

Введение в физику гидросферы

2026 Лекция №8

Носов Михаил Александрович

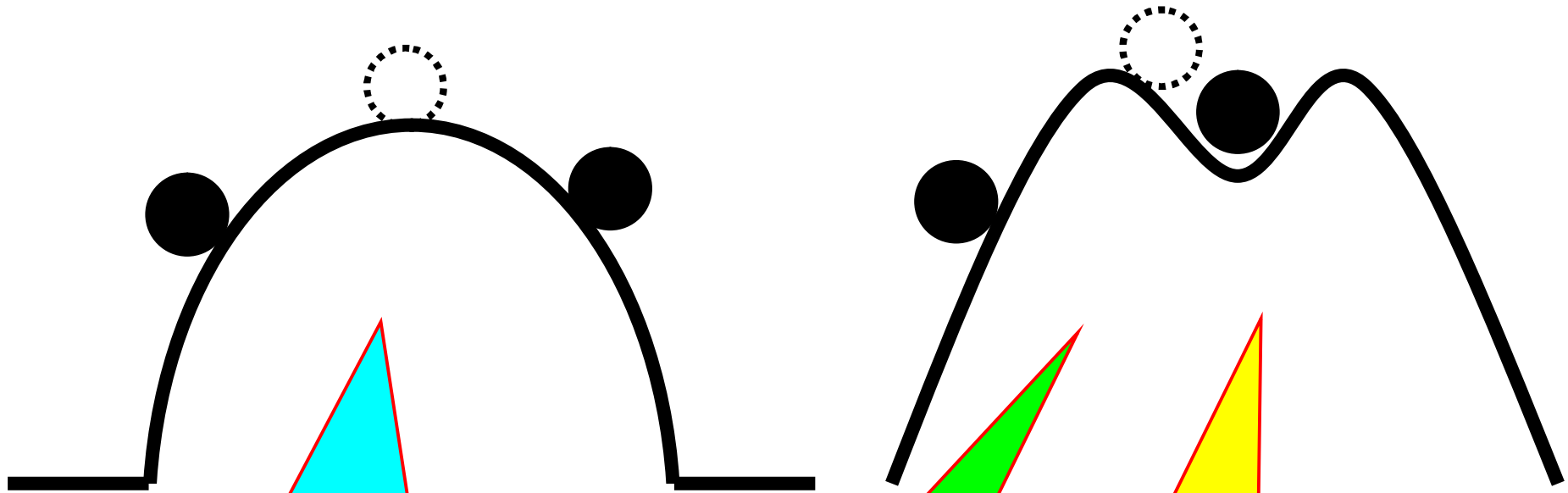
кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



Устойчивость



неустойчива по отношению к бесконечно малым возмущениям

малые возмущения затухают

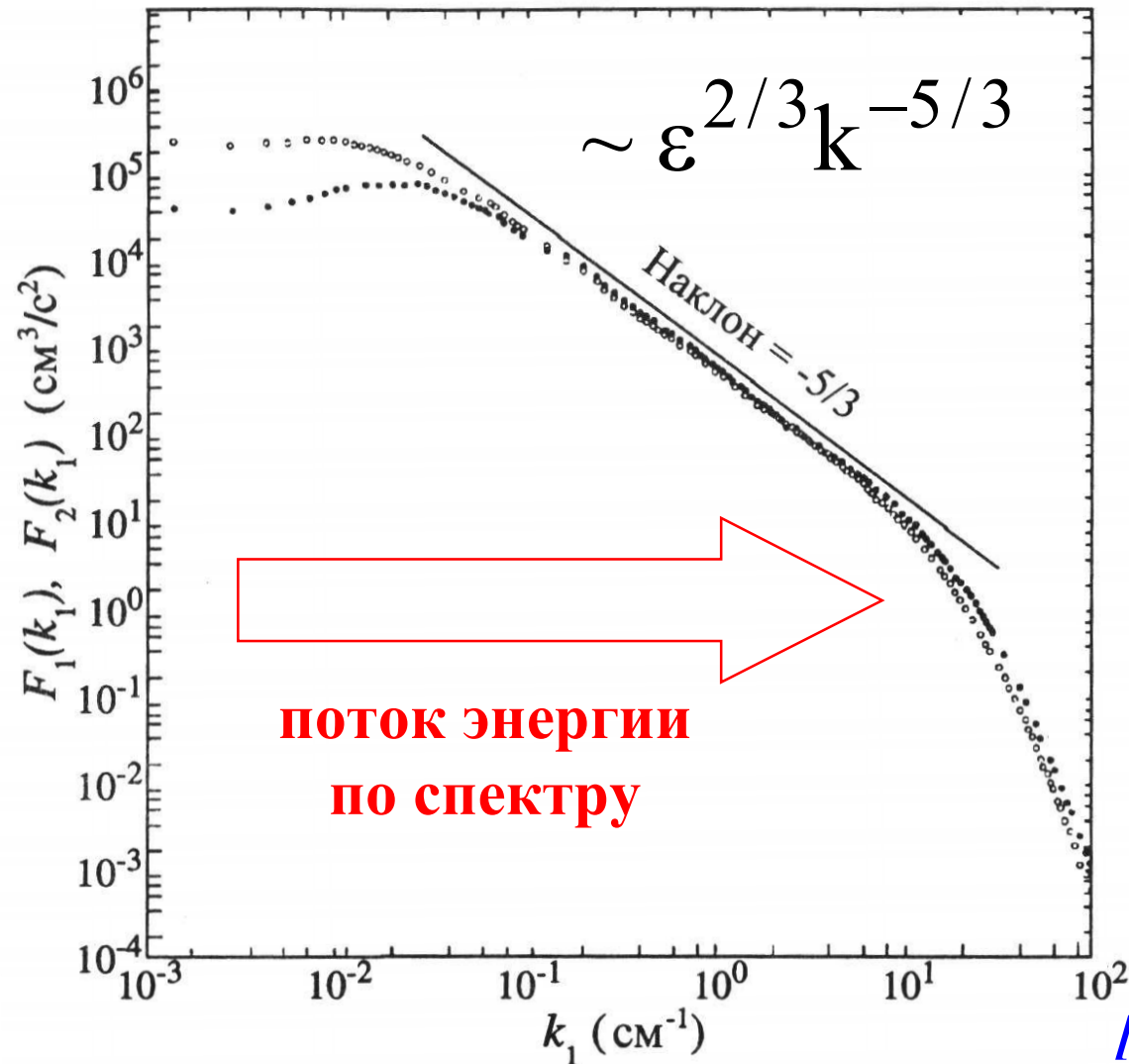
большие возмущения нарастают со временем

