

Атмосферные модели



Ирина Репина

Институт физики атмосферы

им. А.М. Обухова РАН

Содержание

- Глобальные модели климата
- Модели общей циркуляции атмосферы
- Мезомасштабные модели (модели прогноза погоды)
- Вихререзрешающие модели

Иерархия численных моделей атмосферы и климата

Модели общей циркуляции атмосферы, $\Delta = 10 - 100$ км

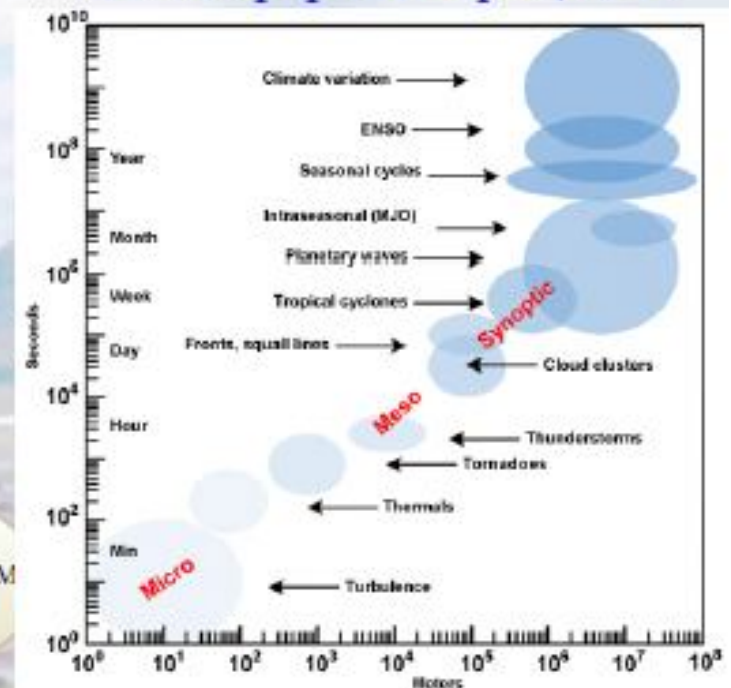
Региональные модели атмосферы, $\Delta = 1 - 10$ км

Вихреразрешающие модели (LES), $\Delta = 10 - 100$ м

Прямое моделирование турбулентности (DNS), $\Delta \sim 1$ мм

Модели деятельного слоя суши и океана

Пространственные и временные масштабы атмосферных процессов



Атмосферную модель, воспроизводящую ВСЕ атмосферные масштабы, невозможно реализовать на современных компьютерах

Иерархия атмосферных моделей



Глобальные модели: разрешение 10-200 км.
(GFDL, ECHAM, HadCM, INM RAS,)

Муссоны и пассаты, циклоны и антициклоны,.....



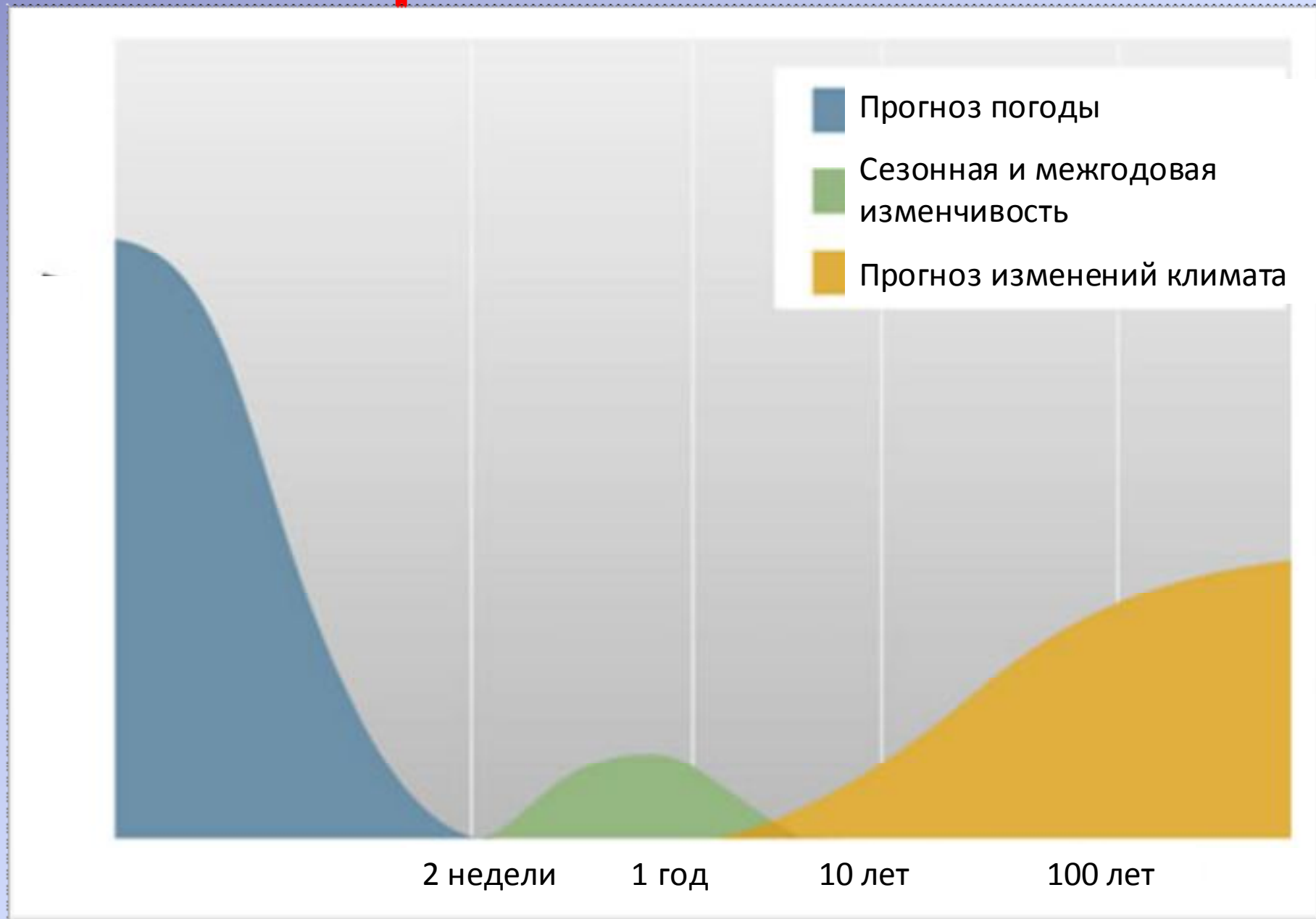
Региональные модели: разрешение 1-10 км.
Мезо-циркуляции. Бриз, Фен, Бора, Шквалы...



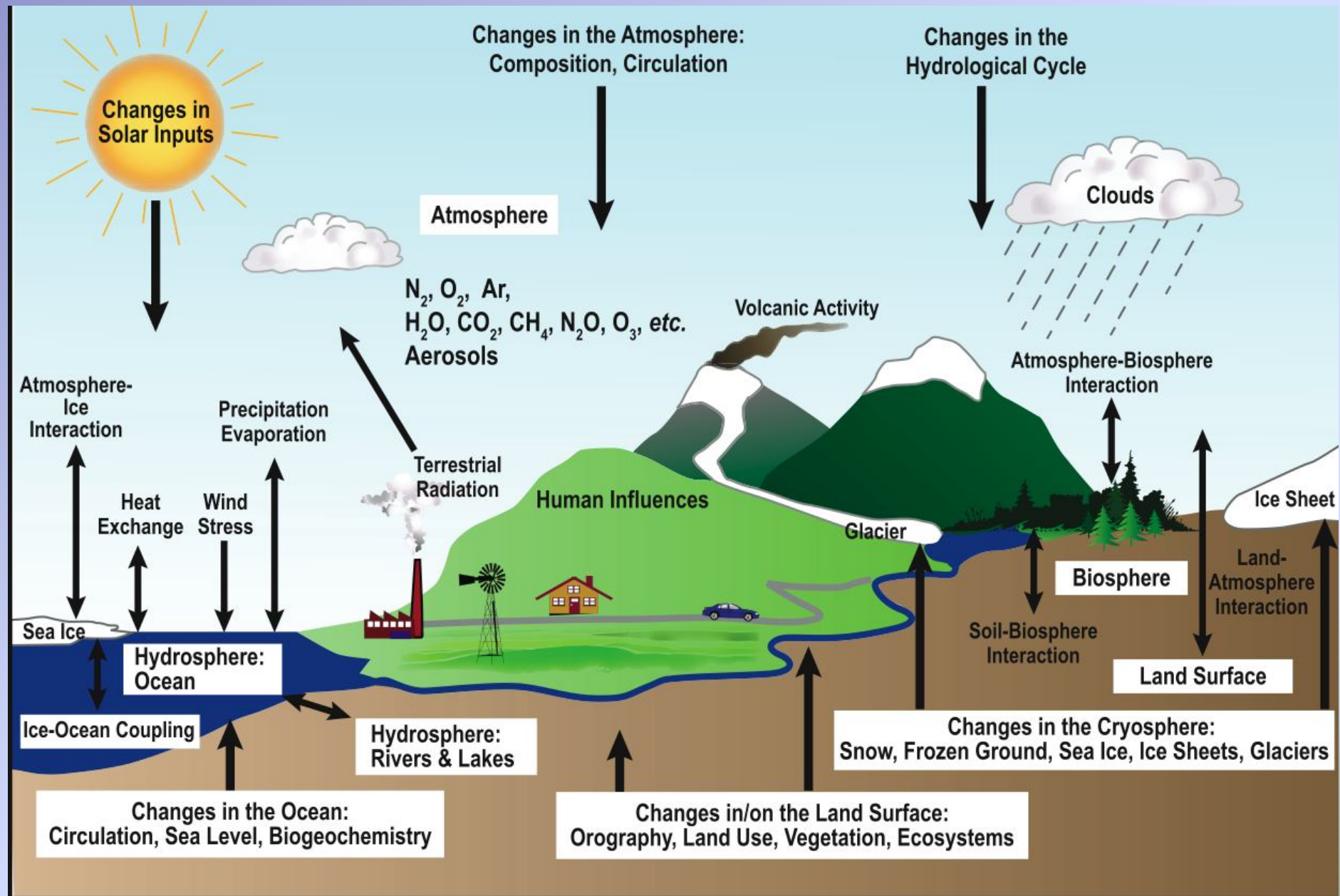
Вихреразрешающие модели: 10-100 м.
Когерентные структуры в атмосфере,
циркуляции над неоднородным рельефом, в
частности в городах...



Временная шкала



Климатическая система



Составляющие климатической системы

- Климатическую систему планеты Земля образуют следующие, взаимодействующие между собой, компоненты:
- 1. **атмосфера** - газовая оболочка Земли (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар, озон и т.д.), воздействующая на перенос к поверхности Земли солнечной радиации, поступающей на ее верхнюю границу;
- 2. **океан** - главный водный резервуар в системе, состоящий из соленых вод Мирового океана и прилегающих к нему морей, поглощающий основную часть поступающей на его поверхность солнечной радиации - мощный аккумулятор энергии;
- 3. **суша** - поверхность континентов с ее гидрологической системой (внутренние водоемы, болота и реки), почва (в том числе, с грунтовыми водами) и криолитозона ("вечная мерзлота");
- 4. **криосфера** - континентальные и морские льды, горные ледники и снежный покров;
- 5. **биота** – растительность на суше и океане, а также живые организмы в воздухе, море и на суше, включая человека.

Климатическая система: погода и климат

- ❑ Климатическая система есть система, объединяющая атмосферу, океан, криосферу, сушу и биосферу.
- ❑ Климатическая система характеризуется конечным множеством параметров (скорость ветра в атмосфере и течений в океане, давление, температура, влажность, соленость и т.д.), значения которых в фиксированный момент времени в различных точках пространства определяют ее состояние.
- ❑ Погода есть **текущее (мгновенное) состояние** атмосферы (совокупность значений метеорологических элементов и атмосферных явлений, наблюдаемых в данный момент времени). Прогноз погоды – расчет траектории в фазовом пространстве (решение задачи Коши, детерминированный подход).
- ❑ Климат есть **ансамбль состояний**, который проходит климатическая система за достаточно большой (несколько десятилетий) промежуток времени (задача без начальных данных, динамика системы на аттракторе).

Особенности климатической системы как физического объекта

- Главные компоненты климатической системы - атмосфера и океан - представляют собой тонкие пленки с отношением вертикального масштаба к горизонтальному порядка 0.01-0.001.
- Систему можно считать квазидвумерной, однако, вертикальная стратификация по плотности очень важна.
- Характерные временные масштабы энергетически значимых физических процессов лежат в диапазоне от 1 часа до десятков и сотен лет.
- Лабораторное моделирование такой системы крайне затруднительно.
- С климатической системой нельзя поставить целенаправленный физический эксперимент.
- Например, ее нельзя “накачать” углекислым газом и, сохраняя прочие равные условия, измерить полученный эффект.
- В распоряжении исследователей имеются лишь короткие ряды данных наблюдений, да и то лишь об отдельных компонентах климатической системы.
- Главным (но не единственным) инструментом изучения климатической системы является **математическое моделирование** с помощью гидродинамических моделей.
- Основу этих моделей должны составлять глобальные модели общей циркуляции атмосферы и океана.

Состояния климатической системы

Климатическая система характеризуется конечным множеством параметров (компоненты скорости ветра и течений, температура и соленость, водяной пар, плотность, давление и др.), значения которых в фиксированный момент времени определяют ее **состояние**. Эта система - глобальна, поскольку ее состояния характеризуются пространственными неоднородностями с масштабами от планетарных (порядка 10000 км по горизонтали и порядка 10 - 100 км по вертикали) до размеров мельчайших турбулентных неоднородностей в атмосфере и океане, элементов растительности и структурных неоднородностей почвы.

Климат - ансамбль состояний климатической системы

- Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени, который с математической точки зрения удобно выбрать очень большим (в пределе бесконечным). В практических приложениях часто под климатом понимаются некоторые характеристики части траектории климатической системы, проходимой ею за определенный промежуток времени (~ 30 лет). В общем случае, под ансамблем понимается не только множество состояний, но и некоторая вероятностная мера, заданная на этом множестве и определяющая вероятность того, что система может находиться на некотором подмножестве данного множества.

