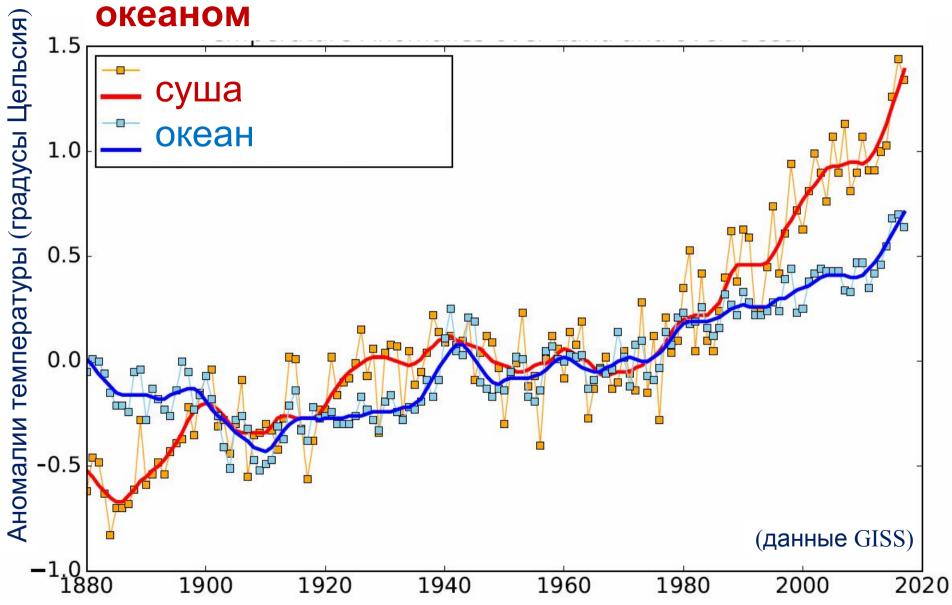
Изменения климата

Мохов И.И.

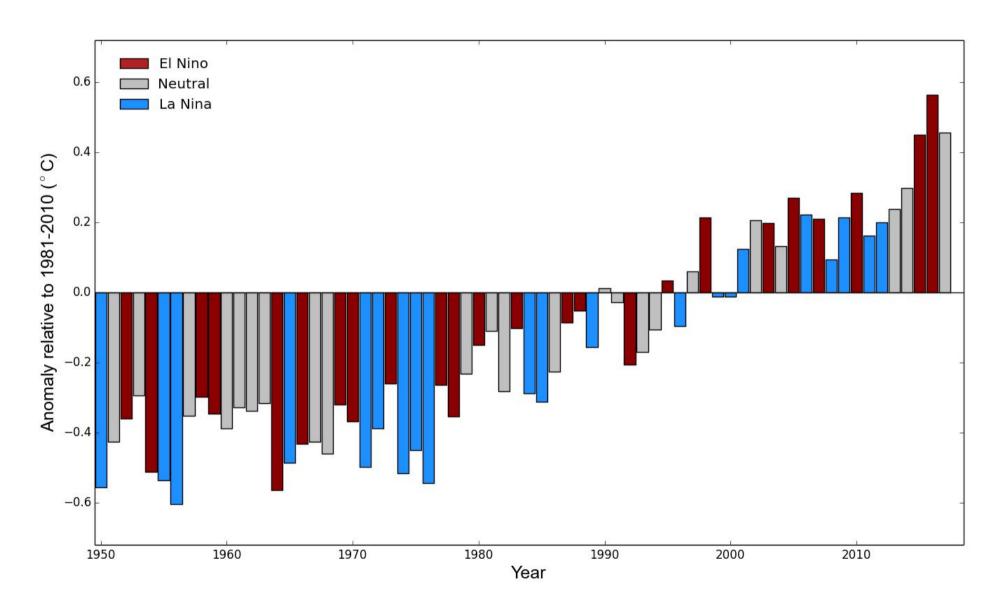
МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

mokhov@ifaran.ru

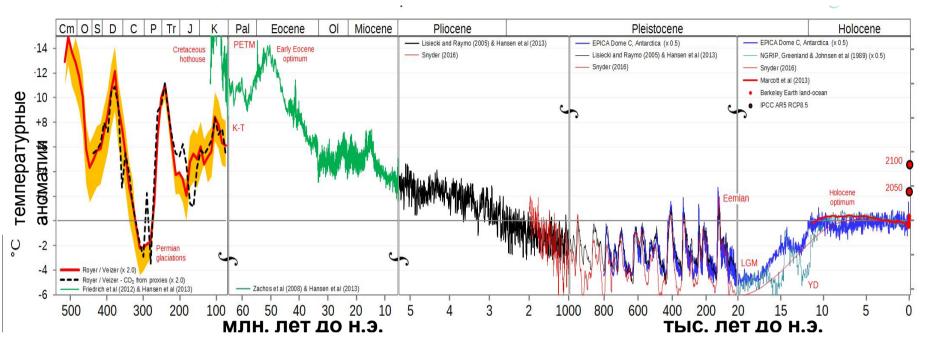
Аномалии температуры над сушей и океаном



Аномалии глобальной приповерхностной температур

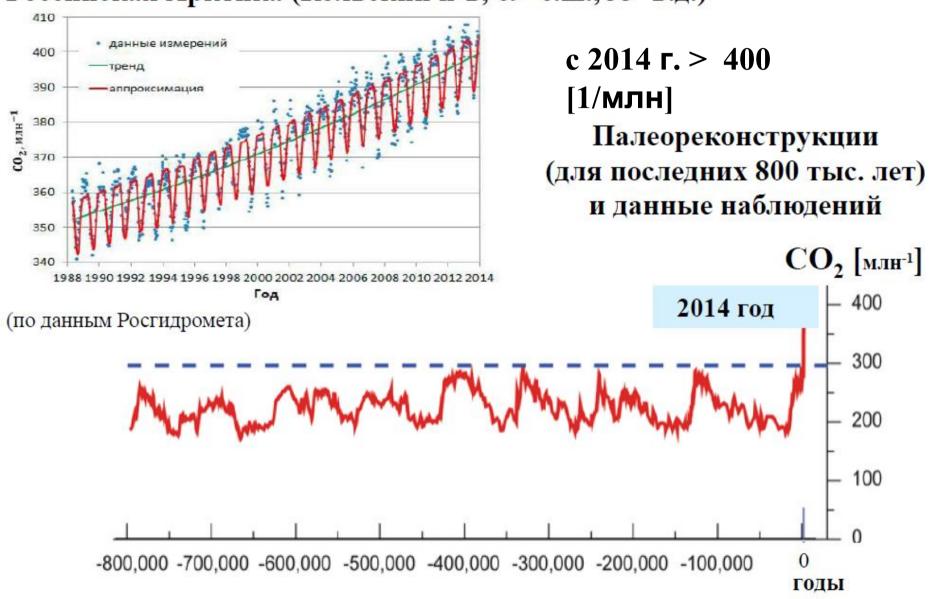


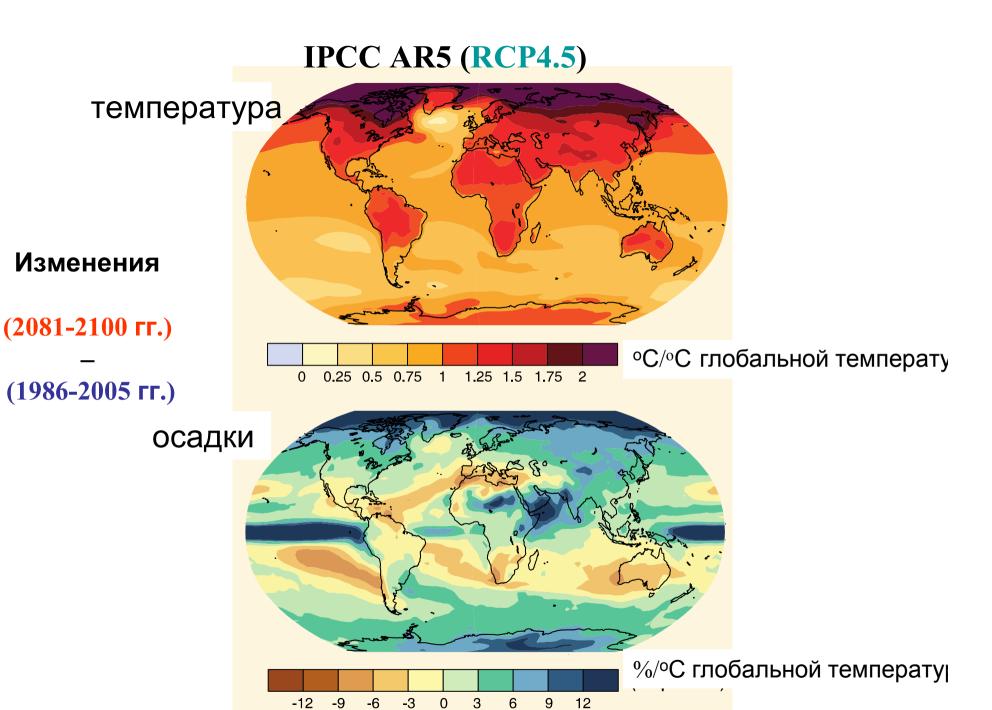
Реконструкции вариаций глобальной температуры



Содержание СО2 в атмосфере

Российская Арктика (Кольский п-в, 69° с.ш., 35° в.д.)





Характерные особенности потепления

Увеличение приповерхностной температуры

Изменение режимов осадков, снежного покрова, влагосодержания почвы и речного стока

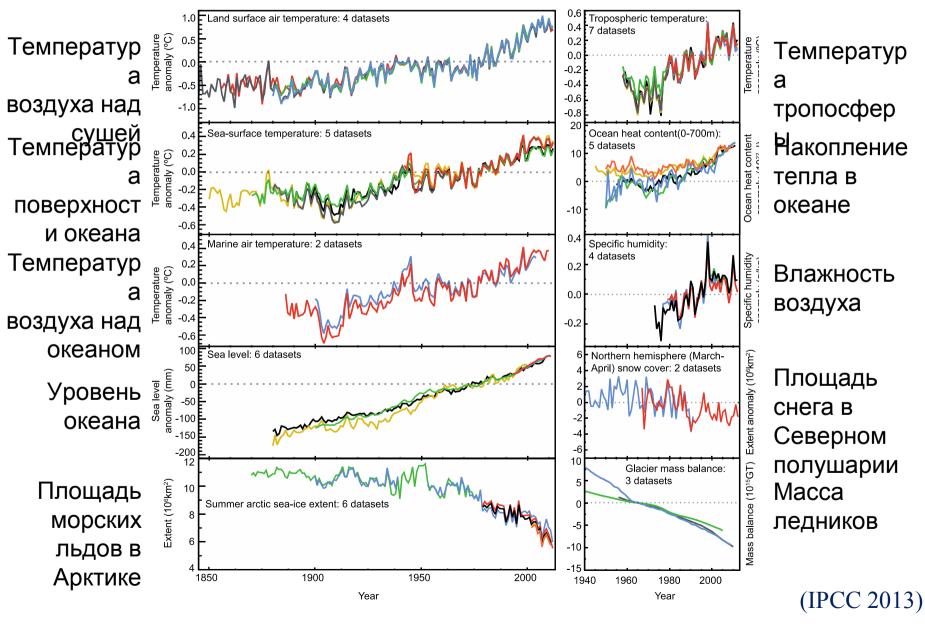
Уменьшение площади морских льдов в Арктике

Изменение режима вечной мерзлоты

Изменение режимов циклонов и антициклонов в средних и полярных широтах

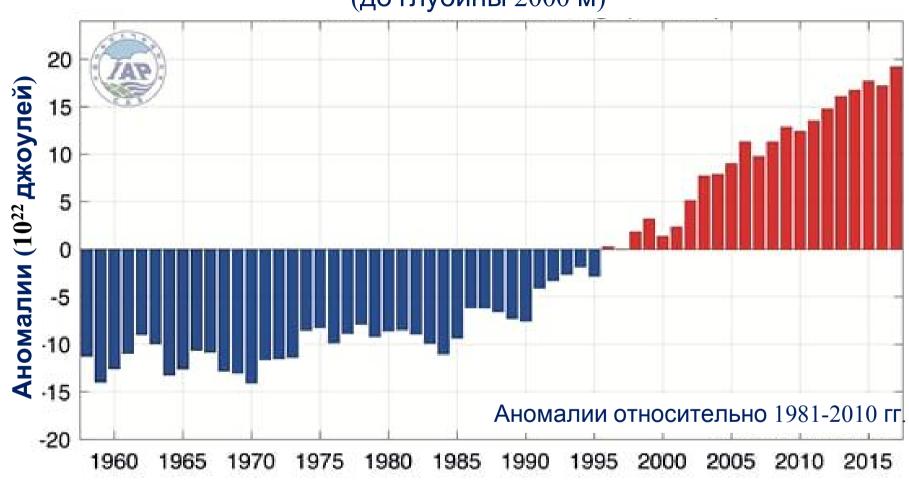
Изменение вероятности засух (пожаров) и наводнений

Глобальные изменения климата

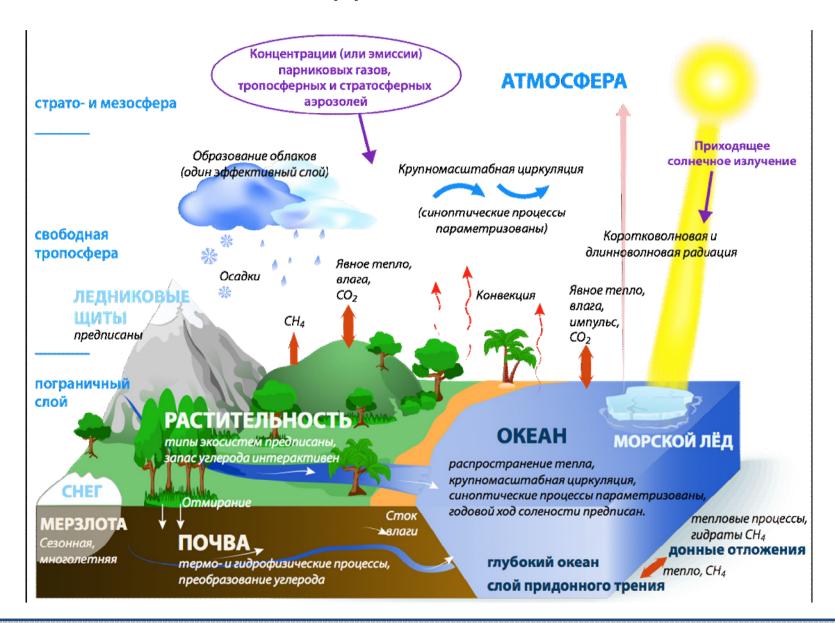


Изменения теплосодержания Мирового океана

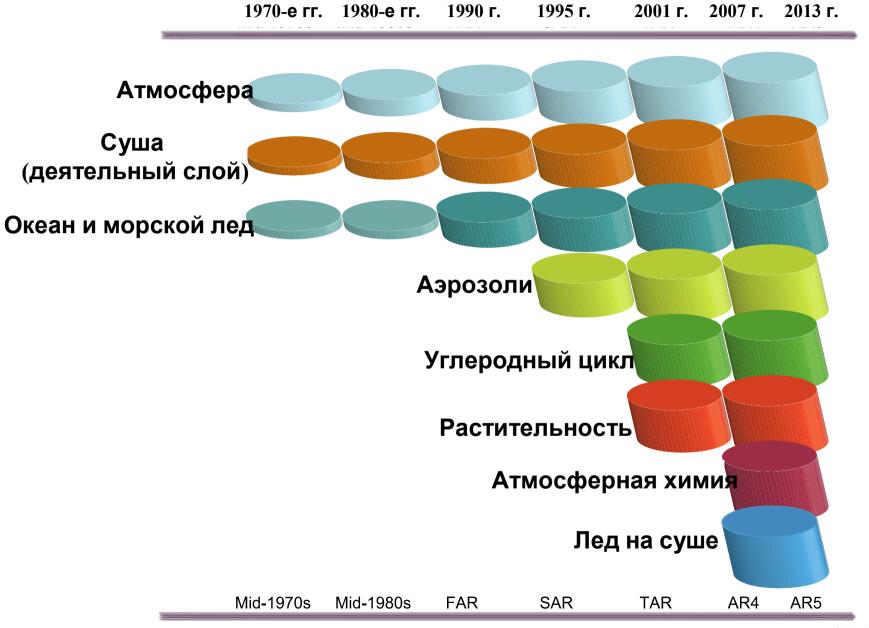
(до глубины 2000 м)



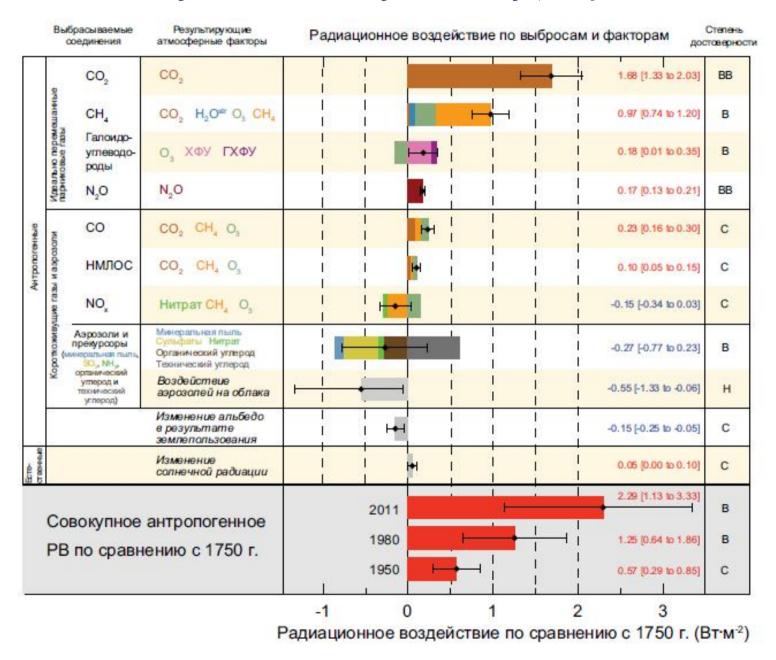
Климатическая модель ИФА РАН



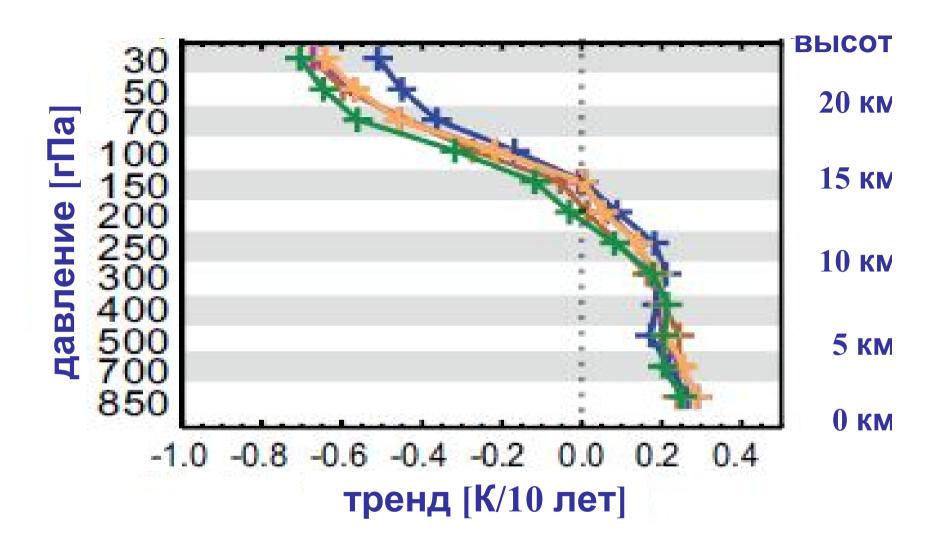
Развитие климатических моделей



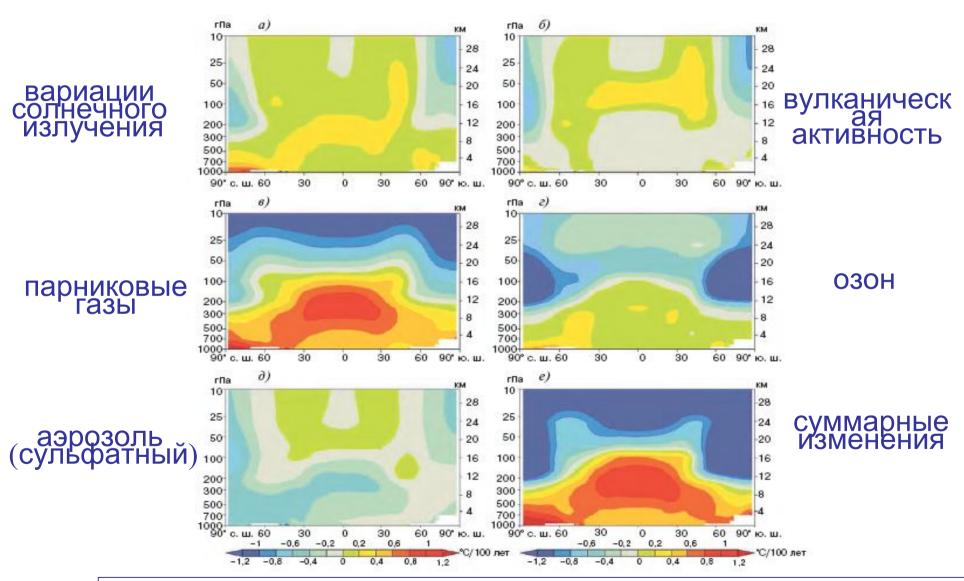
пь разных факторов в формировании изменений радиационного воздейств на земную климатическую систему (с середины 18 века)



Северное полушарие (внетропические широть



Модельные оценки изменений температуры (°С за 100 лет) в разных слоях атмосферы различных широт в 1890-1999 гг.



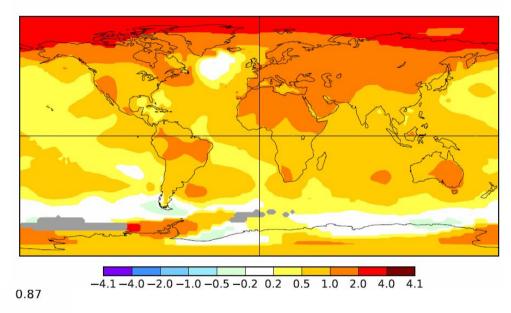
ІРСС, 2007; Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации,

Температурные аномалии и тренды

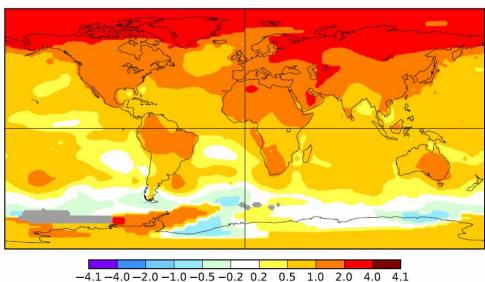
Annual J-D 2009-2018

L-OTI(°C) Anomaly vs 1951-1980

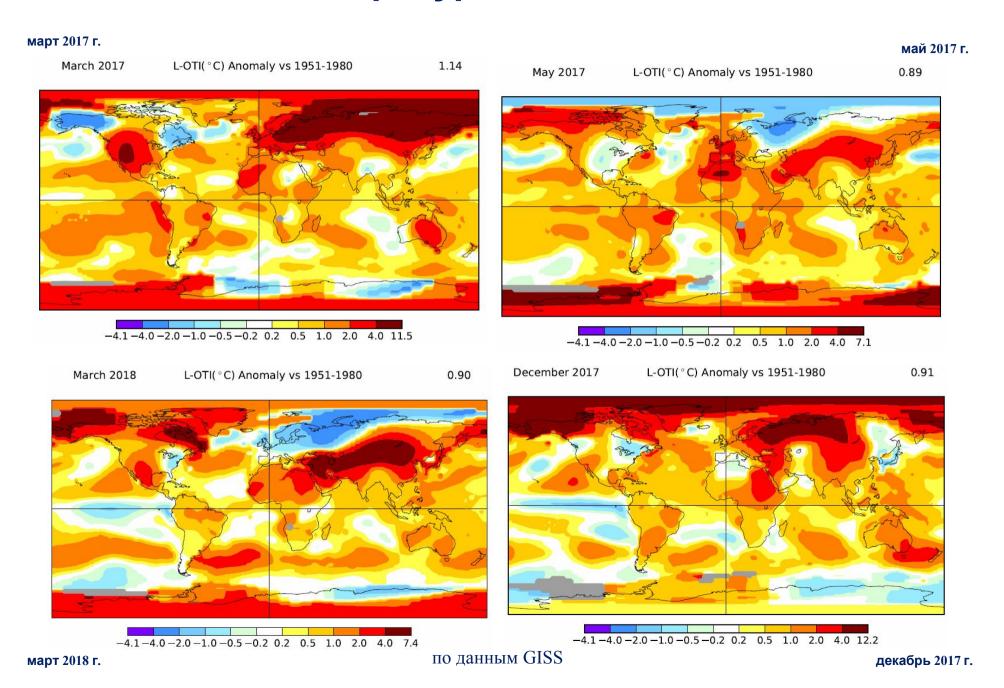
0.75



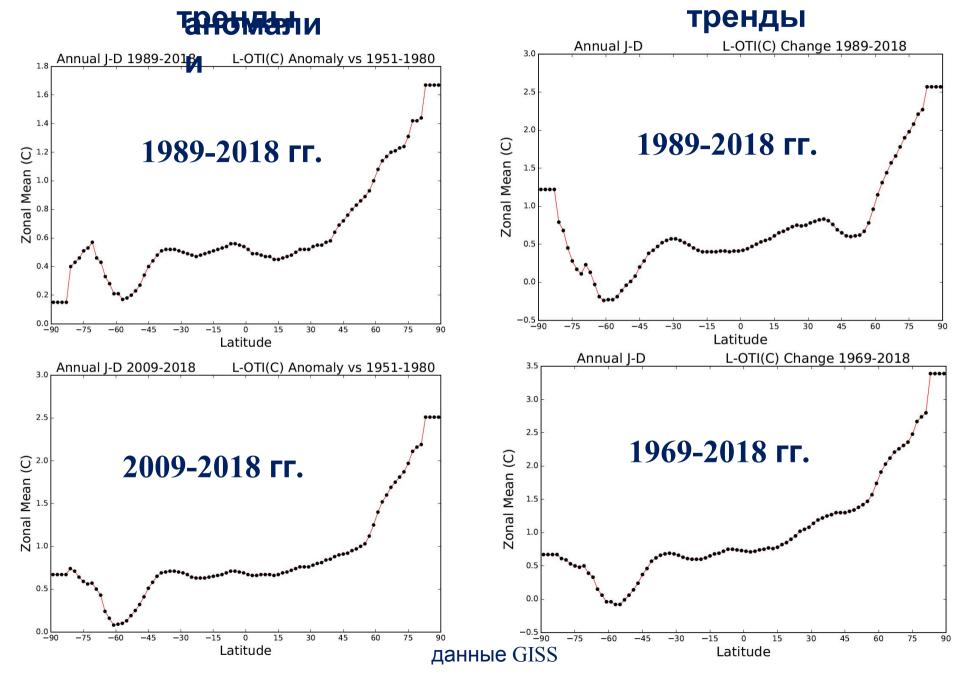
Annual J-D L-OTI(°C) Change 1969-2018



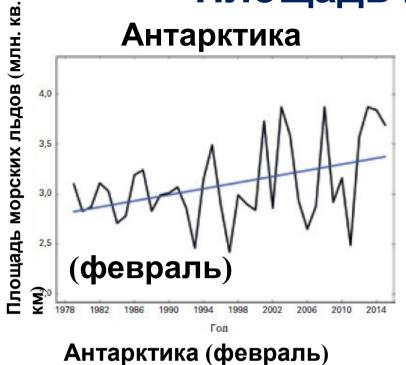
Температурные аномалии

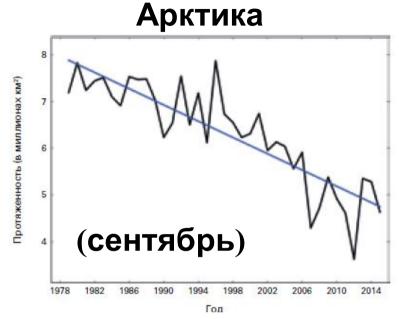


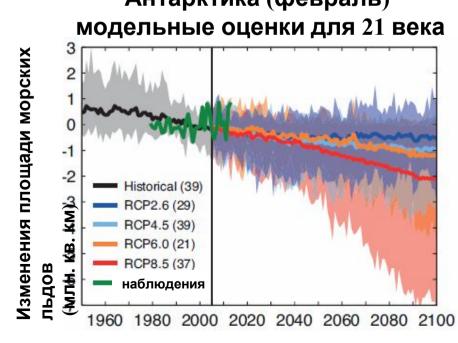
Температурные аномалии и

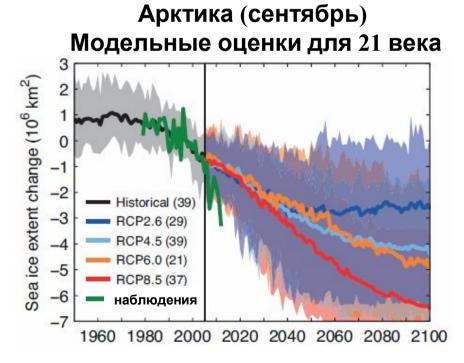


Площадь морских льдов

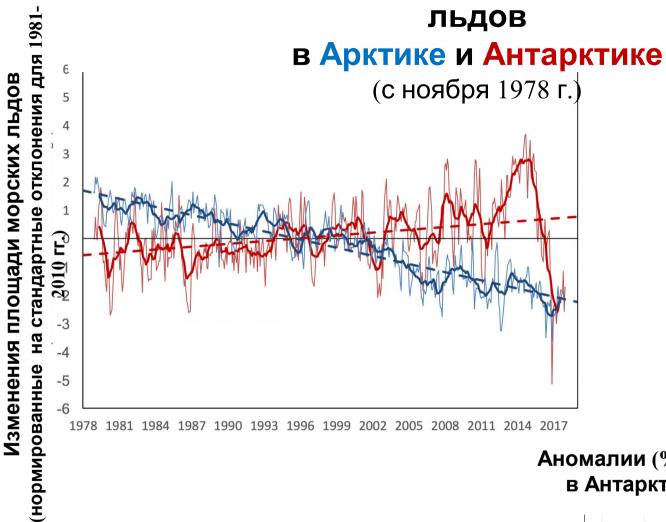




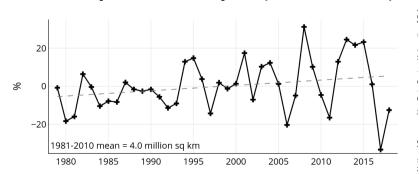




Изменения (нормированные) площади морских льдов

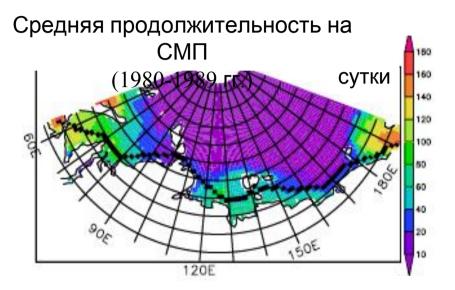


Аномалии (%) площади морских льдов в Антарктике в марте (1979-2018 гг.)