Спектр развитой турбулентности

область
энергии

инерционный
интервал

область
диссипации



$$\varepsilon [\text{M}^2 \text{c}^{-3}]$$

$$k [\text{M}^{-1}]$$

[Frisch, 1995]

Математическое описание турбулентности

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} \\ \operatorname{div} \vec{v} = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{уравнения Навье-} \\ \text{Стокса для} \\ \text{несжимаемой} \\ \text{жидкости} \end{array}$$

Поля скорости и давления представляются в виде суммы (статистического) среднего и пульсаций

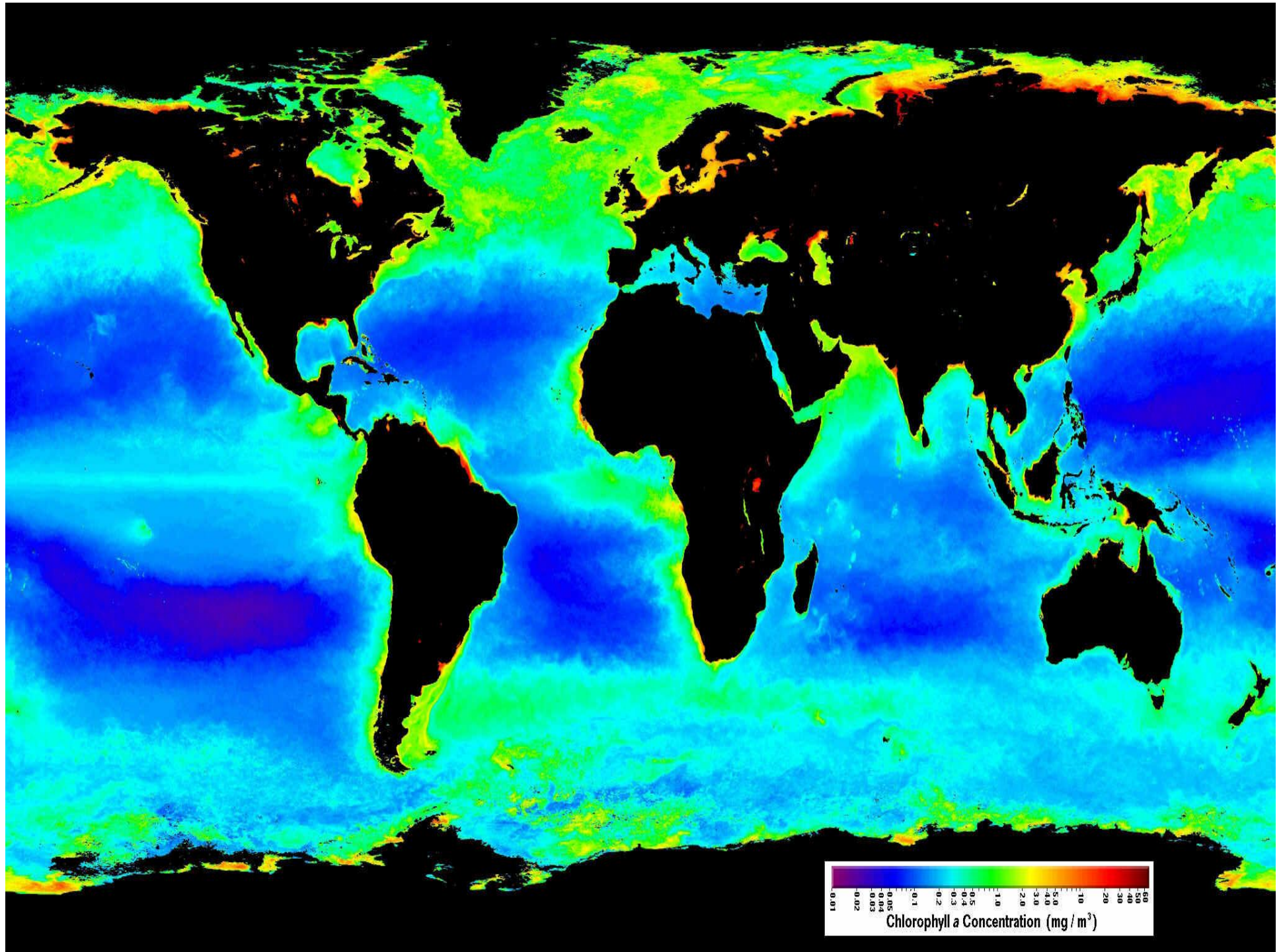
$$\vec{v} = \bar{\vec{v}} + \vec{v}' \quad p = \bar{p} + p'$$

В результате осреднения уравнений Навье-Стокса получается незамкнутая система уравнений Рейнольдса, в которую входят не 4, а 10 неизвестных функций:

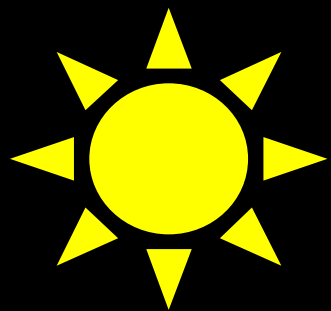
$$\overline{u_i} \quad \overline{p} \quad \overline{u'_i u'_j}$$