Вынужденная климатическая изменчивость

- Вариации состояния климатической системы со строго определенными периодами:
- 1) **суточные колебания**, обусловленные суточными изменениями инсоляции вследствие вращения Земли,
- 2) **приливные колебания**, связанные с гравитационными воздействиями на вращающуюся Землю Луны и Солнца,
- 3) **сезонные колебания** и связанные с ними муссонные эффекты, вызываемые изменениями инсоляции при движении Земли вокруг Солнца.
- Сезонный и суточный циклы - наиболее яркое проявление вынужденной изменчивости климатической системы, обусловленной астрономическим фактором. Изменения в амплитуде и фазе отклика климатической системы на эти внешние воздействия - индикатор изменений климата.

Внутренняя климатическая изменчивость

- Характеризуется интенсивными нерегулярными колебаниями вследствие внутренних **нелинейных взаимодействий** параметров ее состояния и включает следующие составляющие:
- 1) **синоптические колебания** с масштабами ~ 1000 км и периодами в несколько суток – в атмосфере и с масштабами ~ 100 км и периодами в несколько недель – в океане,
- 2) **глобальные колебания** с периодами от недель до месяцев (двухнедельный цикл индекса зональной циркуляции атмосферы в средних широтах и 30-60-дневные колебания в тропиках),
- 3) межгодовые колебания максимальной интенсивности в диапазоне периодов 2-5 лет (квазидвухлетние вариации зонального течения в экваториальной атмосфере и явление Эль-Ниньо).

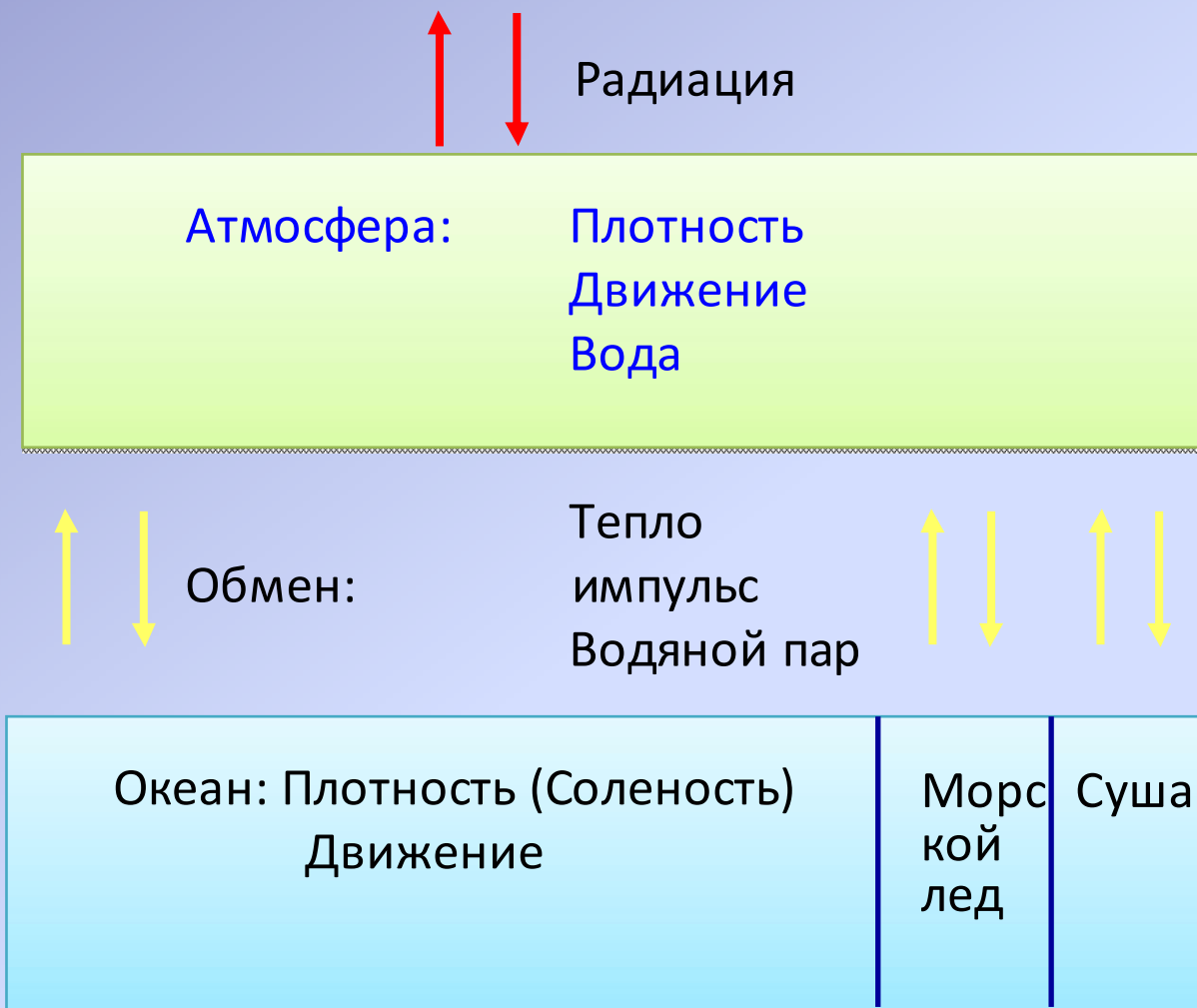
Региональный климат

- Множество типов разнообразных климатов, которые определенным, **региональным**, образом распределены по земной поверхности.
- Их классификация базируется на разделении существующих климатов по **температурному** режиму и степени **увлажнения**, на выделении **ландшафтно - географических** зон суши, на рассмотрении особенностей **общей циркуляции атмосферы** и других критериях.
- С экологической точки зрения удобно рассматривать региональные процессы **континентального** или **субконтинентального** масштабов, что позволяет учесть большой разброс в степени **уязвимости** различных популяций и видов природной среды, возникающих в результате ее локальных различий, экономических, социальных и политических условий и степени зависимости от ресурсов, чувствительных к климату.
- **Уязвимость** определяется как степень, до которой та или иная природная среда способна противостоять разрушительному воздействию изменений климата и является функцией **чувствительности** системы к изменениям в климате и ее способности адаптироваться к этим изменениям.

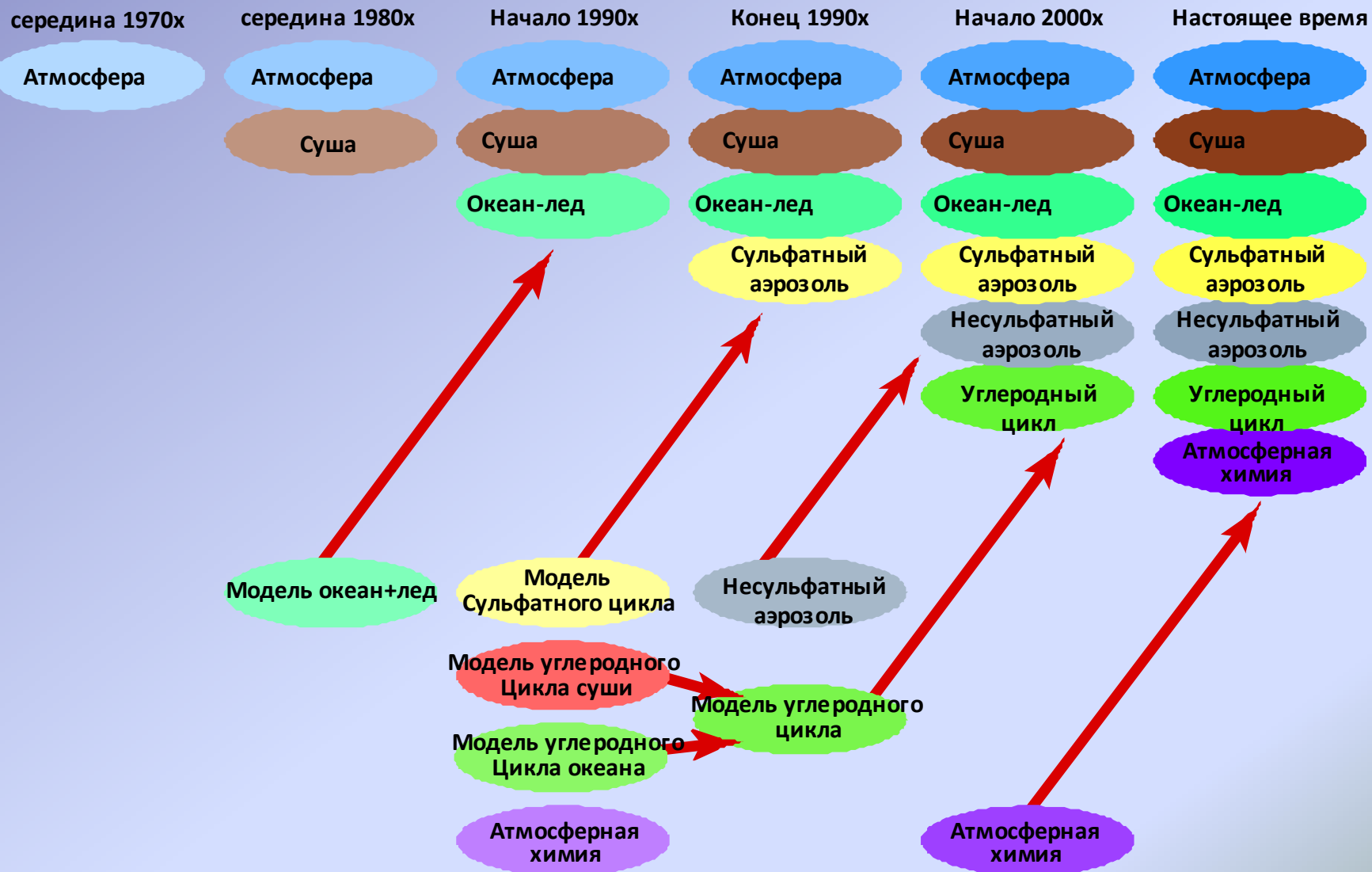
Принципы построения климатических моделей

- Учитывается, что движения в атмосфере и Мировом океане происходят на вращающейся Земле.
- Предполагается, что для описания динамики атмосферы и океана справедливы уравнения Навье-Стокса.
- В отличие от атмосферы океан рассматривается как несжимаемая жидкость.
- Используются уравнения Рейнольдса (осредненные по некоторым пространственным и временным масштабам уравнения Навье-Стокса).
- Считается, что существует принципиальная возможность их замыкания.
- При достаточно большом масштабе осреднения (~100 км) справедливо приближение гидростатики: вертикальный градиент давления приближенно уравнивается силой тяжести.
- Это требует дополнительных упрощений (постоянный радиус Земли, пренебрежение составляющими силы Кориолиса с вертикальной компонентой скорости) с тем, чтобы в системе уравнений при отсутствии внешних источников энергии и диссипации выполнялся закон сохранения энергии.
- Считается, что локально справедливы уравнения классической равновесной термодинамики.

Совместные модели атмосферы и океана



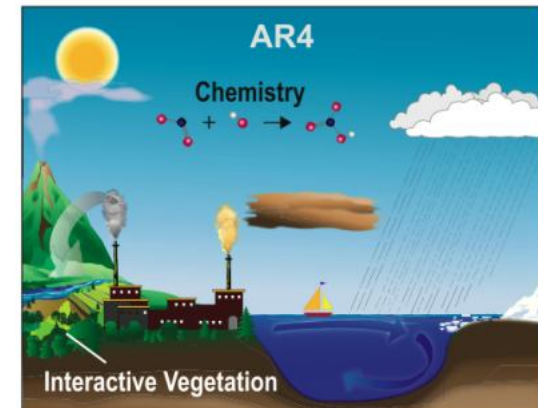
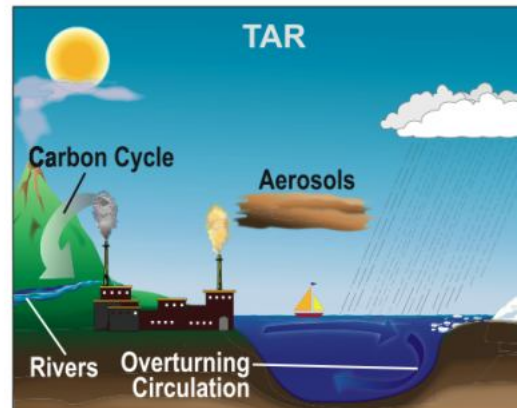
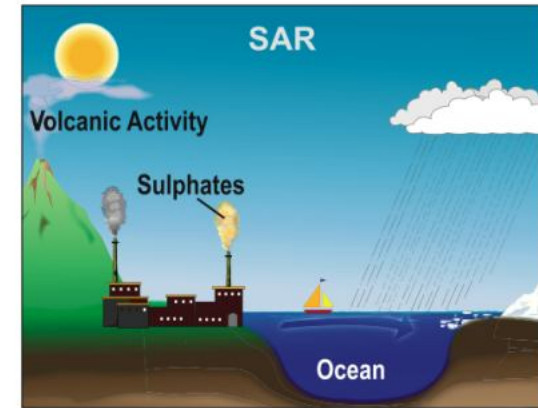
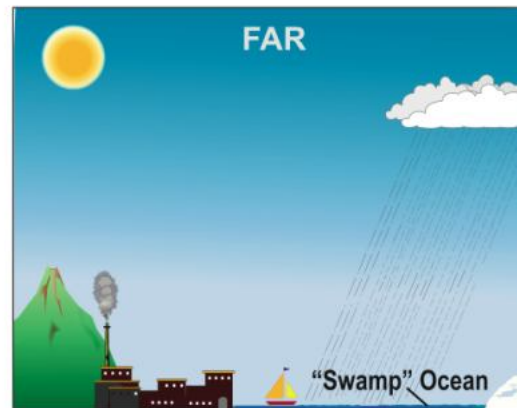
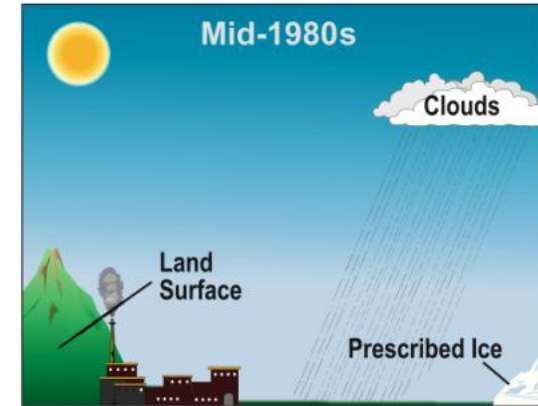
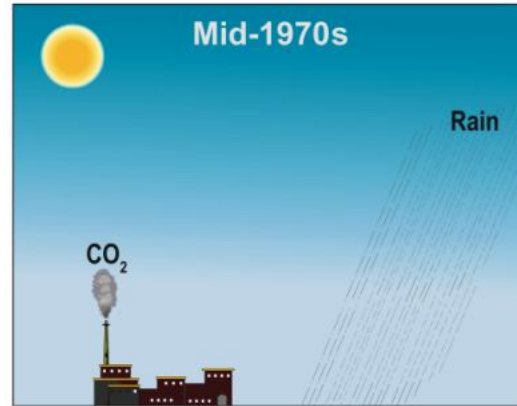
Разработка климатических моделей - прошлое, настоящее и будущее



