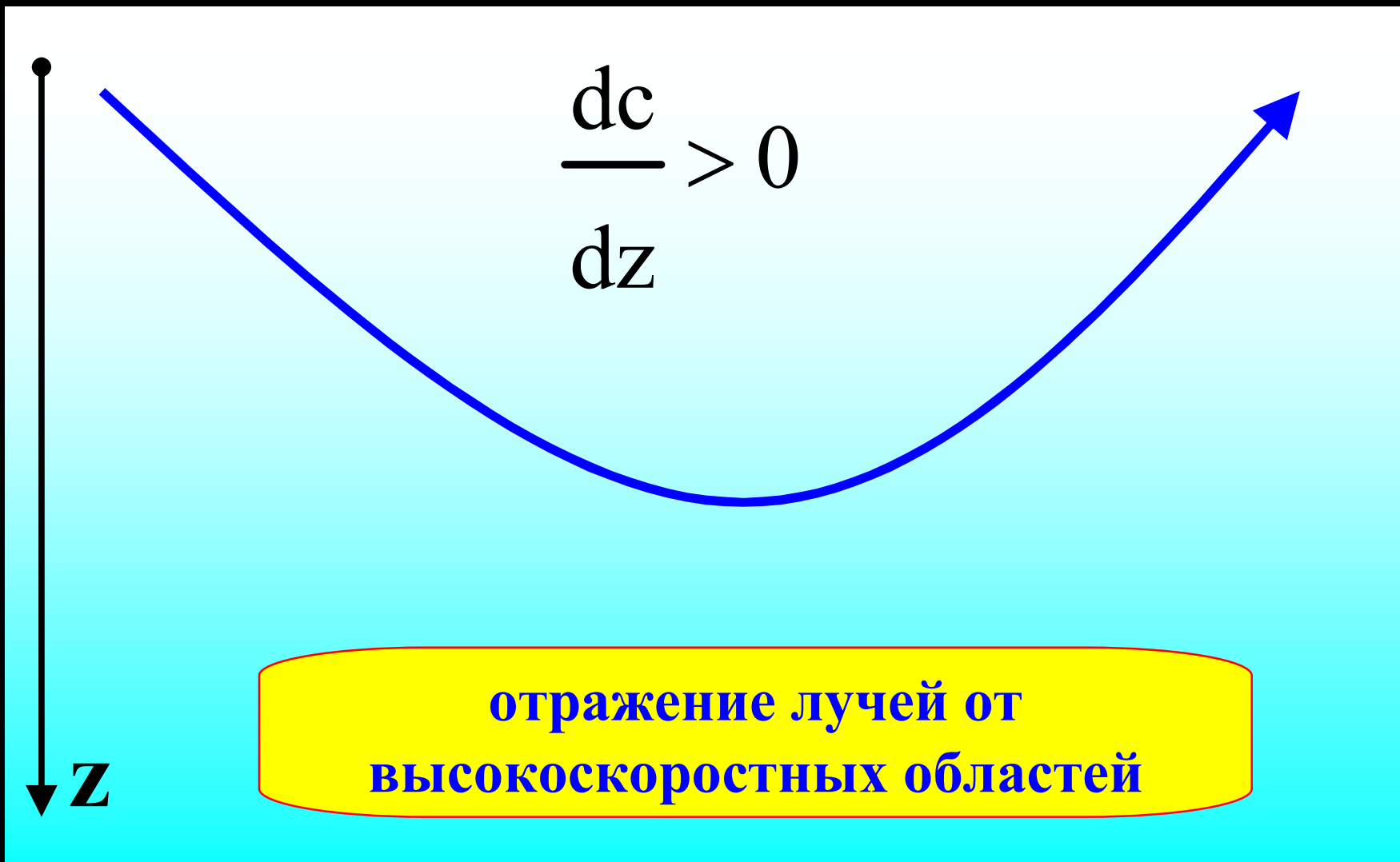
Полное внутреннее отражение



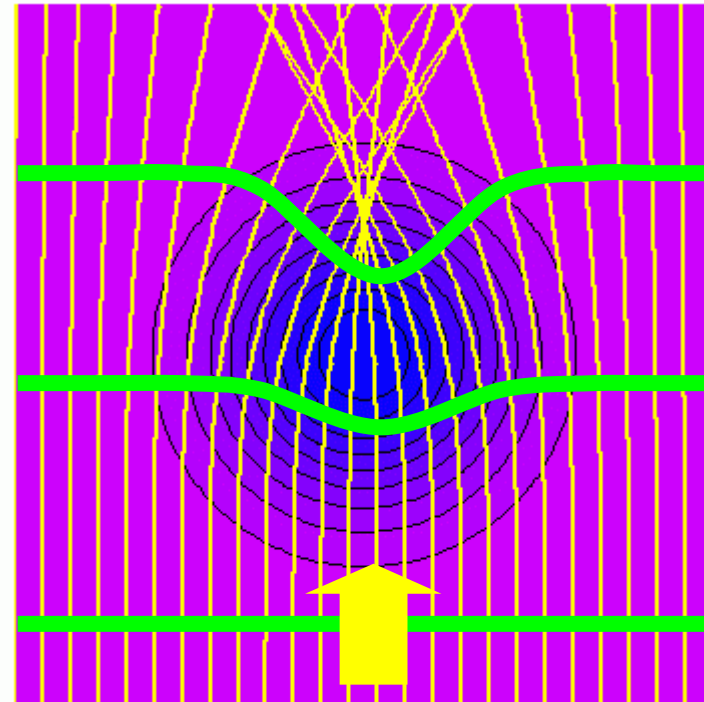
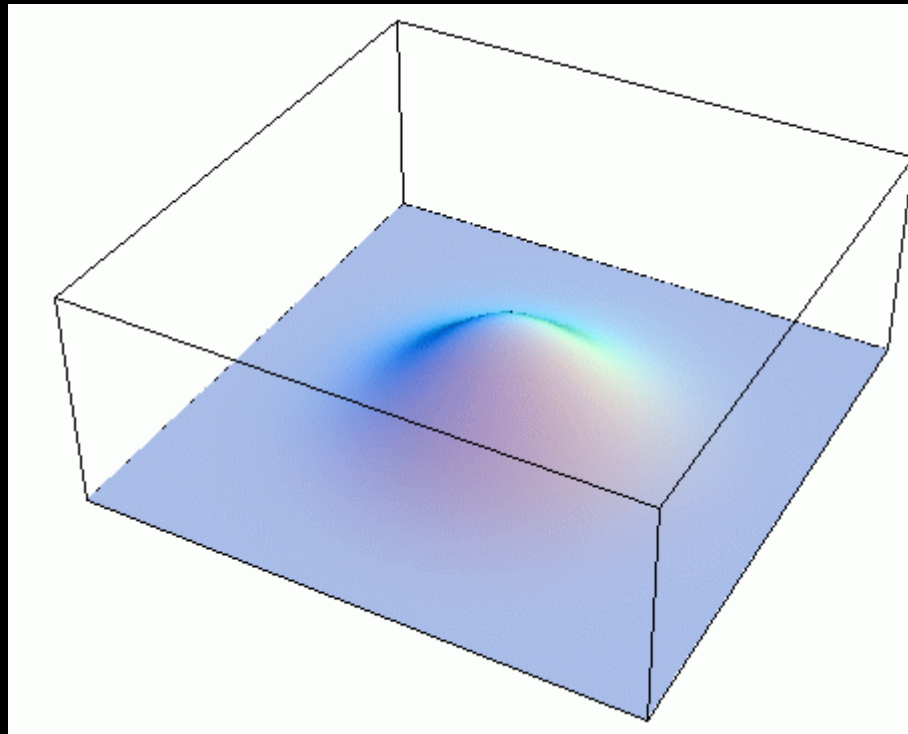
$$n_2 < n_1$$