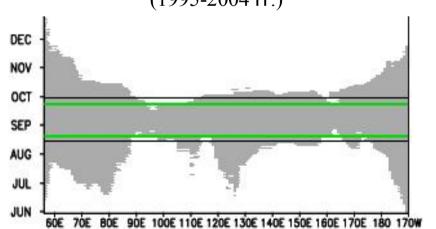
Северный морской путь

Продолжительность сезонов с открытой водой (серый цвет) для разных десятилетий по спутниковым данным

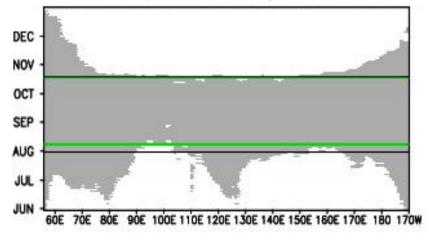




Продолжительность на разных участках СМП (1995-2004 гг.)



Продолжительность на разных участках СМП $(2005-2014\ {\rm гr.})$



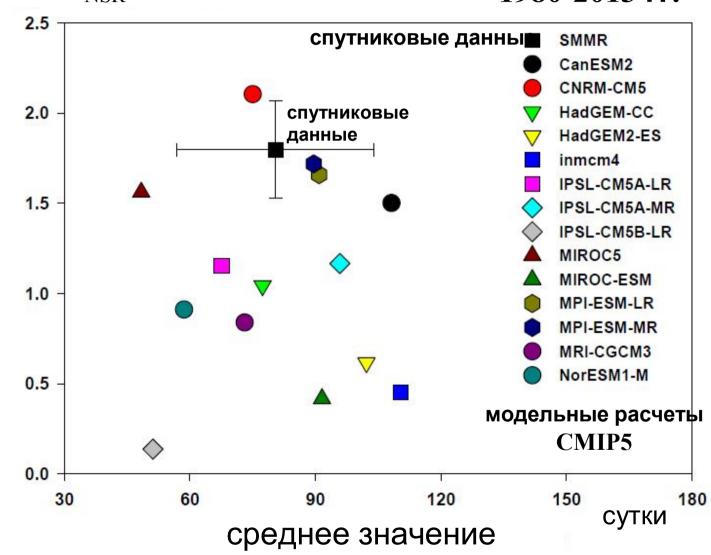
(концентрация морских льдов < 15%)

Khon et al. (2017)

Северный морской путь навигационный период (T_{NSR})



1980-2013 гг.



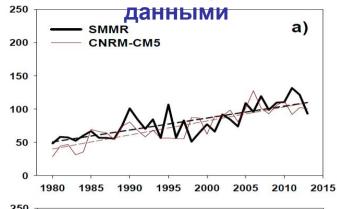
Северный морской путь (СМП) продолжительность навигационного периода (ПНП) 1980-2013 гг.

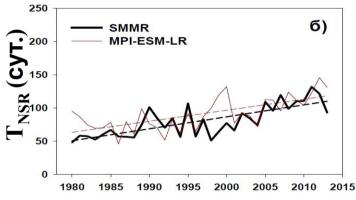
Данные	$\frac{dT}{dt}$, сут/год	T, cyt
Спутниковые	1.8 (±0.3)	80 (±24)
CNRM-CM5	$2.1 (\pm 0.2)$	75 (±25)
MPI-ESM-LR	$1.7 (\pm 0.3)$	91 (±24)
MPI-ESM-MR	$1.7 (\pm 0.4)$	90 (±28)
Среднее	1.8 (±0.2)	85 (±21)

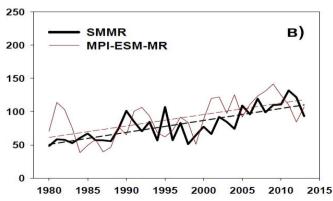
Средняя ПНП на СМП T (при концентрации морских льдов не более 15%) и скорость ее изменения $\frac{dT}{dt}$ в 1980—2013 гг. по спутниковым данным и по расчетам с климатическими моделями CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR

Навигационный период T_{NSR} (в сутках)

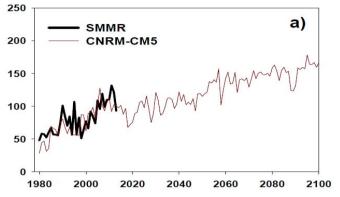
Расчеты с лучшими моделями в сравнении со спутниковыми

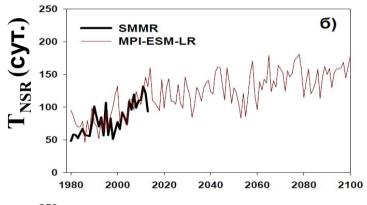


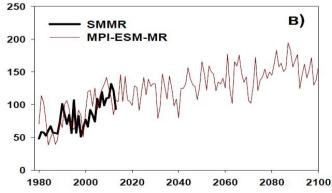




Расчеты с лучшими моделями при сценарии RCP 4.5 для 21 века



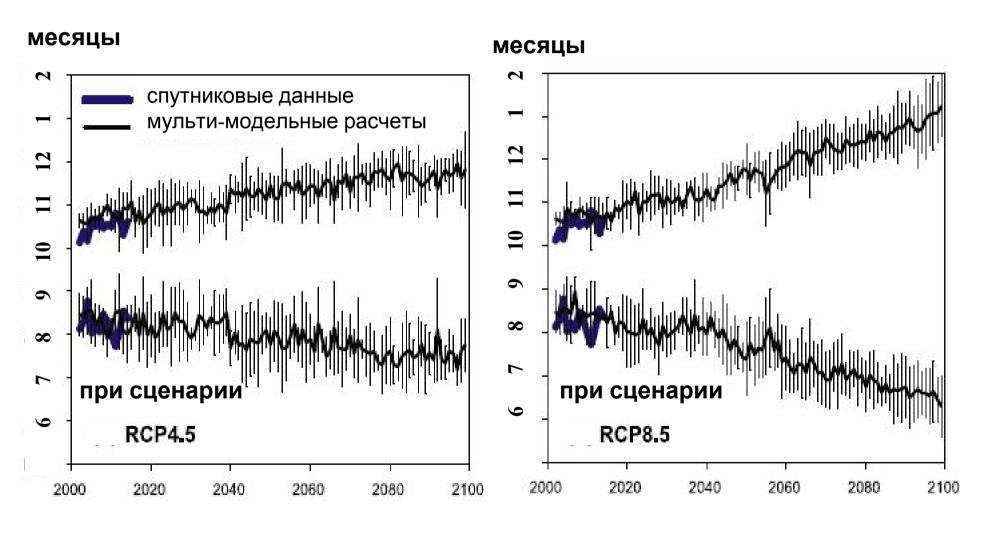




Мохов, Хон (2015), Мохов и др. (2016)

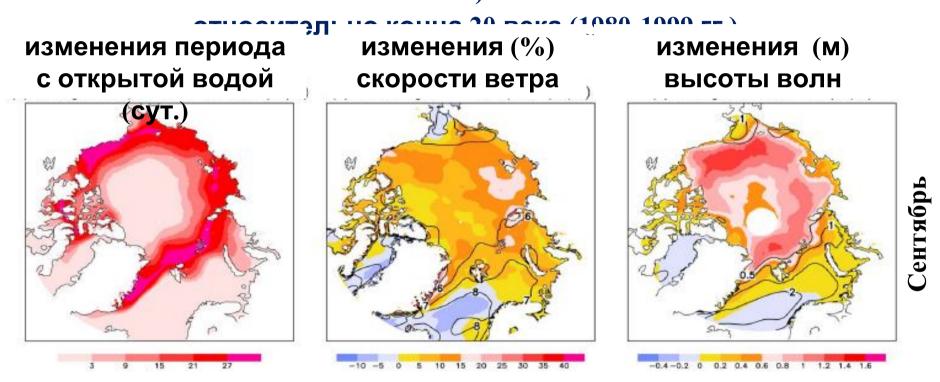
Северный морской путь

(изменения начала и конца навигационного периода)



Арктика

Модельные оценки изменений (сентябре) к середине 21 века (2046-2065 гг.)



Расчеты с региональной климатической моделью и моделью для морских волн при сценарии умеренных антропогенных воздействий для 21 века

Вертикальный градиент температуры в тропосфере γ [K/KM]1.05 1.00 0.95 0.90 по данным реанализа ERA-Interim 0.85 (1979-2014 гг.) 0.80 0.75 70 90 80 60 30 Latitude 1.6 1.4 1.2 1.0 $d\gamma/dT$ 8.0 0.6 0.4 0.2 0.0 90 80 70 60 50 40 30 20 Latitude 3.5 $P = \gamma_{NH}^{-1} (d\gamma/dT)_{NH} \delta T_{NH}$ 3.0 2.5 $p=P/P_{NH}$ $P_{NH} = \gamma_{NH}^{-1} (d\gamma/dT)_{NH} \delta T_{NH}$ 2.0 1.5 1.0

30

20

Mokhov et al. (2016)

0.5

90

70

60

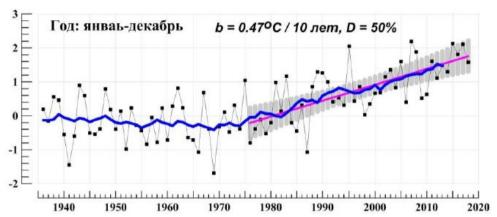
50

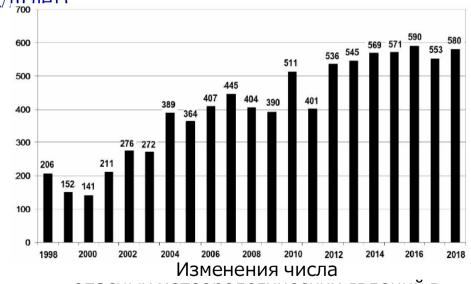
Latitude

Изменения приповерхностной температуры и количества опасных метеорологических явлений в России

связи с глобальным и эффектом потеплением арктического усиления России ПО данным Росгидромета приповерхностная температура растет последние десятилетия более чем в 2.5 раза быстрее глобальной.

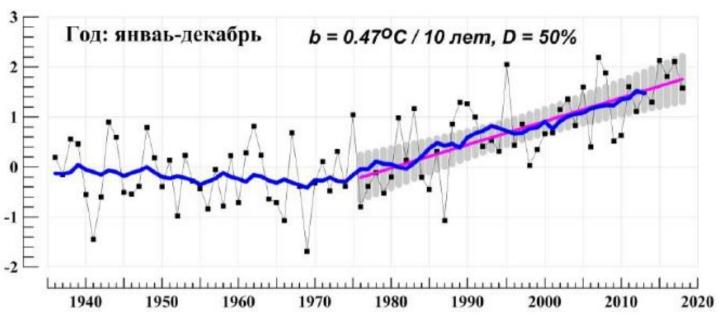
При этом число опасных метеорологических явлений в России с конца 20 века увеличивается в среднем на 6-7% в год. (в 2018 г. более, чем в 4 раза больше, чем в 2000 г.)





опасных метеорологических явлений в России

Температурные аномалии и тренды



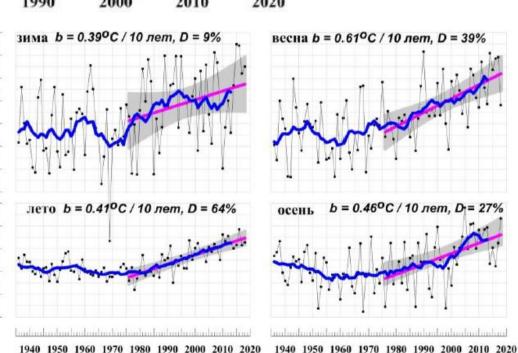
-1

-2

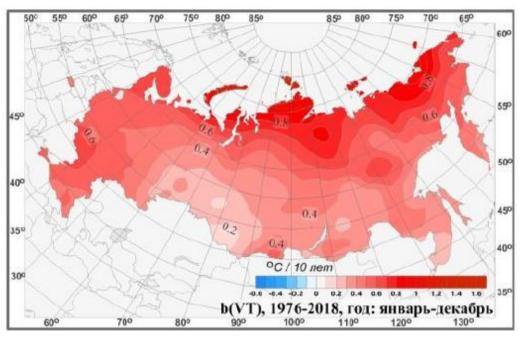
Рисунок 1.1 — Средние годовые (вверху) и сезонные аномалии температуры приземного воздуха ($^{\circ}$ C), осредненные по территории России, 1936-2018гг.

Аномалии рассчитаны как отклонения от среднего за 1961-1990 гг. Показаны также 11- летнее скользящее среднее, линейный тренд за 1976-2018 гг. с 95%-й доверительной полосой; b - коэффициент тренда-2 (°C/10 лет), D% – вклад тренда в суммарную дисперсию.

данные Росгидромета

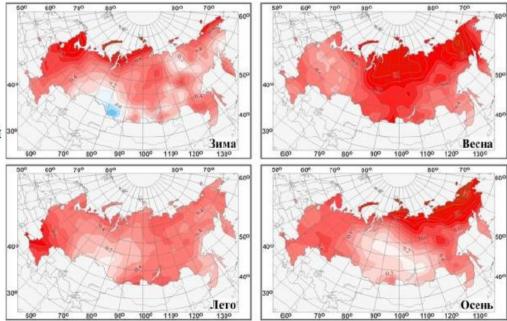


Температурные тренды



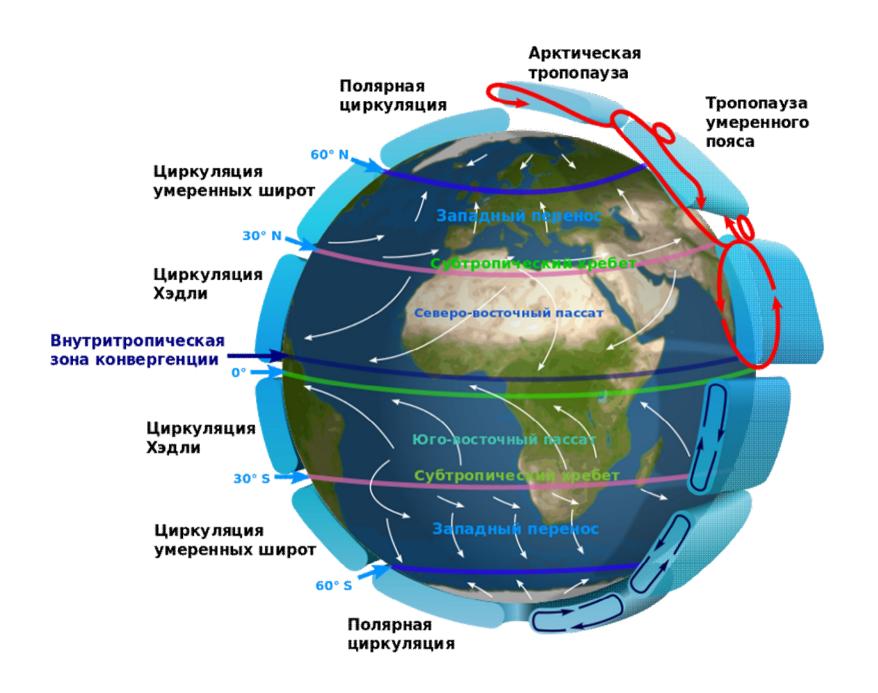
Коэффициент линейного тренда среднегодовой и средних сезонных значений температуры приземного воздуха на территории России за период 1976-2018 гг. (°C/10 лет)

данные Росгидромета



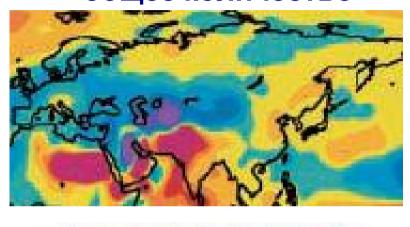
Атмосферно-климатические аномалии в

- Потенление уменьшение температурного перепоса рост роли меридиональных процессов, в том числе процессов блокирования с формированием аномально жарких и сухих периодов летом (Европейская часть России, лето 2010 г.) или аномально холодных зимой.
- Эффекты блокирования атмосферной циркуляции в сезоны муссонной активности на Дальнем Востоке при более высоком влагосодержании атмосферы и при аномально высокой температуре океана —> риск сильных наводнений на Амуре (2013 г.).
- Рост интенсивности конвективных процессов: больше сильных ливней, рост грозовой активности (больше молний —> рост риска возникновения лесных пожаров), рост числа воздушных смерчей.
- При росте приповерхностной температуры летом и перераспределении внутриконтинентальных осадков (ливни становятся реже, но сильнее), —> рост риска засух и пожароопасности.
- •Рост температуры поверхности моря —> рост риска сильных ливней в прибрежных регионах (Крымск, 2012 г.).

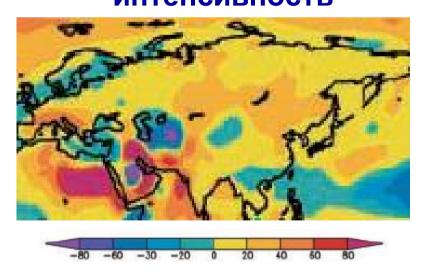


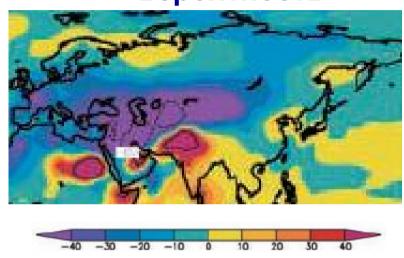
Модельные оценки возможных изменений летних осадков (%)

общее количество вероятность

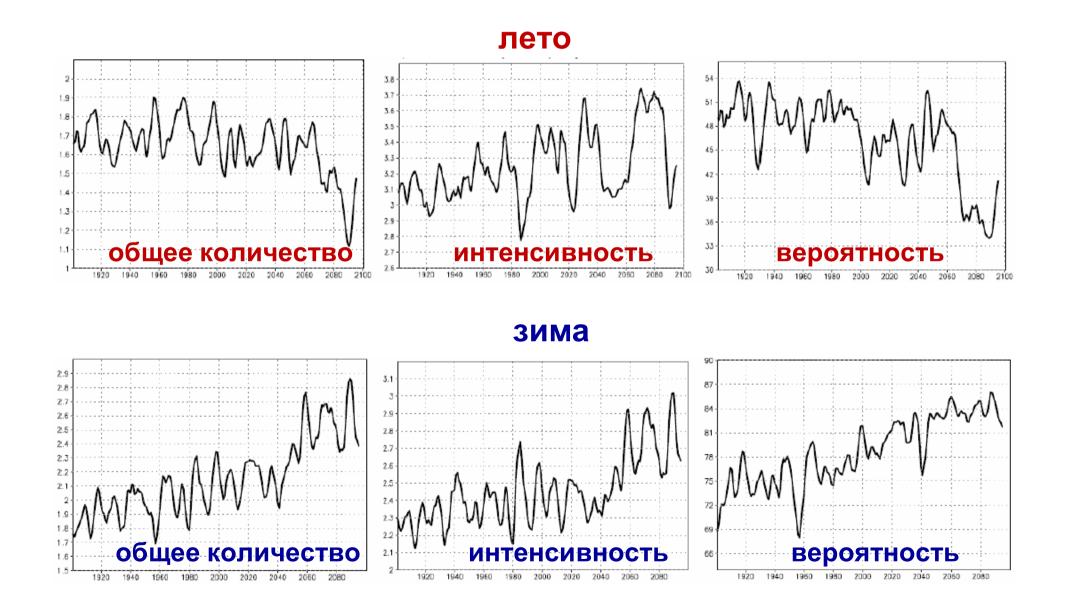


интенсивность

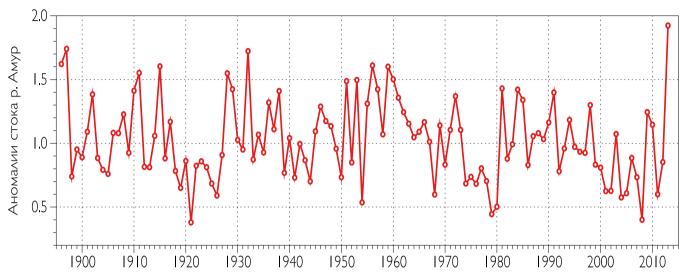




Модельные оценки возможных изменений осадков (%) в московском регионе в 21 веке



Рекордное наводнение на Амуре в 2013 г.

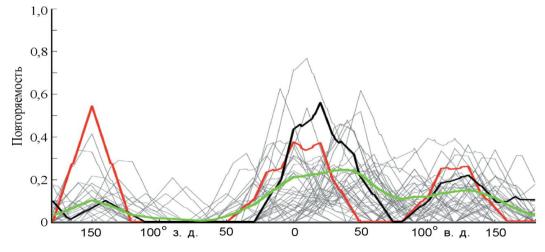


Аномалии стока р. Амур в августе-сентябре

нормировано на среднее для 1961-1990 гг.

Повторяемость атмосферных блокингов в летний период (1969-2013 гг.).

Серые кривые – все годы, зеленая кривая – среднемноголетнее, черная кривая – 2010 г., красная кривая – 2013 г.



Мохов и др., 2014

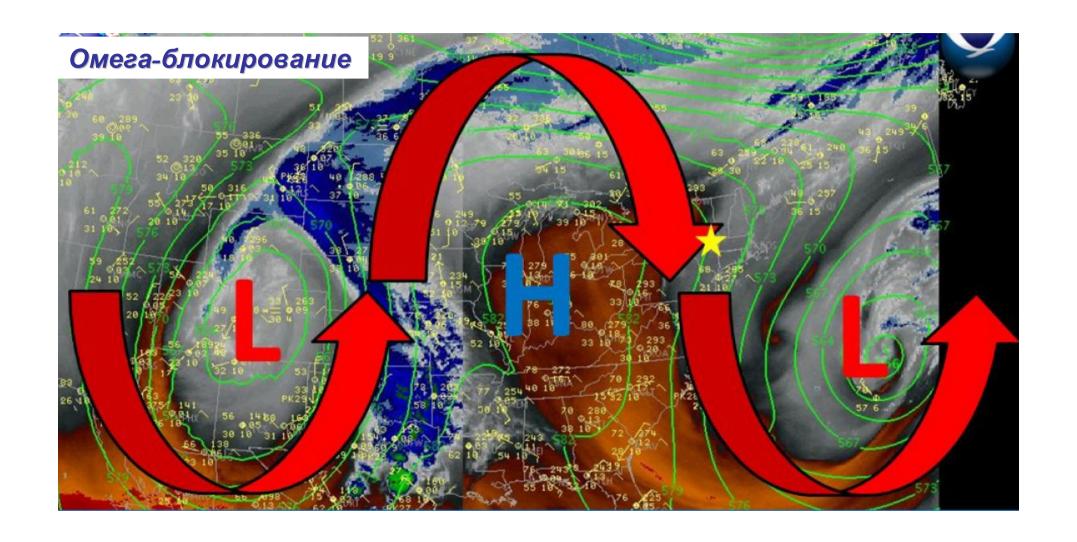
Блокинг расщепляющегося типа (диполь)

зональный поток (с запада на восток) в средних широтах

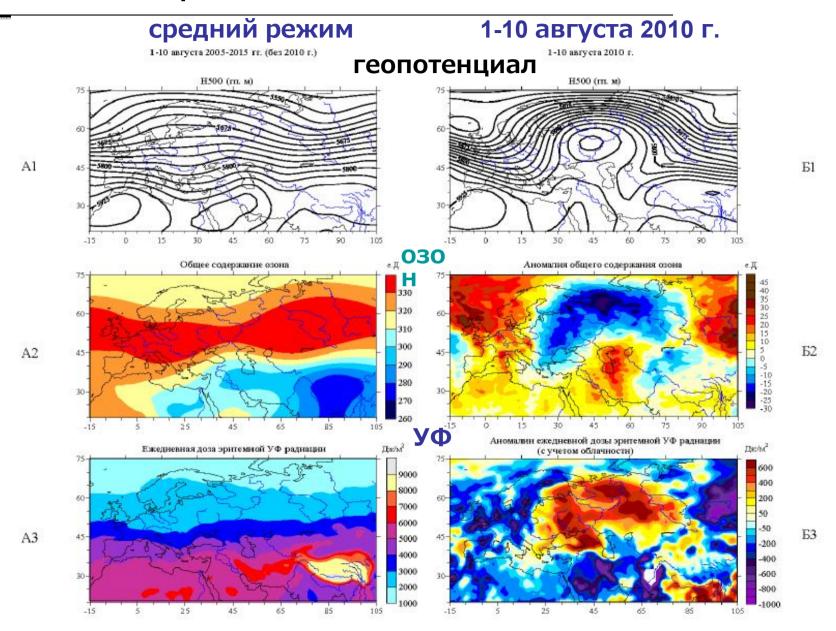


зональный поток (с запада на восток) в средних широтах

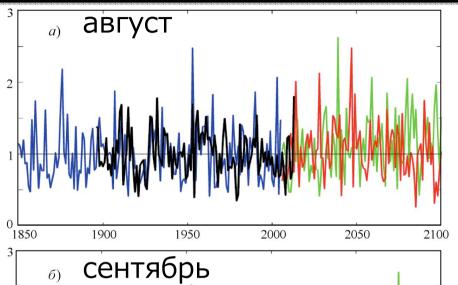
$$U = c/2\pi d$$



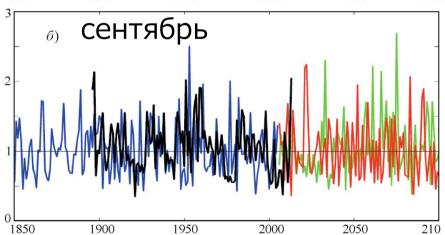
Блокирование над ЕТР летом 2010 г.