Важность изучения турбулентности
для динамики океана (гидросферы) и
атмосферы обусловлена ее определяющей
ролью в процессах обмена импульсом,
теплом и веществом

- погода и климат**
- первичная продуктивность**
- транспорт примесей (в т.ч. загрязнений)**
- ...многие иные задачи**



Теплообмен между океаном и атмосферой



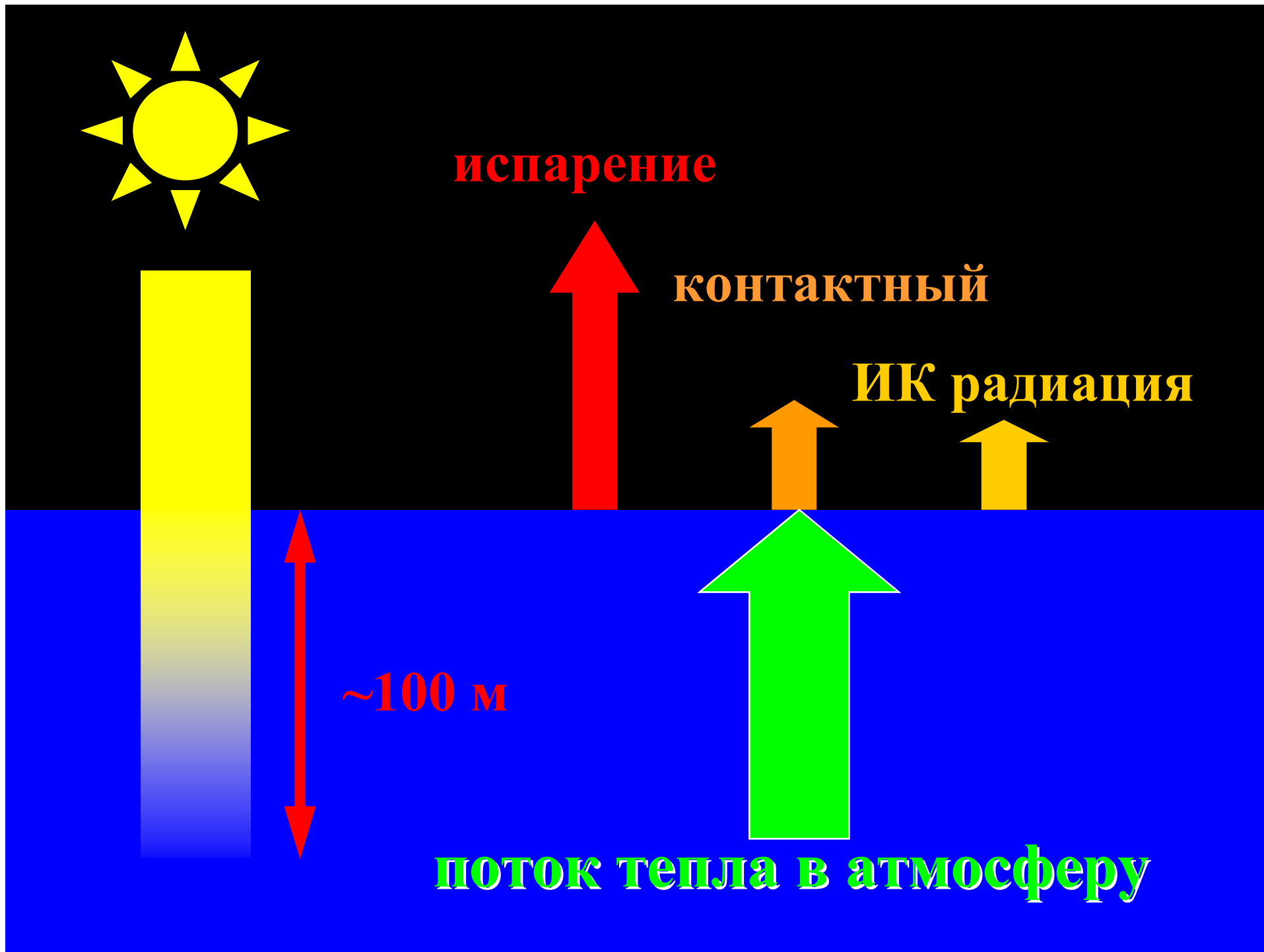
испарение

контактный

ИК радиация

~100 м

поток тепла в атмосферу

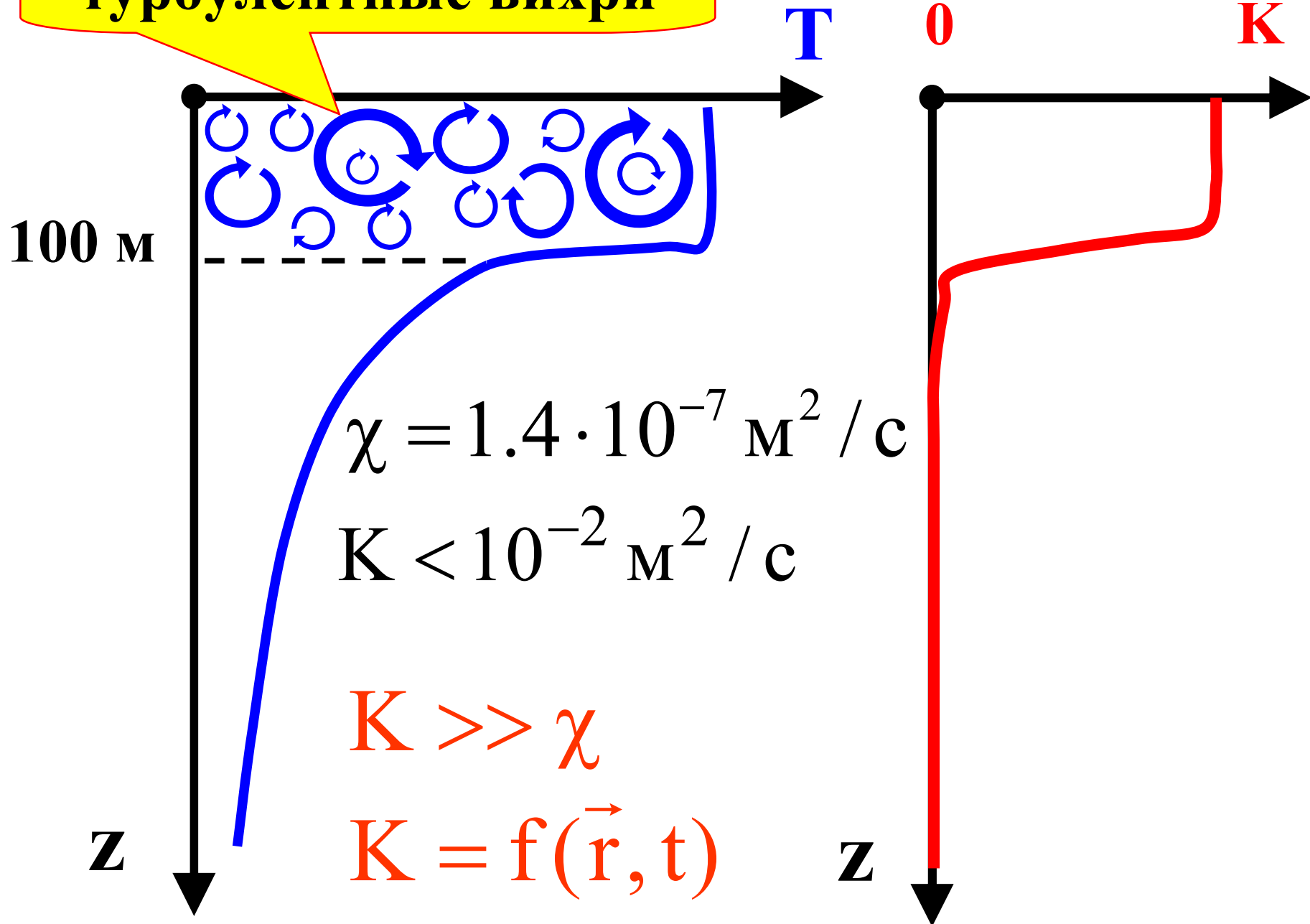


~~$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z, t)$$~~

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left([\chi + K(z, t)] \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(z, t)$$