Климатическая модель → Модели Земной системы

Разработка
глобальных
климатических
моделей (GCMs)

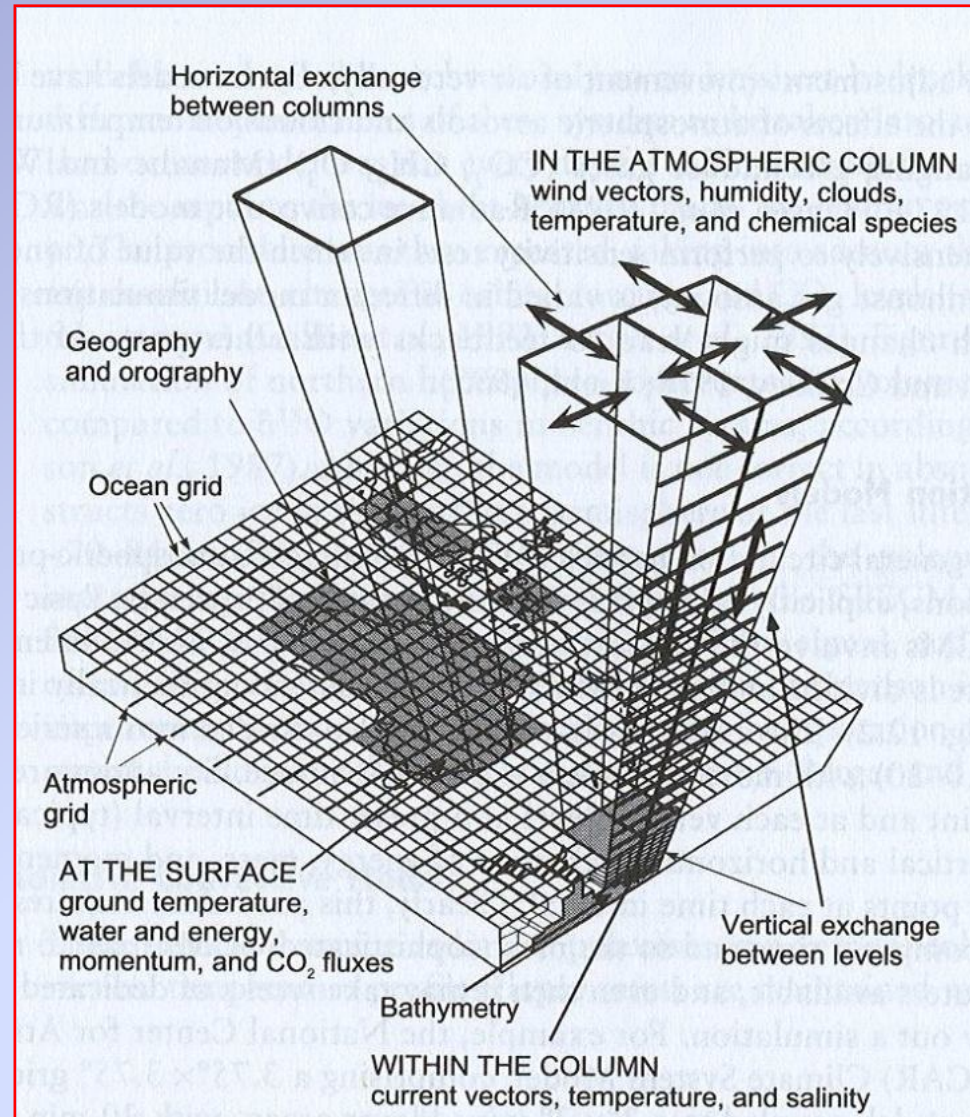
The World in Global Climate Models

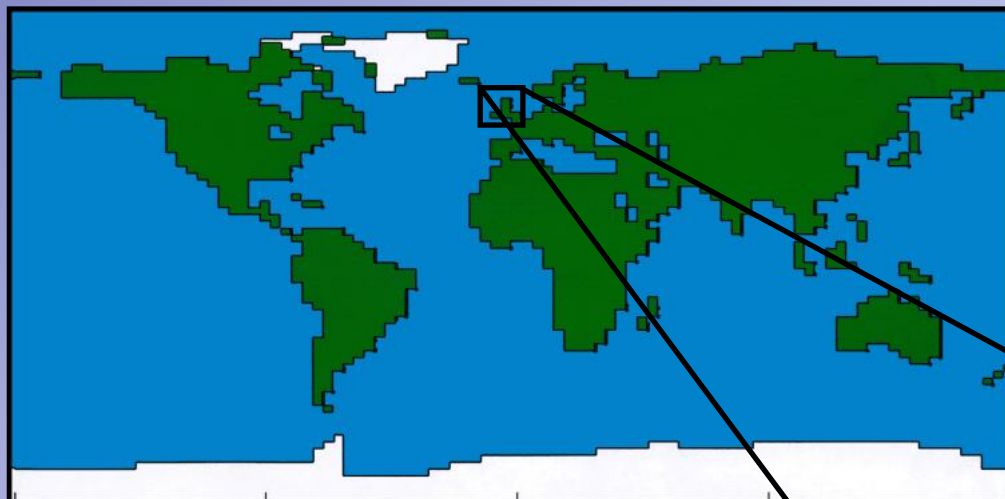


Современные модели климата

- **GCM-Reality Intercomparison Project for SPARC (GRIPS)**
- **Global Land-Atmosphere Coupling Experiment (GLACE)**
- **Global Soil Wetness Project (GSWP)**
- **Models and Measurement II (MMII): Stratospheric Transport**
- **Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project (OCMIP)**
- **Ocean Model Intercomparison Project (OMIP)**
- **Paleo Model Intercomparison Project (PMIP)**
- **Project for Intercomparison of Landsurface Parameterization Schemes (PILPS)**
- **Potsdam DGVM Intercomparison Project**
- **Potsdam NPP Model Intercomparison Project**
- **Project to Intercompare Regional Climate Simulations (PIRCS)**
- **Regional Climate Model Intercomparison Project for Asia (RMIP)**
- **Seasonal Prediction Model Intercomparison Project (SMIP)**
- **Sea-Ice Model Intercomparison Project (SIMIP)**
- **Snow Model Intercomparison Project (SnowMIP)**
- **Stretched Grid Model Intercomparison Project (SGMIP)**
- **Study of Tropical Oceans In coupled models (STOIC)**
- **WCRP F11 Intercomparison**
- **WCRP Radon Intercomparison**
- **WCRP Scavenging Tracer Intercomparison**