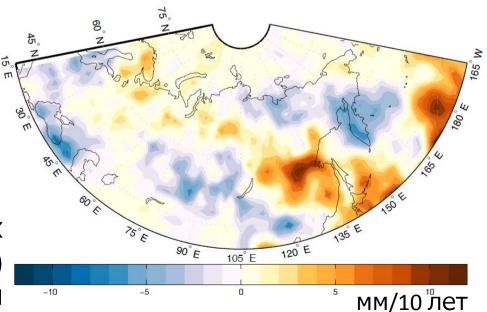
Риск повторения наводнения на Амуре в 21 веке



Аномалии стока р. Амур (нормированные на 1961-1990) по данным наблюдений (черная кривая) и по данным модели MPI-ESM-MR при сценариях historical (синяя кривая), RCP4.5 (зеленая кривая), RCP8.5 (красная кривая).

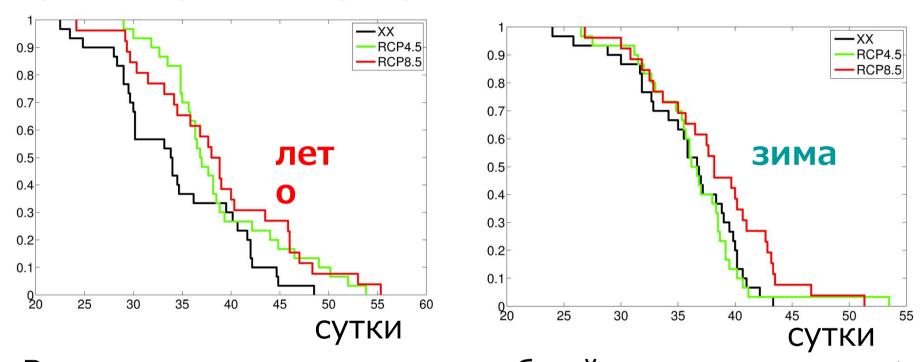


Тренд количества летних осадков в 21 в. (2006-2100 гг.) (модель MPI-ESM-MR, сценарий





Модельные оценки изменений характеристик блокирований западного переноса в атмосфере средних широт Северного полушария в 21 веке



Вероятность превышения общей длительности (в сутках) летнего (слева) и зимнего (справа) блокирования в Евро-Атлантическом регионе в зависимости от длительности блокирования по ансамблевым модельным расчетам для последнего 30-летия 21 века при разных сценариях RCP 4.5 и RCP 8.5 в сопоставлении с последним 30-летием 20 векмахем Тум. эжев (2015)

Стационирование волн Россби

U — скорость зонального потока (с востока на запад)

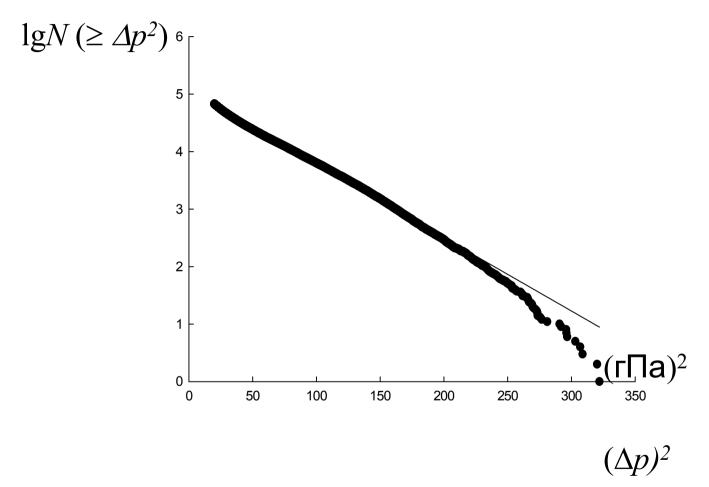
 U_R – скорость волны Россби (с запада на восток)

$$U_R \sim \beta m^{-2}$$

m – волновое число, β = $2\Omega cos \phi/R$, R и Ω - радиус и угловая скорость вращения Земли, ϕ - широта

При
$$U=U_R$$
При $dU/dT < 0 \to dm/dT > 0$
Ослабление зонального полока при нотей нении способствует стационированию волн Россби с

Внетропические циклоны



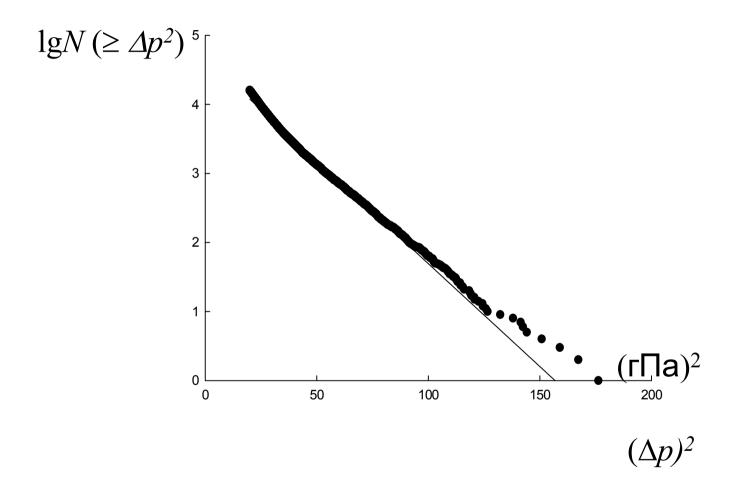
Кумулятивное число циклонов с кинетической энергией $\geq E_k \sim (\Delta p)$

Акперов и др. (2007)

• Крупные (за исключением самых мощных) атмосферные вихри по энергии распределены экспоненциально, как в статистике Больцмана.

• Можно сказать, что они являются частью канонического ансамбля Гиббса, где океан играет роль термостата, а атмосфера является подсистемой, где вихри — это флуктуации, распределенные по Больцману.

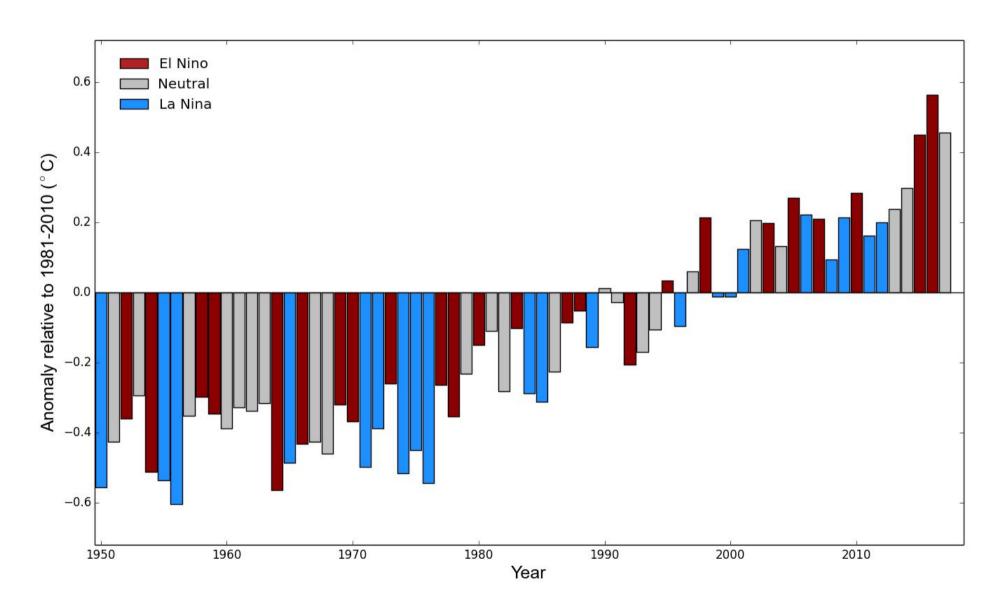
Внетропические антициклоны



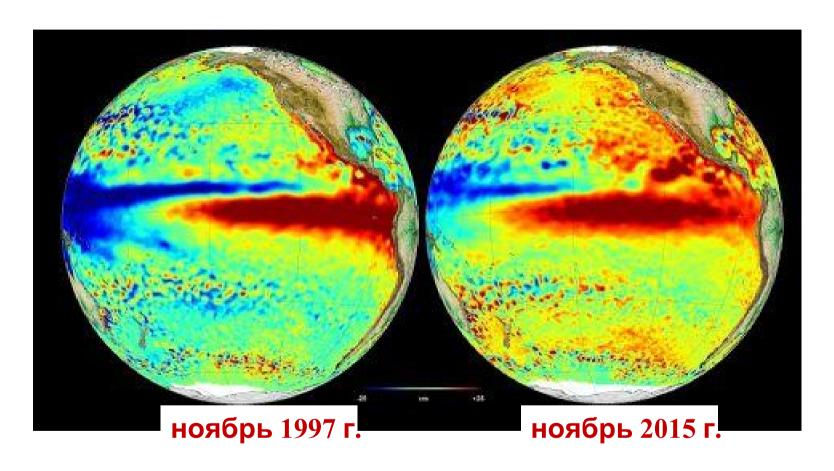
Кумулятивное число антициклонов с кинетической энергией $\geq E_k \sim (\Delta p)$

Акперов и др. (2007)

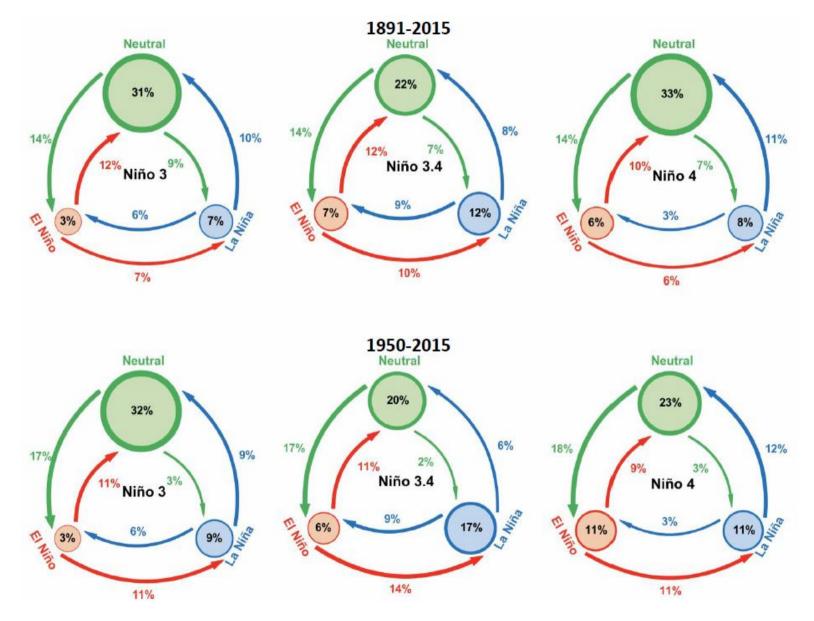
Аномалии глобальной приповерхностной температур



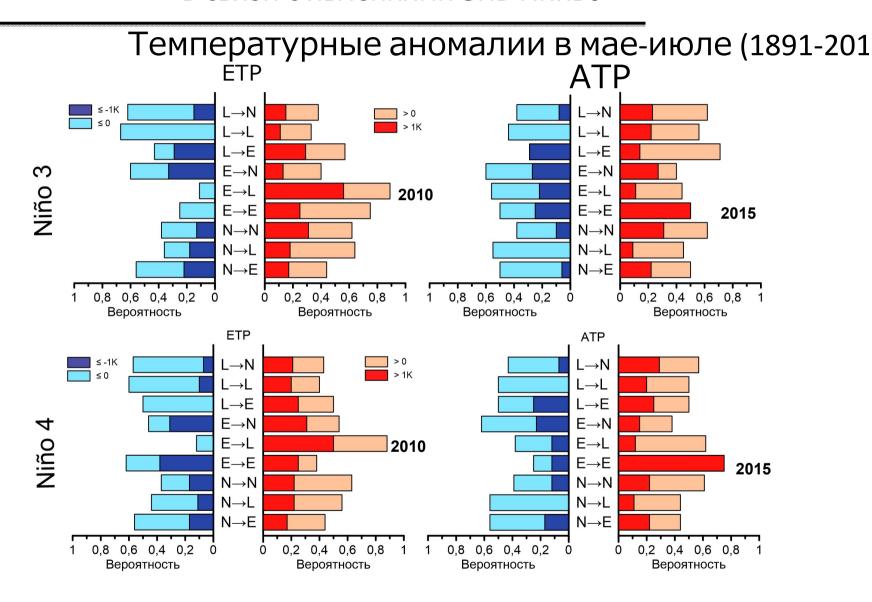
Явления Эль-Ниньо (аномалии температуры поверхности в Тихом океане)



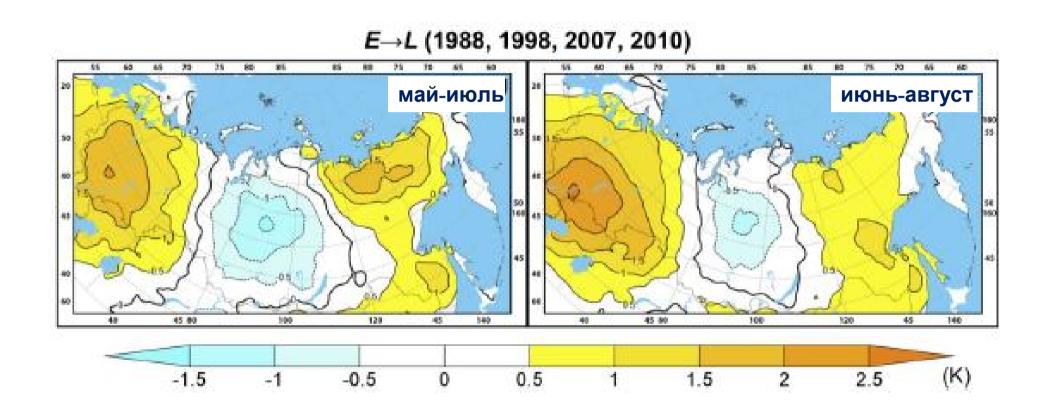
Фазовые переходы для явлений Эль-Ниньо / Ла-Нинья



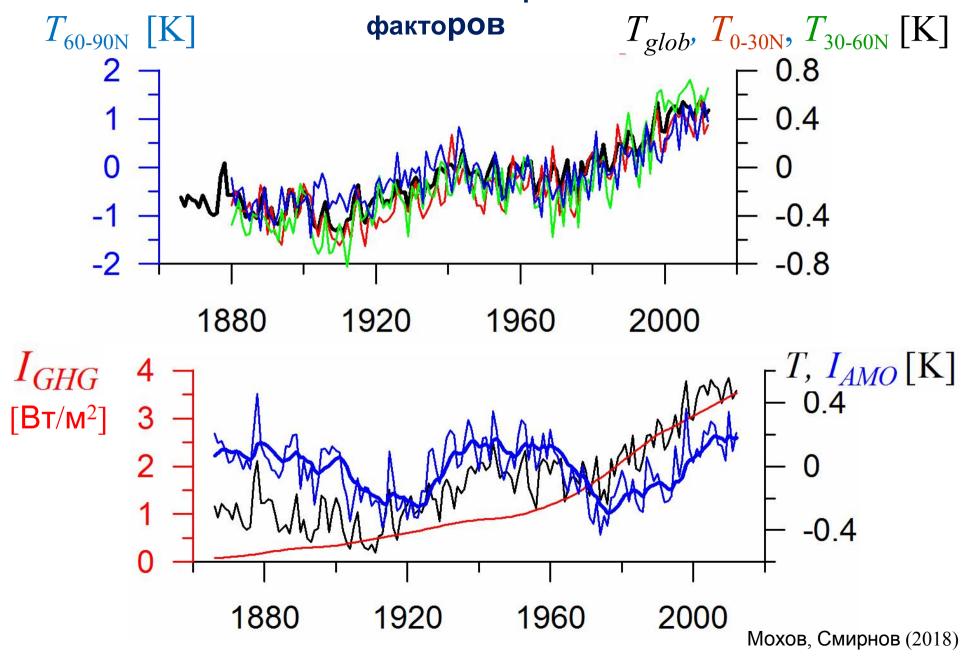
эгодно-климатические аномалии в среднеширотных российских региона в связи с явлениями Эль-Ниньо



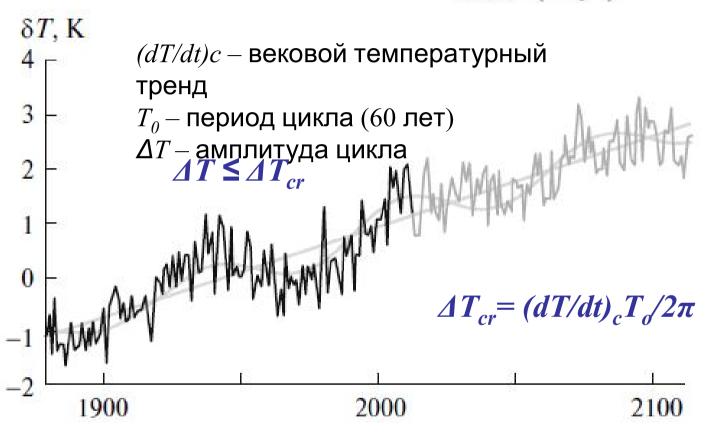
Температурные аномалии в мае-июле в годы со сменой фазы Эль-Ниньо на Ла-Нинья



Современные климатические изменения Роль естественных и антропогенных



условие "не похолодания" $\left(\frac{dT}{dt}\right)_c / \left(\frac{2\pi\Delta T}{T_0}\right) \ge 1$



Арктика:

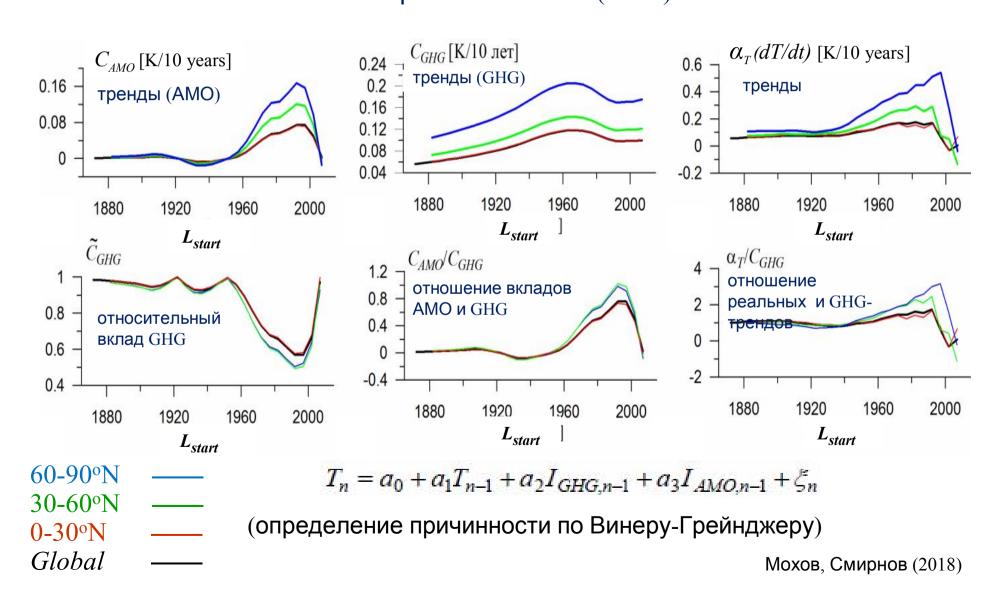
$$(dT/dt)_{cA}$$
= 2.4 K/(100 лет)
(ΔT)_A= 0.3K (0.2-0.4K)
(ΔT)_{Acr}=0.23K

Северное полушарие:

$$(dT/dt)_{cNH}$$
= 1.0 K/(100 лет)
(ΔT) =0.2K (min 0.1K)
(ΔT) $_{cr}$ =0.1K мохов (2015)

Температурные тренды

относительный вклад Атлантической мультидесятилетней осцилляции (AMO) и парниковых газов (GHG)



Смерчегенез в России



Иваново (1984) смерч (торнадо) в СССР (F4)

Ханты-

Мансийск (2012)

Один из самых

северных

смерчей

(широта 61°с.ш.)^{Один из самых}

Благовещенск (2013)

сильных смерчей

последнего

времени на

Дальнем Востоке.

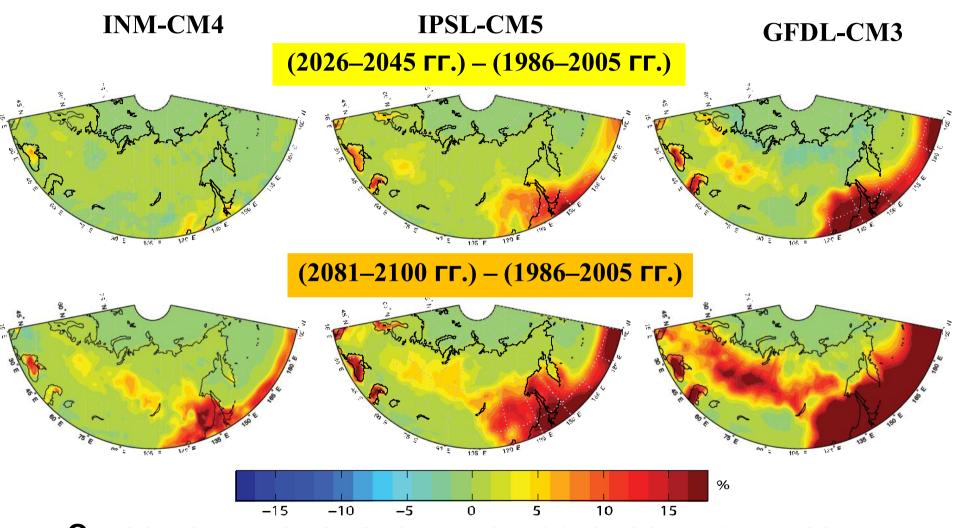


Янаул (2014) Самый разрушительный смерч России в 21 в. (EF3).

Курганский и др. (2013) Чернокульский и др. (2015)

Оценки риска смерчегенеза в 21 век

по расчетам с 3 моделями при сценарии антропогенных воздействий RCP 4.5



Относительные изменения повторяемости критических значений индекса, характеризующего риск смерчегенеза

(Чернокульский и др., 2017)

Новые климатические эффекты



Воронки на Ямале

Приходите на кафедру физики атмосферы и в Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Кафедра физики атмосферы

Можно задать интересующие вас вопросы и узнать больше об обучении и научной работе на кафедре и в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН:

Группа исследований климатических процессов

зав. кафедрой, ак. **Мохов Игорь Иванович** (ауд. 4-69); в.н.с., д.ф.-м.н., проф. РАН **Елисеев Алексей Викторович** (ауд. 5-54)

Группа динамики мезомасштабных процессов в атмосфере

в.н.с., д.ф.-м.н., Кожевников Валентин Николаевич (ауд. 5-56)

Группа радиометрии и радиолокации природных сред

доц., д.ф.-м.н. Илюшин Ярослав Александрович (ауд. 5-69)

Группа дистанционного зондирования и радиотомографии атмосферы и околоземного космического пространства

доц., к.ф.-м.н. **Андреева Елена Станиславовна** (ауд. **5-63**); с.н.с., к.ф.-м.н. **Падохин Артем Михайлович** (**башня "Ж"** крыши факультета)

Группа исследований динамики и турбулентности пограничного слоя атмосферы доц., к.ф.-м.н. **Юшков Владислав Пролетарьевич** (ауд. 5-57)

Группа исследований волновых процессов в атмосфере и ионосфере доцент, к.ф.-м.н. **Захаров Виктор Иванович** (ауд. 5-57 или спецпрактикум – **башня А** крыши факультета)

Группа исследований взаимодействий океана и атмосферы н.с., к.ф.-м.н. Бербенева Наталья Алексеевна (ауд. 5-56)

Можно посетить Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (Пыжевский пер, 3, метро Третьяковская, тел. (495) 951 55 65, www.ifaran.ru):

Научные станции

Звенигородская научная станция

Кисловодская высокогорная научная станция

Цимлянская научная станция

Лаборатория теории климата

зав. лаб. Мохов Игорь Иванович mokhov@ifaran.ru

Отлел исслелования климатических процессов

зав. отл.

Мохов Игорь Иванович mokhov@ifaran.ru

Лаборатория математической экологии

зав. лаб. Гинзбург Александр Самуилович gin@ifaran.ru

Лаборатория физики верхней атмосферы

зав. лаб. Семёнов Анатолий Иванович anasemenov@vandex.ru

Лаборатория моделирования атмосферного переноса

зав. лаб. Макоско Александр Аркадьевич aam@presidium.ras.ru

Отдел динамики атмосферы зав. отл.

Голицын Георгий Сергеевич gsg@ifaran.ru

Радиоакустическая лаборатория

зав. лаб. Куличков Сергей Николаевич snk@ifaran.ru

Лаборатория геофизической гидродинамики

зав. лаб. Чхетиани Отто Гурамович ochkheti@rssi.ru

Лаборатория взаимодействия атмосферы и океана

зав. лаб. Репина Ирина Анатольевна repina@ifaran.ru

Лаборатория турбулентности и распространения волн

зав. лаб. Горбунов Михаил Евгеньевич gorbunov@ifaran.ru

Лаборатория атмосферной спектроскопии

зав. лаб. Гречко Евгений Иванович

grechko@ifaran.ru

Лаборатория газовых примесей атмосферы

зав. лаб. Скороход Андрей Иванович skorokhod@ifaran.ru

Лаборатория оптики и микрофизики аэрозоля

зав. лаб. Горчаков Геннадий Ильич gengor@ifaran.ru

Сектор дистанционного исследования состава атмосферы

зав. лаб. Постыляков Олег Вадимович oleg-postylyakov@yandex.ru

Отдел исследования состава атмосферы

зав. отд.