**Коэффициент турбулентного
обмена теплом**

турбулентные вихри



$$b = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right]$$

**энергия
турбулентности на
единицу массы**

$$L \quad [\text{м}]$$

**масштаб
турбулентности**

$$K \quad \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$$

**коэффициент
турбулентного
обмена**

$$K \approx L\sqrt{b} \approx LU$$

$$Re \equiv \frac{LU}{\nu} = \frac{K}{\nu}$$

Молекулярные коэффициенты

$$\chi = 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$$

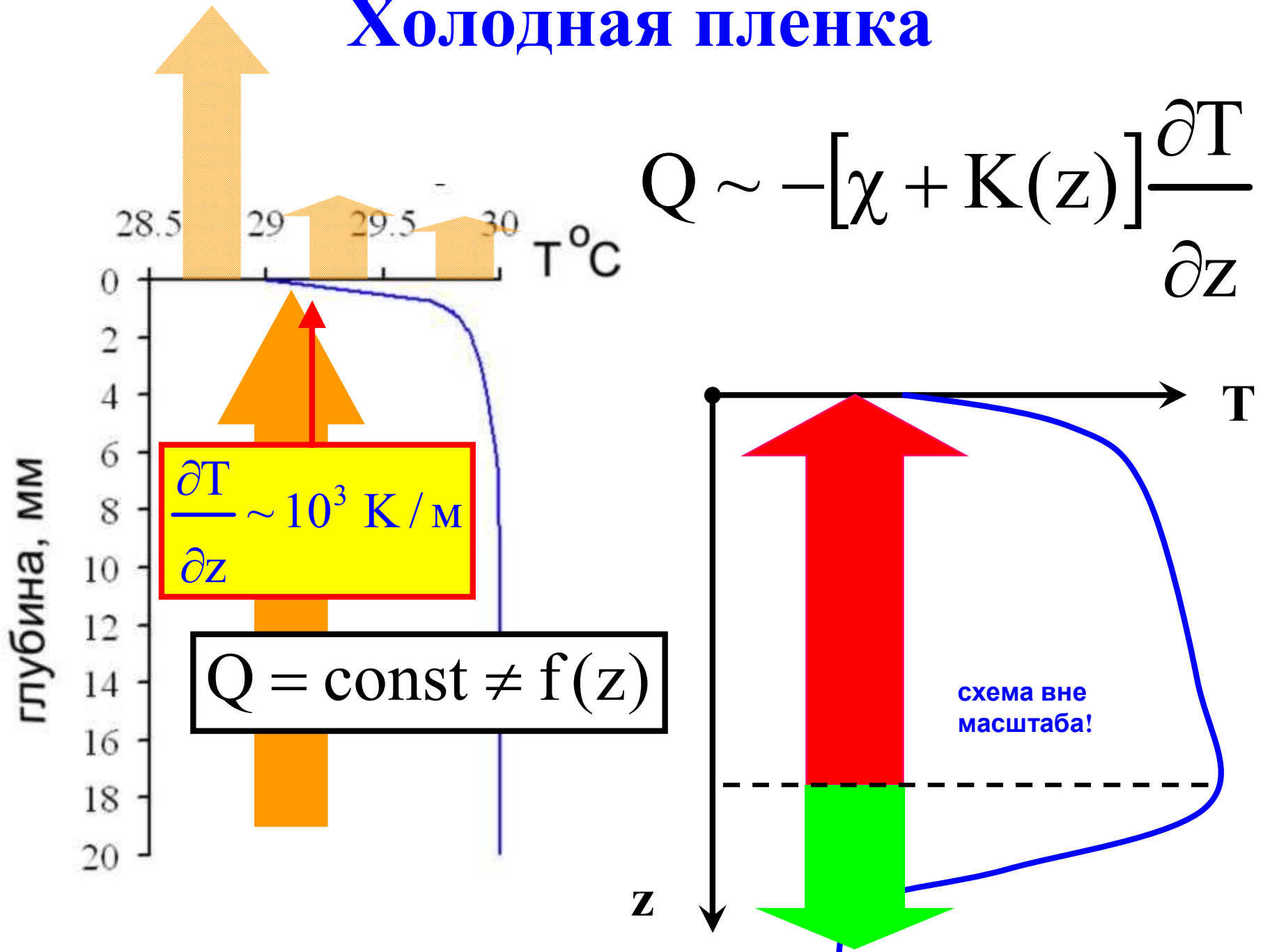
$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Турбулентные коэффициенты