$$c_2 > c_1$$

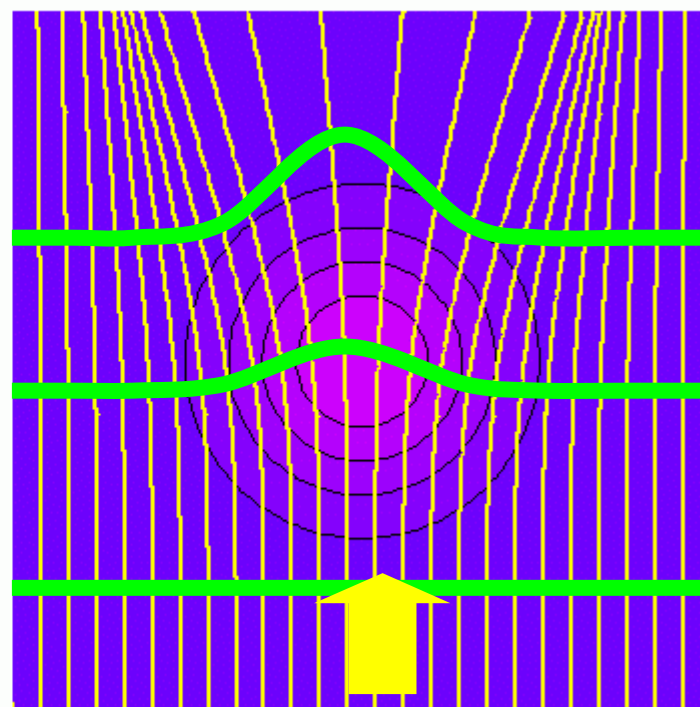
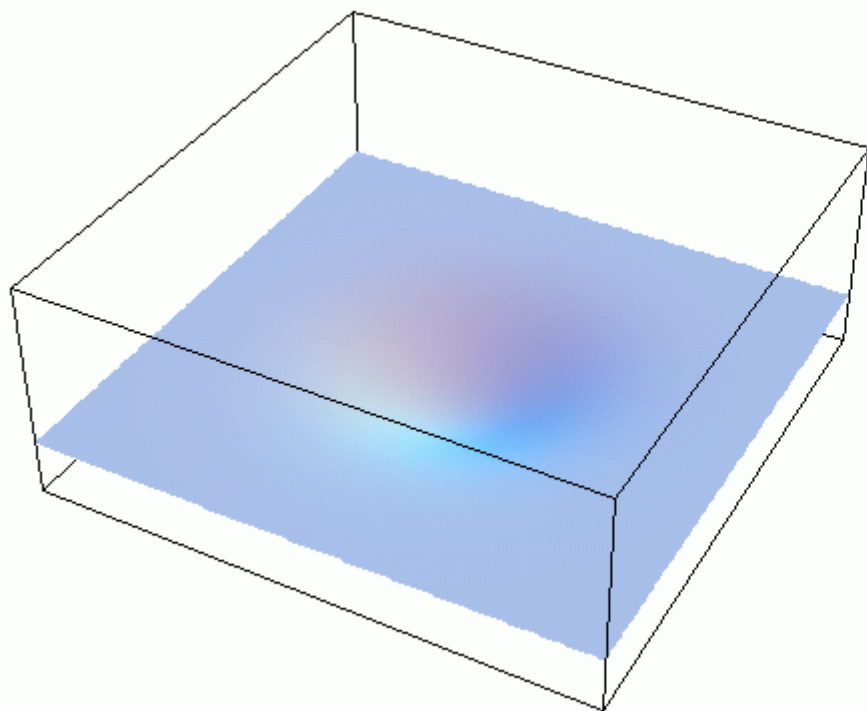
Полное внутреннее отражение



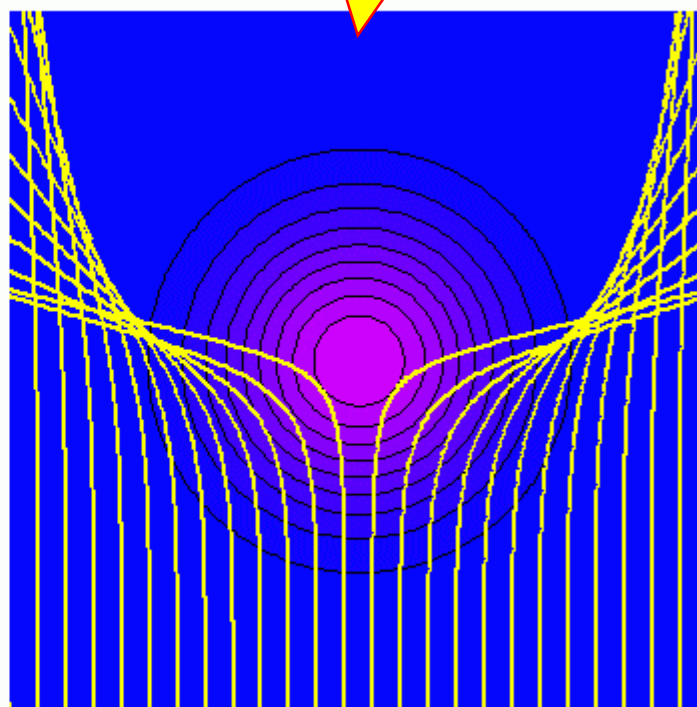
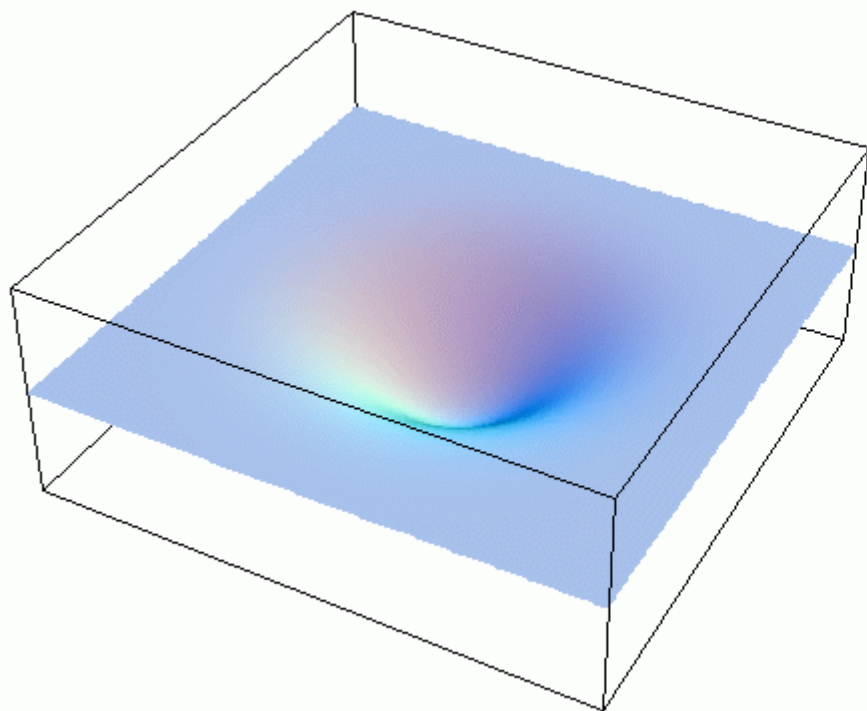
Фокусировка лучей областью с пониженной скоростью распространения волн