Еланский Николай Филиппович elansky@ifaran.ru

Основы геофизики



2019 Лекция №13

Носов Михаил Александрович

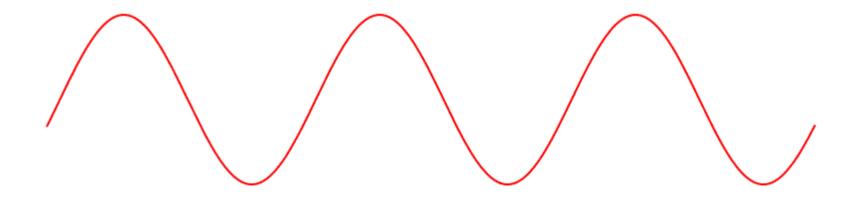
отделение геофизики, физический факультет МГУ

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

Волновые движения в океане и атмосфере

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

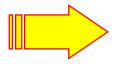
[Физическая энциклопедия]



типы волн

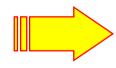
(классификация по типу возвращающей силы)

сила тяжести



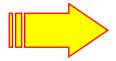
гравитационные поверхностные и внутренние

сила поверхностного натяжения



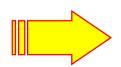
капиллярные

сила упругости



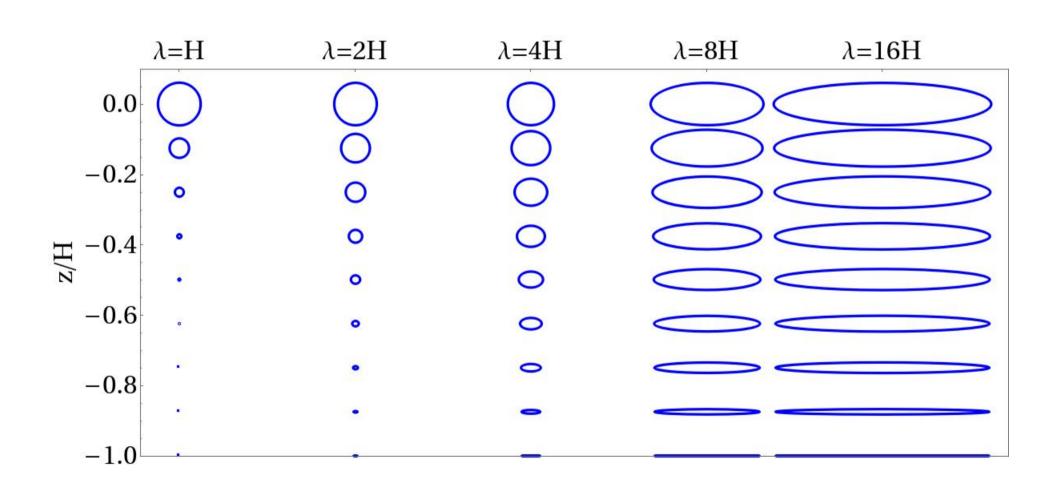
(гидро)акустические

сила Кориолиса

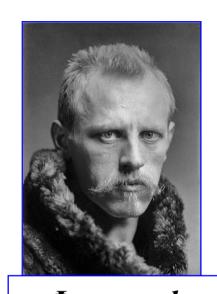


гироскопические (инерционные)

Траектории частиц в поверхностных волнах малой амплитуды



Эффект «мертвой воды»



Фритьоф
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")



Эффект «мертвой воды»

см. анимацию

Основной механизм генерации внутренних волн в океане (лабораторная модель)

см. анимацию

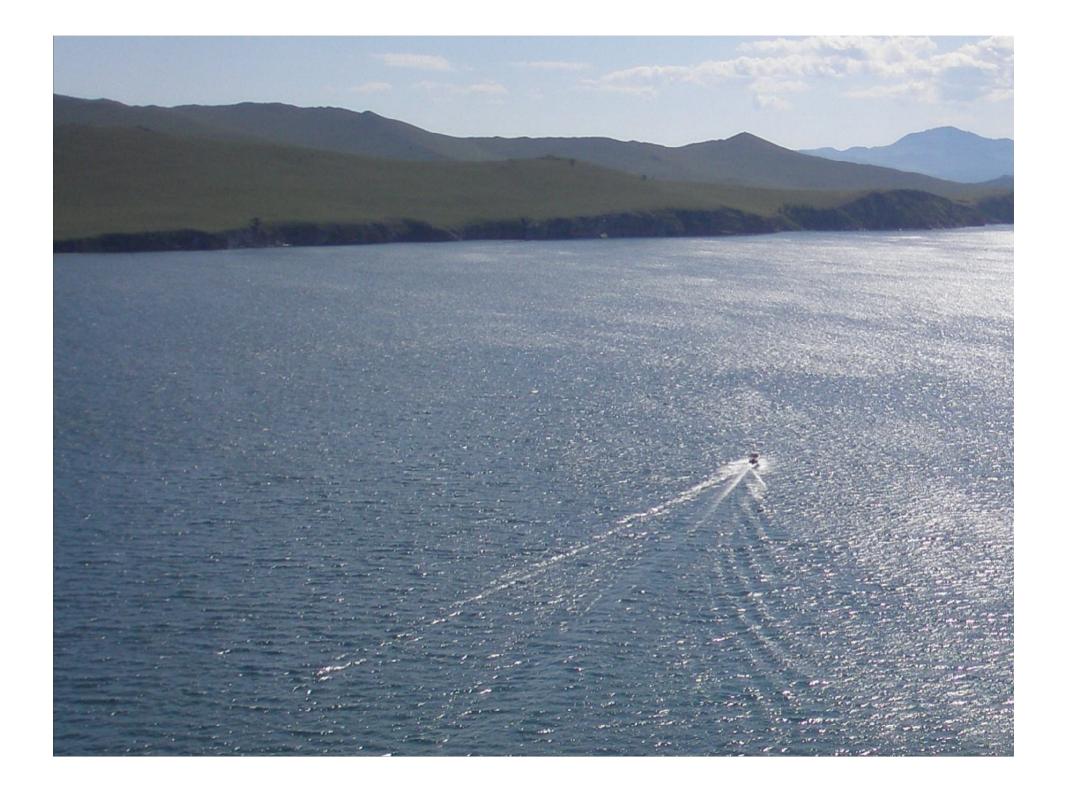
типы волн в океане

(классификация по причине возникновения)

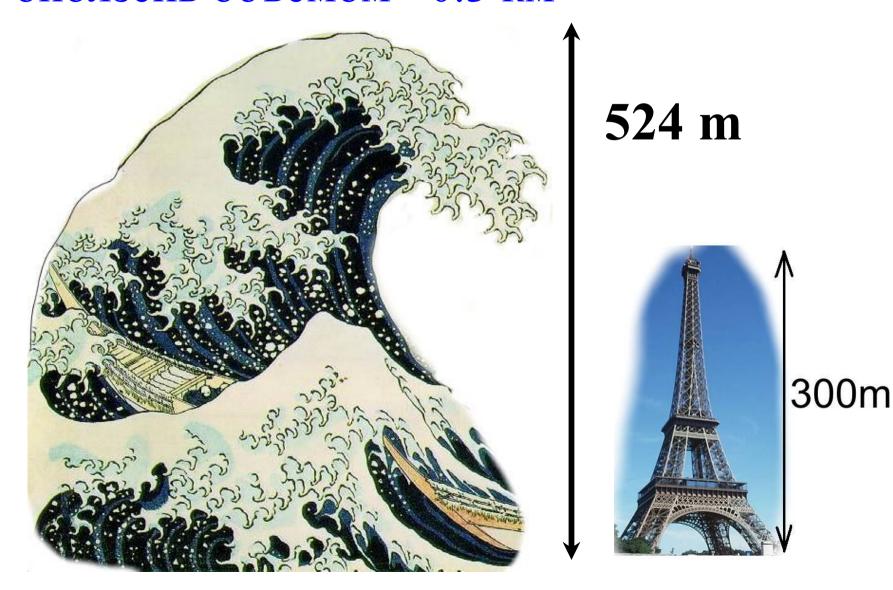
- ветровые
- приливные
- анемобарические
- сейсмические (цунами)
- оползневые (цунами)
- штормовые нагоны
- корабельные

•

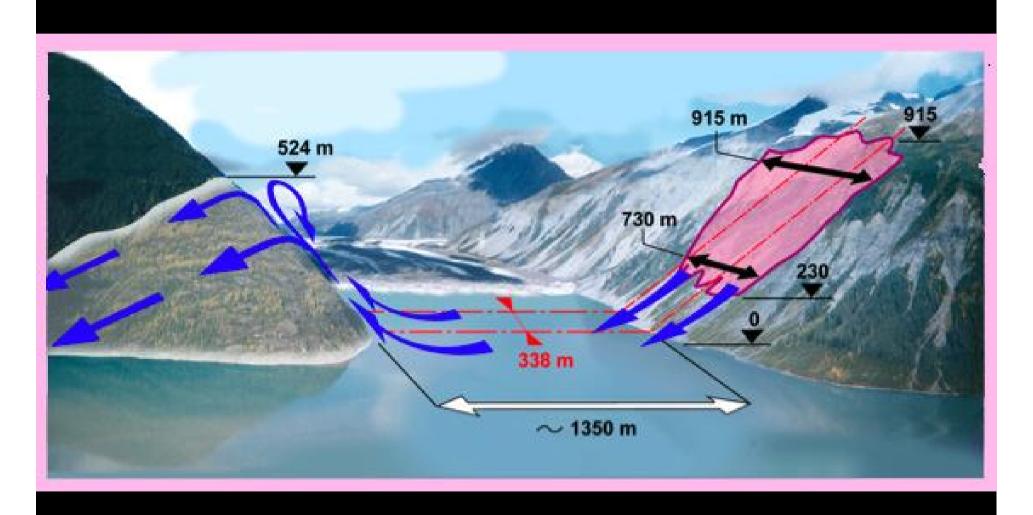




Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г оползень объемом ~0.3 км³



Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г оползень объемом ~0.3 км³





типы волн в океане

(названия волновых явлений)

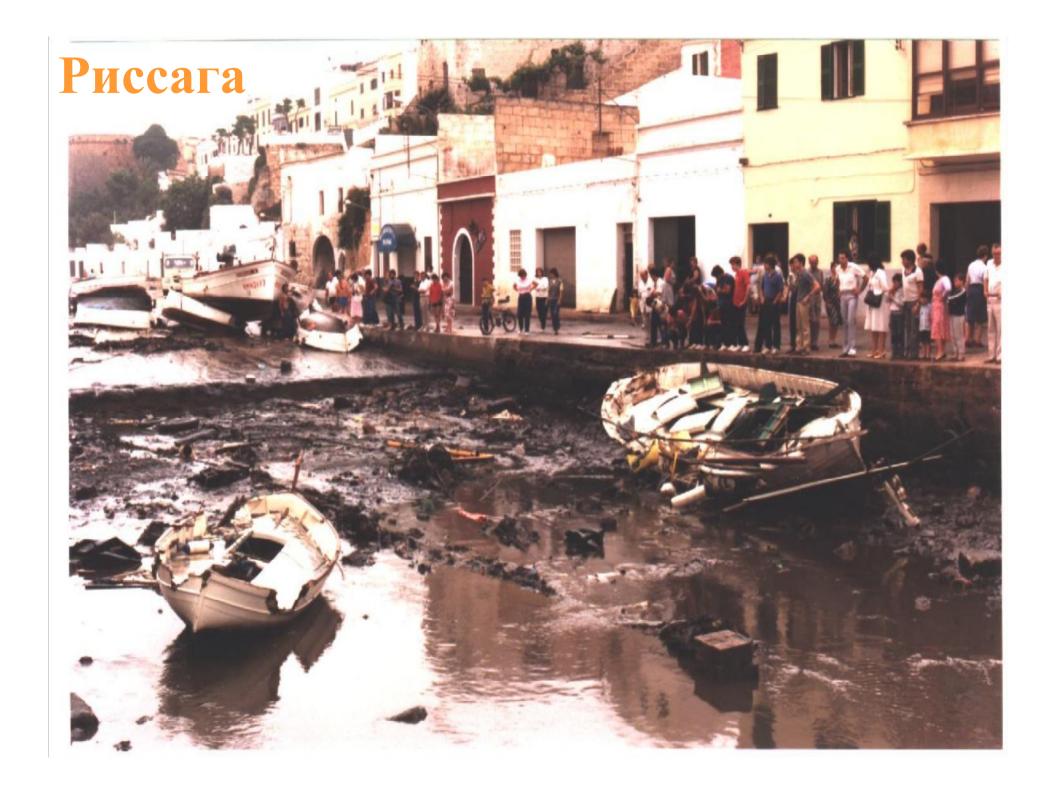
- Поророка (Амазонка)
- Риссага (о.Менорка)
- Абики (о.Кюсю)
- сейши
- "волны-убийцы"
- солитоны
- захваченные волны
- зыбь
- бор

•



Поророка (рогогоса)











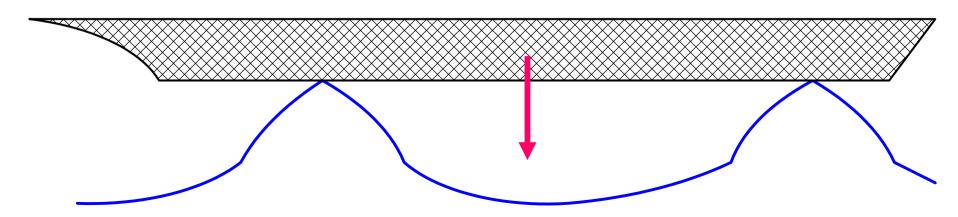




«Волны-убийцы»
Последовательные кадры
(с интервалом 2 сек)
подхода волны к берегу;
ее высота достигла 25 м
(Ванкувер, Канада)



"World Gloria"



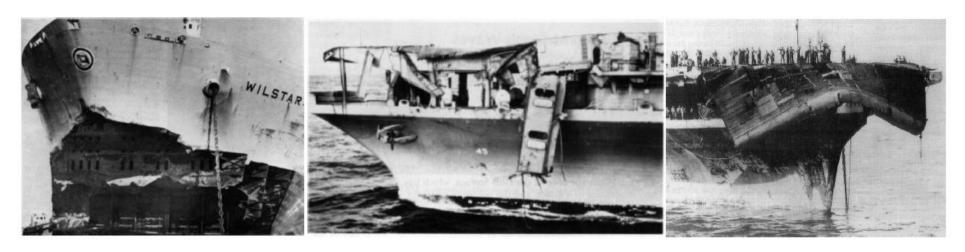
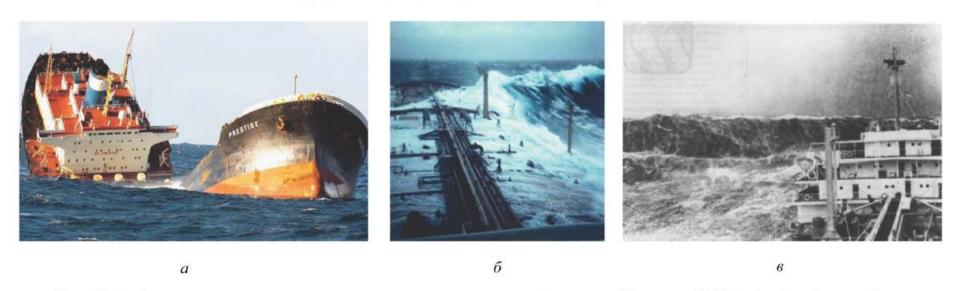


Рис. 1. Фотографии повреждений, вызванных экстремальными волнами



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

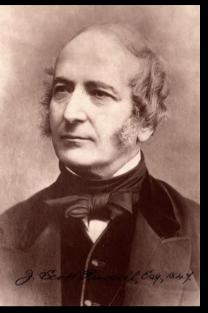
[Слюняев, 2017]

Солитон



Открытие солитона (1834 г.)





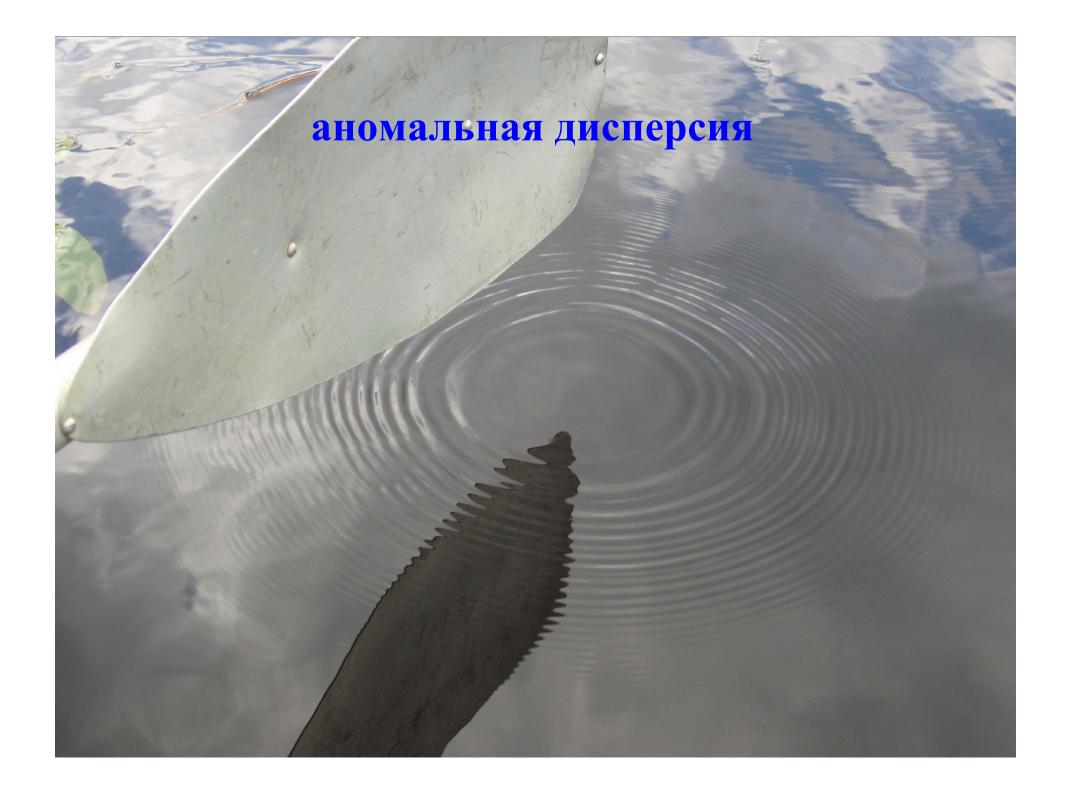
Джон Скотт Рассел (1808-1882)

Фазовая дисперсия (нормальная)

см. анимацию

Фазовая дисперсия (аномальная)

см. анимацию

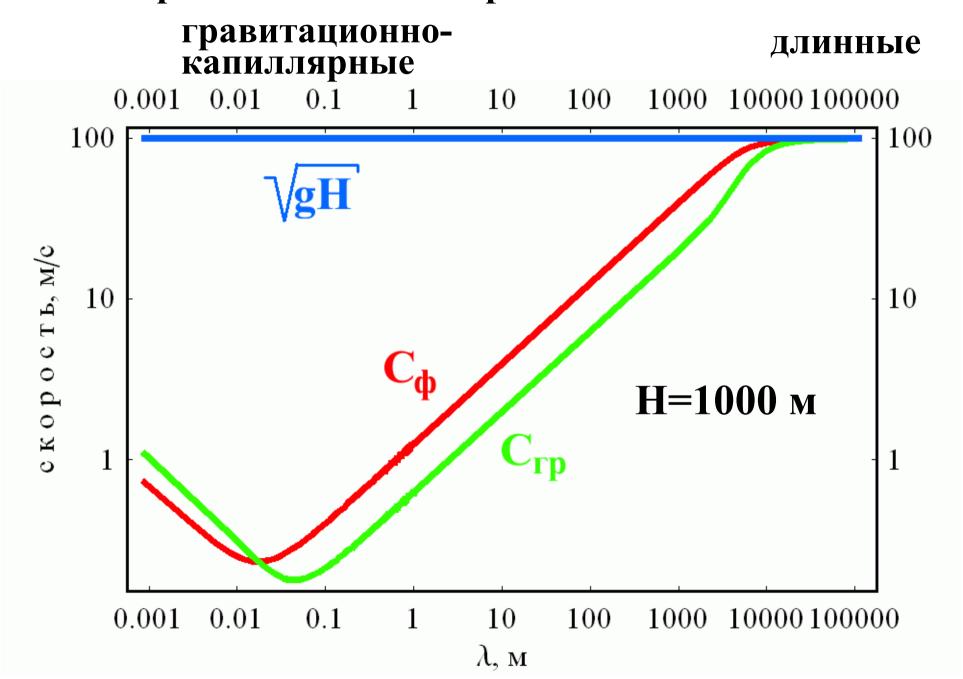


нормальная дисперсия

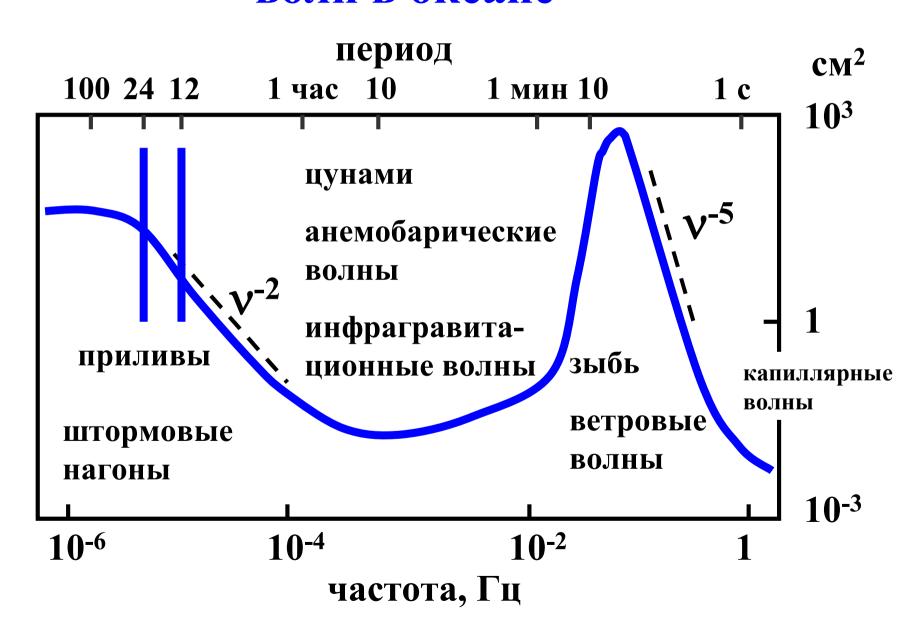


капиллярные

гравитационные



Спектр гравитационных поверхностных волн в океане



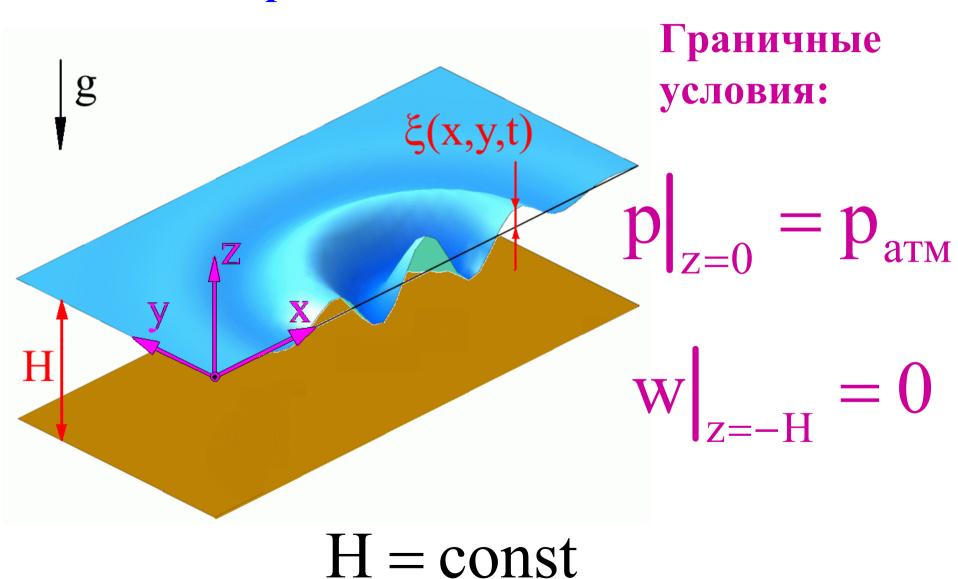
Математическое описание волновых движений

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{v}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] \\ + v\Delta \vec{v} + (\vec{g} + \frac{v}{3}) \vec{\nabla} \operatorname{div} \vec{v} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0 \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \end{cases}$$
 Гравитационные волны
$$\vec{v} \equiv (u, v, w)$$

Постановка задачи о поверхностных гравитационных волнах



Линейная теория длинных гравитационных волн

ИЛИ

теория "мелкой воды"

$$(\lambda >> H)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}} + \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \mathbf{z}} = 0 \implies |\mathbf{w}| \sim \frac{H}{\lambda} |\mathbf{u}_{\text{гориз.}}|$$

$$\frac{\partial \mathbf{w}'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}} - \mathbf{g}$$

приближение

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

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \\ \frac{\partial z}{\partial z} = -\rho g \end{cases}$$

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

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

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \Rightarrow \frac{\partial v}{\partial t} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

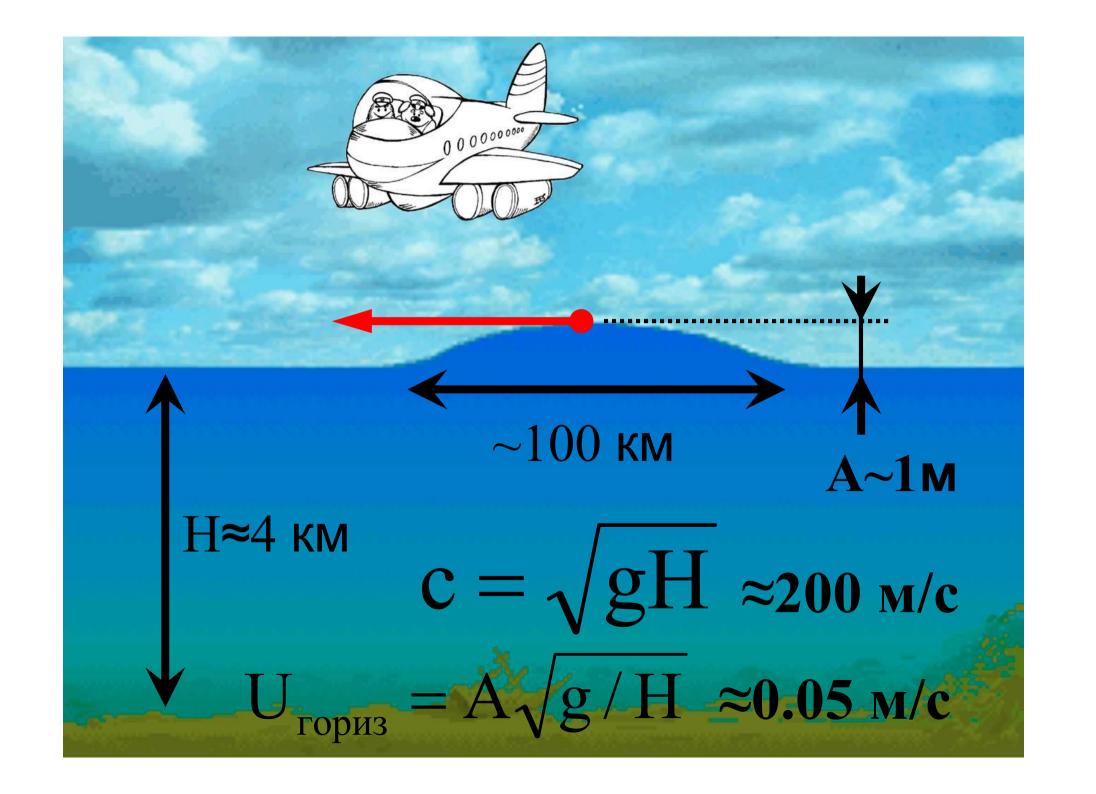
Волновое уравнение для описания длинных гравитационных волн