$$K^{\text{верт.}} = f^{\text{верт.}}(\vec{r}, t) < 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с}$$

$$K^{\text{гориз.}} = f^{\text{гориз.}}(\vec{r}, t) < 10^4 \text{ м}^2 / \text{с}$$

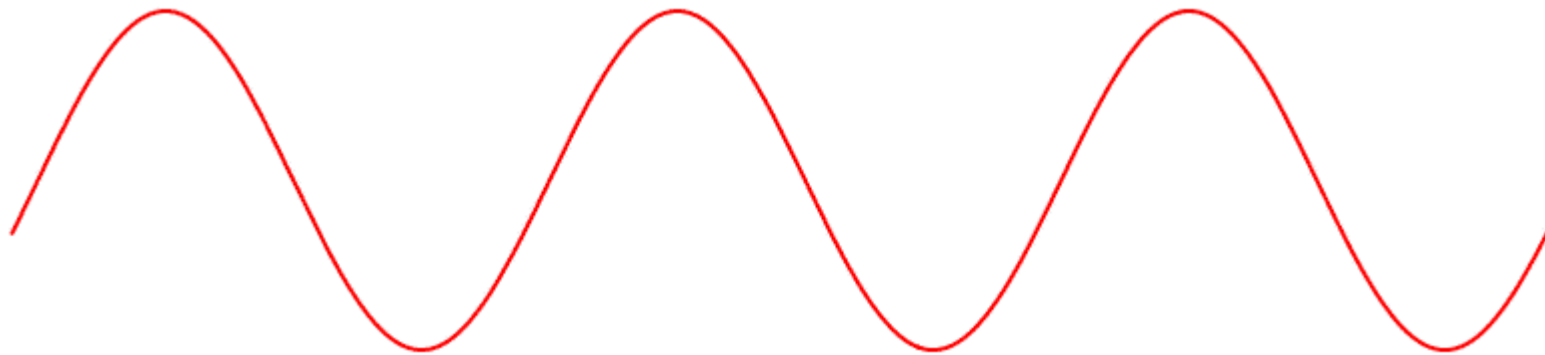
Холодная пленка



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

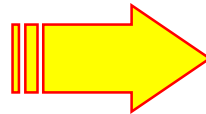
[Физическая энциклопедия]



ТИПЫ ВОЛН

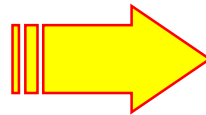
(классификация по типу возвращающей силы)

сила тяжести



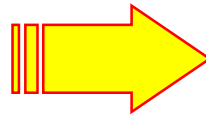
гравитационные
поверхностные и
внутренние