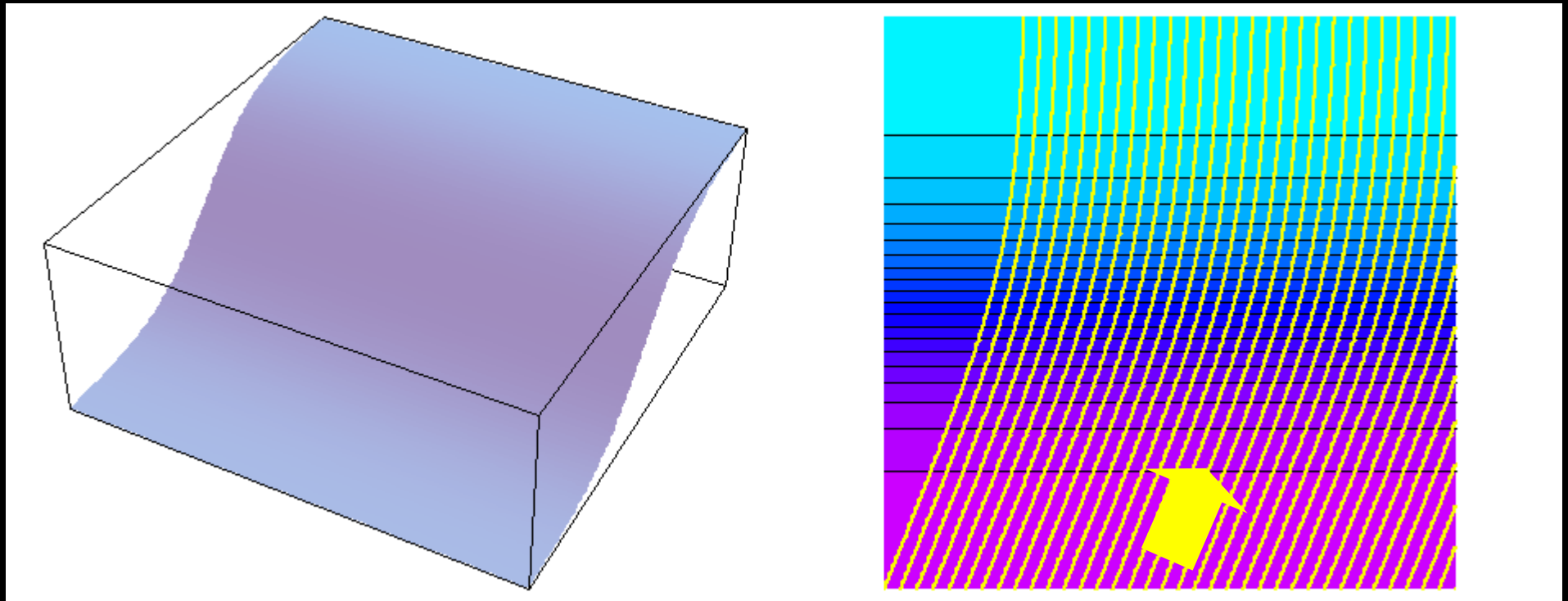
Дефокусировка лучей областью с повышенной скоростью распространения волн



Зона тени



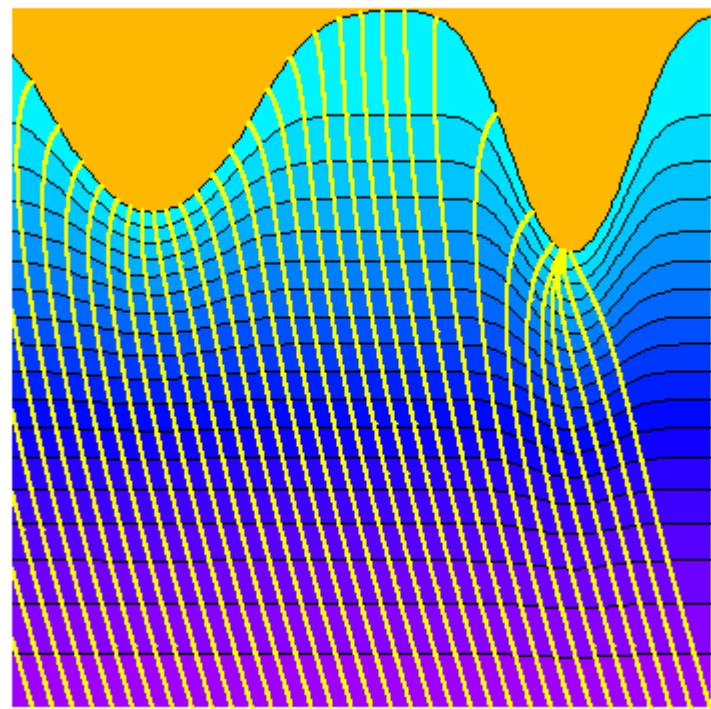
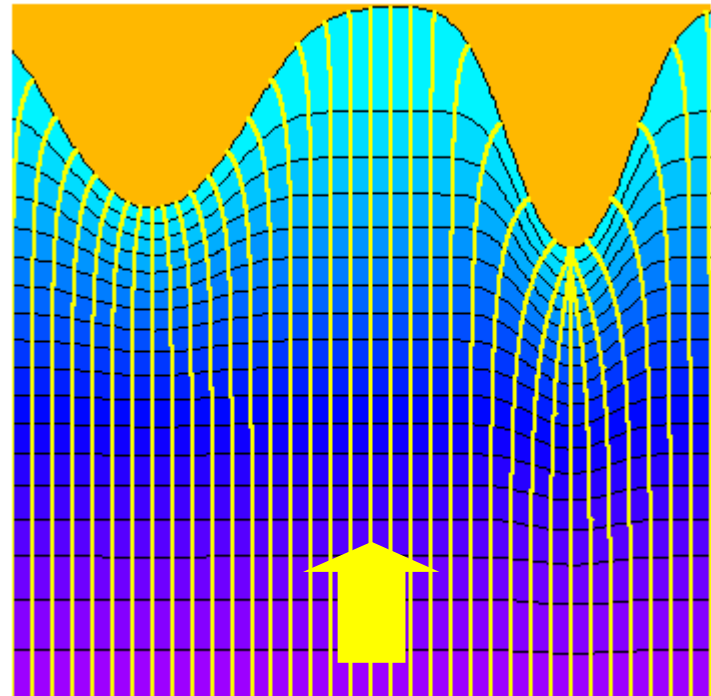
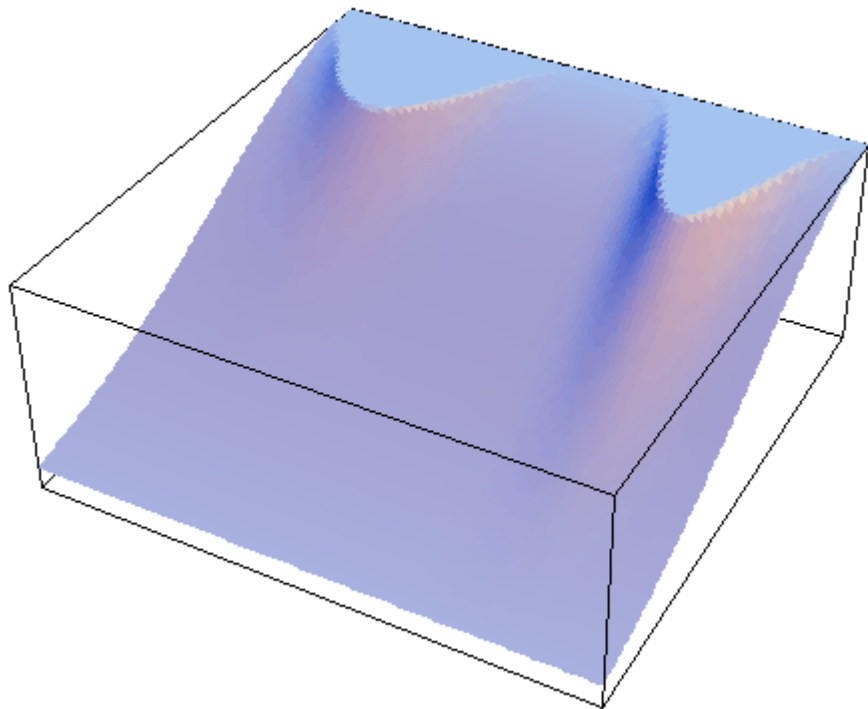
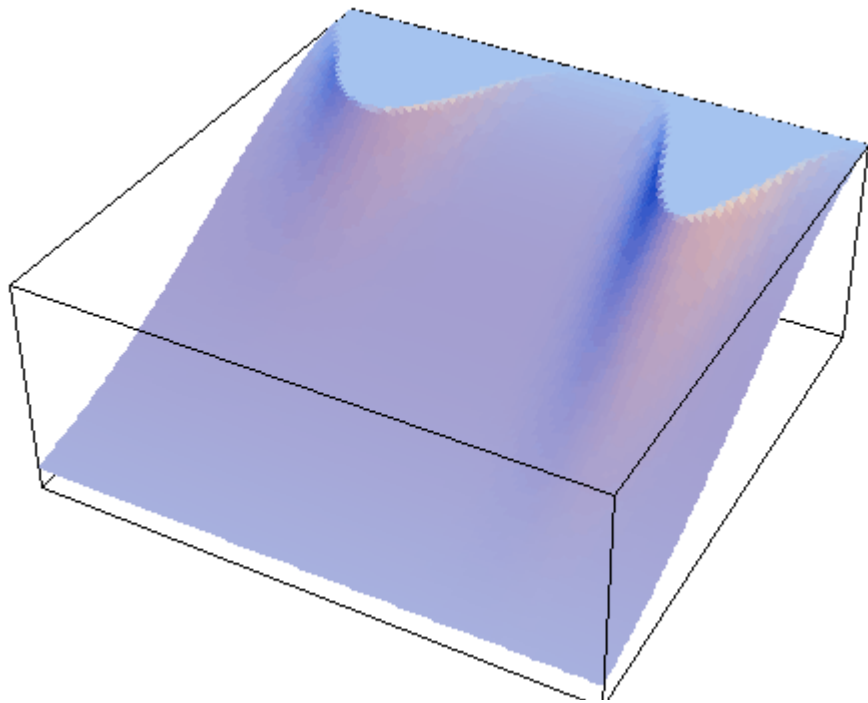
Рефракция гравитационных волн в прибрежной зоне