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

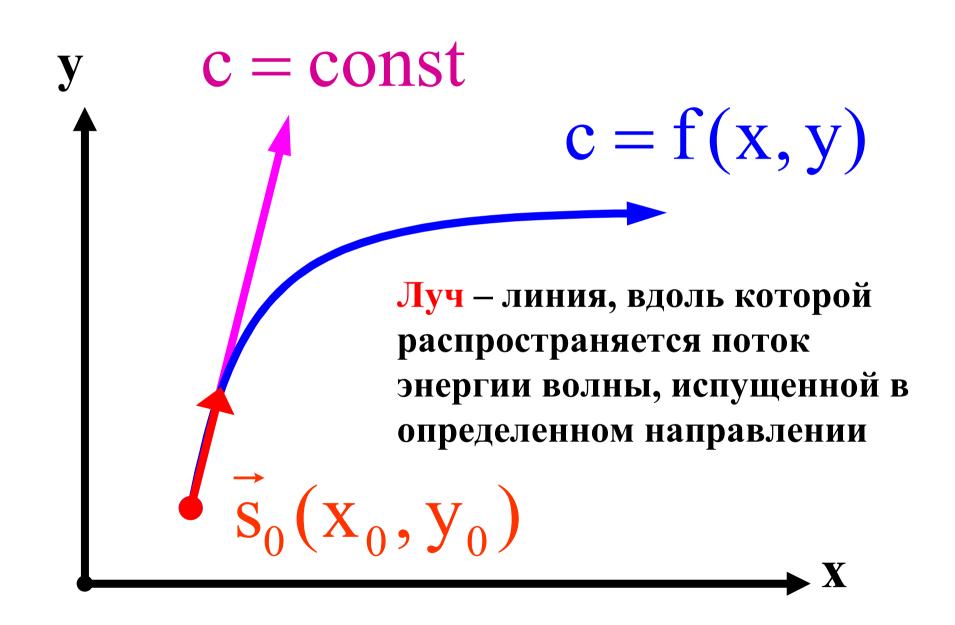
$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \Delta \xi$$
Скорость

 $c = \sqrt{gH}$

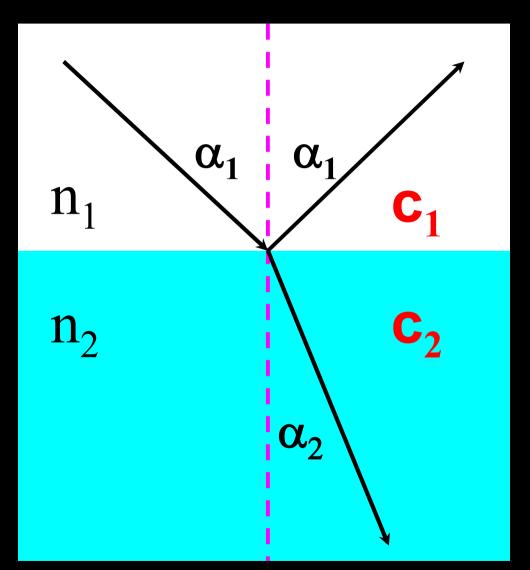
скорость длинных волн



Приближение «геометрической оптики»



Закон Снеллиуса

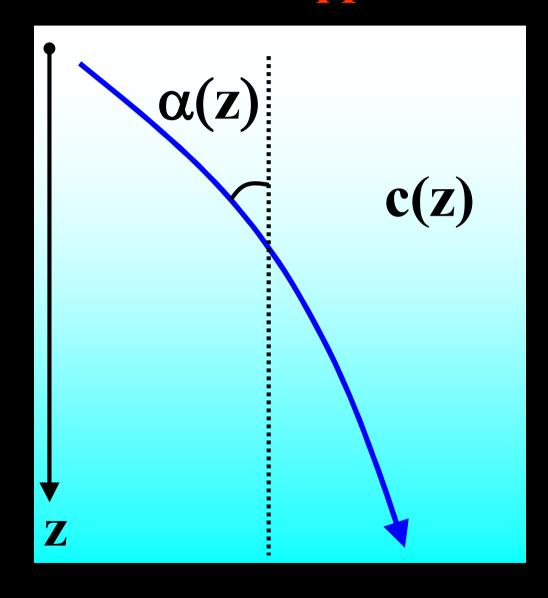


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{c}_0 / \mathbf{c}$$

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

Рефракция

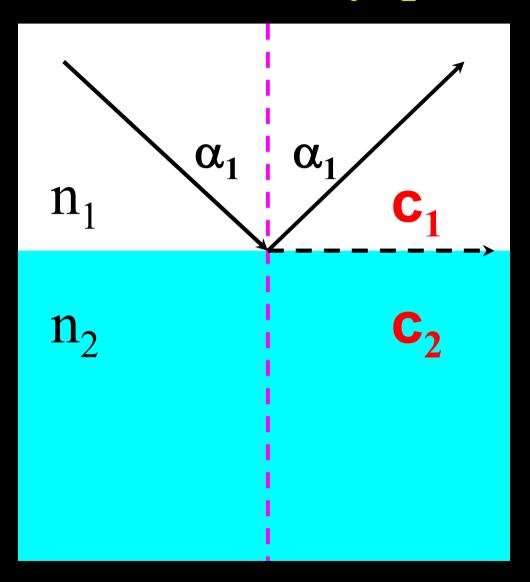


$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

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

Рефракция — изменение направления волновых лучей в среде с (плавно) изменяющейся в пространстве скоростью

Полное внутреннее отражение



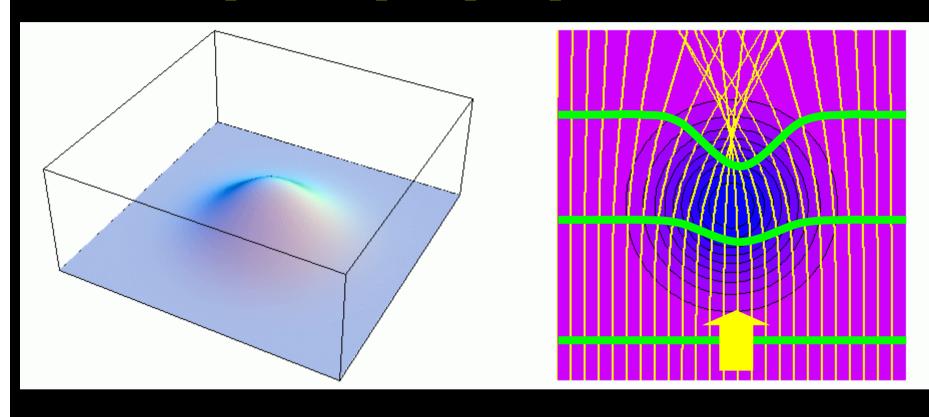
$$n_2 < n_1$$

$$\mathbf{c}_2 > \mathbf{c}_1$$

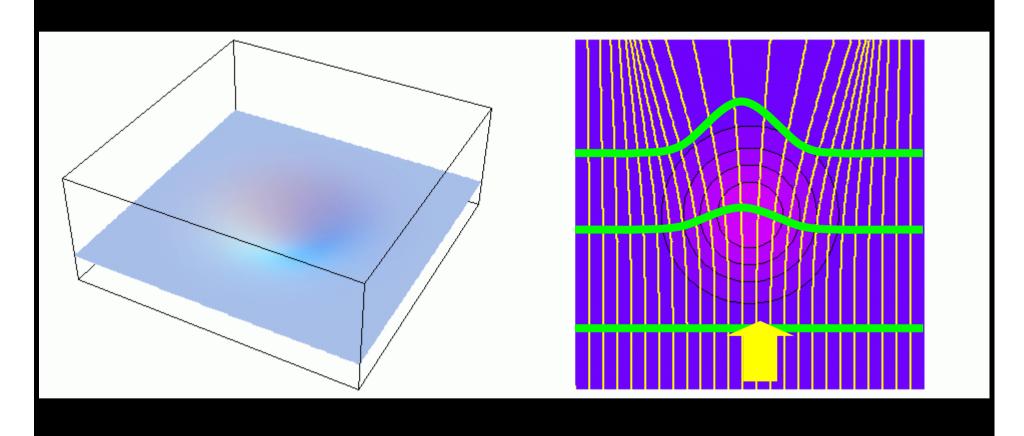
Полное внутреннее отражение



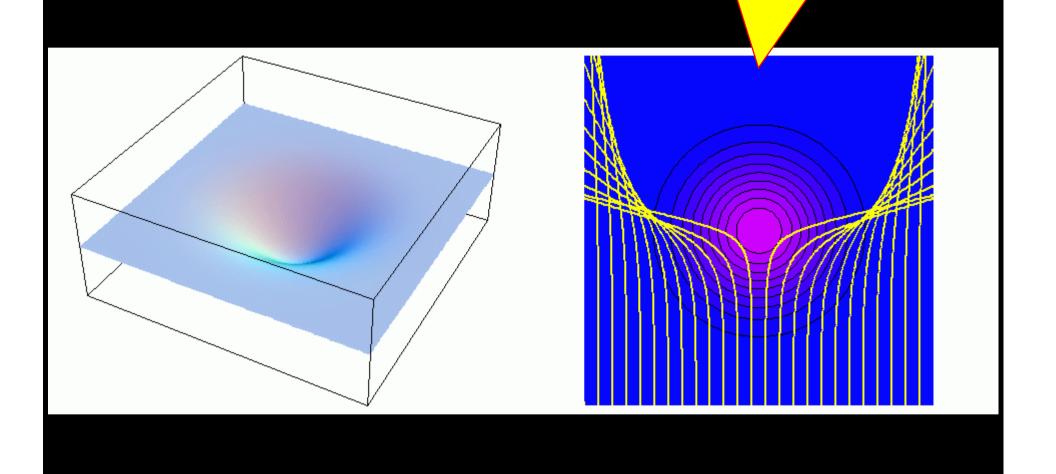
Фокусировка лучей областью с пониженной скоростью распространения волн



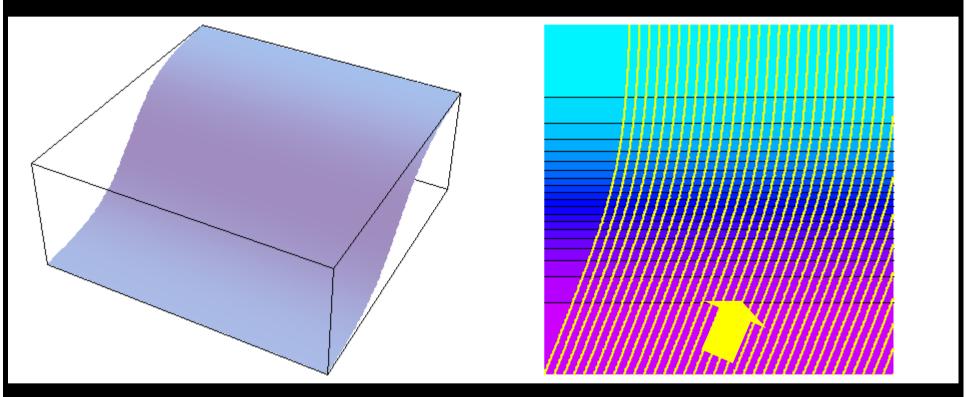
Дефокусировка лучей областью с повышенной скоростью распространения волн







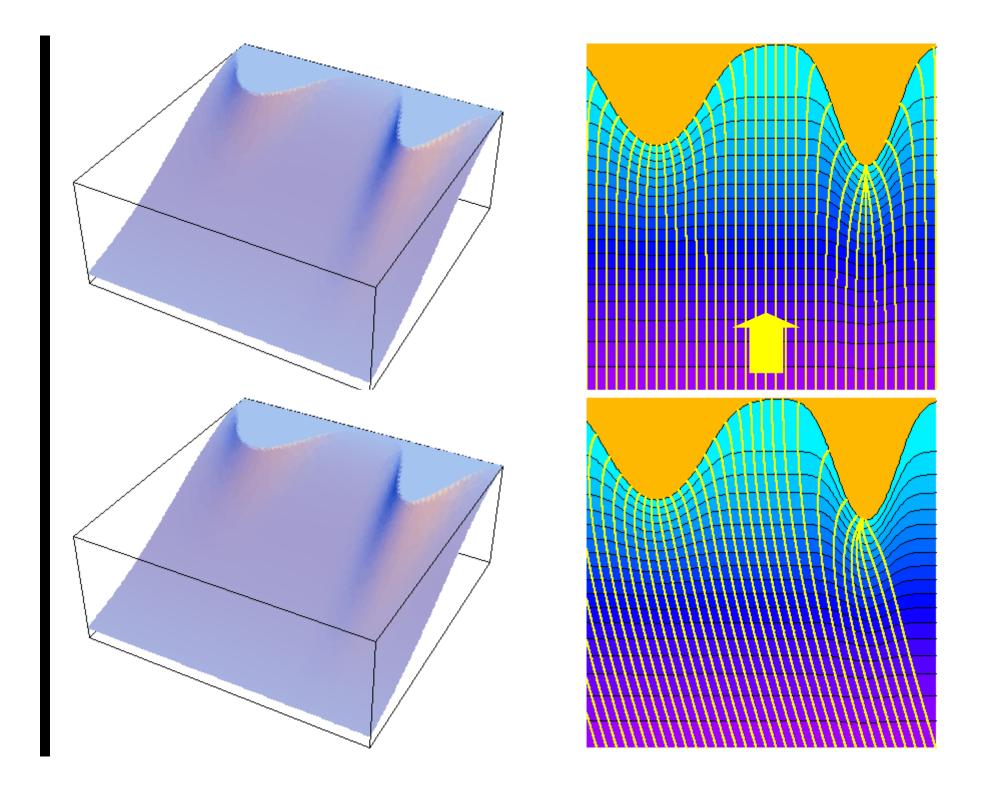
Рефракция гравитационных волн в прибрежной зоне



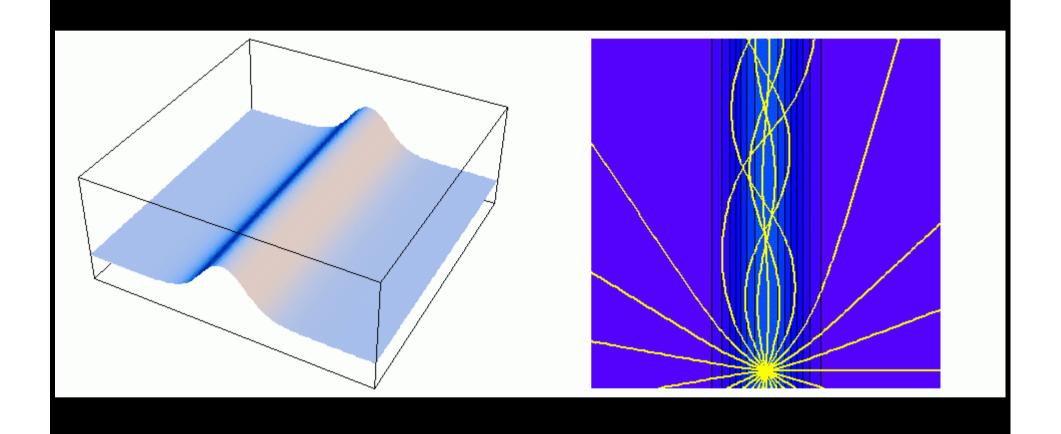
Волновые лучи подходят к побережью по нормали

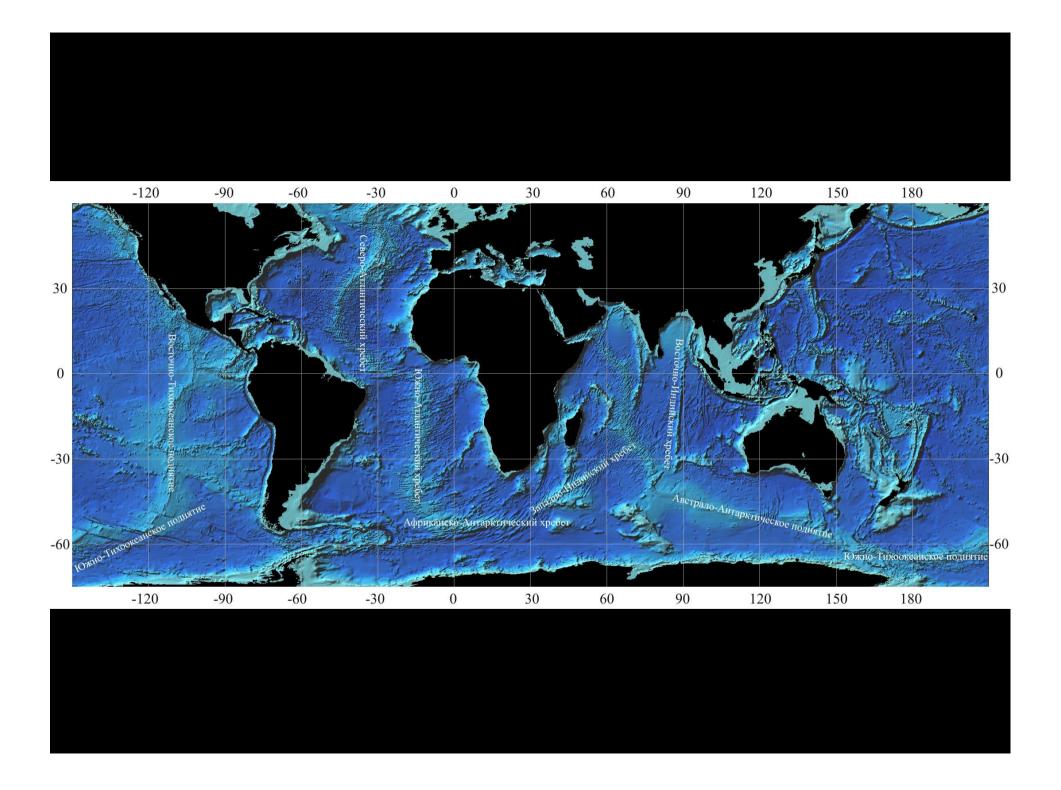
Концентрация волновой энергии на мысах и защищенность бухт





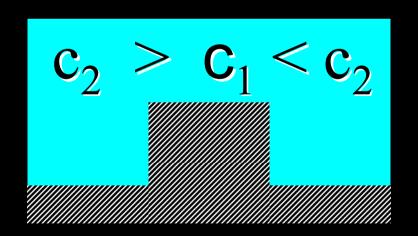
Захват волн подводными хребтами

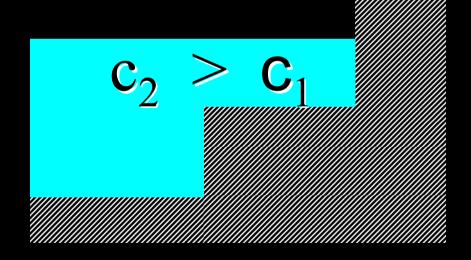


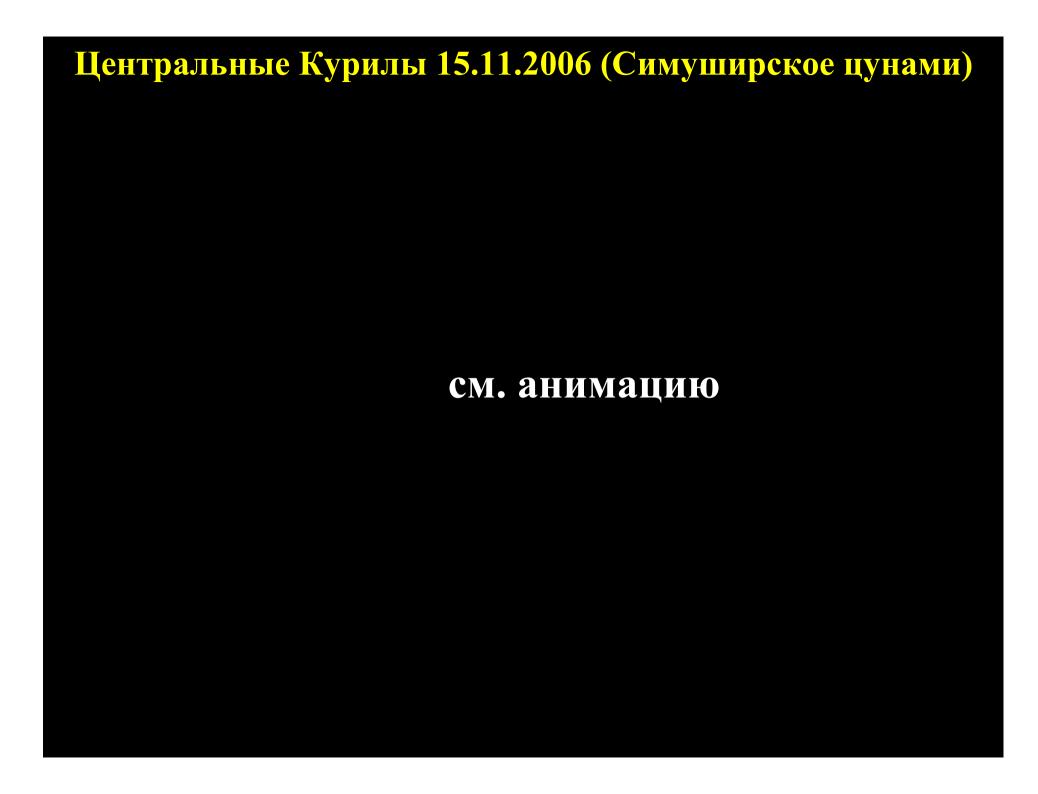


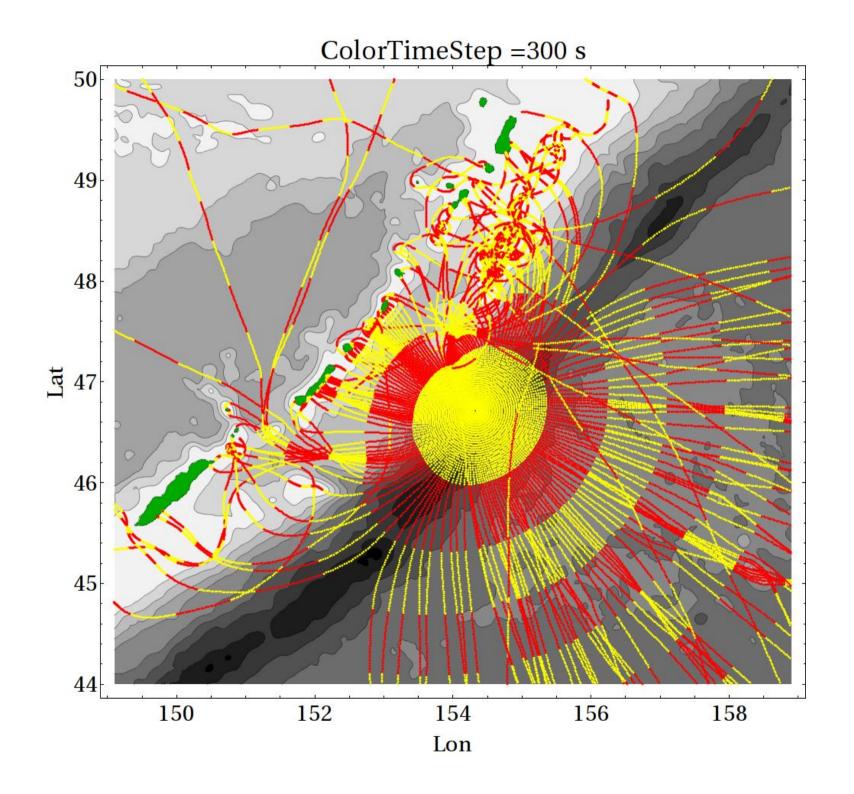
Захваченные волны

подводный хребет материковый склон и берег





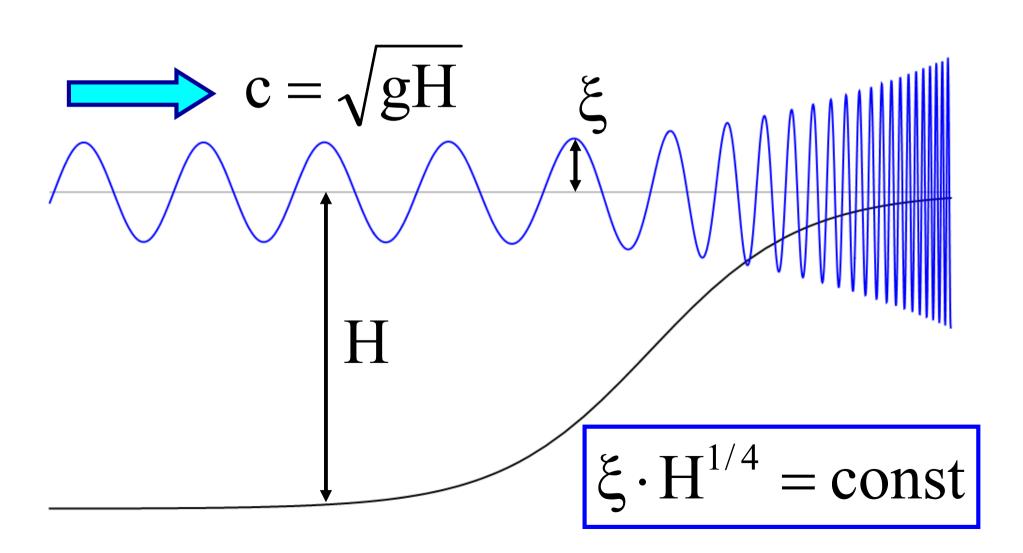




Закон Грина (закон "1/4")

$$W \sim \xi^2$$

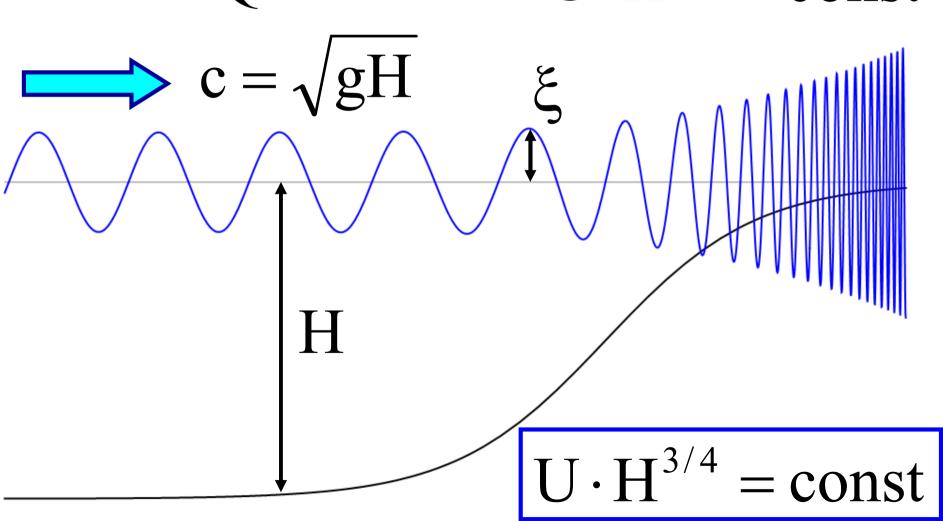
$$W \sim \xi^2$$
 $Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{H} = const$



Закон для скорости течения (закон «3/4")



$$Q \sim U^2 Hc \sim U^2 H^{3/2} = const$$



Основы геофизики



2019 Лекция №14

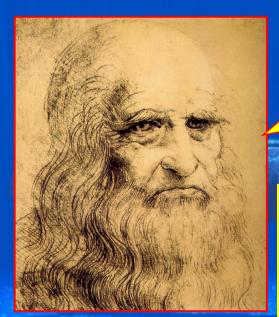
Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