сила
поверхностного
натяжения



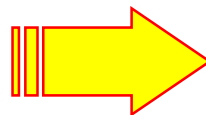
капиллярные

сила упругости



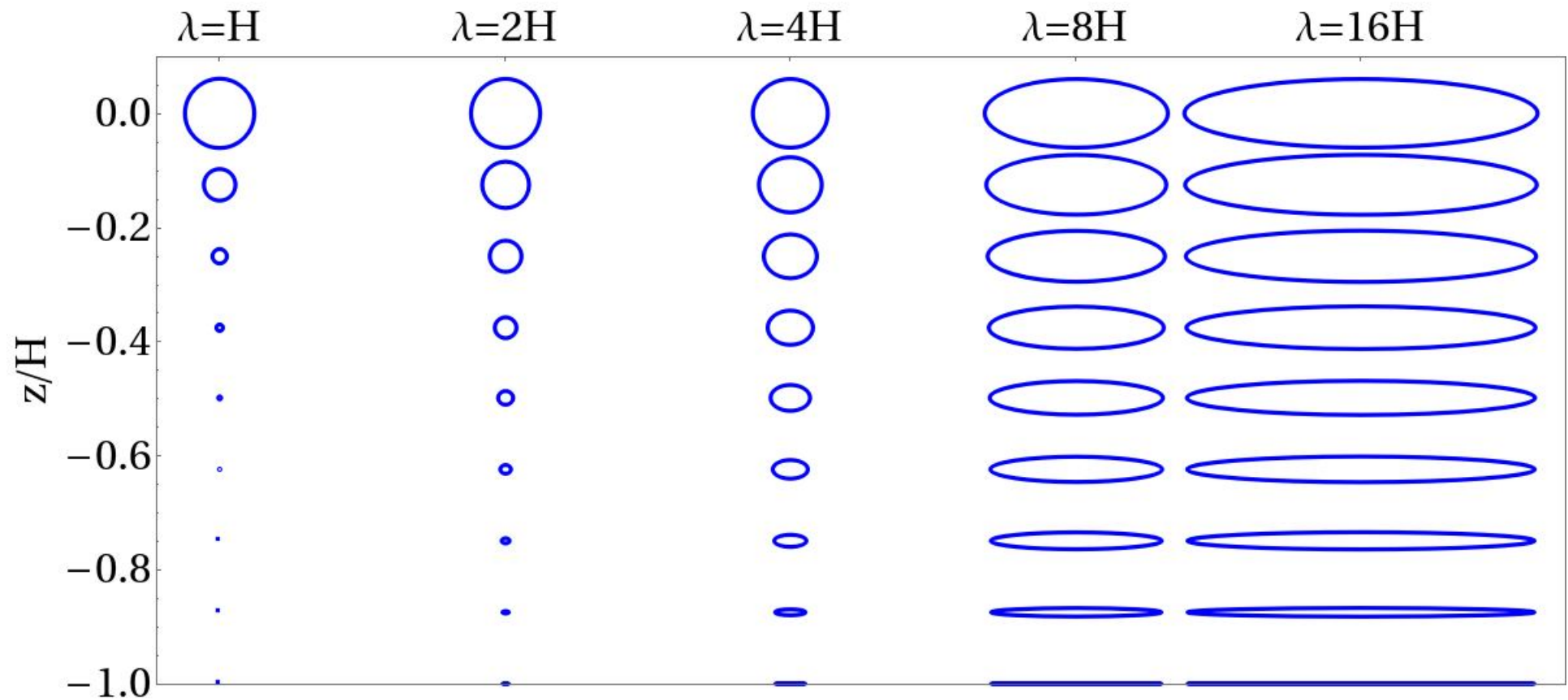
(гидро)акустические

сила Кориолиса

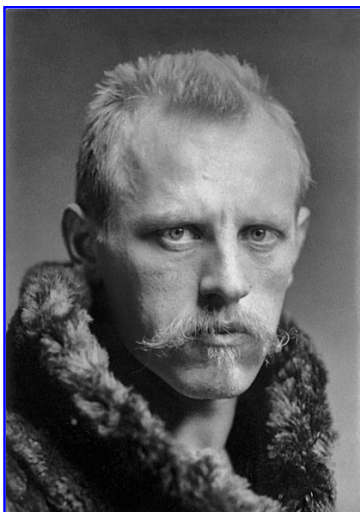


гироскопические
(инерционные)

Траектории частиц в поверхностных волнах малой амплитуды



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)
- штормовые нагоны
- корабельные
- ...