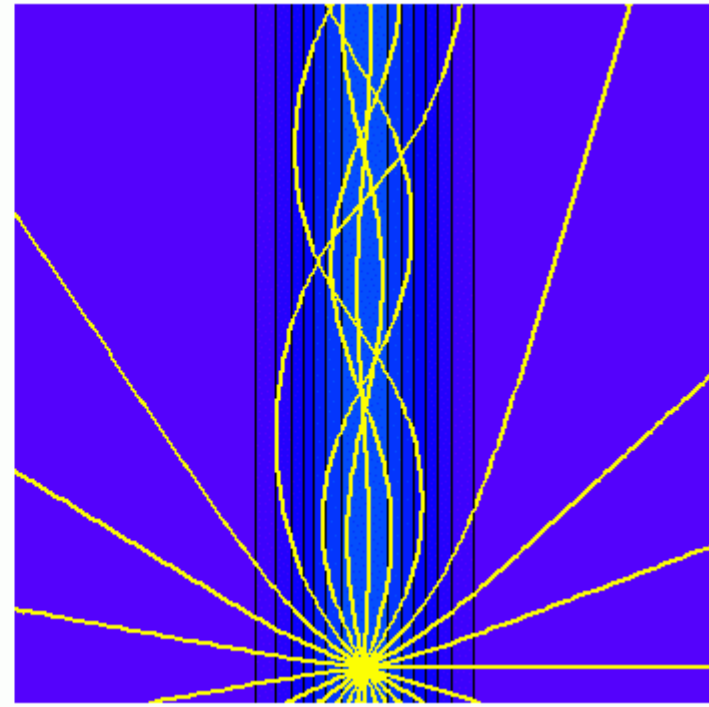
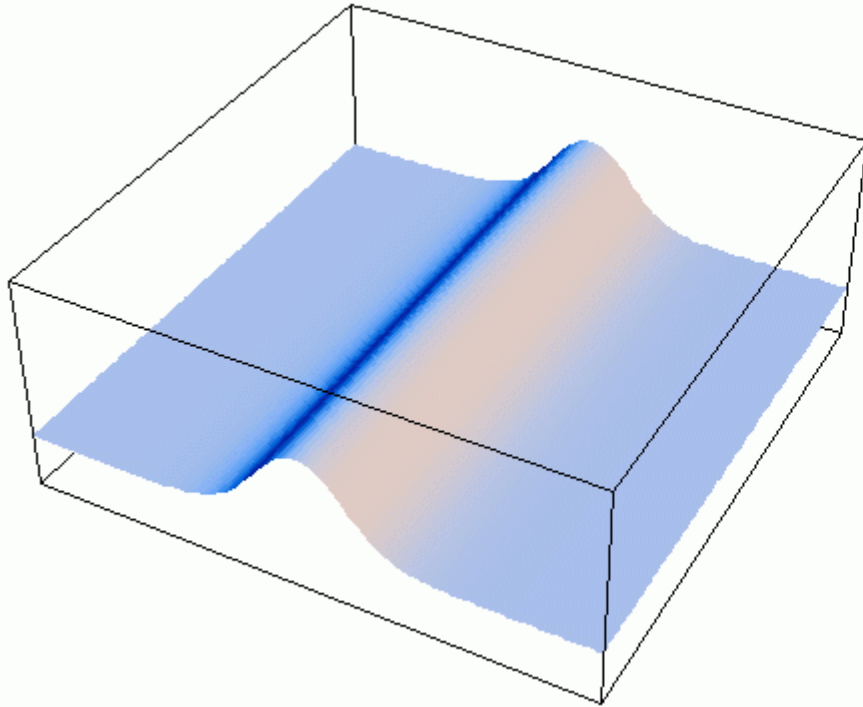
**Волновые лучи подходят к
побережью по нормали**