Структура глобальных климатических моделей

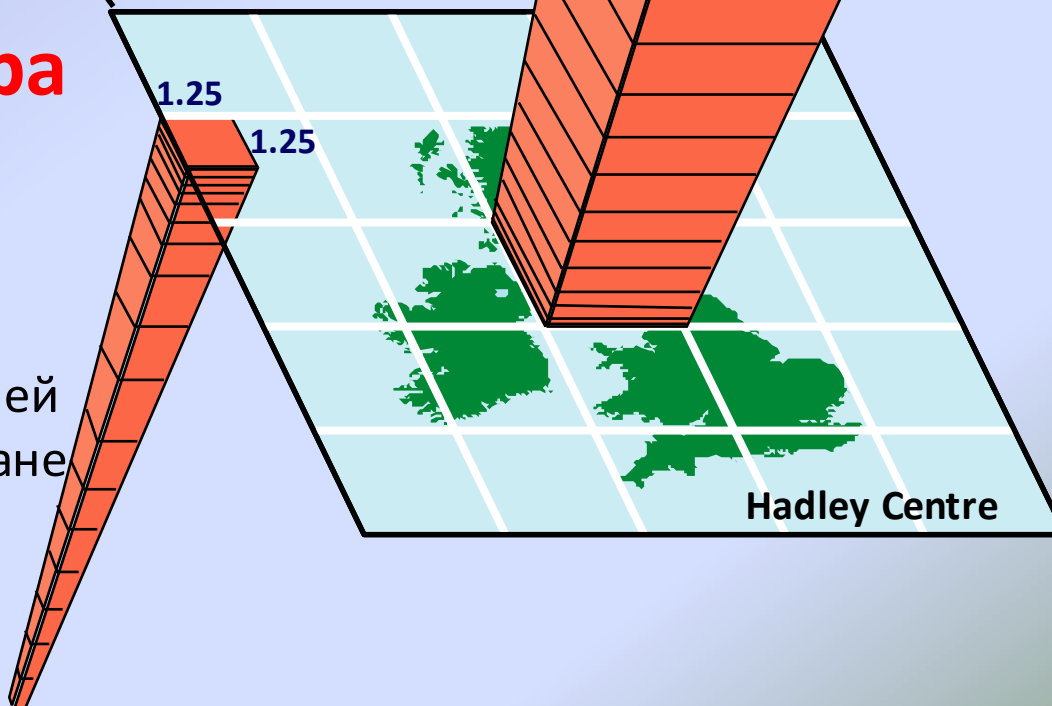




Модель Гадлей-центра HadCM3

20
уровней
в океане

-5km



19 уровней
в атмосфере

30km

2.5
lat

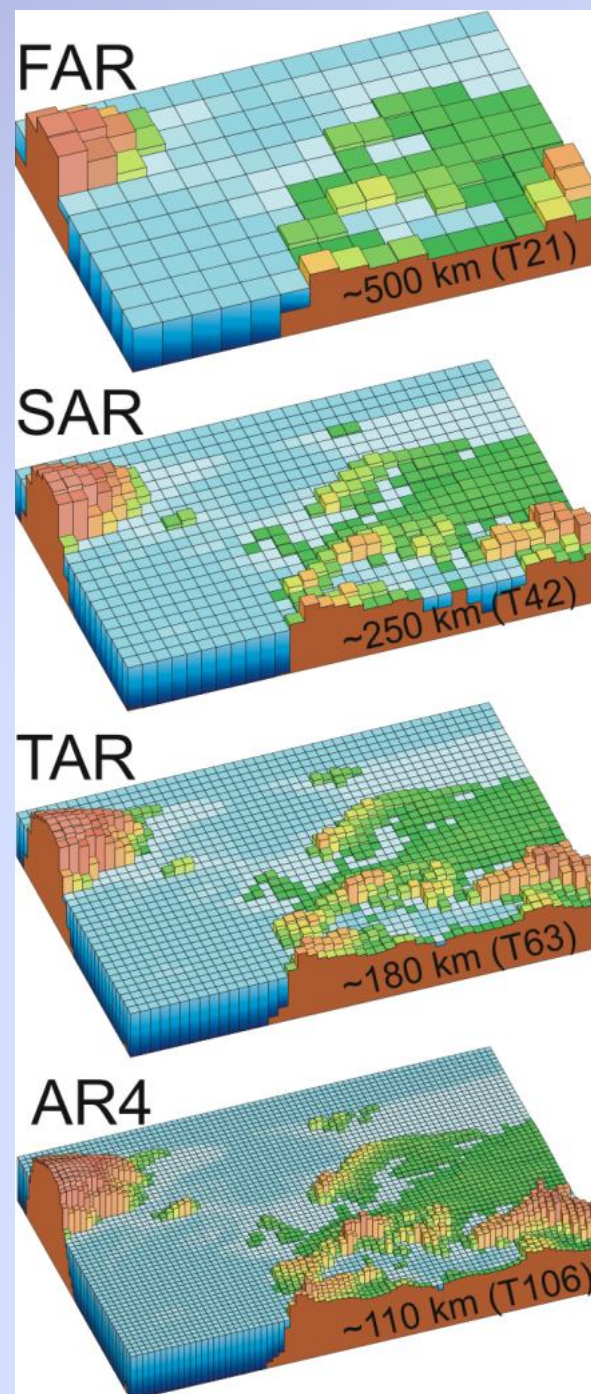
3.75
long

1.25

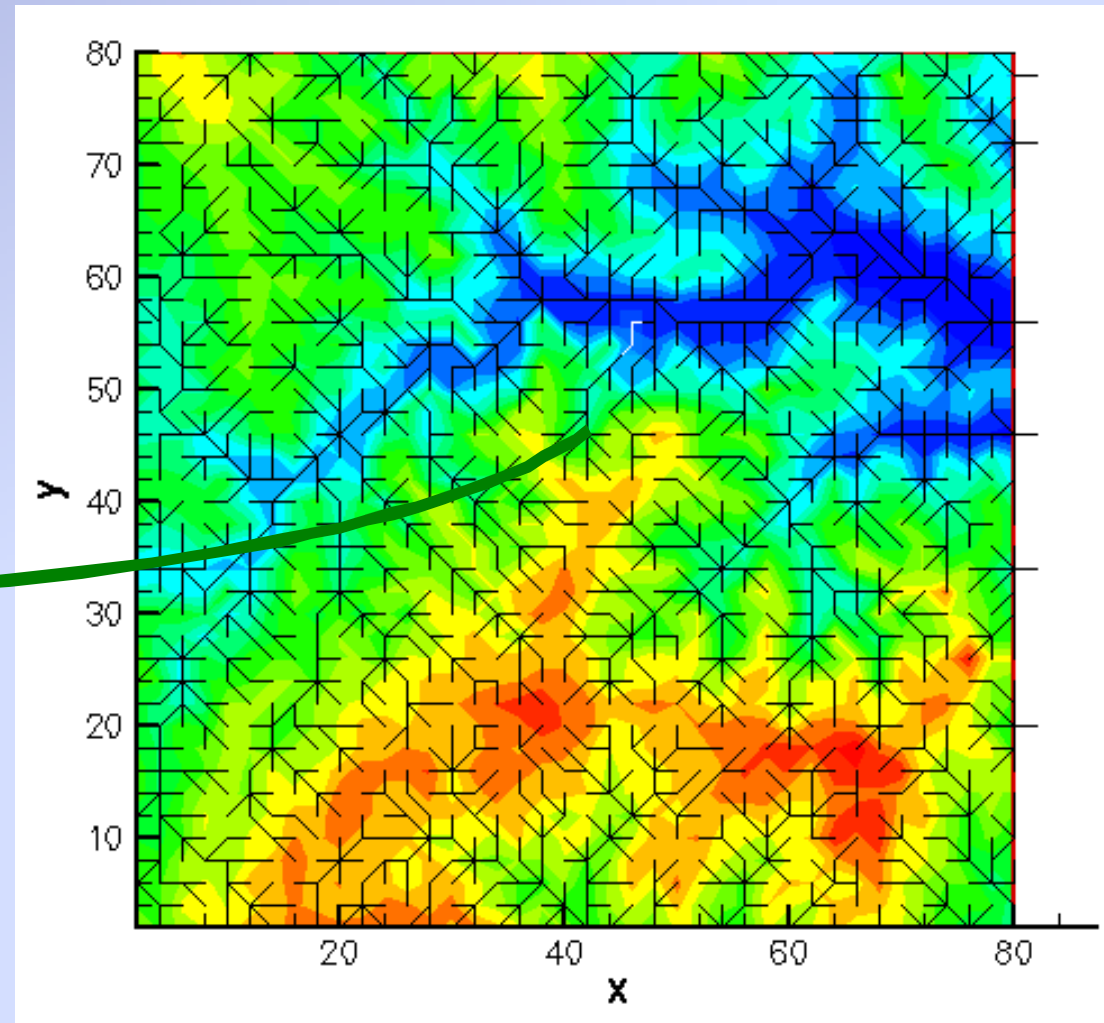
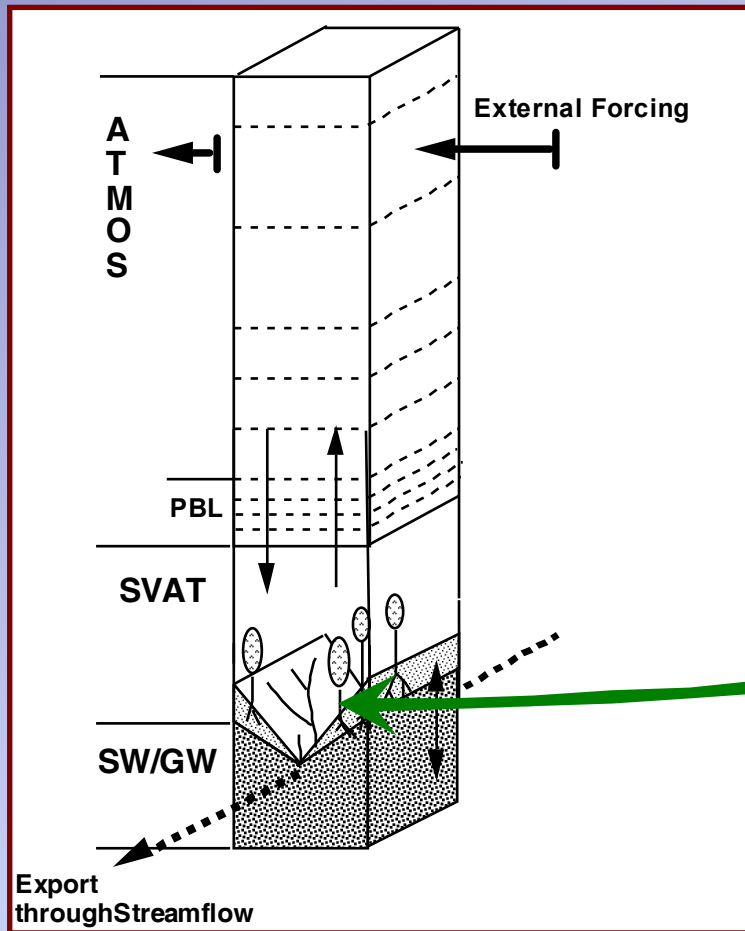
1.25

Hadley Centre

Эволюция пространственного разрешения моделей



Глобальные климатические модели: Взаимодействие атмосферы и поверхности

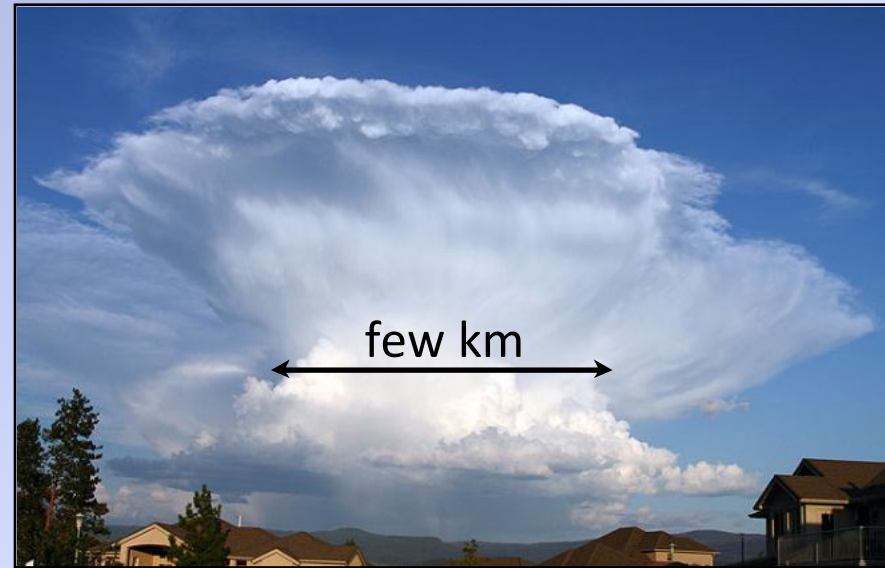


Различные масштабы:
В зависимости от свойств
поверхности

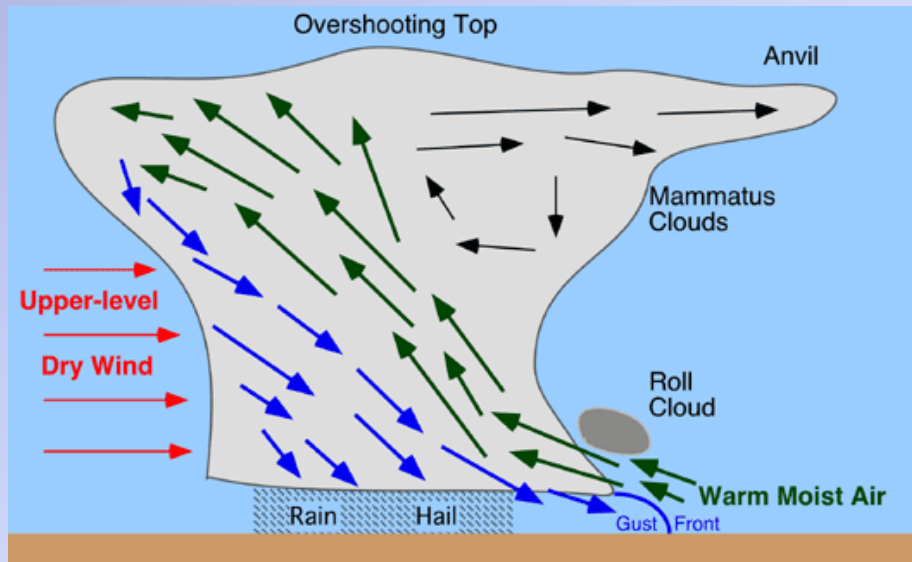
Параметризации

**Многие процессы
оказываются в
подсеточной области:**

**Например, атмосферная
конвекция**



(www.physicalgeography.net)



(www.physicalgeography.net)

Что делает модель?

Параметризация:
Распространяет эффект
подсеточного процесса на всю
ячейку. Предполагается, что
подсеточный процесс вкладывает
определенную часть в изменение
свойств ячейки в целом.

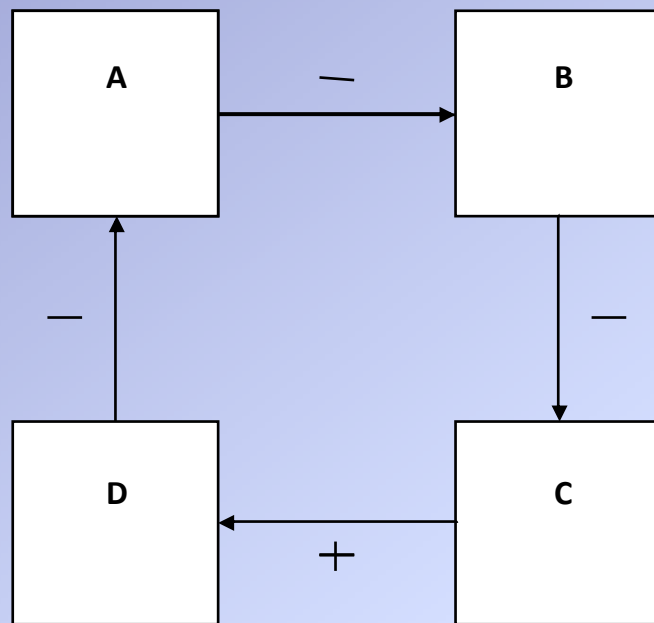
Обратные связи

- Процессы, протекающие в климатической системе, осуществляются в виде обратных связей между различными параметрами ее состояния. Механизмы обратной связи могут либо усиливать аномалии одного из взаимодействующих параметров (**положительная** обратная связь), либо ослаблять их (**отрицательная** обратная связь).

Пример положительной обратной связи: взаимодействие между снежным покровом и радиацией. Зимой снег на подстилающей поверхности отражает почти всю проходящую солнечную радиацию, что приводит к постоянному ее охлаждению. При таянии части снежного покрова альbedo уменьшается и усилившееся поглощение солнечной радиации земной поверхностью или водой способствует таянию снега.

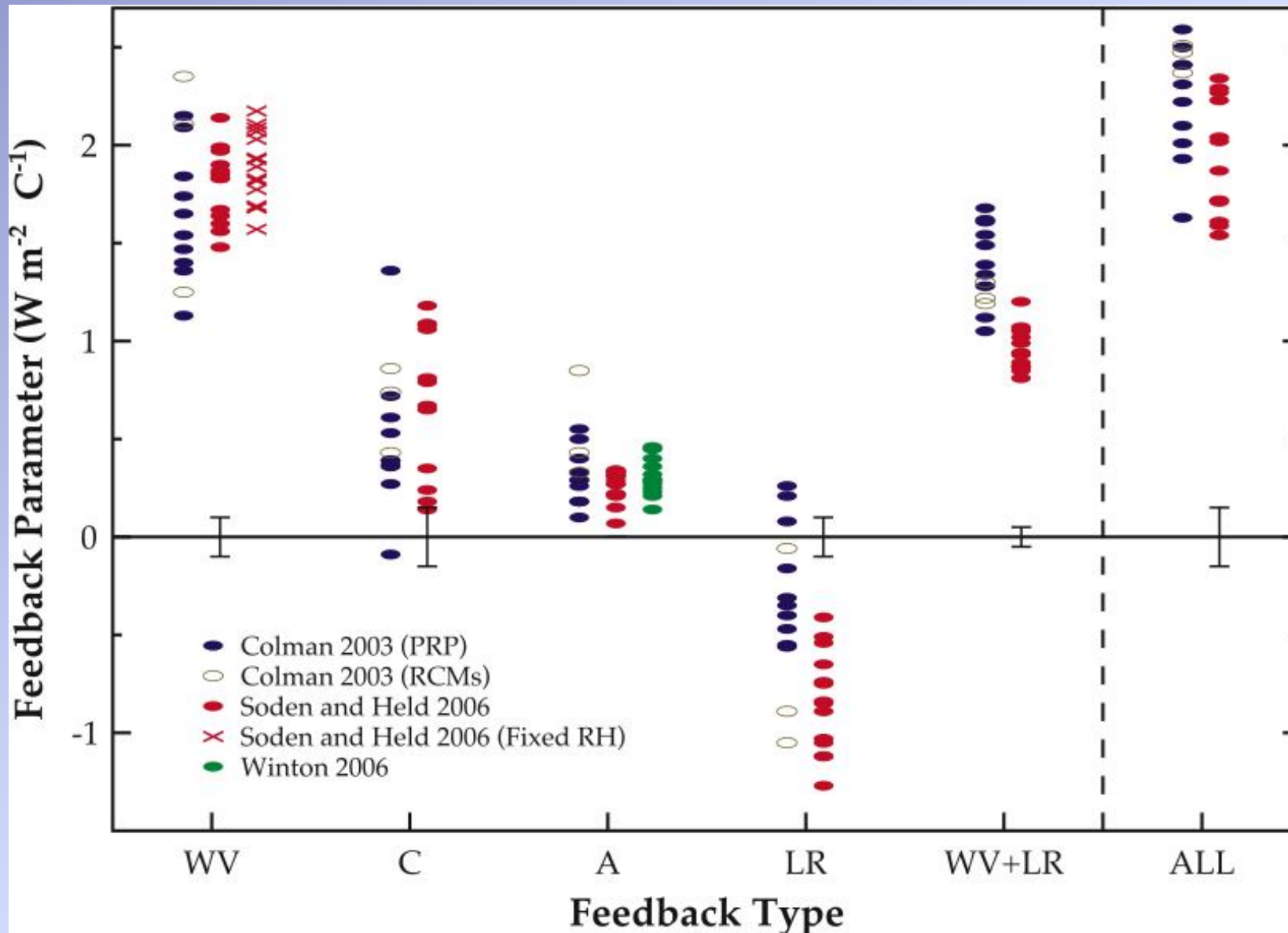
Пример отрицательной обратной связи: облачность – радиация. Повышение температуры поверхности влажной суши приводит к росту содержания водяного пара и к увеличению облачности, которое уменьшает количество солнечной радиации, достигающей поверхности, и к понижению ее температуры. В этом случае имеется также некоторая положительная обратная связь, обусловленная поглощением облаками длинноволнового излучения Земли.