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

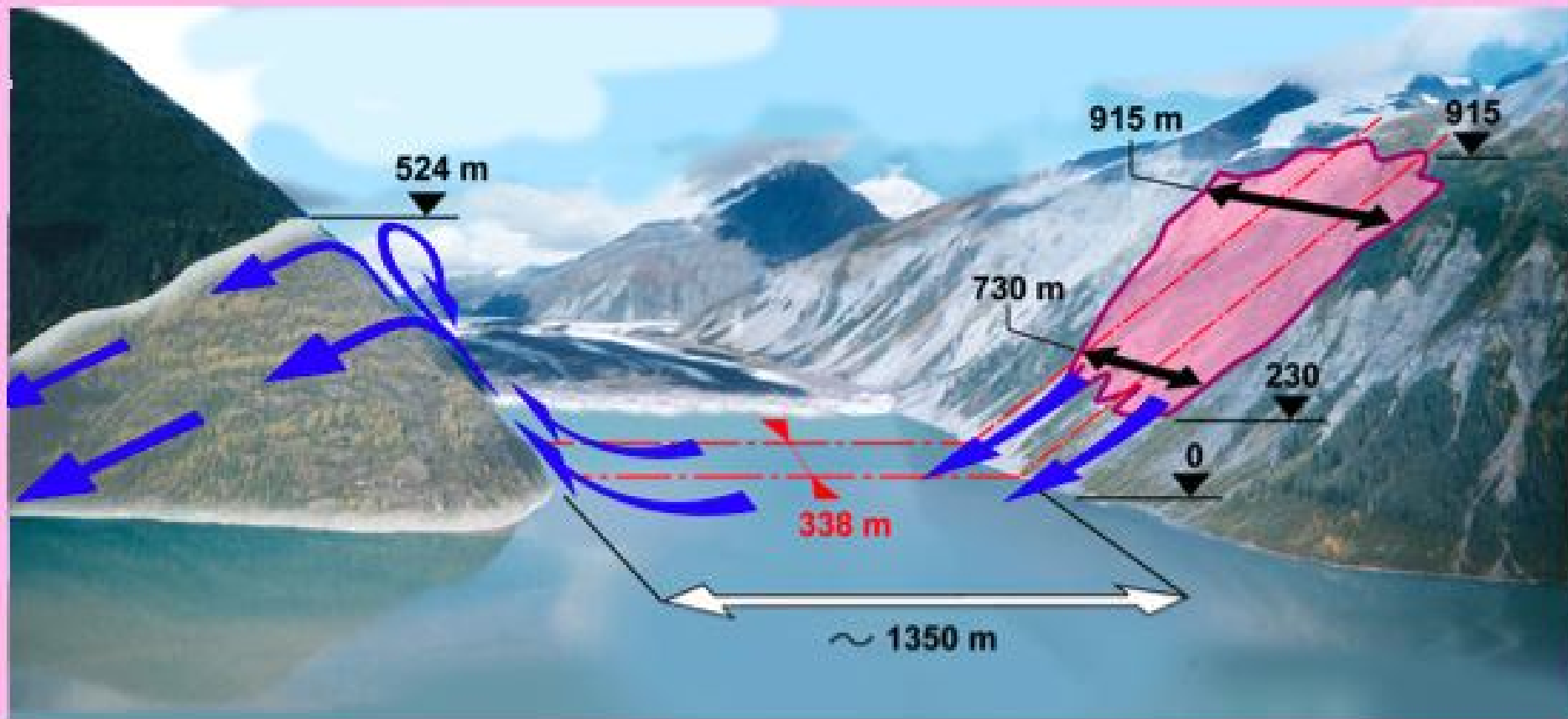


524 m



300m

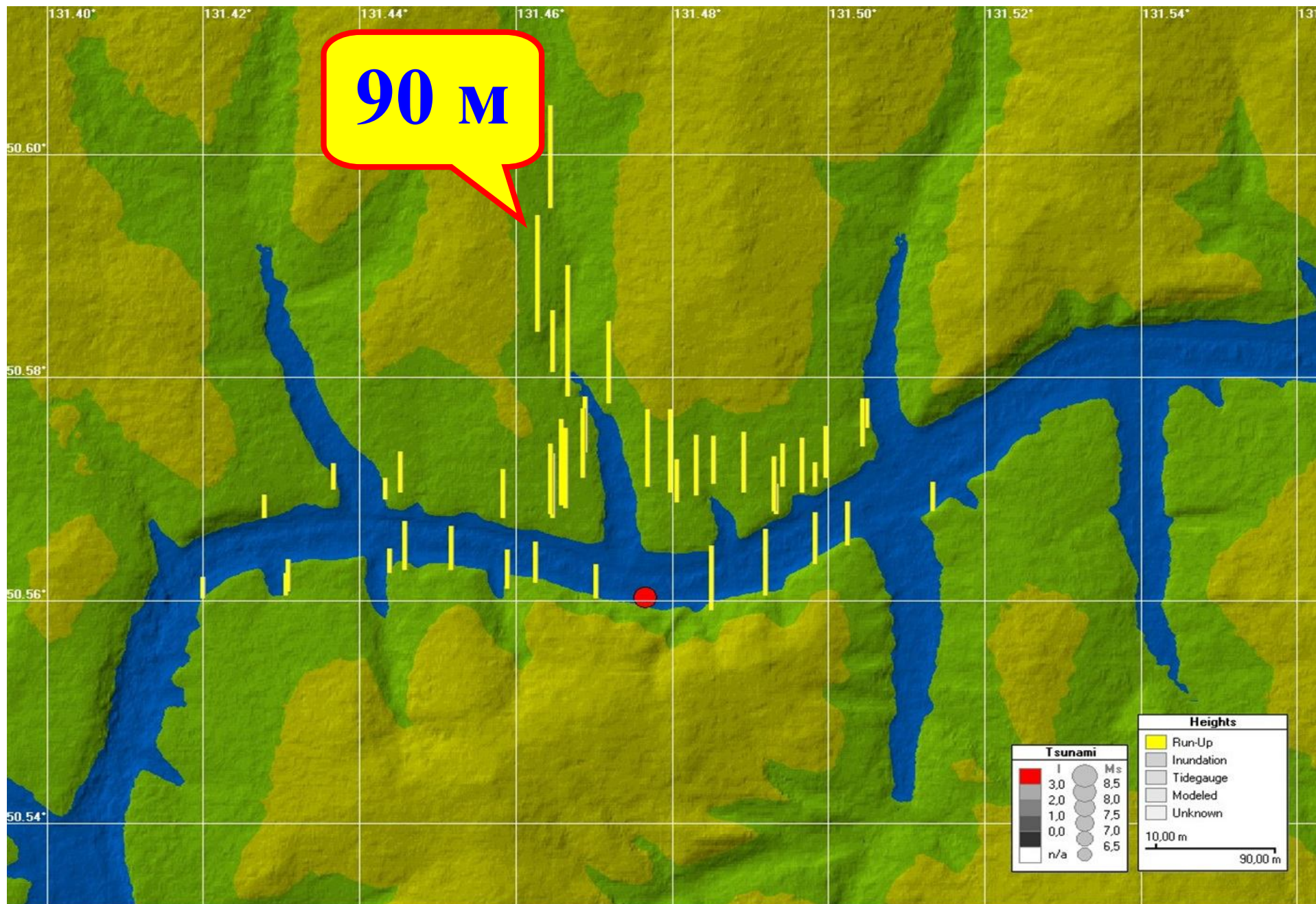
Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г
оползень объемом $\sim 0.3 \text{ км}^3$



«Ледяное» цунами в Бурейском вдхр. 11.12.2018



Общий вид чаши отрыва и тела оползня. Снимок с квадрокоптера «Фантом-4»
А.Н.Остроухова (ИВиЭП ДВО РАН) от 19.06.2019.



Визуализация измеренных высот заплеска в графической оболочке PDM/TSU

ТИПЫ ВОЛН В ОКЕАНЕ

(названия волновых явлений)

- Поророка (Амазонка)
- Риссага (о.Менорка)
- Абики (о.Кюсю)
- сейши
- “волны-убийцы”
- СОЛИТОНЫ
- захваченные волны
- зыбь
- бор
- ...



«Волны-убийцы»

**Последовательные кадры
(с интервалом 2 сек)
подхода волны к берегу;
ее высота достигла 25 м
(Ванкувер, Канада)**

1973 South Africa



“World Gloria”