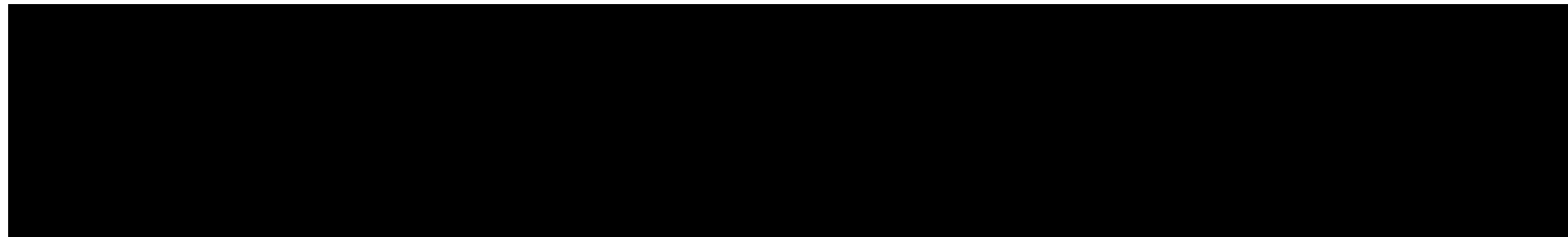
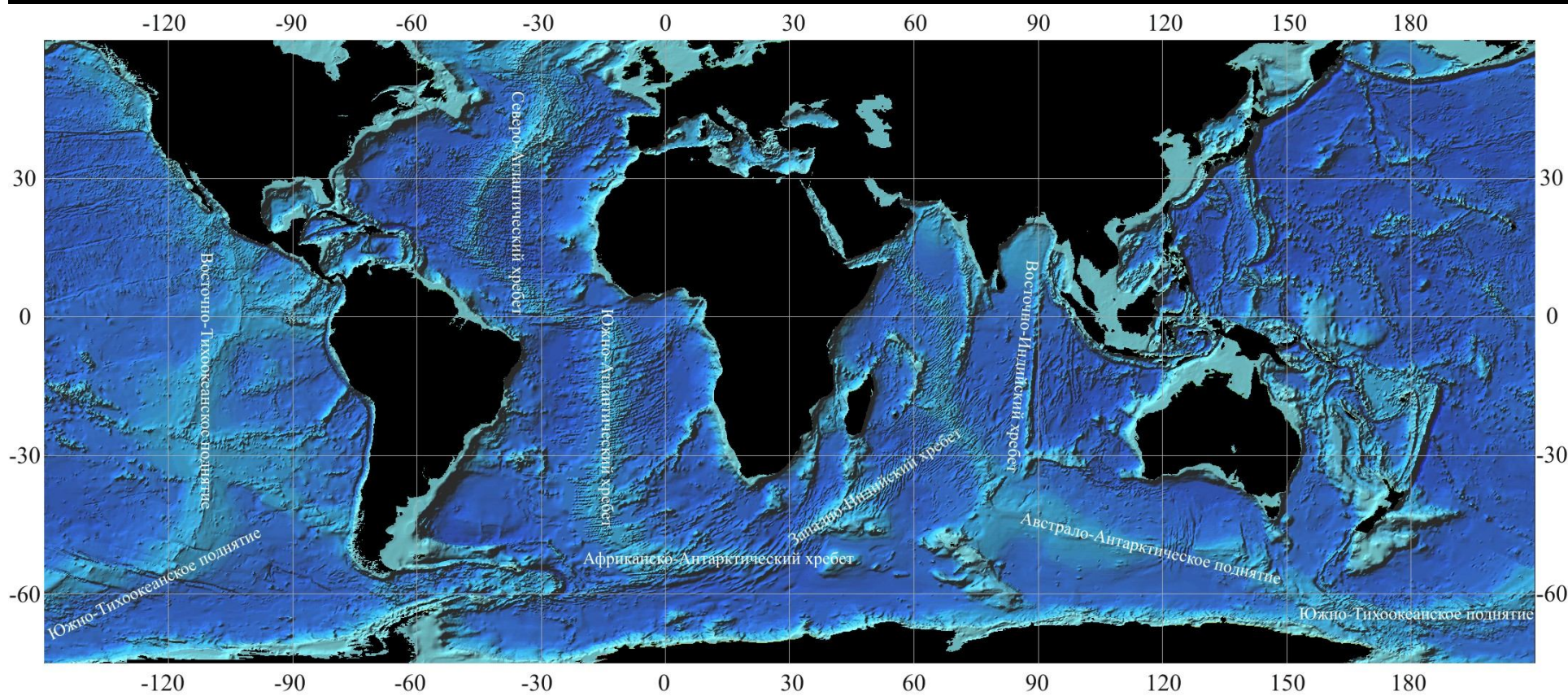
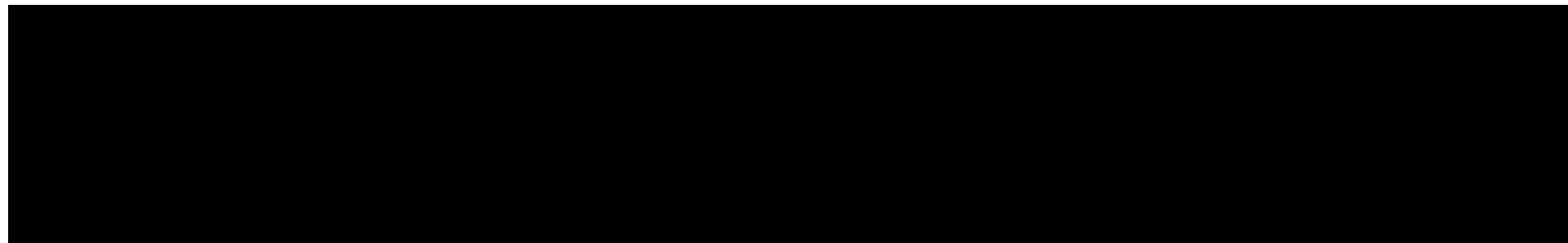
Концентрация волновой энергии на мысах и защищенность бухт