Граф обратных связей

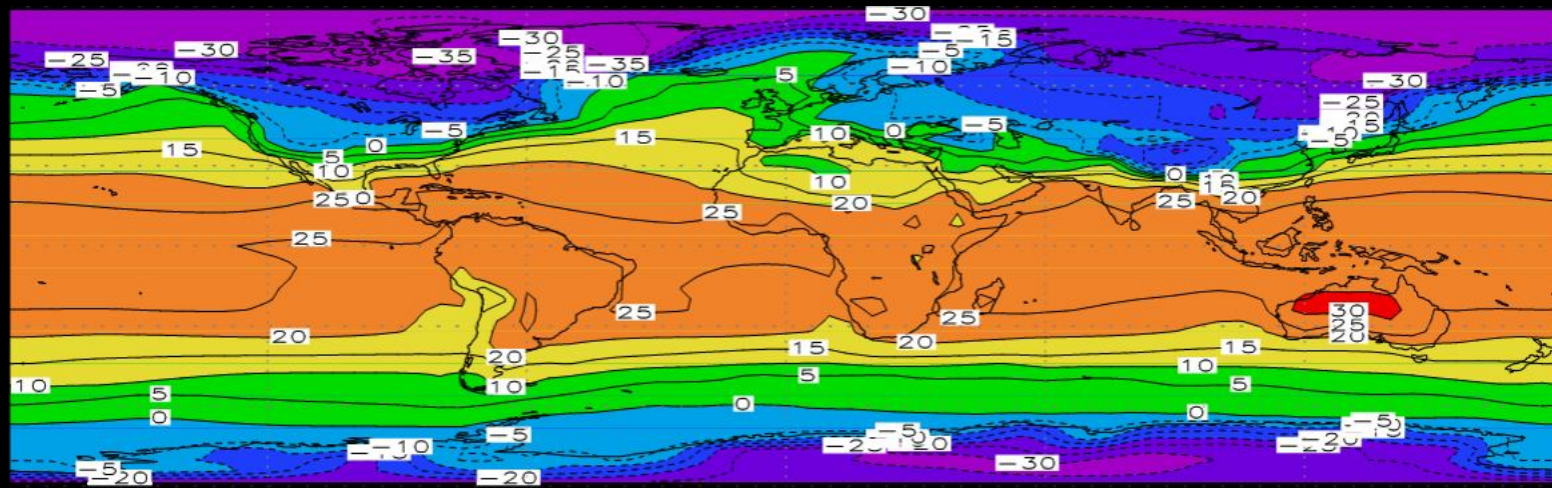
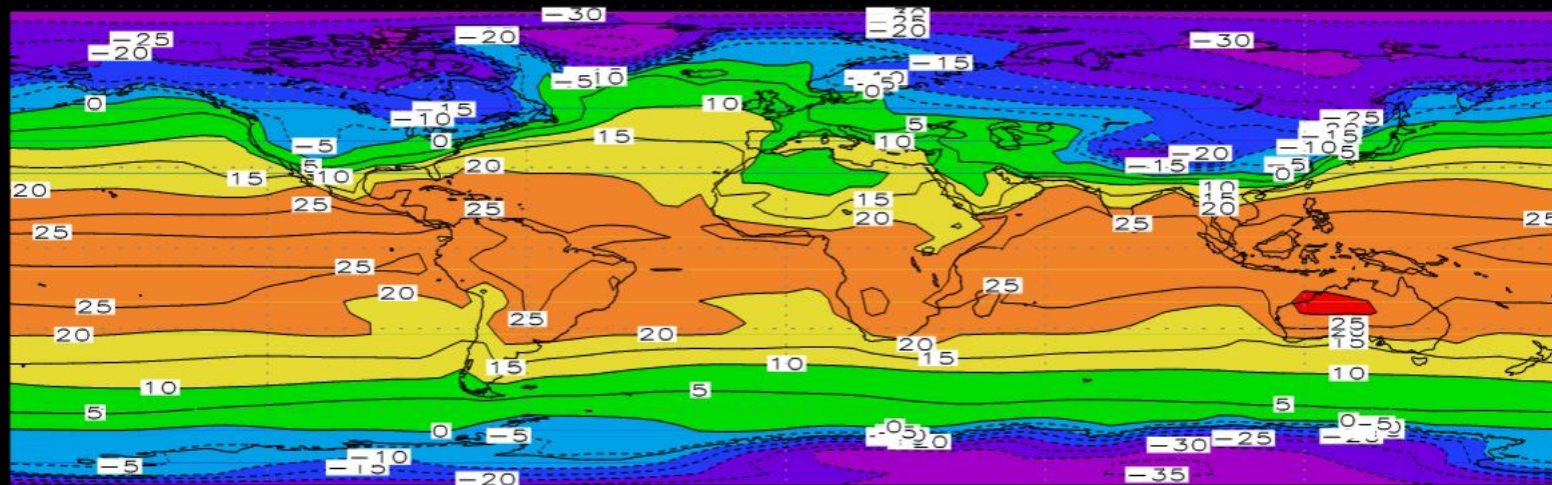


- Если стрелка направлена от А к В и увеличение А приводит к росту В, то имеет место положительная обратная связь, отмеченная на рисунке знаком (+); если же рост характеристики А вызывает уменьшение В, то проявляется отрицательная обратная связь – знак (-); наконец, если изменения в А никак не влияют на В, то обратная связь отсутствует и отмечается знаком (0). Демонстрируемый цикл связей показывает, что реализуется процесс, в котором увеличение некоторой характеристики А вызывает уменьшение параметра В, что в свою очередь приводит к росту характеристики С. Это увеличение С затем обуславливает рост параметра D и в конечном счете к уменьшению величины А. Поскольку произведение $(-)(-)(+)(-)$ = (-), то рассмотренный пример описывает отрицательную обратную связь, заключающуюся в том, что начальное положительное возмущение в характеристике А вызывает последовательность событий, которые приводят к уменьшению этого возмущения).

Влияние обратных связей

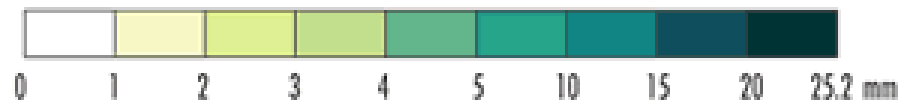
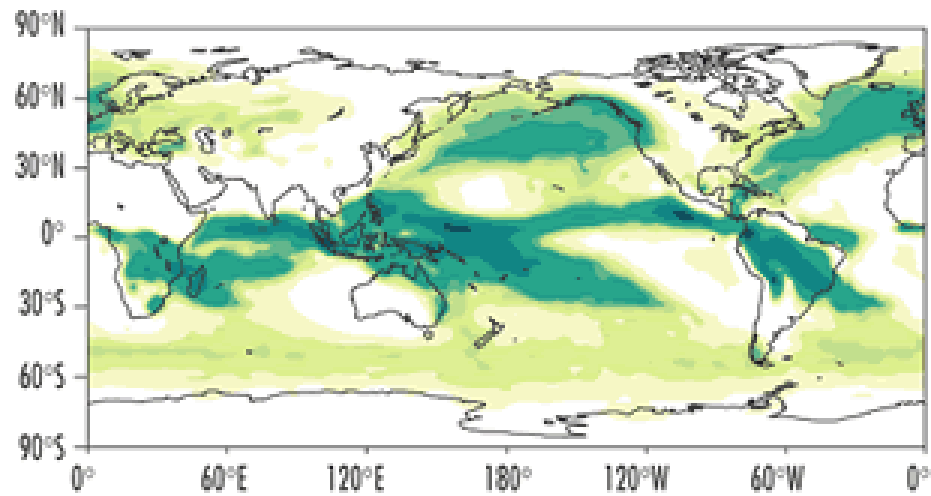


Приповерхностная температура воздуха зимой: модель (верх) и наблюдения (низ)

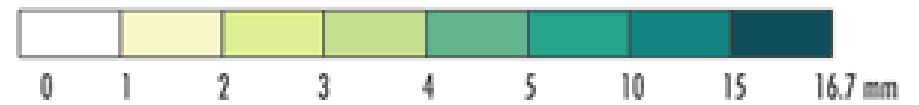
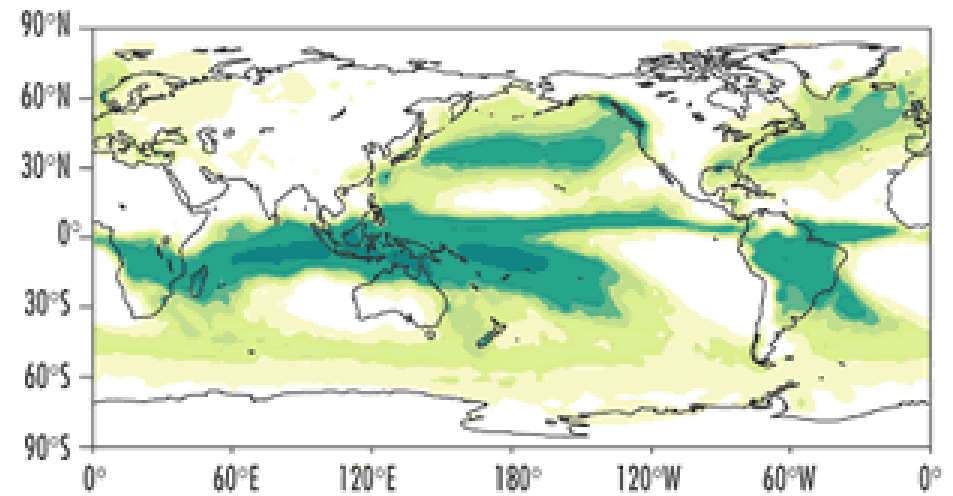