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

Акустические

ВОЛНЫ



Леонардо да Винчи 1452- 1519

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





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

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} & \text{ Гравитационные волны} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 & \text{Акустические волны} \end{cases}$$

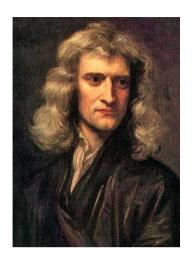
$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} \\ \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\frac{\vec{\nabla}p'}{\rho_0} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho \vec{v} = 0 \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 div \vec{v}' = 0 \end{cases}$$

$$\vec{v}' - \text{малая} \qquad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}' \qquad \vec{v}_0 = 0$$

$$\vec{\nabla}p_0 = \vec{g} \qquad p = p_0 + p' \qquad |p'| << p_0$$

$$\rho_0 + \rho' \qquad |\rho'| << \rho_0$$



Sir Isaac Newton

$$\rho' = \begin{pmatrix} \partial \rho \\ \partial p \end{pmatrix}_{T} p'$$

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{T} = \frac{1}{c_{N}^{2}}$$

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

$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{s} p'$$

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



Pierre-Simon Laplace

$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{s} p' \quad \begin{cases} \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{v}')}{\partial t} = -\frac{\Delta p'}{\rho_{0}} \\ \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{c^{2}} \left\{\frac{1}{c^{2}} \frac{\partial^{2} p'}{\partial t^{2}} + \rho_{0} \frac{\partial \operatorname{div}(\vec{v}')}{\partial t} = 0\right\}$$

Волновое уравнение

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

Волновое уравнение (акустика)

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

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right) \approx \frac{340 \text{ м/c}}{8000 \text{ м/c}}$$
 вода
$$\approx 1500 \text{ м/c}$$
 Скорость звука

Скорость звука в воде

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

ЭМПИРИЧЕСКАЯ Зависимость

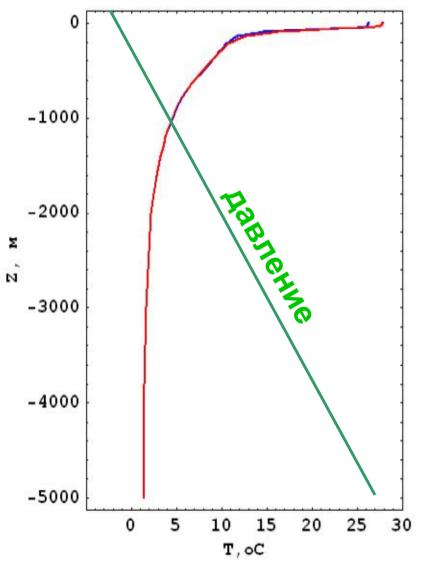
TEOS-10 www.teos-10.org

$$1480 < c < 1545 \text{ m/c}$$

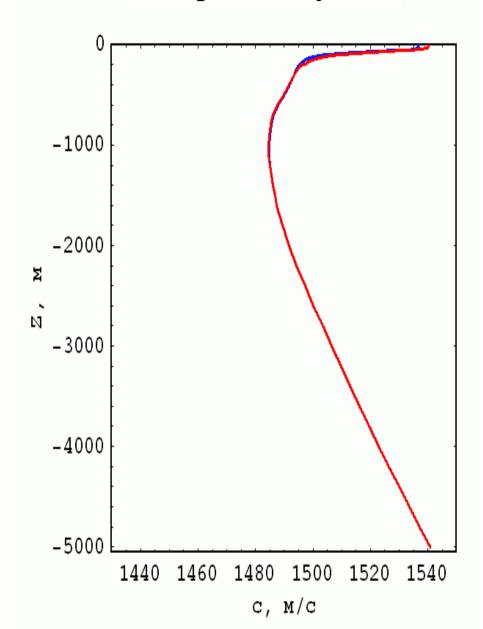
$$\frac{\partial c}{\partial T} > 0 \qquad \frac{\partial c}{\partial p} > 0$$

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

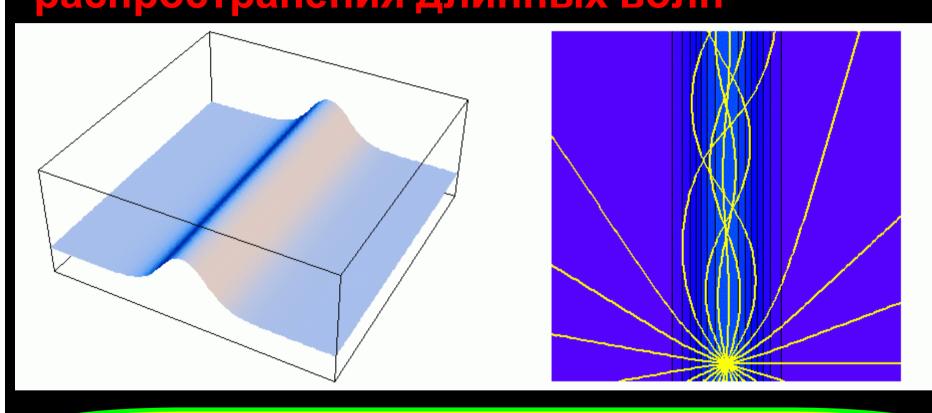




Скорость звука



Захват волн подводными хребтами т.е. областями с пониженной скоростью распространения длинных волн



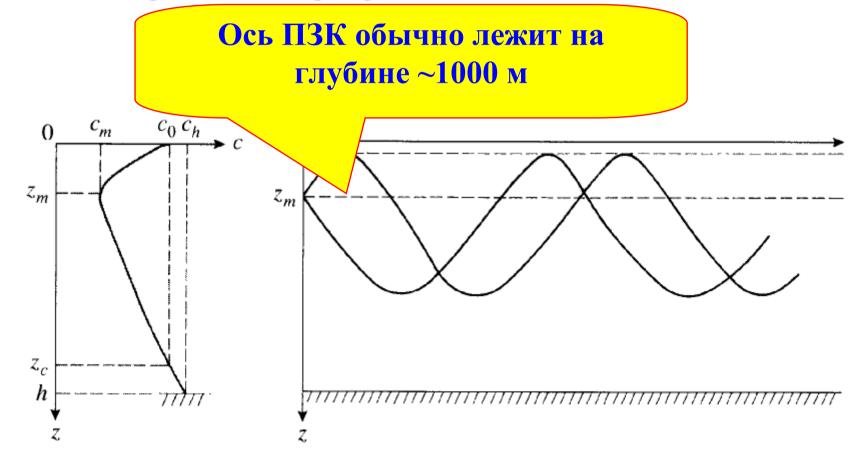
Область с пониженной скоростью звука может захватывать звуковые волны!

Подводный звуковой канал (ПЗК)

Deep Sound Channel

SOFAR Channel

(Sound Fixing and Ranging)

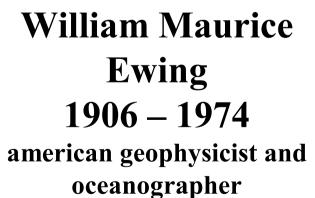


Подводный звуковой канал (ПЗК)



обнаружен и описан в 1940-е годы двумя исследователями

(независимо)





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)

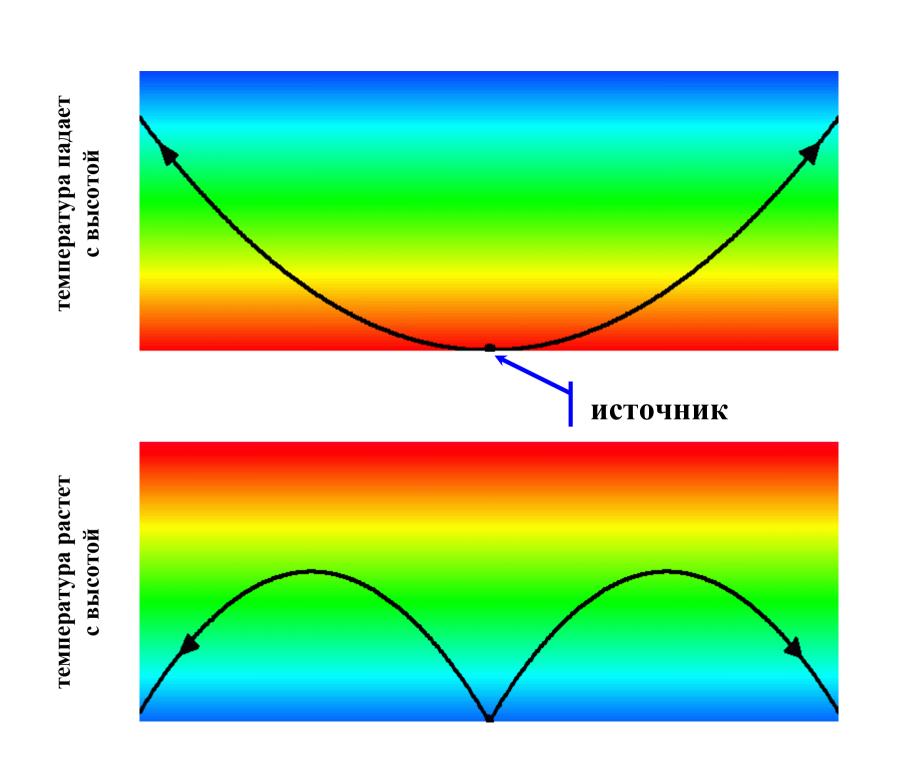
•

Скорость звука в воздухе

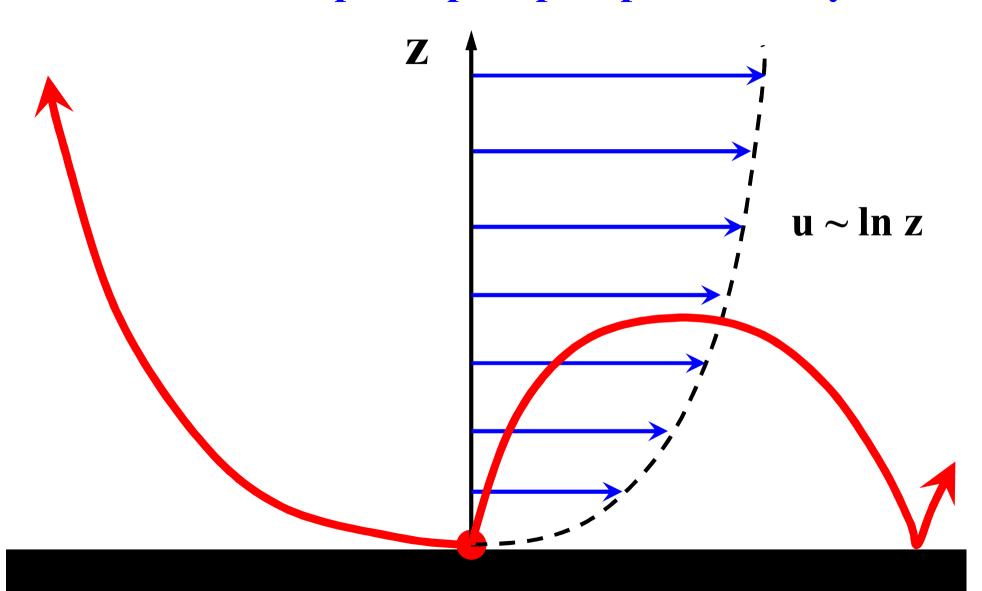
$$c \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{s}} = \sqrt{\frac{C_{p} R T}{C_{v} \mu}} \approx 340 \text{ m/c}$$

В атмосфере (гомосфере) скорость звука определяется только температурой

скорость звука не зависит от давления



Влияние ветра на распространение звука





Оптические явления в атмосфере вызываются

преломлением (рефракцией)

- □ миражи, фатаморгана
- 🔲 мерцания
- □ смещение положения небесных тел
- □ искажение формы небесных тел

поглощением и рассеянием

- 🔲 зеленый луч
- □ голубой цвет неба
- **□** явления сумерек

ядрами конденсации

- радуга, белаярадуга
- □ гало
- □ ложные солнца и ложные луны
- **с**ветовые столбы

Оптические явления в океане вызываются

преломлением (рефракцией)

поглощением и рассеянием

конМенсалия <u>амбаямия</u>

□ цвет океанов, морей и вод суши

Явления, вызываемые преломлением в воздухе

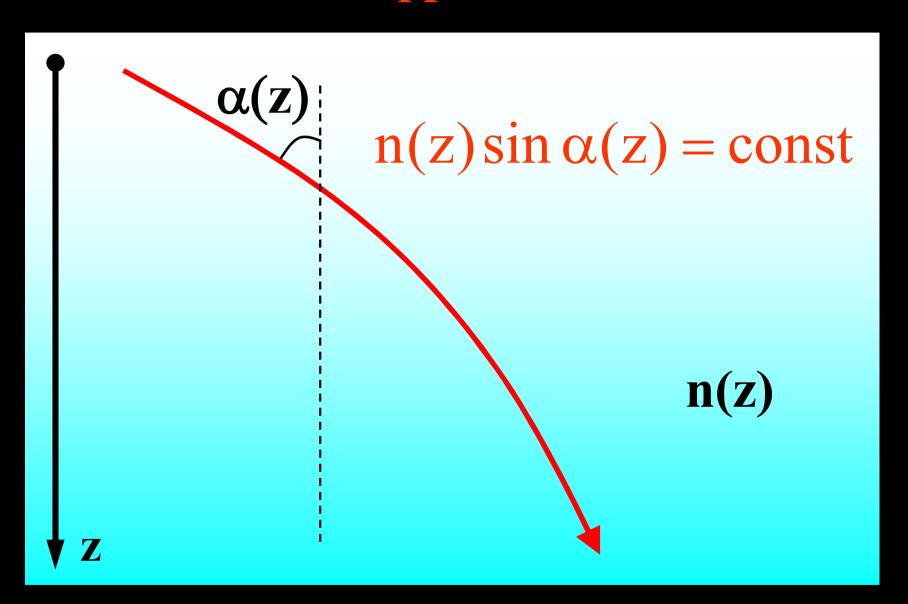
$$c_0
eq f(\lambda)$$
 скорость света в вакууме $c = c_0 / n = f(\lambda)$ скорость света в среде

Показатель преломления

Воздух 1.00029

Вода 1.33

Рефракция



Изменение показателя преломления воздуха с высотой

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \frac{1}{\rho} = r^2$$

 Формула Лоренц- Лорентца

$$n = 1 + \Delta n$$
, $\Delta n \ll 1$

$$\frac{\Delta n}{--} = const$$

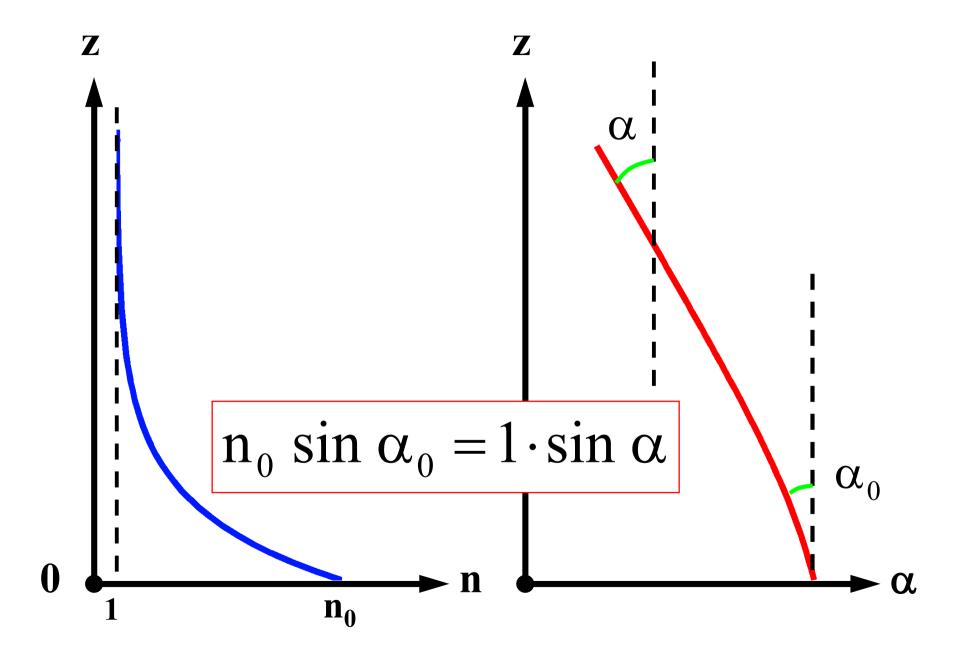
$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H}$$

ρ

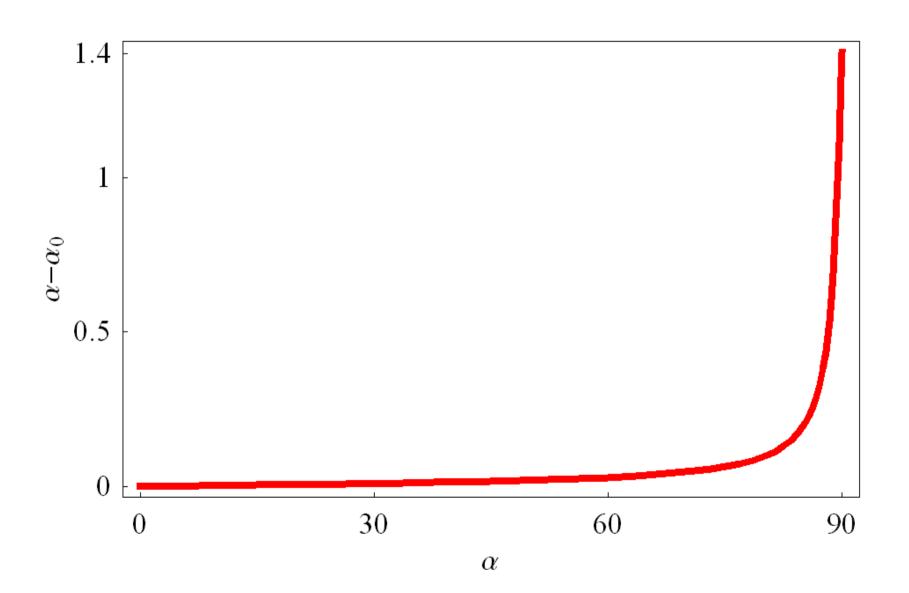
«Барометрическая формула» для показателя преломления

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

Рефракция света в атмосфере

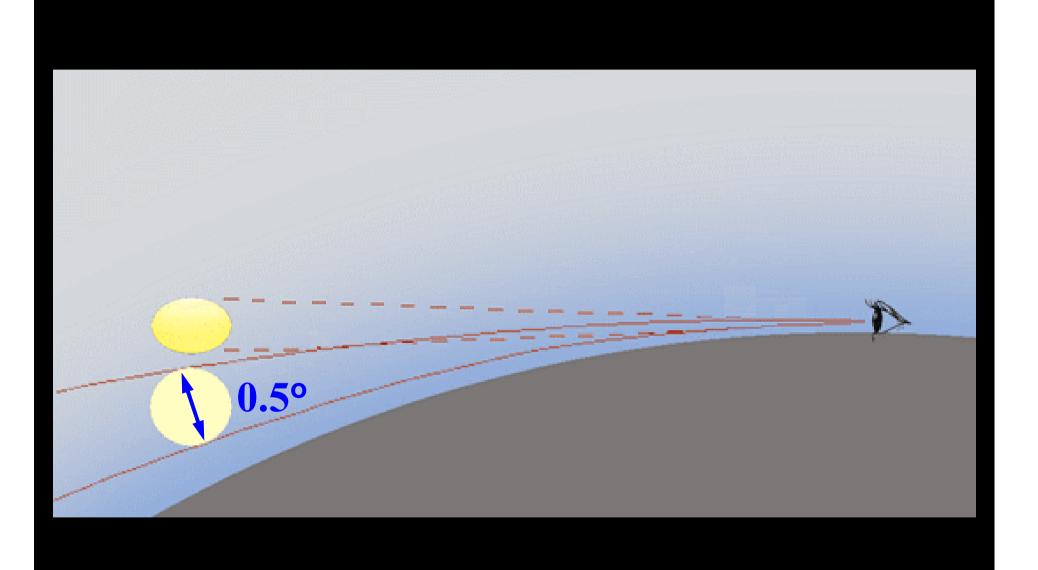


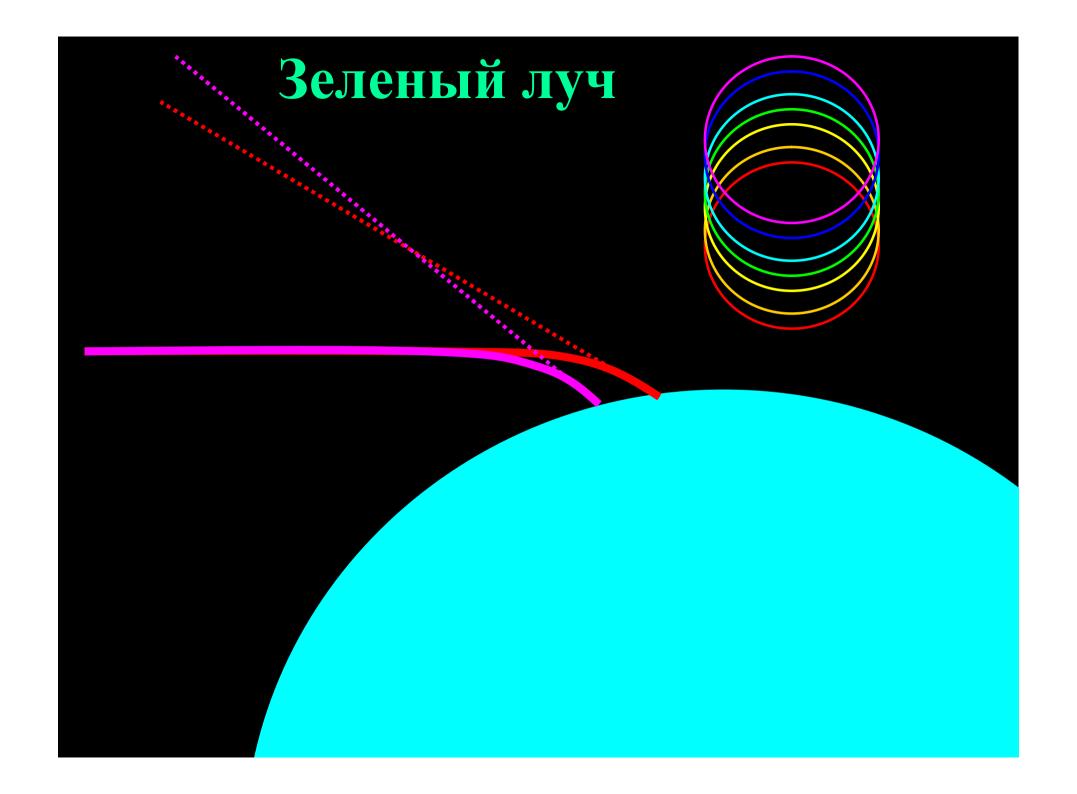
Отклонение светового луча в атмосфере как функция угла падения



Искажение формы небесных тел







Зеленый луч

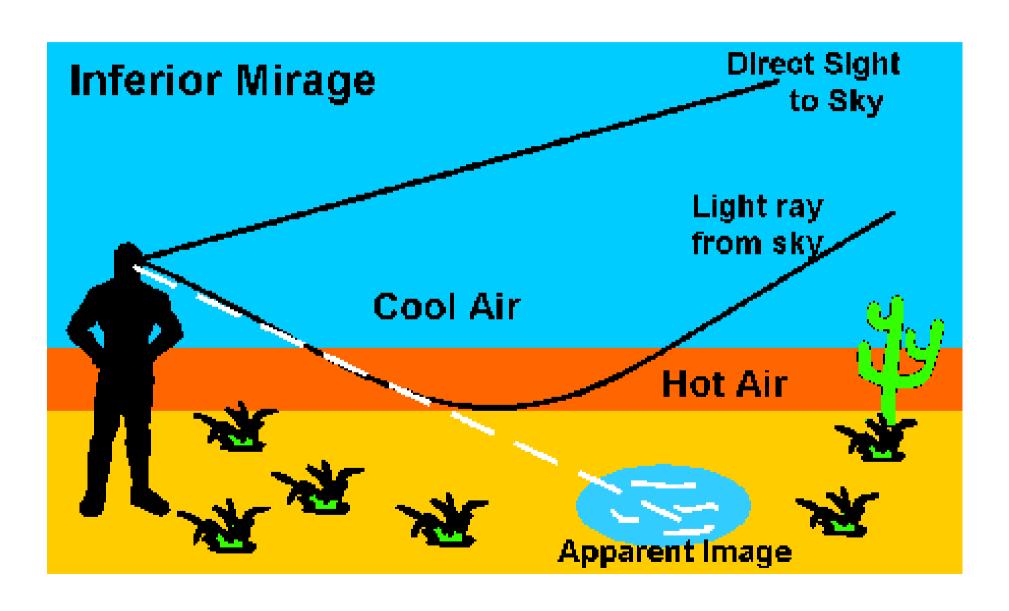


Миражи – оптическое явление в атмосфере, состоящее в том, что вместе с отдалённым предметом (или участком неба) видно его мнимое изображение, смещенное относительно предмета

Причина образования — ПВО света на границах, разделяющих слои воздуха с различной температурой

- ***в зависимости от расположения по отношению к предмету различают верхний, нижний и боковой миражи
- ***мираж всегда виден в той области, где выше температура воздуха

Мираж (нижний)



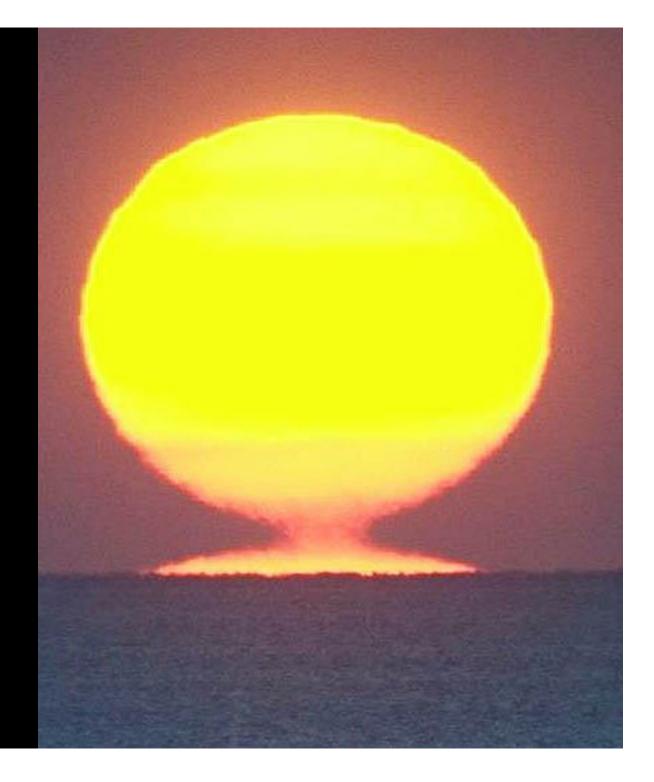




Etruscan Vase Sunset

The mirage is produced by light refracted by a low lying warm air layer.

by Michael Myers at Cape Hatteras, North Carolina.