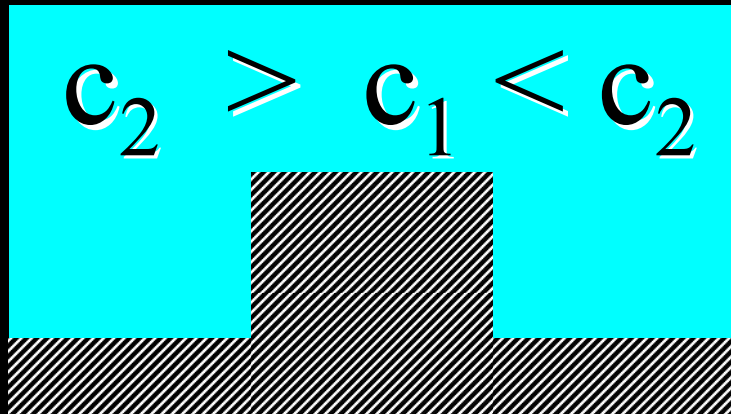
Захват волн подводными хребтами



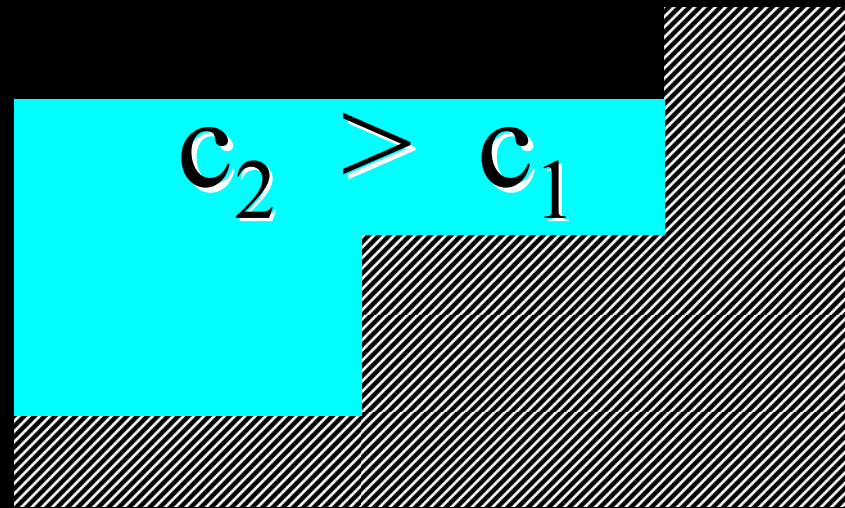


Захваченные волны

ПОДВОДНЫЙ
хребет

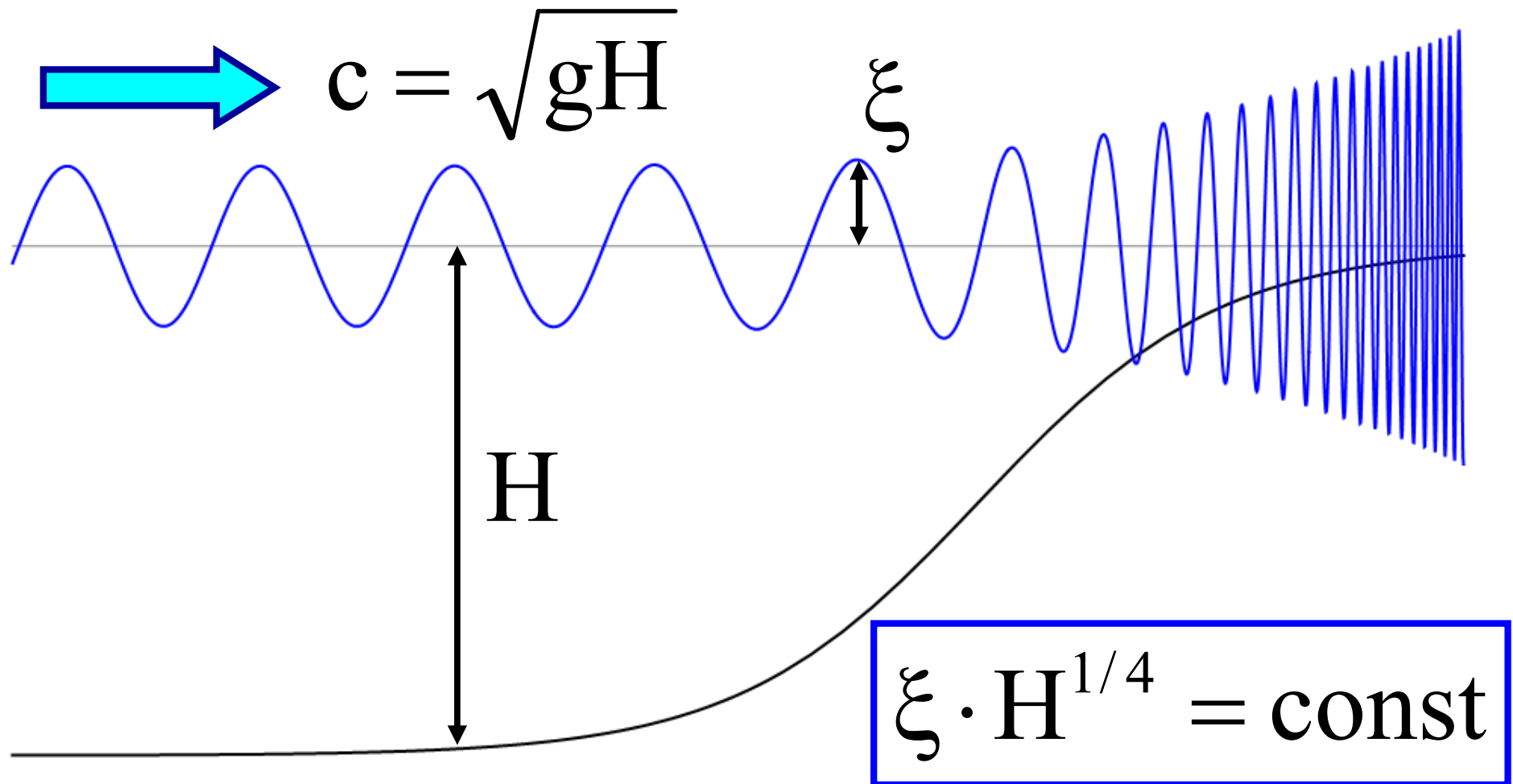


МАТЕРИКОВЫЙ
склон и берег



Закон Грина (закон "1/4")

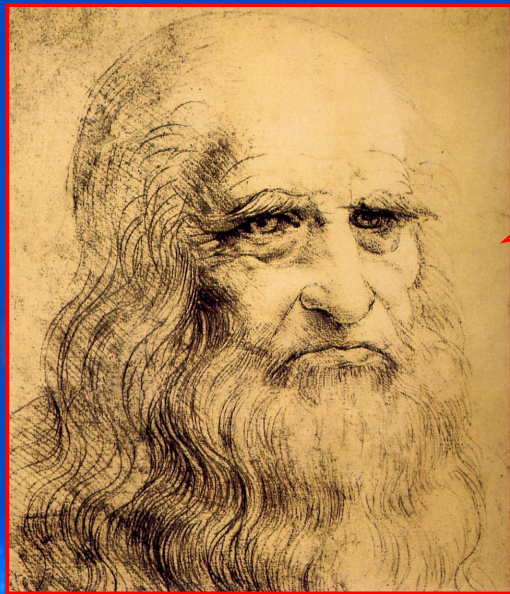
$$W \sim \xi^2 \quad Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{H} = \text{const}$$



Акустические

ВОЛНЫ

«...погрузив трубу одним концом в воду и прижав другой ее конец к уху, можно услышать корабли, идущие вдали...»



Леонардо да Винчи
1452- 1519



Система уравнений для описания линейных волн без учета вращения Земли и сил вязкого трения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \end{array} \right.$$

**Гравитационные
волны**

**Акустические
волны**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla} p'}{\rho_0} \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{v}' = 0 \end{array} \right.$$

\vec{v}' - малая

величина

$$\frac{\vec{\nabla} p_0}{\rho_0} = \vec{g}$$

ρ_0

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'$$

$$\vec{v}_0 = 0$$

$$p = p_0 + p'$$

$$|p'| \ll p_0$$

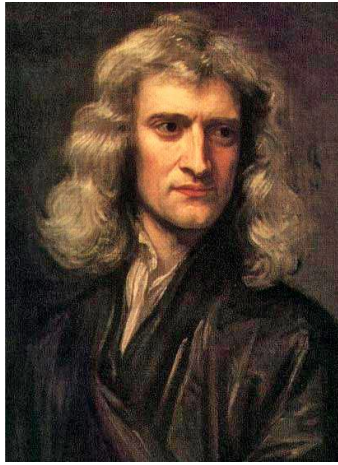
$$\rho = \rho_0 + \rho'$$

$$|\rho'| \ll \rho_0$$

$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{p}} \right)_s \mathbf{p}'$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{p}} \right)_s = \frac{1}{c^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = - \frac{\vec{\nabla} p'}{\rho_0} \quad | \text{div} \\ \frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \text{div} \vec{v}' = 0 \quad | \frac{\partial}{\partial t} \end{array} \right.$$



Sir Isaac Newton

~~$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{p}} \right)_T \mathbf{p}'$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{p}} \right)_T = \frac{1}{c_T^2}$$~~



Pierre-Simon Laplace

$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s p' \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{v}')}{\partial t} = -\frac{\Delta p'}{\rho_0} \\ \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \rho_0 \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{v}')}{\partial t} = 0 \end{array} \right.$$

Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \Delta p' = 0$$

Скорость звука

Волновое уравнение (акустика)

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - c^2 \Delta p' = 0$$

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \approx 1500 \text{ м / с}$$