Осадки

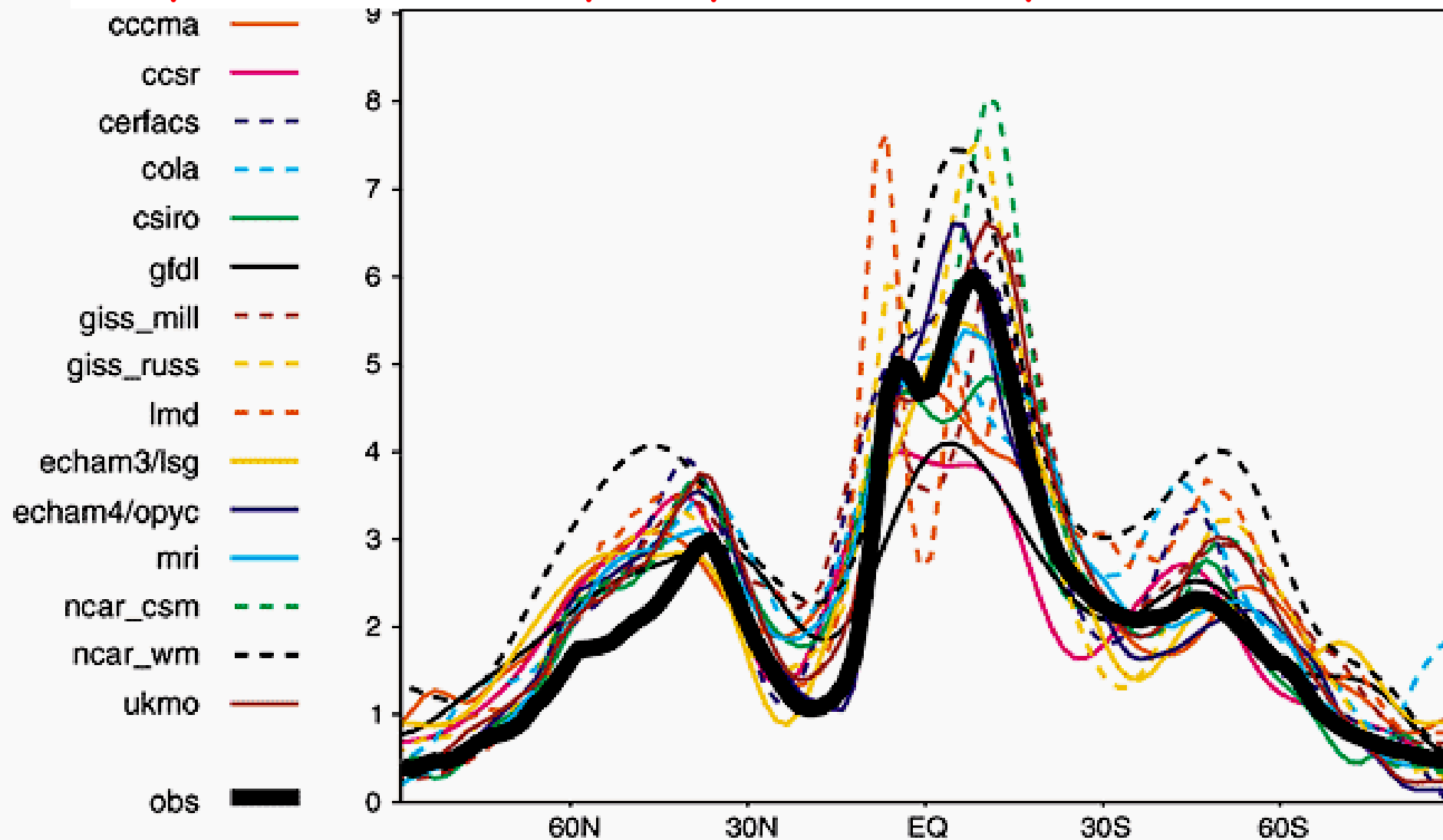
Observed rainfall



Modelled rainfall

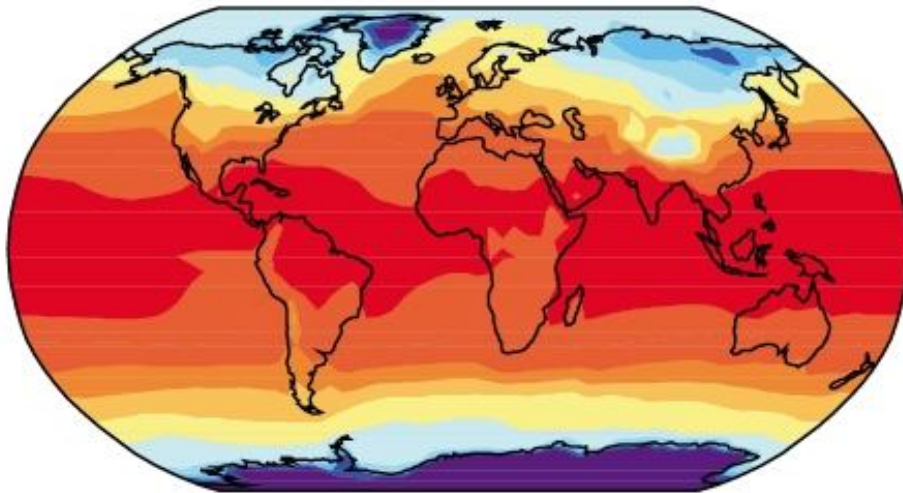


Меридиональное распределение увлажнения

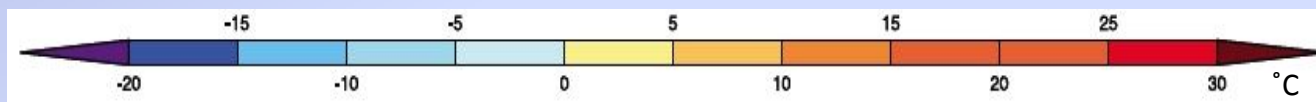
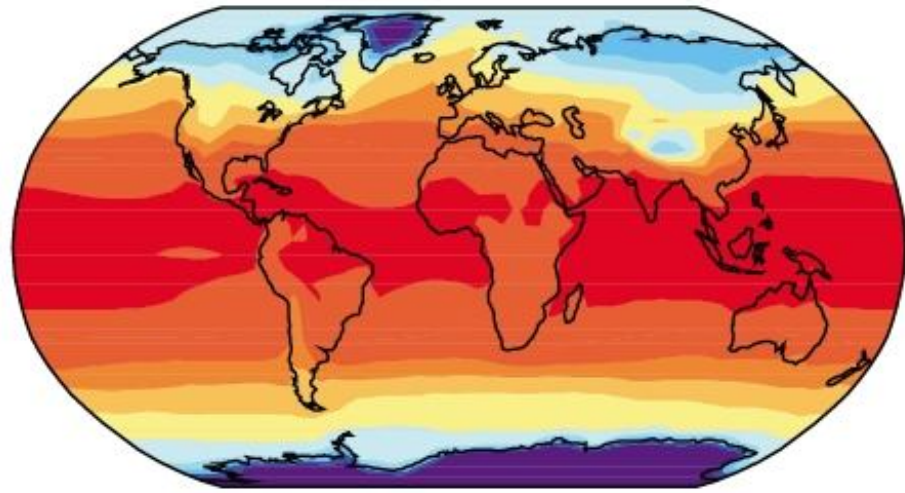


Средняя температура поверхности (1980-1999)

CRU/HadISST



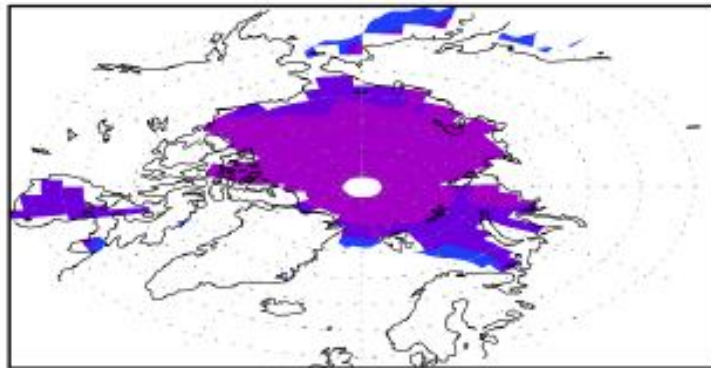
Mean Model



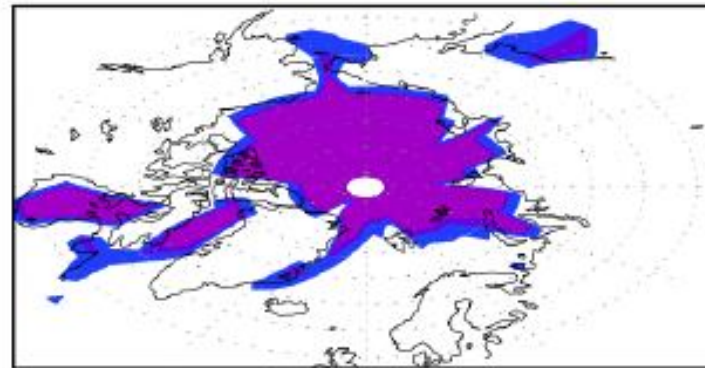
Осреднение по ансамблю из 23 GCM

Средняя сплоченность морского льда в Северном полушарии в марте (вверху) и сентябре (внизу) по результатам модели (слева) и данным наблюдений (справа).

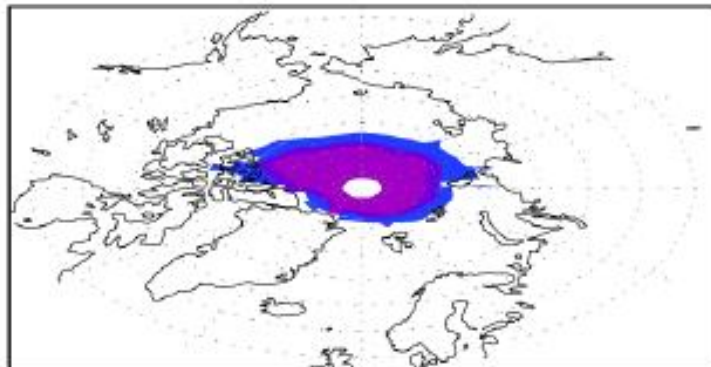
ice 03 mod



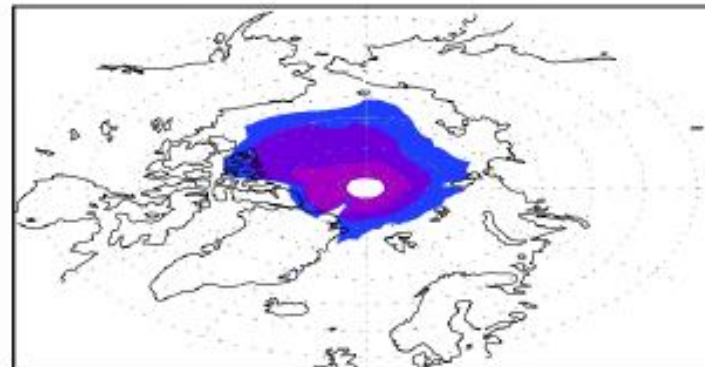
ice 03 obs



ice 09 mod

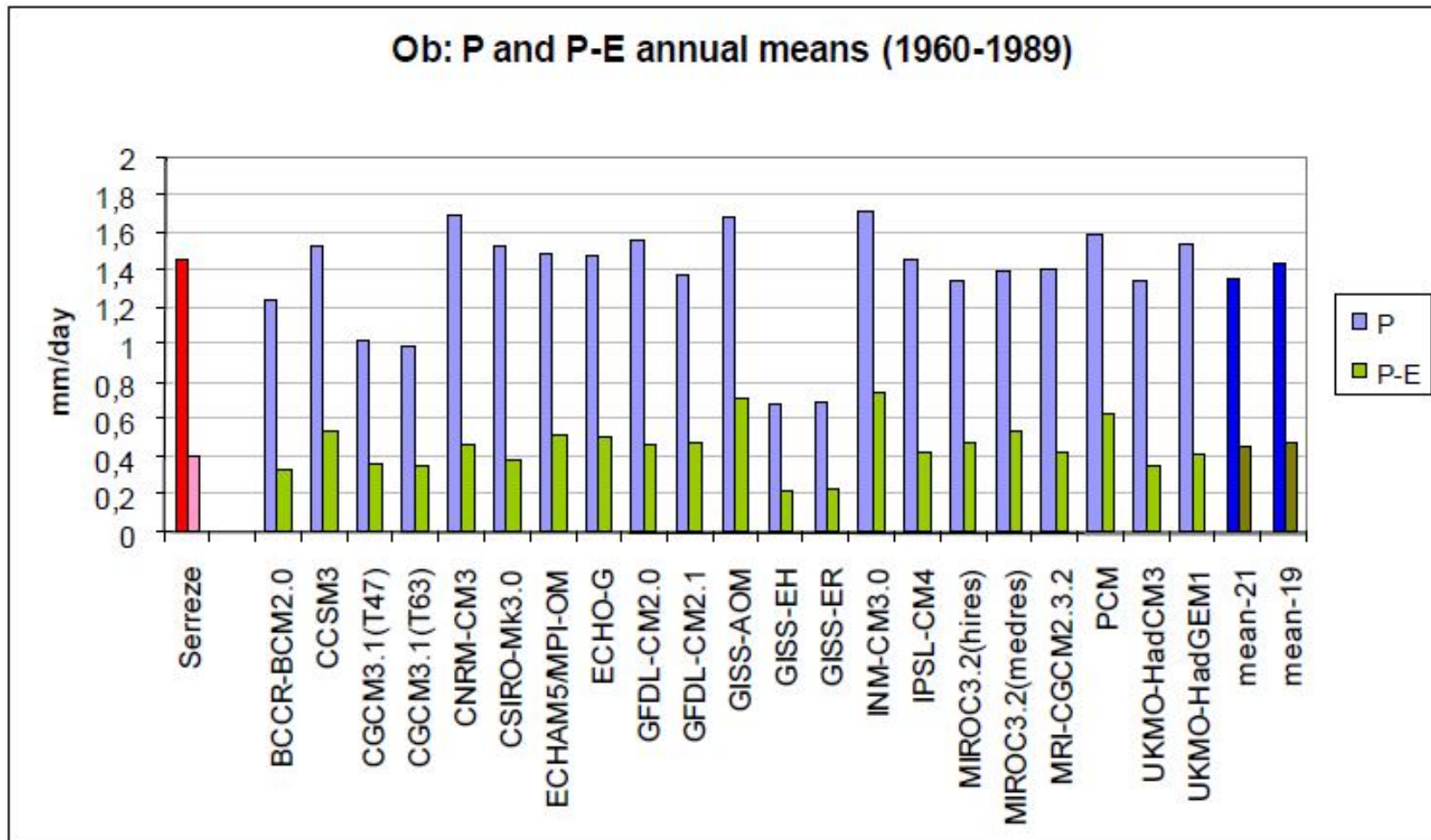


ice 09 obs

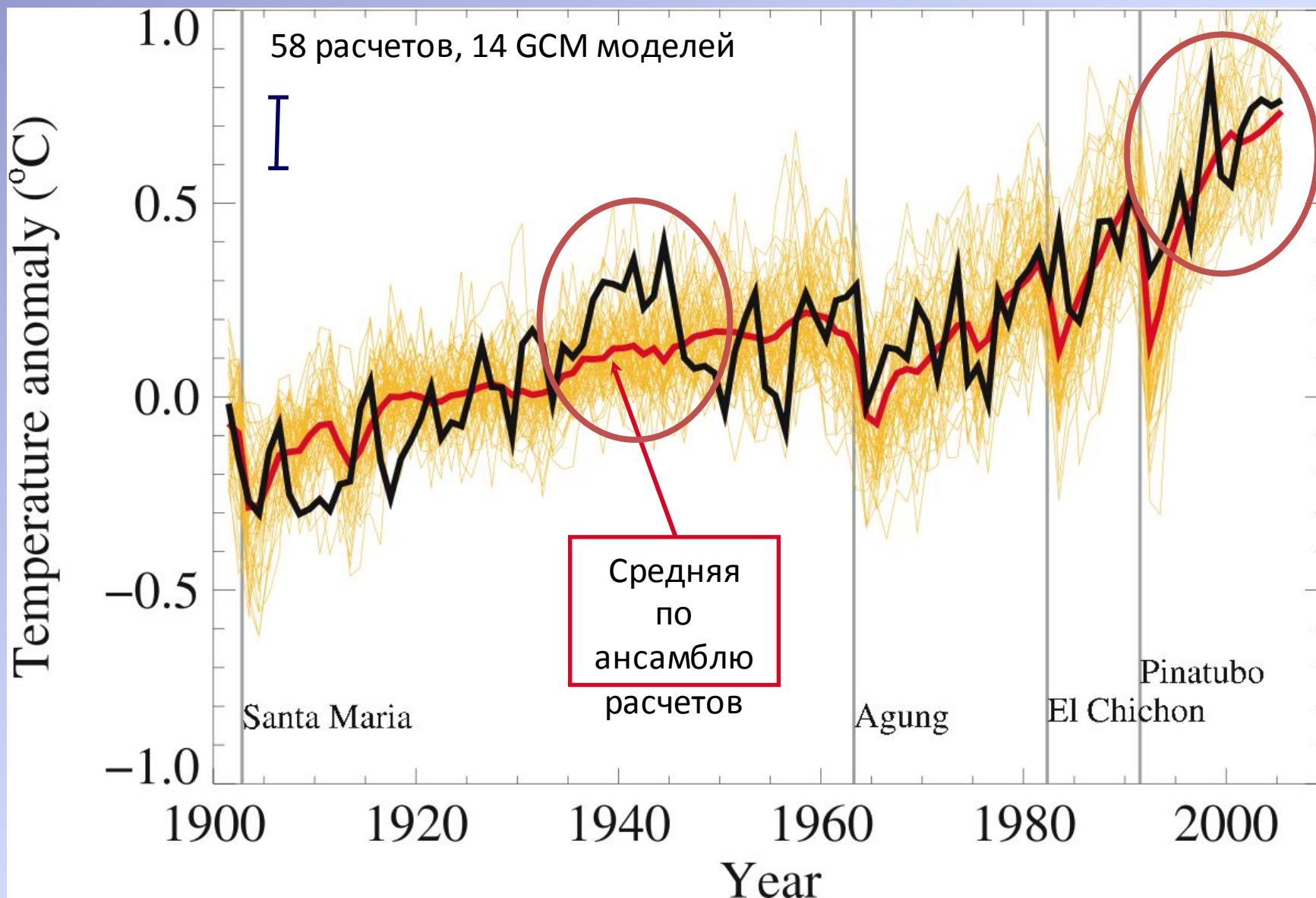


Разность между осадками (P) и испарением (E)

Kattsov V.M., J.E. Walsh, W.L. Chapman, V.A. Govorkova,
T.V. Pavlova, and X. Zhang, 2007



Восстановление глобальной температуры



Сценарии МГЭИК (IPCC)

A1: Мир с быстро растущей экономикой, низким ростом населения и внедрением новых, более эффективных, технологий.