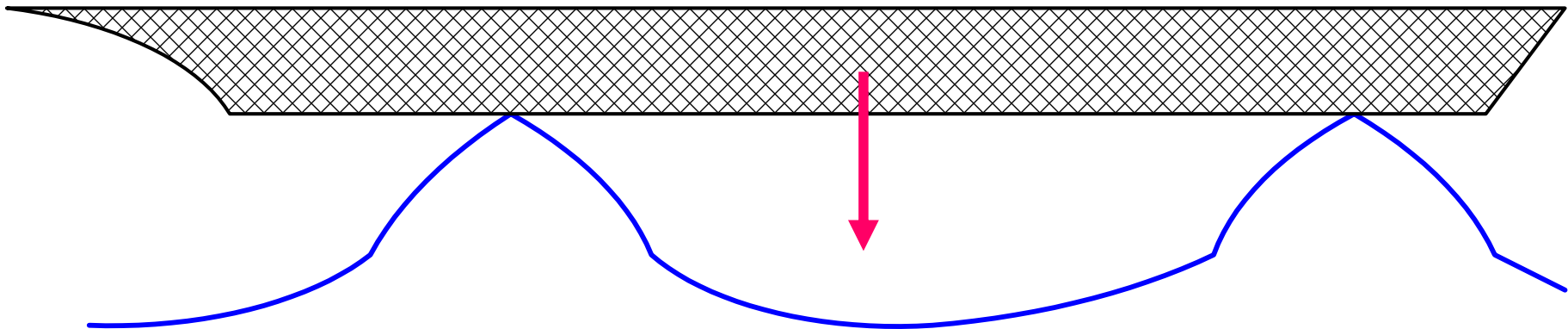




Рис. 1. Фотографии повреждений, вызванных экстремальными волнами



а



б

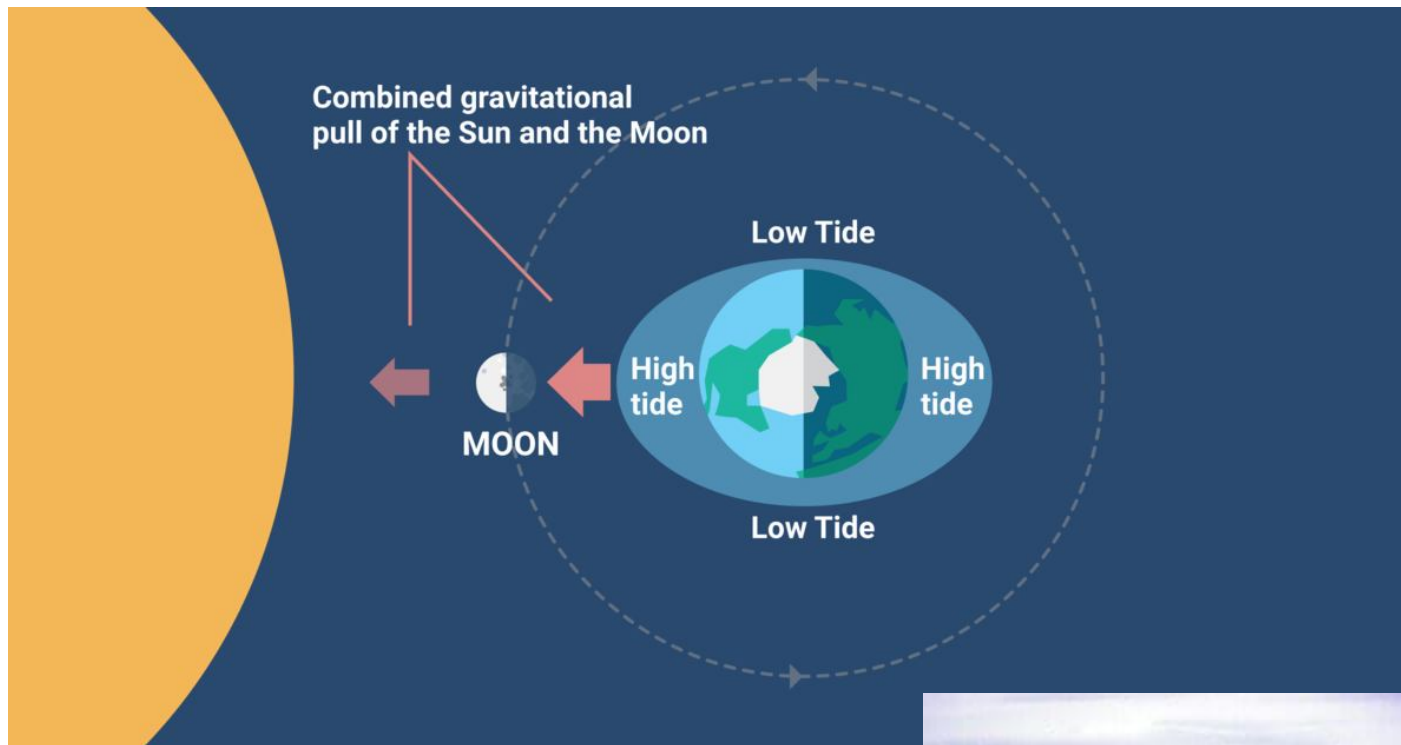


в

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]

Приливные ВОЛНЫ



High tide (left) and low tide (right) in the Bay of Fundy in Canada. Image credit: Wikimedia Commons, Tttrung. Photo by Samuel Wantman.



Поророка (porofofo) на р. Амазонка



7 NEWS
SPOTLIGHT
FROM THE VAULT

Риссага



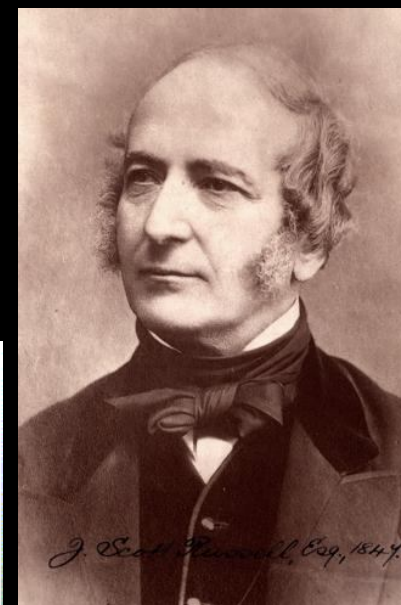


Риссага

СОЛИТОН



Открытие солитона (1834 г.)



Джон
Скотт
Рассел
(1808-1882)