вода

Скорость звука

Скорость звука в воде

$$c = c(T, S, p)$$

эмпирическая
зависимость

TEOS-10
www.teos-10.org

$$1480 < c < 1545 \text{ м/с}$$

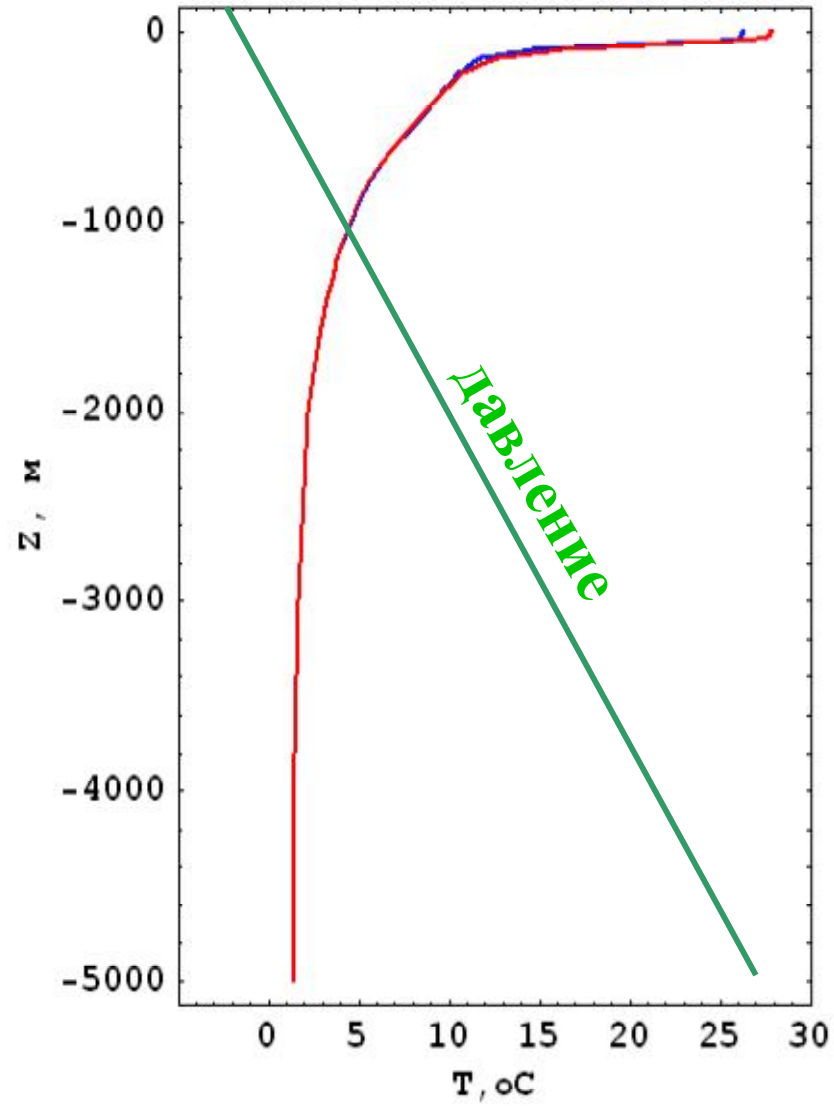
$$\delta c < 5\%$$

$$\frac{\partial c}{\partial T} > 0$$

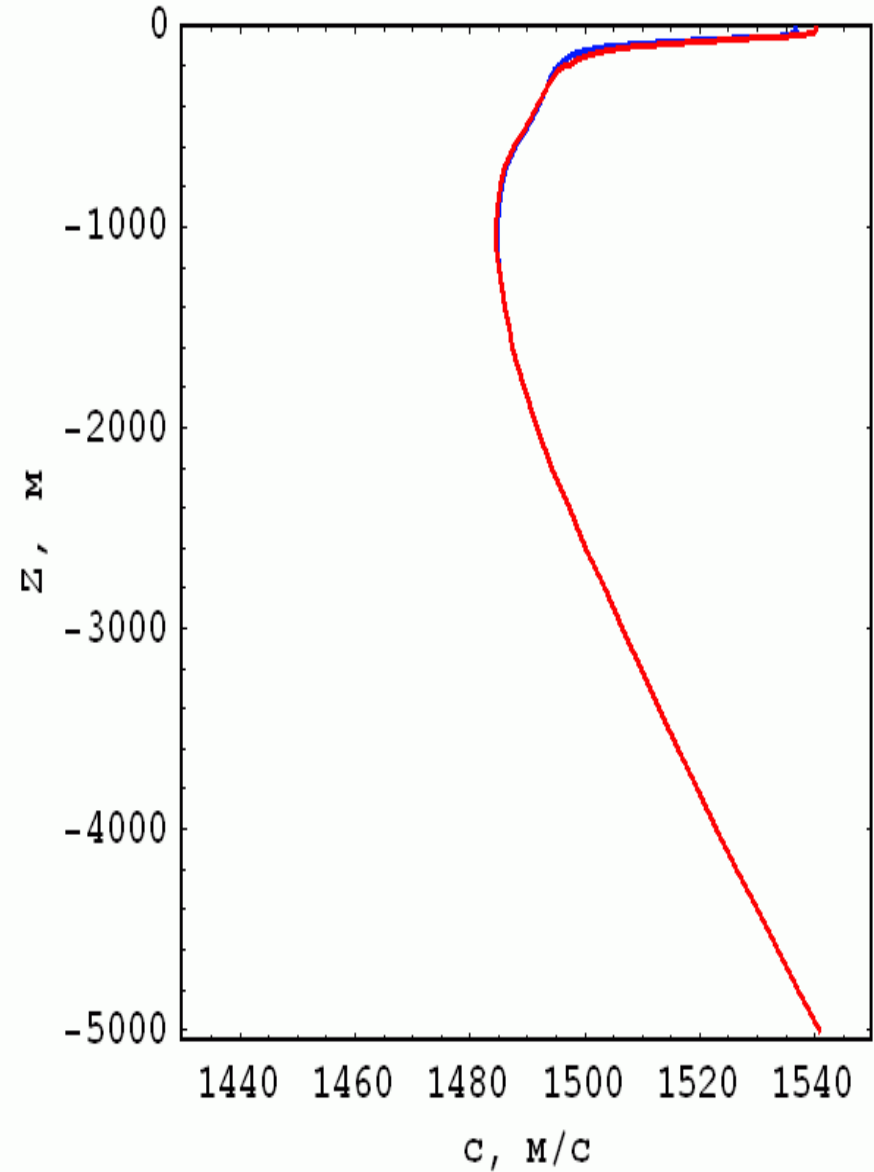
$$\frac{\partial c}{\partial p} > 0$$

Lat=10 Lon=-150

Температура

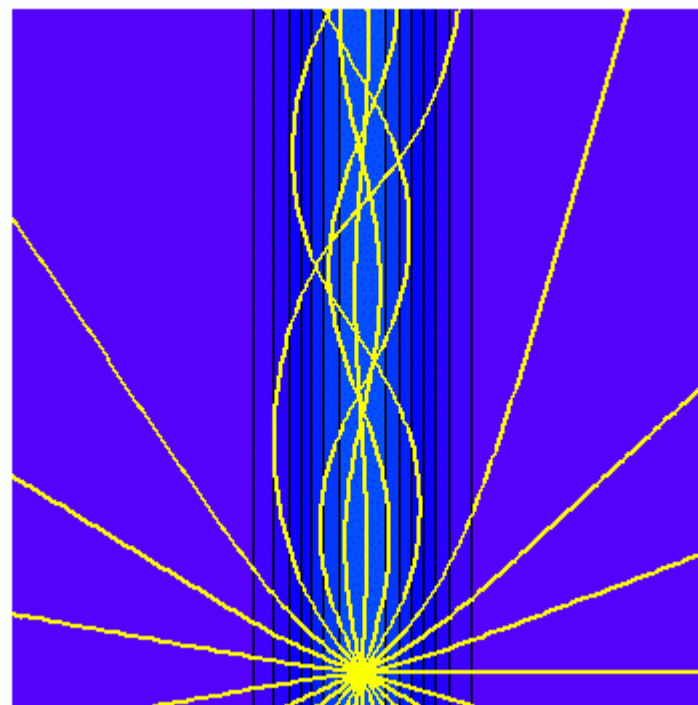
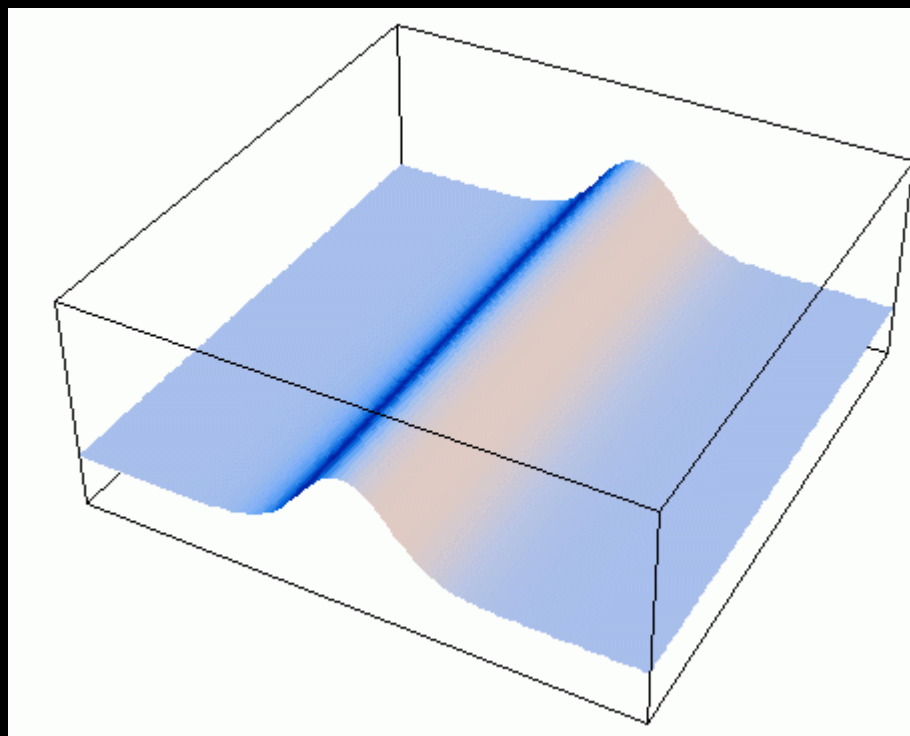


Скорость звука



Захват волн подводными хребтами

т.е. областями с пониженной скоростью распространения длинных волн



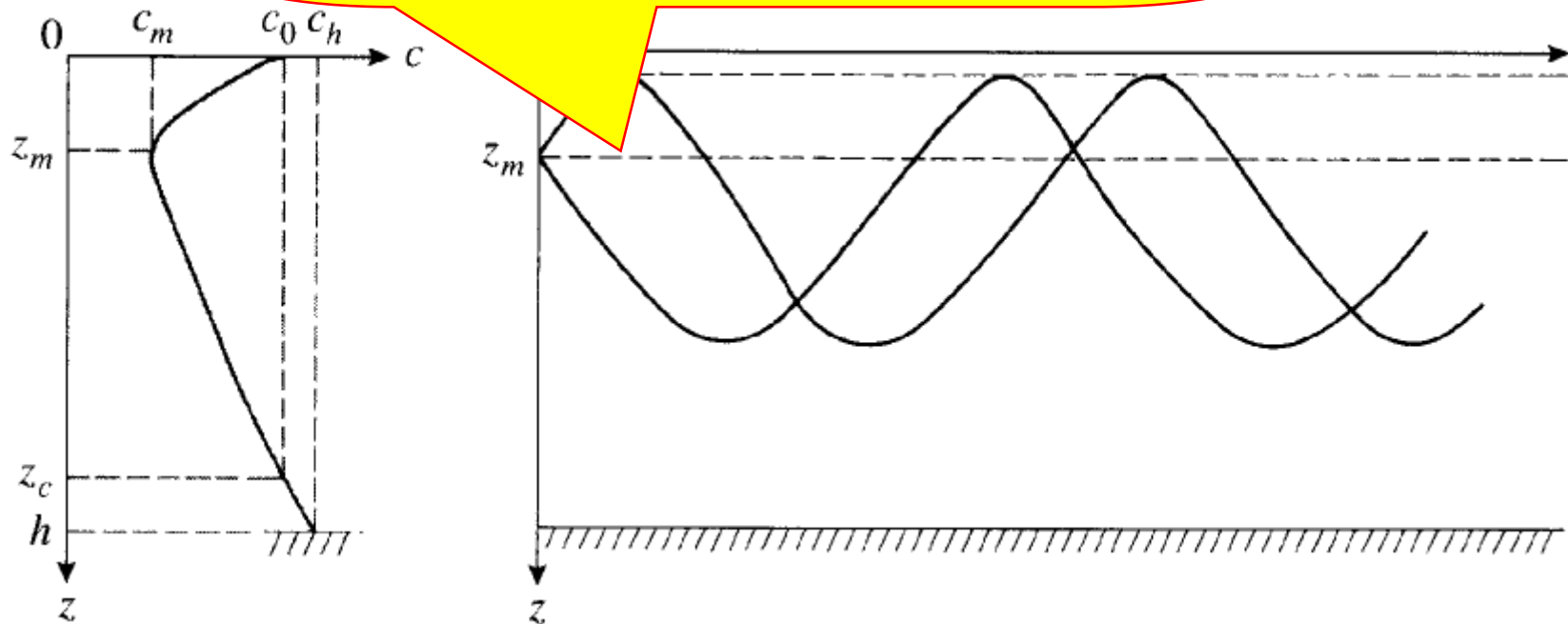
Подводный звуковой канал (ПЗК)

Deep Sound Channel

SOFAR Channel