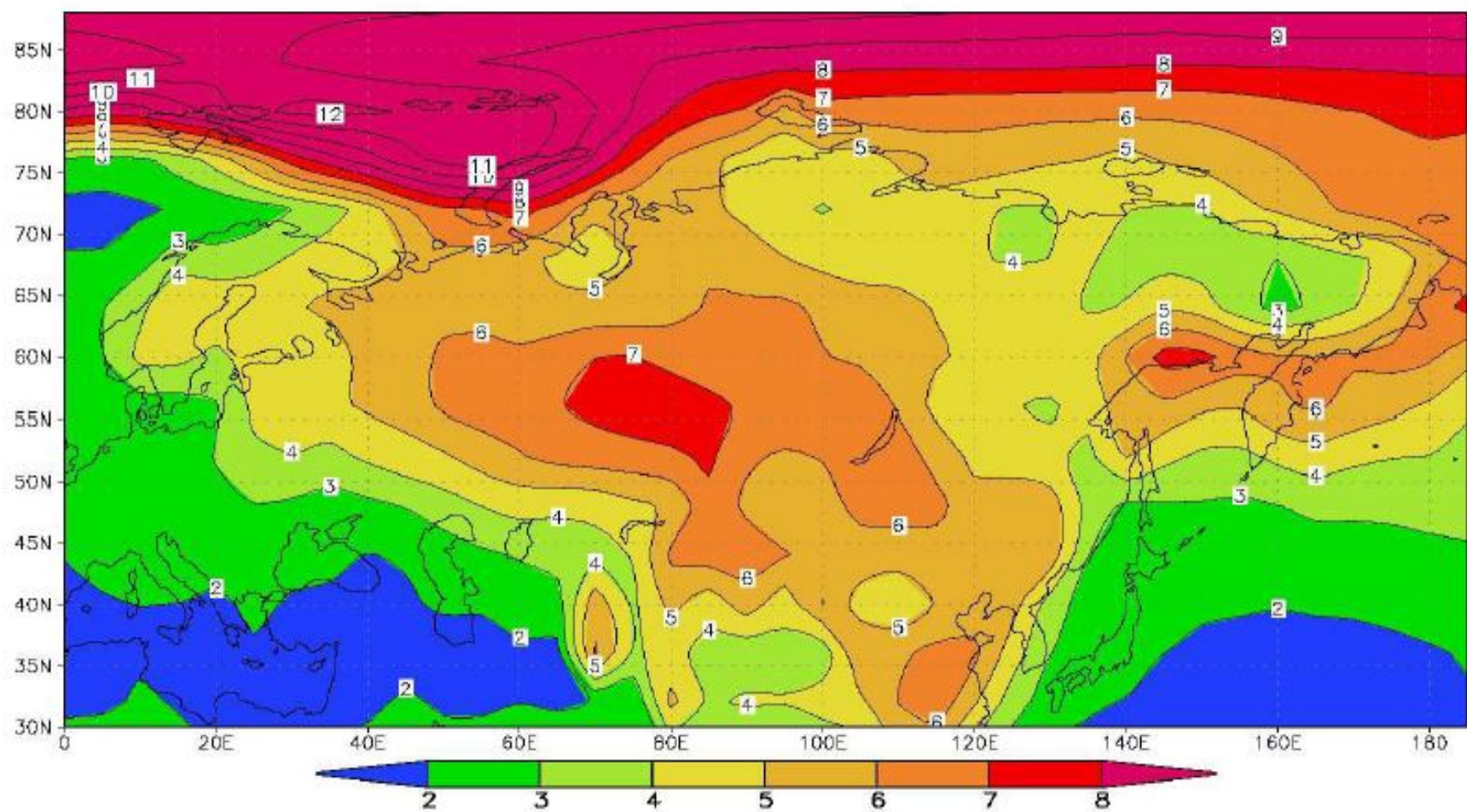
A2: Неоднородный мир; быстрый рост популяции, а экономический рост и смена технологий происходят медленнее, чем по другим сценариям.

B1: Мир с низким ростом популяции, быстрыми изменениями в информационных потоках и экономике, соответствующим чистым технологиям и меньшим нагрузкам на природные ресурсы.

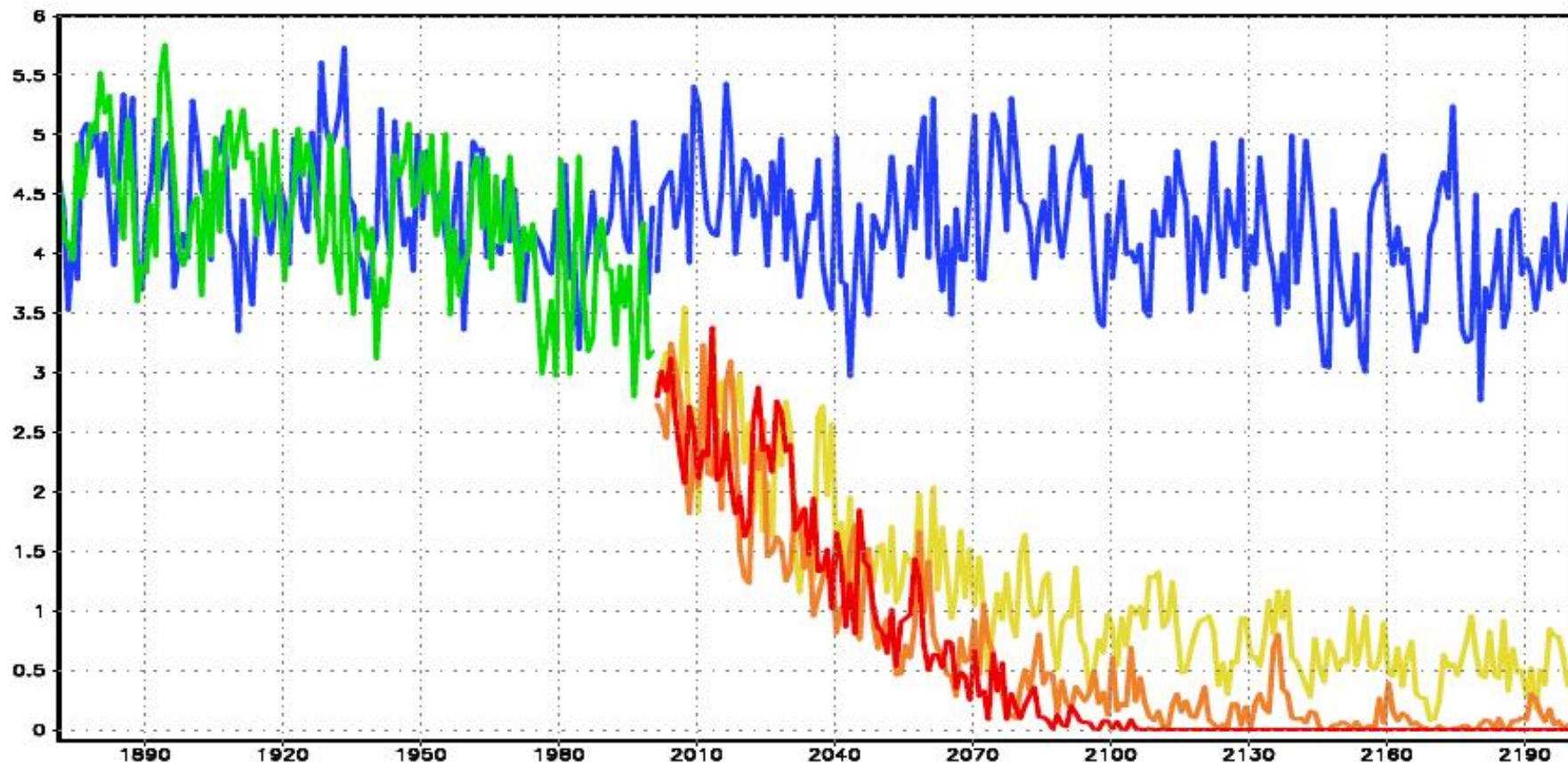
B2: Мир, базирующийся на локальных решениях глобальных проблем; умеренный рост популяции, промежуточные уровни экономического развития и более диверсифицированные технологические изменения по сравнению с сценариями A1 и B1.

A1B: Мир с умеренным использованием ресурсов и сбалансированным использованием технологий.

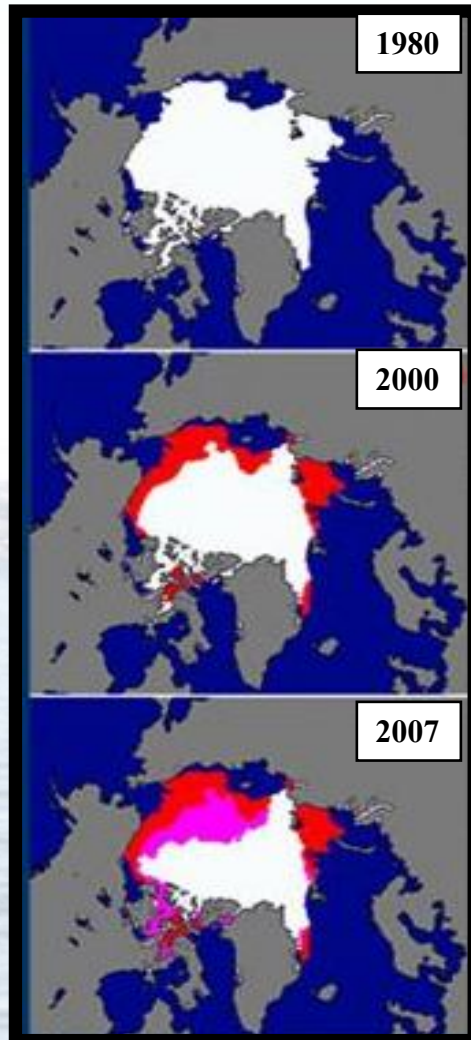
Возможные изменения зимней температуры приземного воздуха в конце XXI века (осредненной за период 2081-2100 гг.) по сравнению с данными для конца XX века (осреднение за 1981-2000 гг.) по результатам модели Института вычислительной математики РАН для сценария A1B



Площадь морского льда в северном полушарии, млн. кв. км в марте (а) и сентябре (б) по данным контрольного эксперимента (голубая кривая), эксперимента по воспроизведению климата XX века (зеленая), экспериментов В1 (желтая), А1В (оранжевая), А2 (красная кривая).

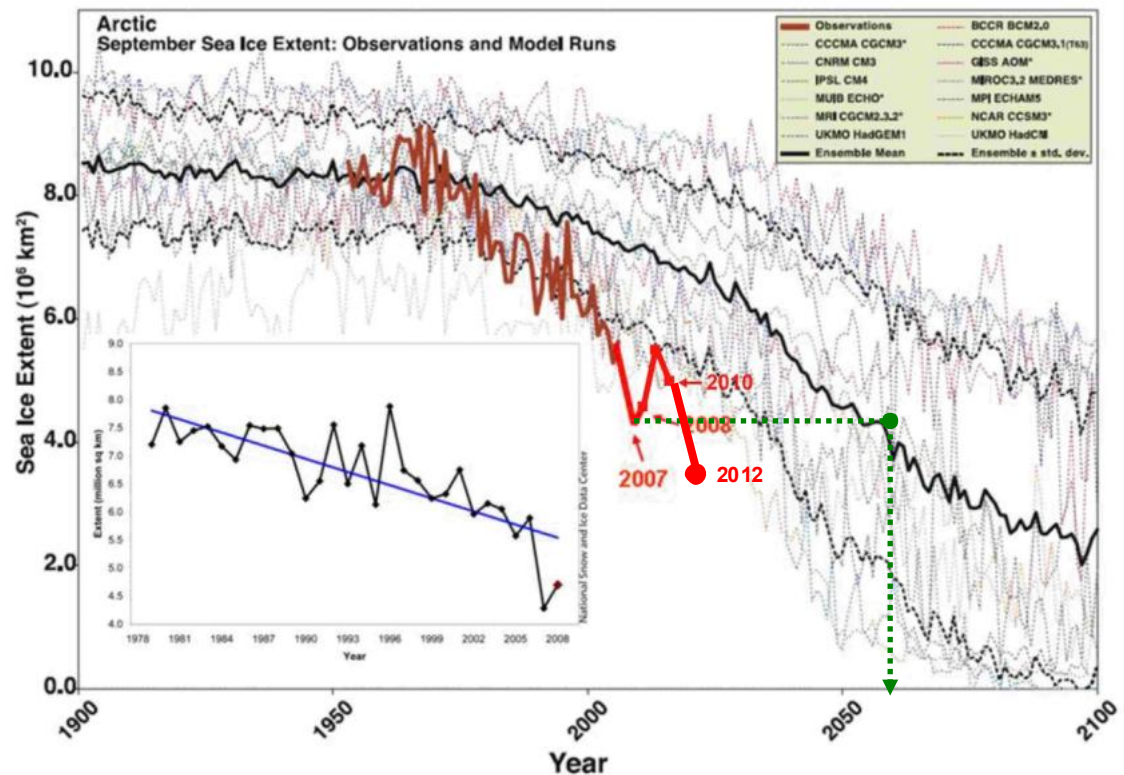


Уменьшение ледовитости СЛО



(from Serreze (by Perovich))

Фактическая площадь ледового покрова в СЛО в 2007 соответствовала среднему по ансамблю прогнозу ГКМ для ~2055 г.