Явления, вызываемые поглощением и рассеянием

Закон Бугера (1729 г.)

$$dI = -\sigma I dx$$

показатель ослабления

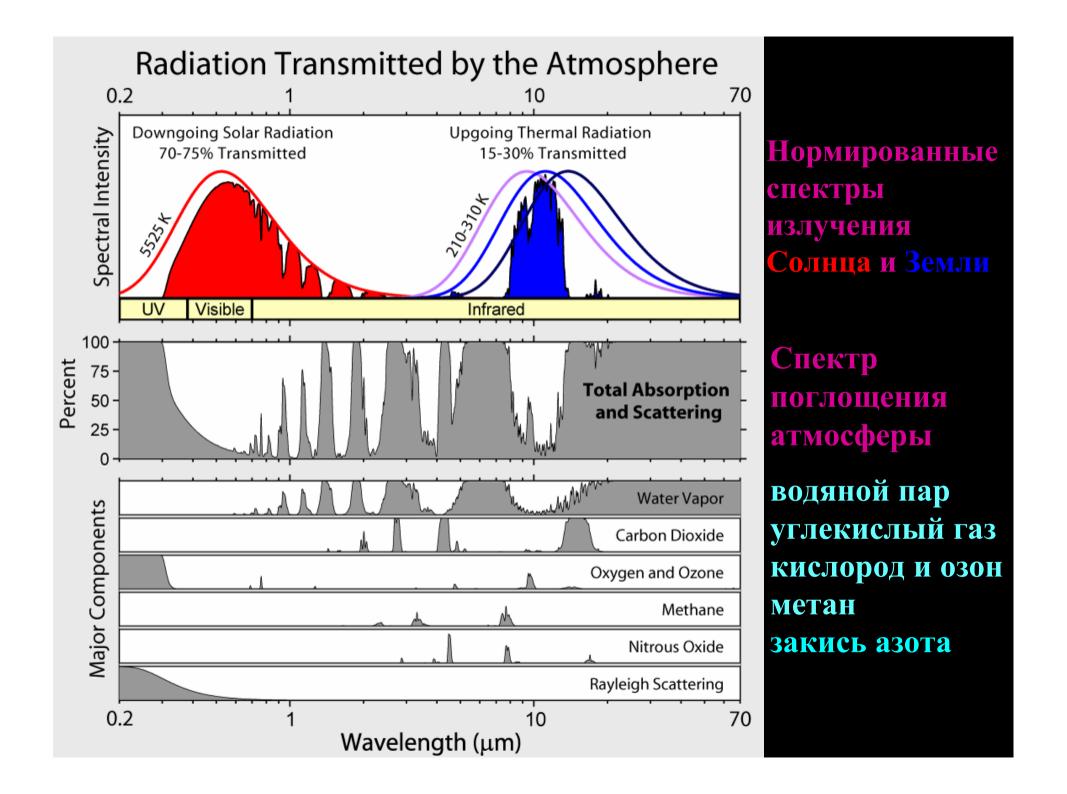
$$I(x) = I_0 e^{-\sigma \cdot x}$$

В атмосфере и в океане

$$\alpha = \alpha(y)$$



Pierre Bouguer
1698-1758
French
mathematician,
geophysicist,
geodesist, and
astronomer

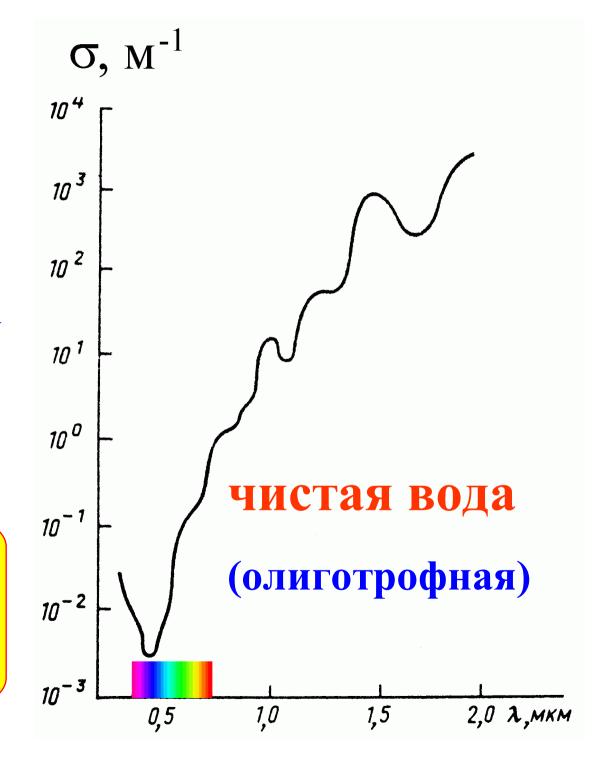


Коэффициент ослабления для морской воды

$$I(x) = I_0 e^{-\sigma x}$$

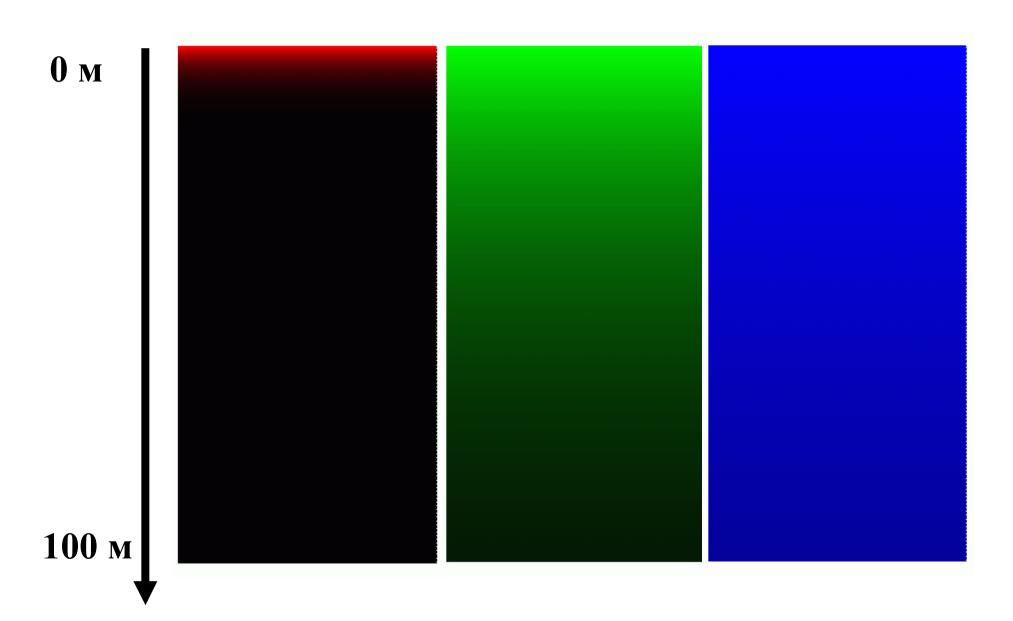
$$\sigma = \sigma(\lambda)$$

наличие желтого вещества меняет вид зависимости

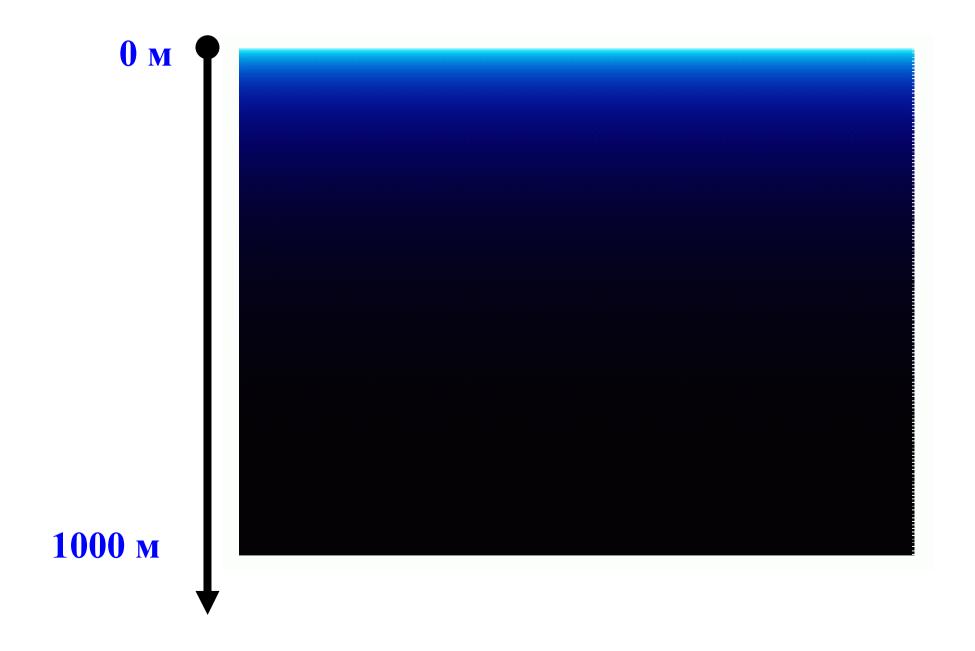


Ослабление света с глубиной в чистой воде

$$\sigma = 0.27 \text{ m}^{-1}$$
 $\sigma = 0.023 \text{ m}^{-1}$ $\sigma = 0.005 \text{ m}^{-1}$



Ослабление света с глубиной в чистой воде



Ослабление электромагнитного излучения есть следствие факторов:

- 1. Поглощения (переход энергии в тепло)
- 2. Рассеяния («переизлучения»)



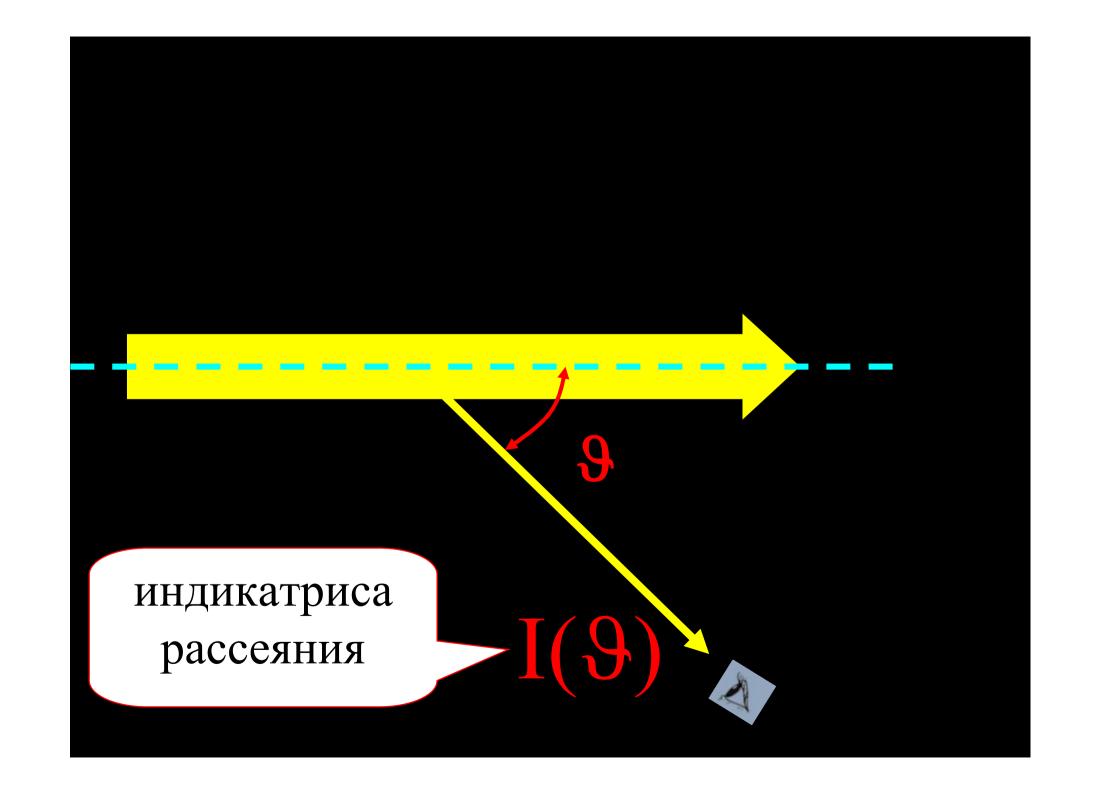
крупные частицы (неоднородности)

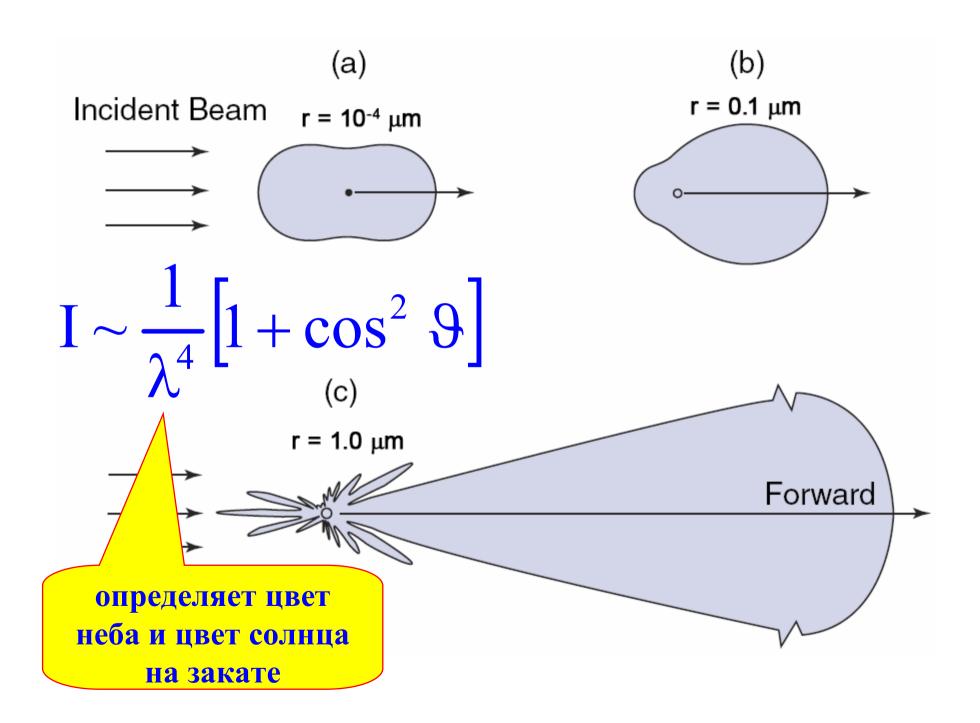
$$D>>\lambda$$

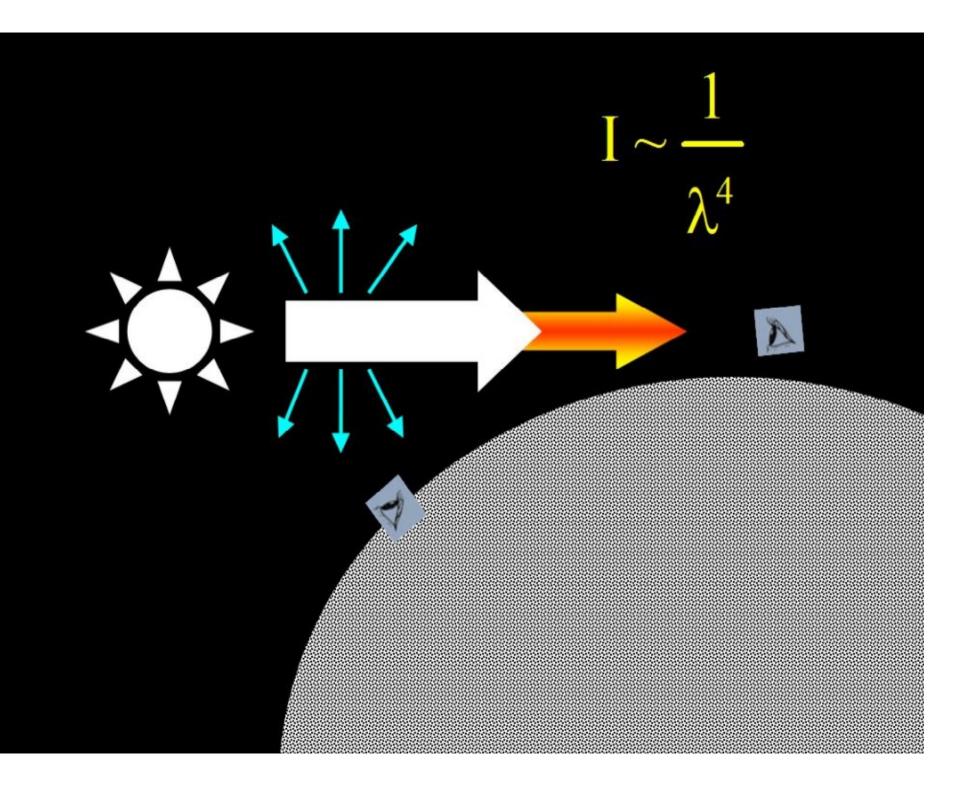
рассеяние Ми

мелкие частицы (неоднородности) **D**<< \lambda

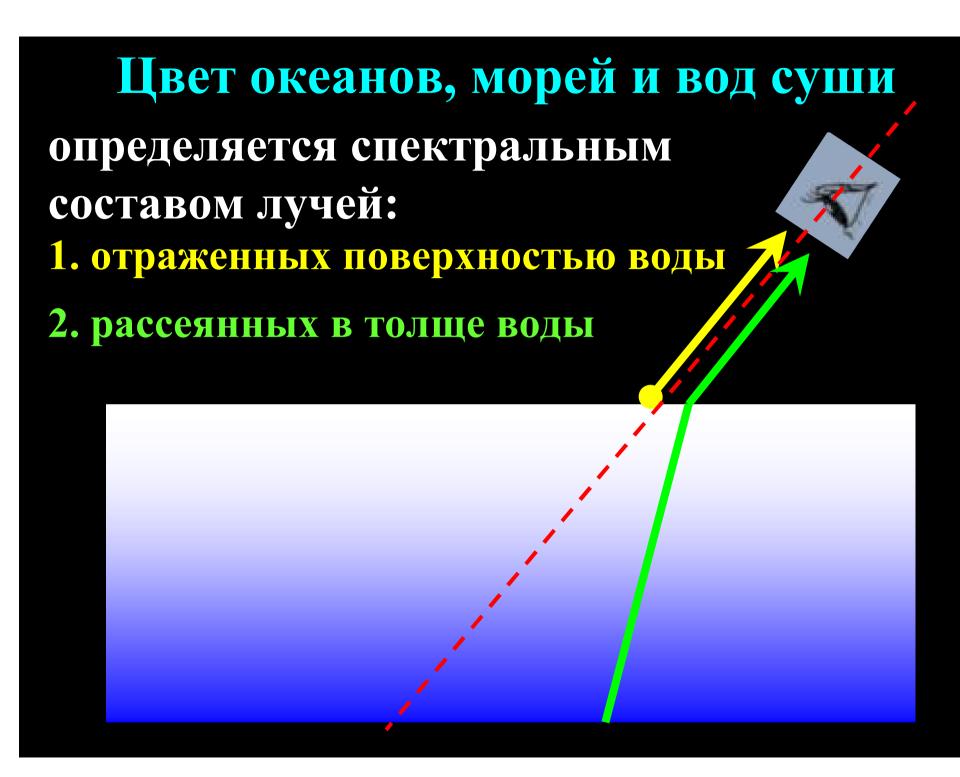
рассеяние Рэлея или молекулярное









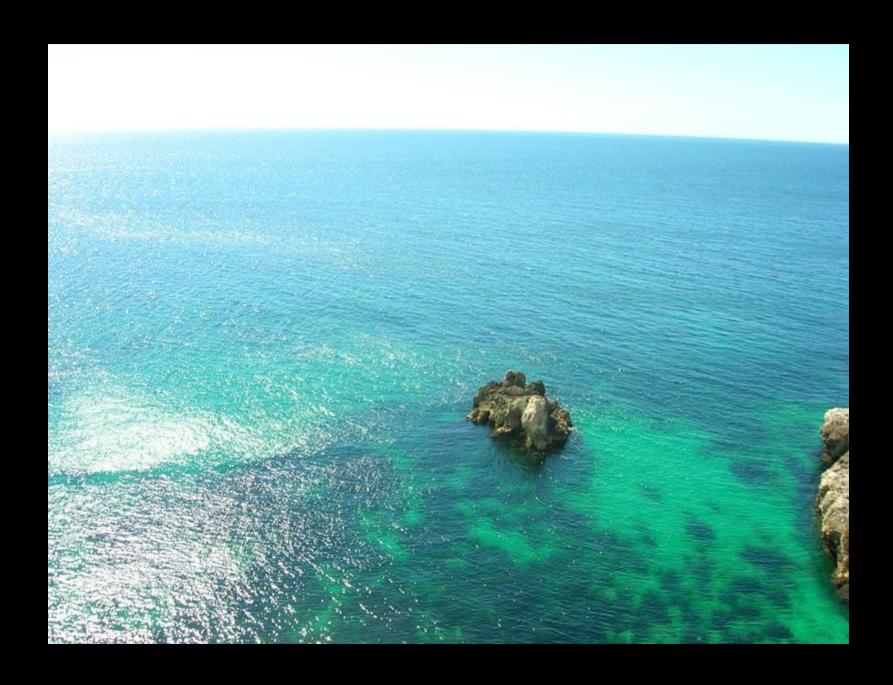


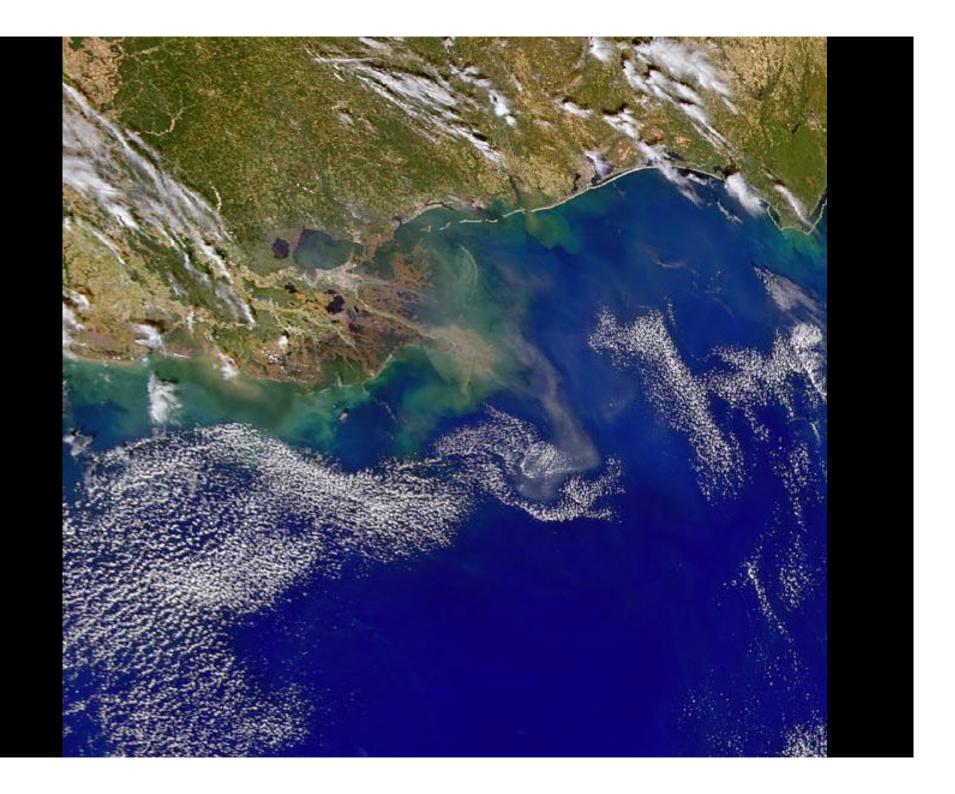
Коэффициент отражения неполяризованного излучения на границе «воздух-вода» как функция угла падения