(Sound Fixing and Ranging)

Ось ПЗК обычно лежит на
глубине ~ 1000 м



Подводный звуковой канал (ПЗК)

D
S
(S



William Maurice Ewing
1906 – 1974
american geophysicist and oceanographer

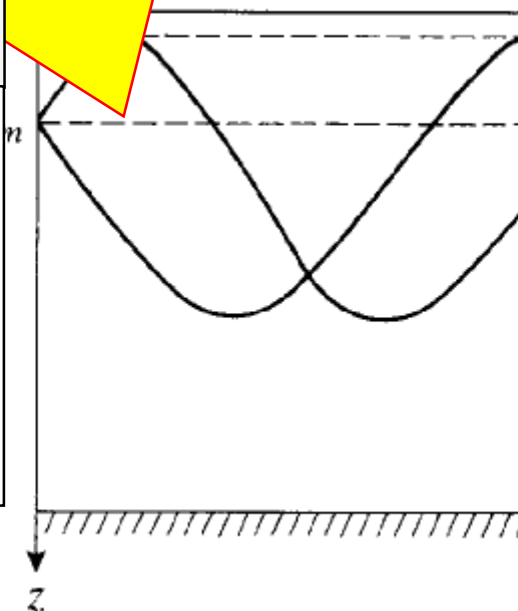


nging)

ПЗК обычно лежит на глубине ~1000 м



Леонид Максимович Бреховских
1917-2005
выдающийся учёный в области физики, акустики океана, академик АН СССР



Прикладная гидроакустика

- **Акустический радар (сонар)**
- **Подводная связь (передача информации)**
- **Подводная навигация**
- **Наблюдения за погодой и климатом (регистрация шумов от ветра или осадков, акустическая термометрия)**
- **Измерение скорости течения (ADCP)**
- ...