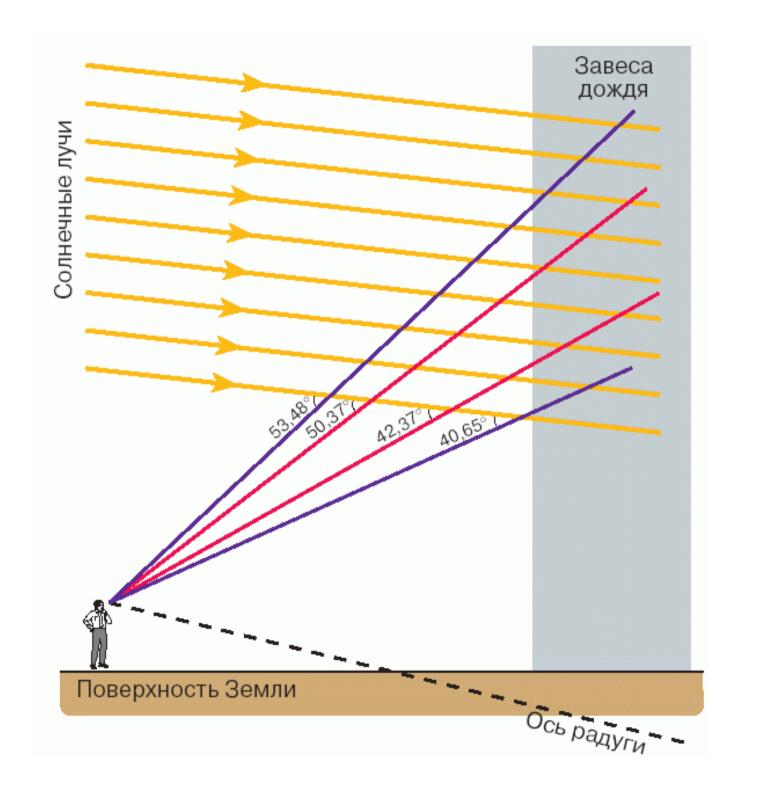


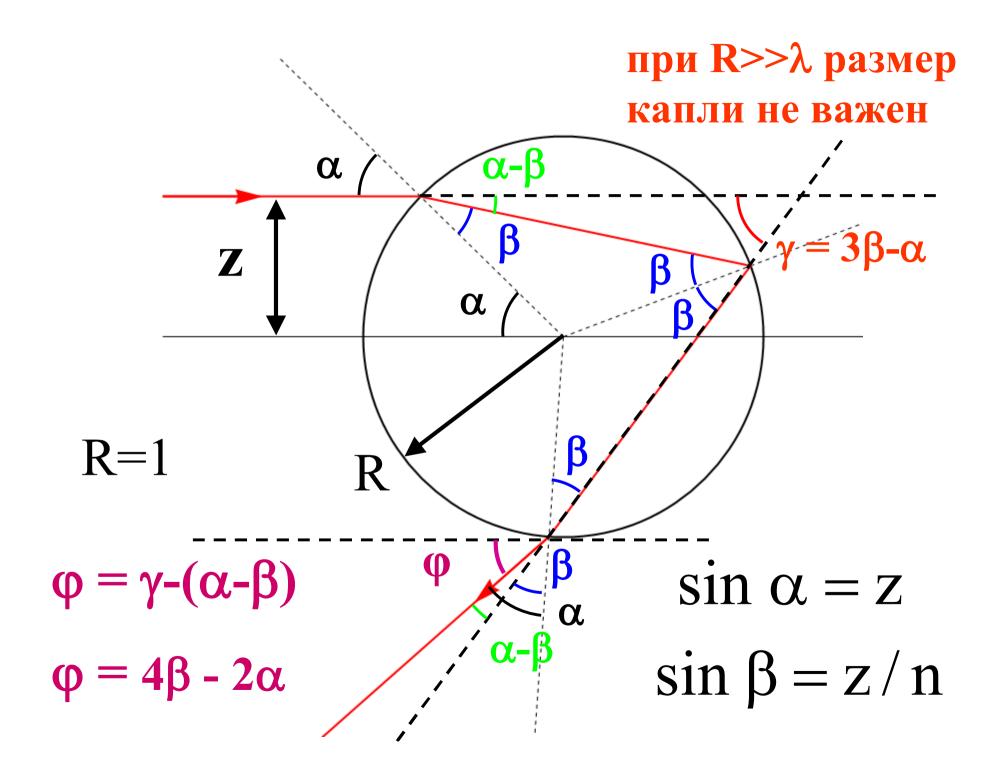


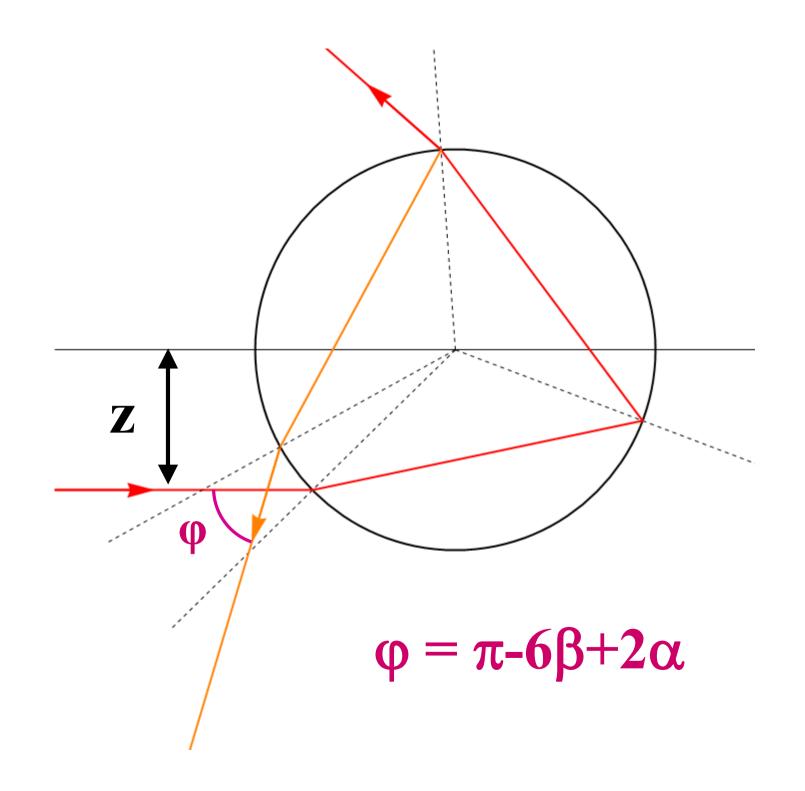


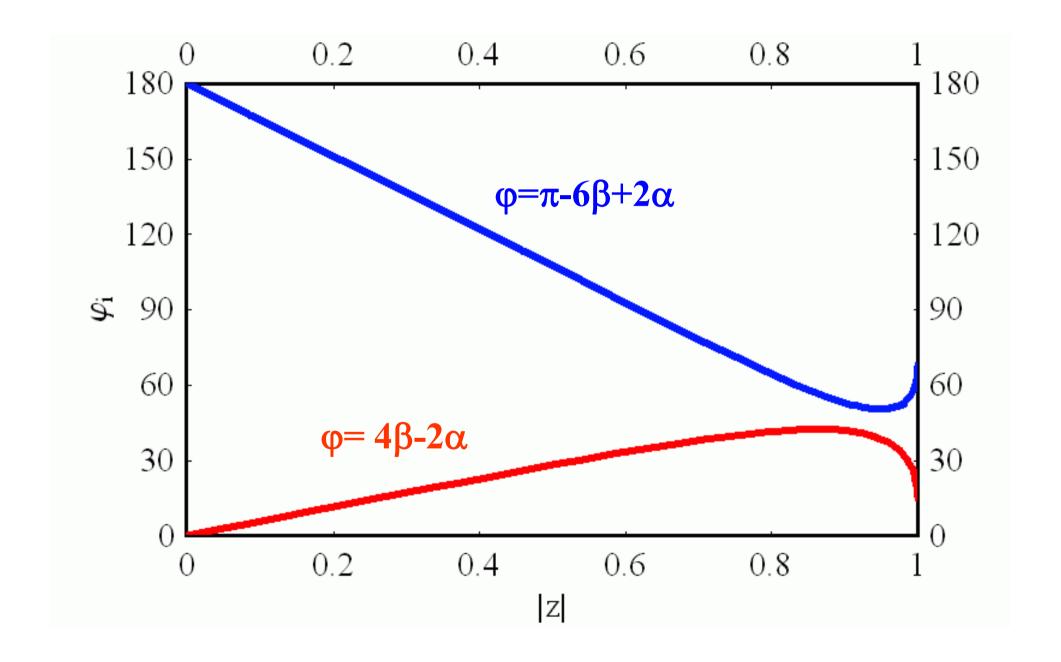
Оптические явления, вызываемые ядрами конденсации

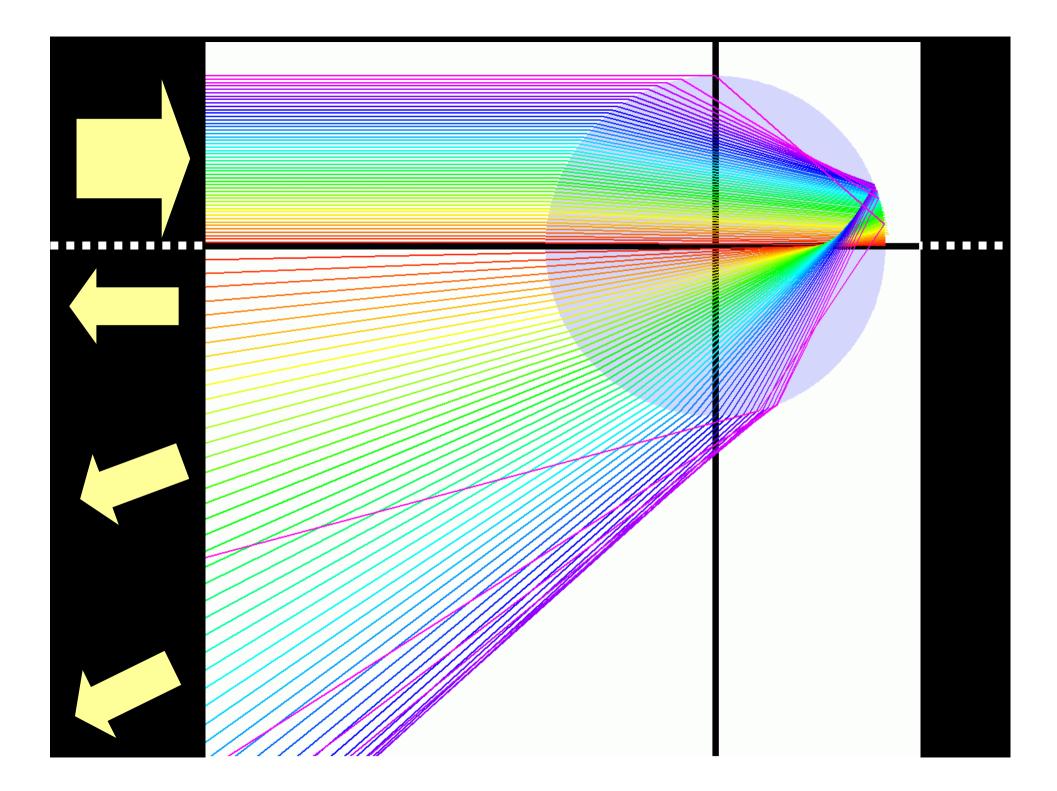


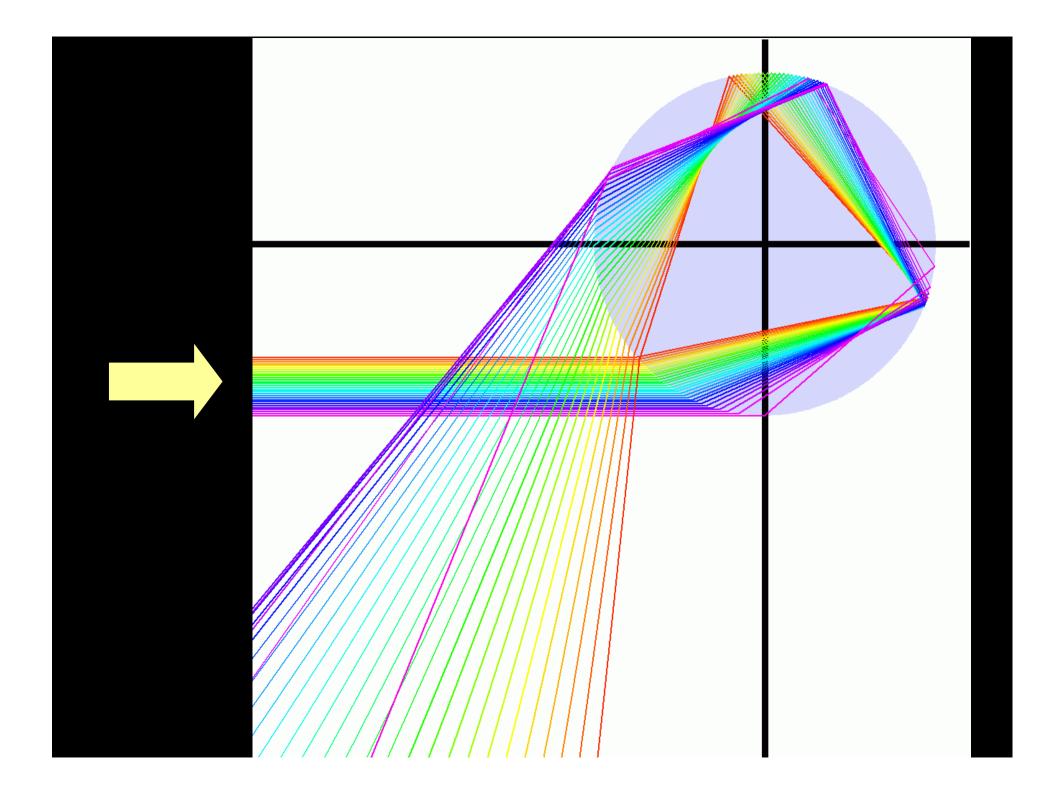


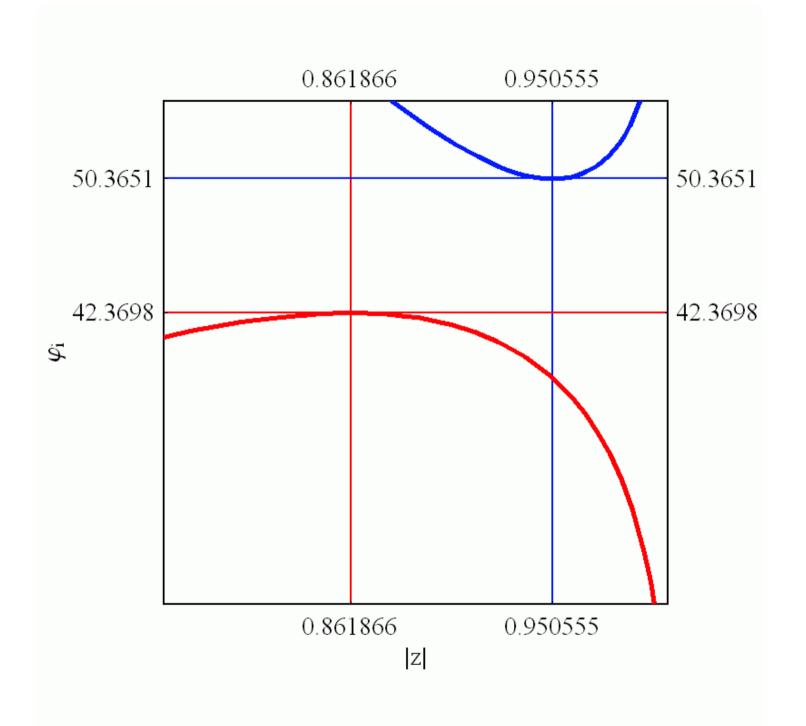


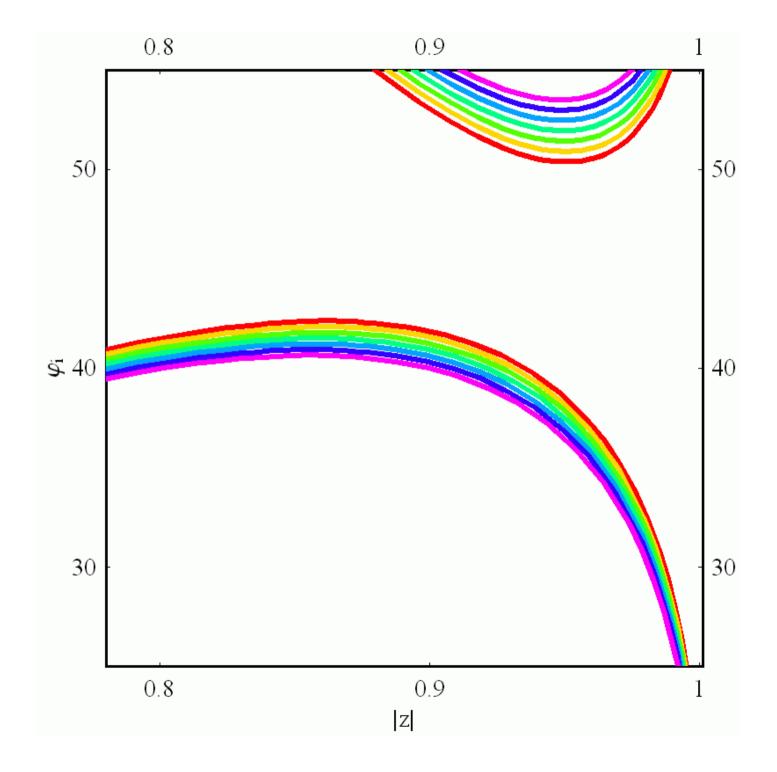




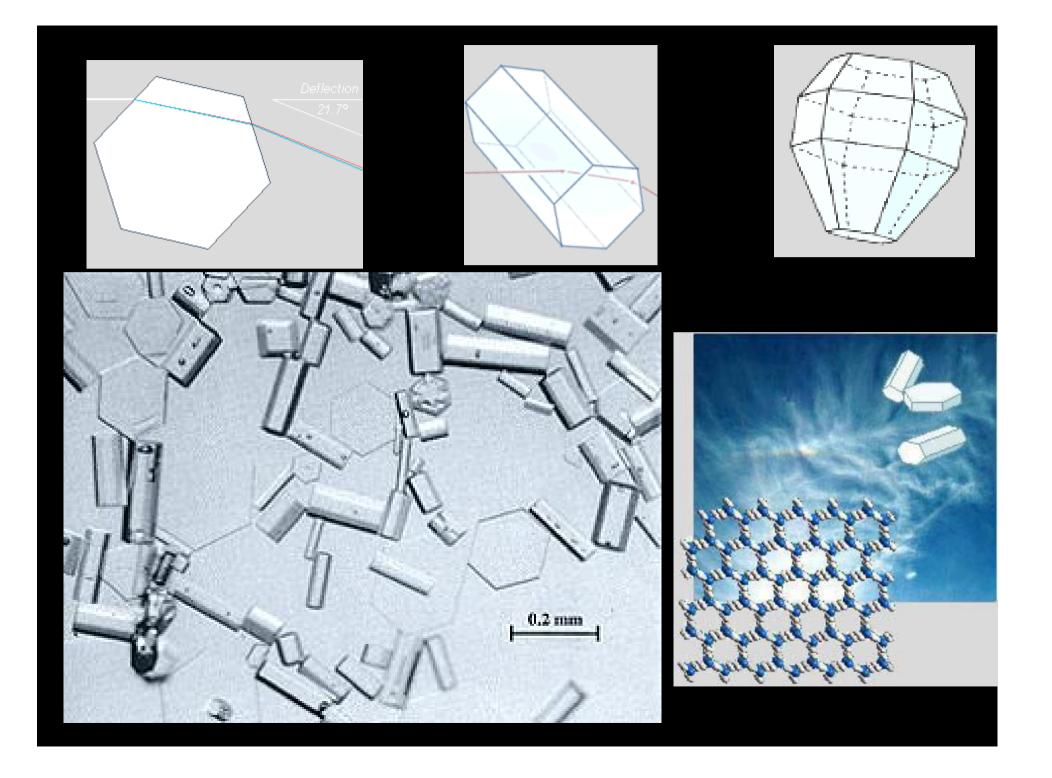










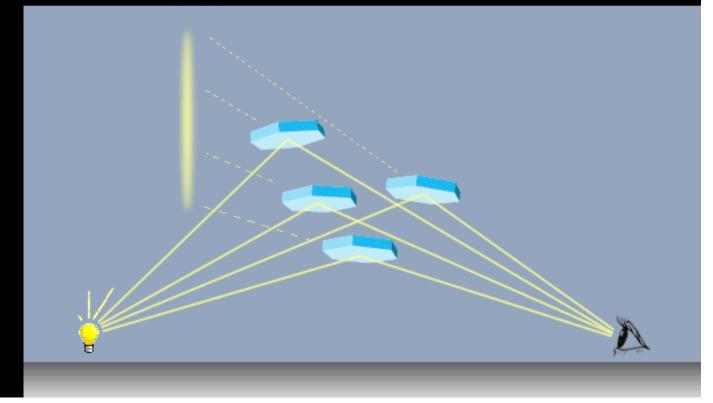


Оптические эффекты, вызываемые кристаллами льда



Световые столбы





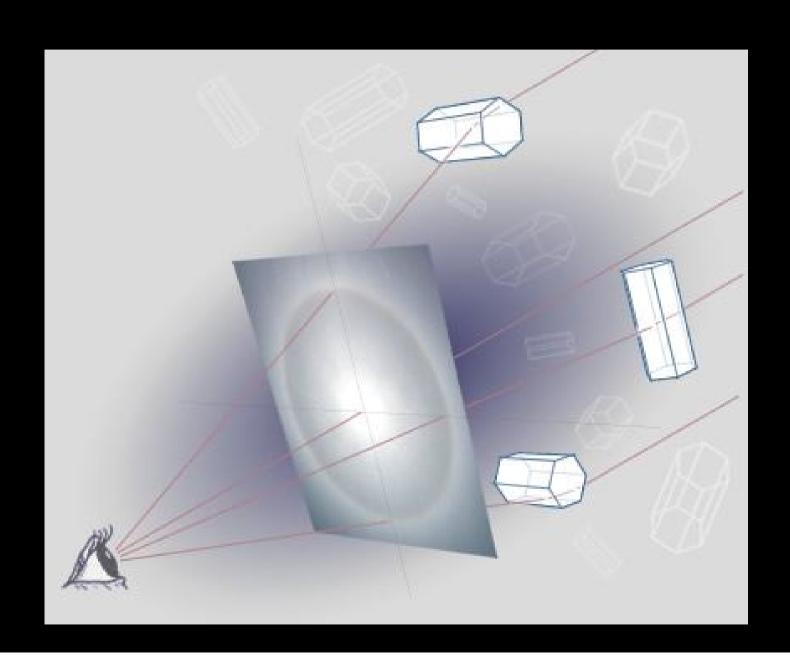
Световой столб (Sun Pillar)

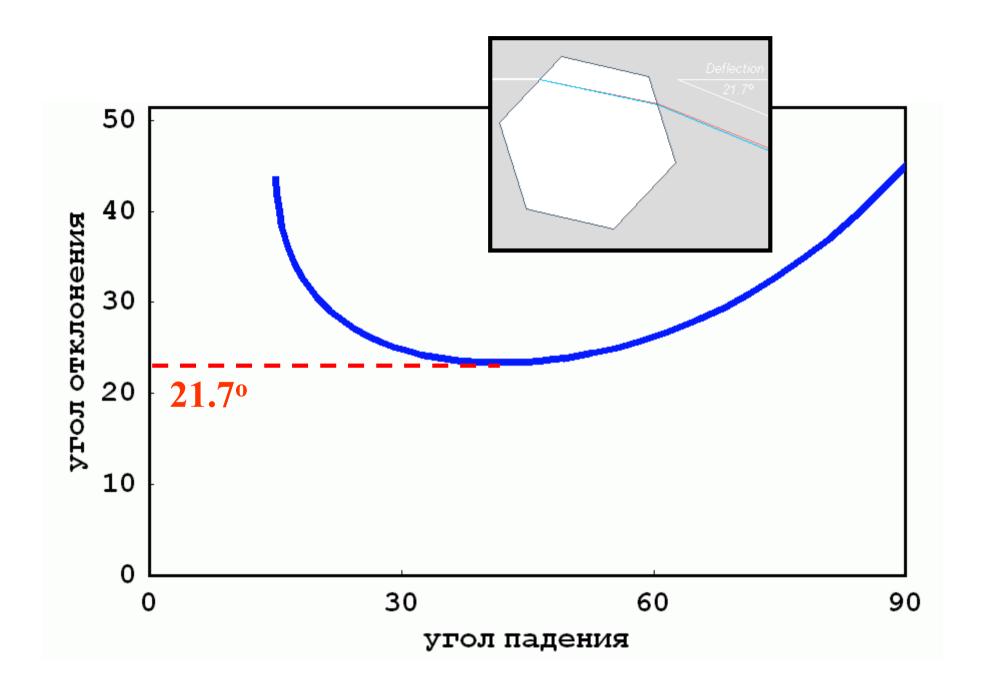


Световой столб (Sun Pillar)



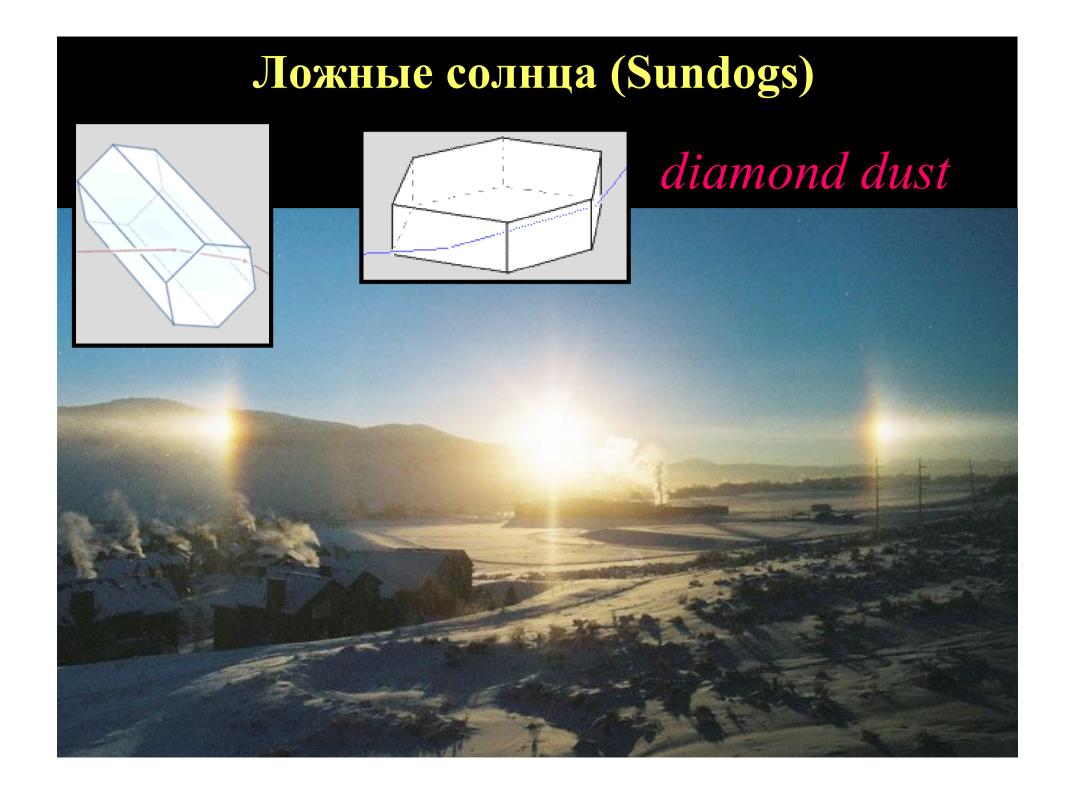
Гало



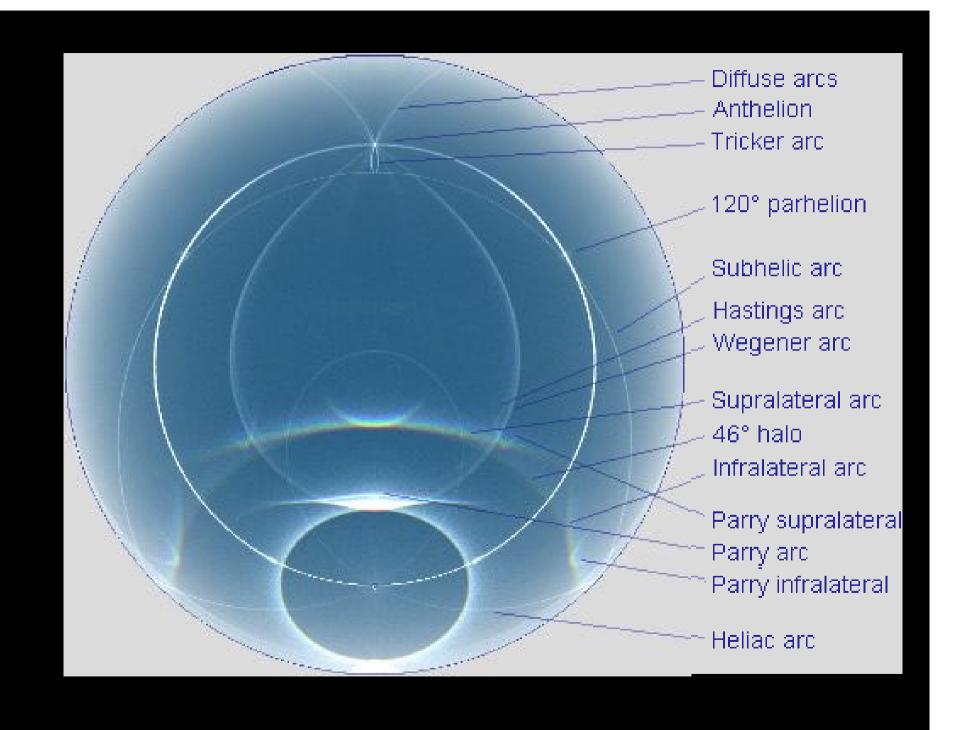


22 град. гало вокруг Луны





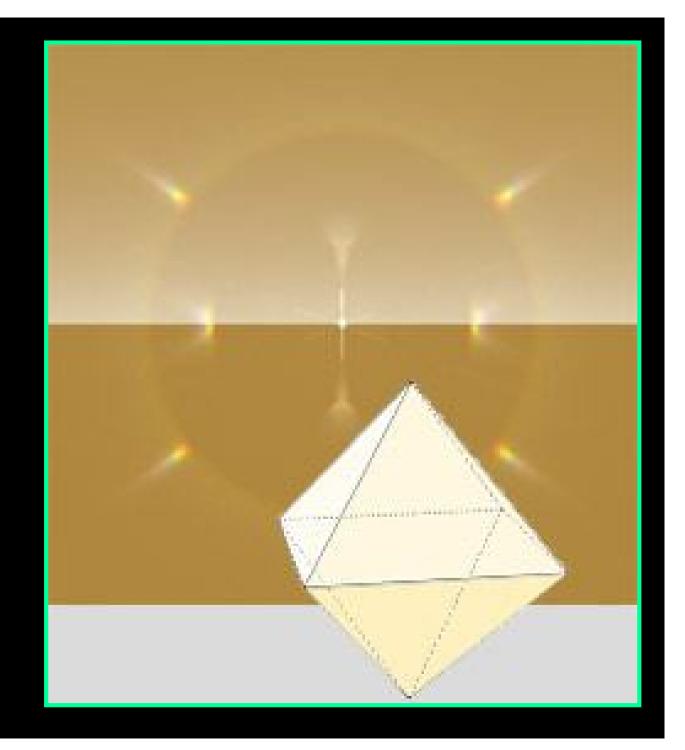






Кристаллы аммония

(атмосферы Юпитера и Сатурна)



Atmospheric Optics

http://www.atoptics.co.uk/