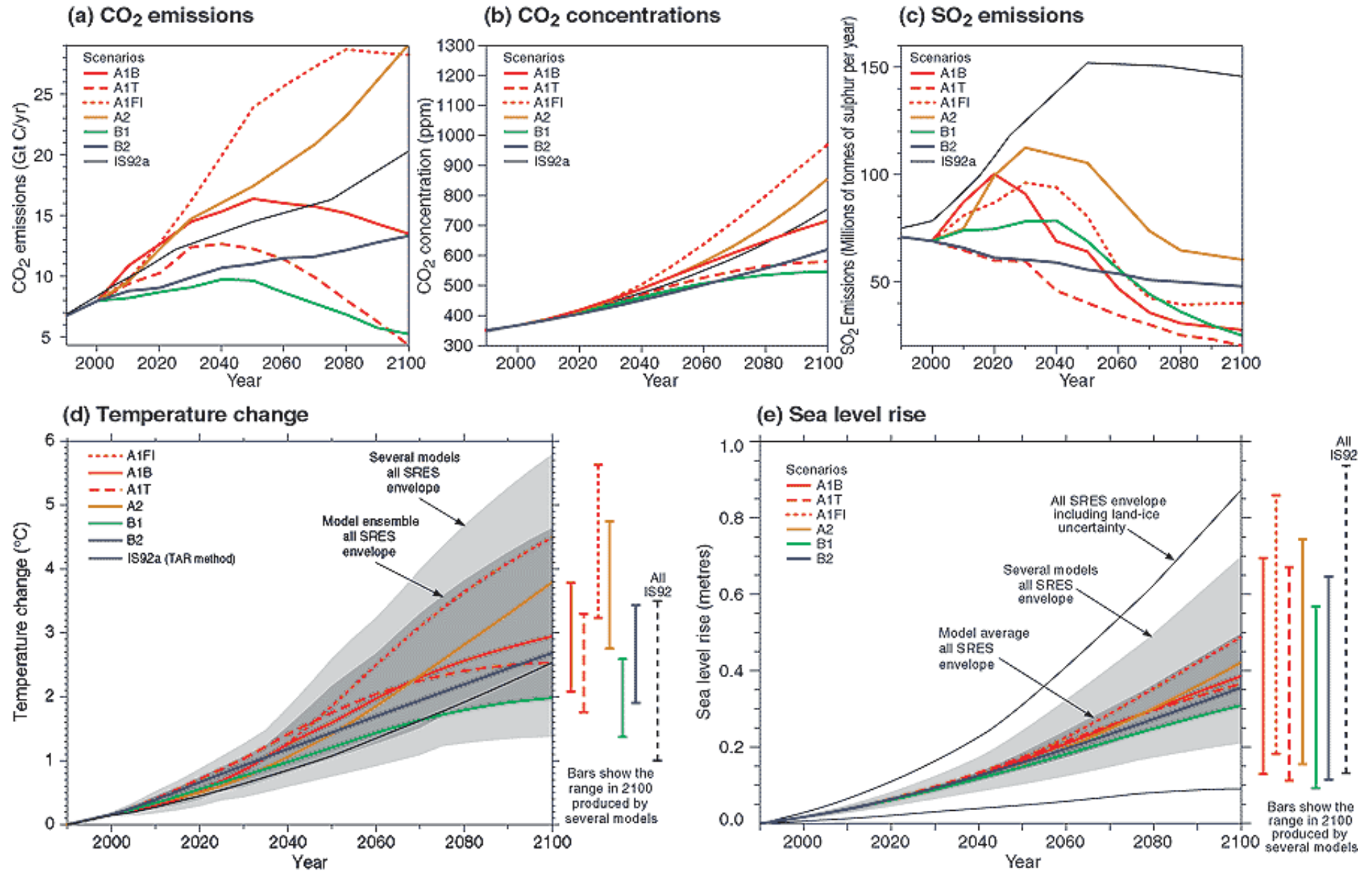


Adapted from Stroeve et al. 2007 GRL

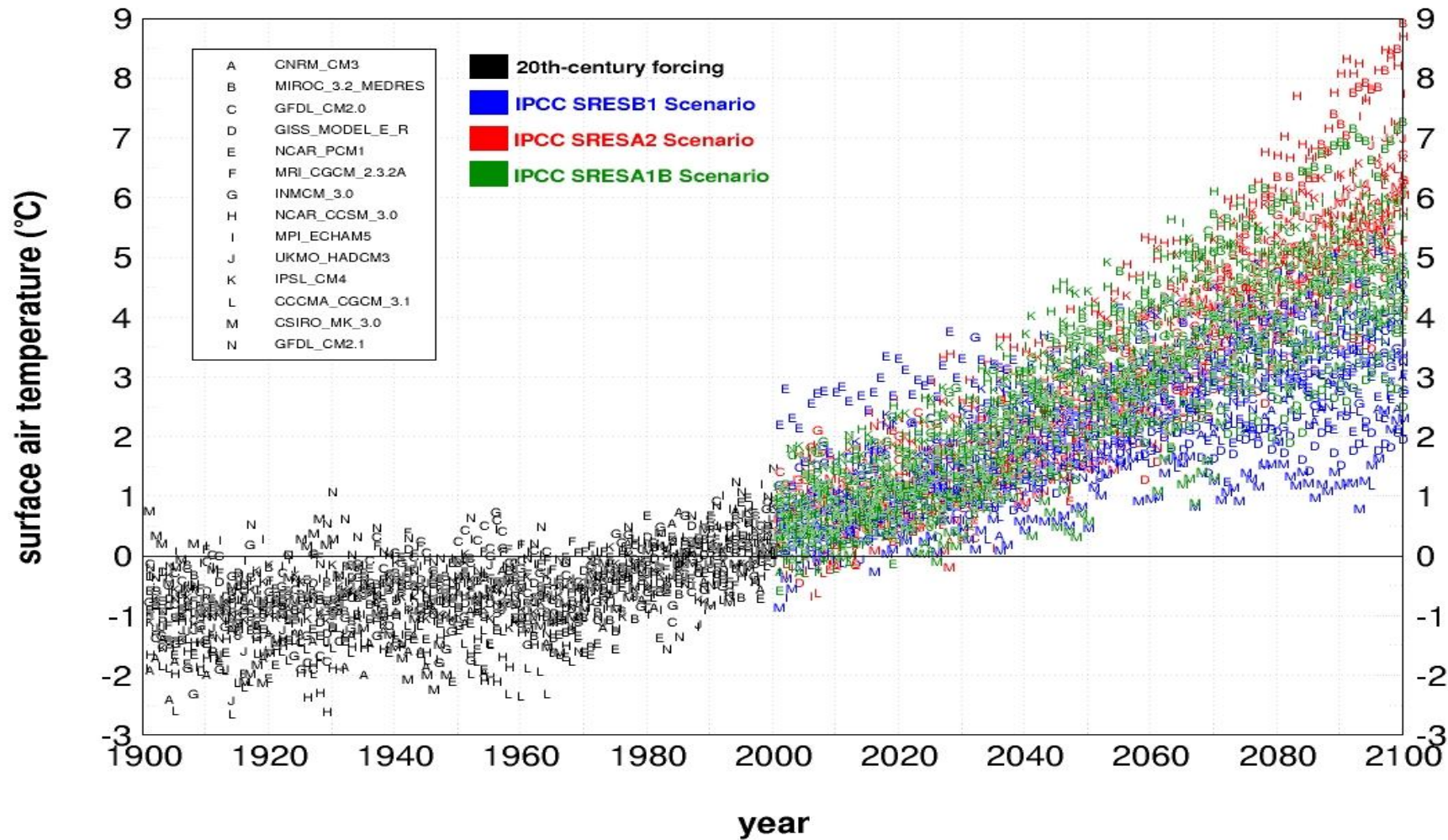
Отклик климатических моделей на удвоение концентрации углекислого газа (Covey et al., 2003)

- Эксперименты со CMIP2-моделями в рамках сценария 1% роста CO₂ в год. Удвоение – за 70 лет.
- Диапазон глобального среднего потепления в разных моделях – относительно узкий (1.5 - 4.5°C).
- Возможно, в силу того, что время отклика системы возрастает с увеличением чувствительности климата (Wigley and Schlesinger 1985).
- Модели с большей чувствительностью (больше потепление за счет удвоения CO₂) дальше от равновесного состояния чем менее чувствительные модели (в каждый конкретный момент времени).
- CMIP2 – модели с большей чувствительностью эффективнее реализуют тепло, поступающее в океана в процессе увеличения концентрации CO₂ (Raper et al. 2001).
- Усиленное потребление тепла океаном «затягивает» процесс потепления его поверхности.
- Разброс в отклике температуры поверхности океана на заданное возмущение меньше, чем неопределенность в прогнозе самого возмущения.
- В то же время, рост модельных осадков сильно отличается между моделями и не проявляет простых связей с модельными температурами.

The global climate of the 21st century

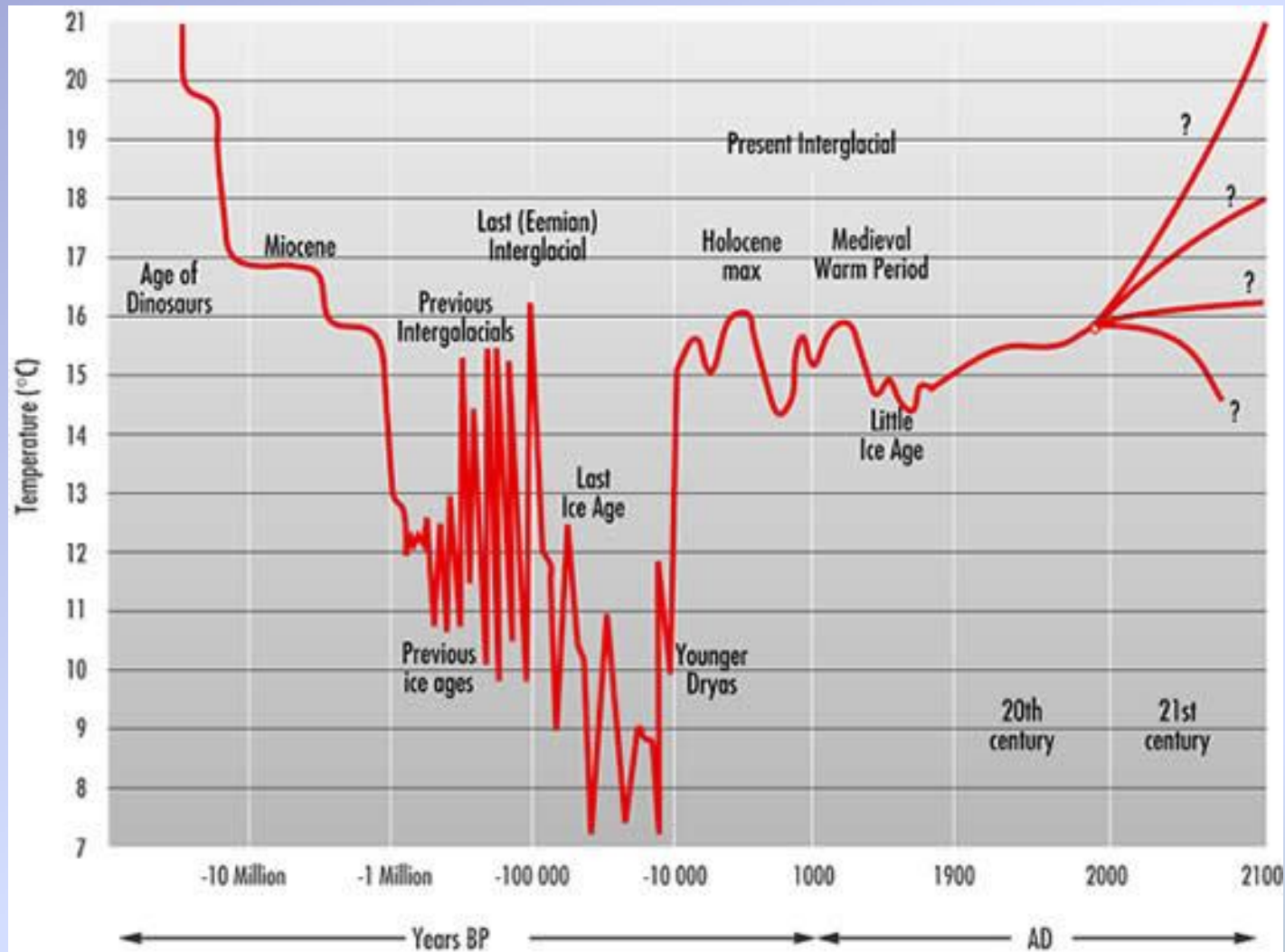


IPCC модели: Изменение температуры Арктики (60-90°N)



IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

И что нас ждет?



Горизонтальное разрешение большинства глобальных климатических моделей, результаты которых использованы при подготовке 4-го отчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2007 г.), составляет примерно 200 км.

Прогресс в развитии супервычислительных систем и технологий ставит перед сообществом специалистов по моделированию климата проблему разработки моделей с типичным размером конечно-разностной сетки достаточным для того, чтобы явным образом описывать мезомасштабные (в диапазоне 2 - 200 км) негидростатические процессы на всем Земном шаре.

Ключевой момент дальнейшего развития климатических моделей: разработка многомасштабных моделирующих систем, одним из критериев качества которых может служить их способность воспроизводить особенности наблюдаемого пространственного спектра кинетической и доступной потенциальной энергии.

Рост мощности современных и будущих вычислительных систем сопровождается существенными изменениями в их архитектуре, в частности, переходом к массивно-параллельным компьютерам, что требует разработки хорошо масштабируемых вычислительных алгоритмов для использования на большом количестве процессорных ядер. Переход к высокому разрешению по всему Земному шару потребует отказа от равномерной сетки в широтно-долготной системе координат.

Потребуется также пересмотр физических параметризаций. В первую очередь, это касается параметризации конвекции, поскольку конвекция начинает воспроизводиться явно при разрешениях несколько километров и менее. В настоящее время уже используется подход, получивший название «суперпараметризация»: в каждой вертикальной колонке, связанной с горизонтальной ячейкой крупномасштабной модели, явно воспроизводится двумерная (в вертикальном сечении) локальная и мезомасштабная динамика течений.

В 1904 г. В.Бьеркнес указал, что для описания атмосферных процессов можно использовать систему 7 уравнений гидротермодинамики с 7 неизвестными:

- закон сохранения трехмерного момента (3 скалярных уравнения движения);
- закон сохранения массы сухого воздуха;
- уравнение состояния идеального газа;
- закон сохранения энергии;
- уравнения для сохранения влажности во всех ее фазах.

Основа – фундаментальные законы физики

1. Закон сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V}\rho) - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z}$$

2. Первый закон термодинамики

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V}\rho\theta) - \frac{\partial w\rho\theta}{\partial z} + \frac{\rho}{C_p} \frac{T}{\theta} \dot{H}$$

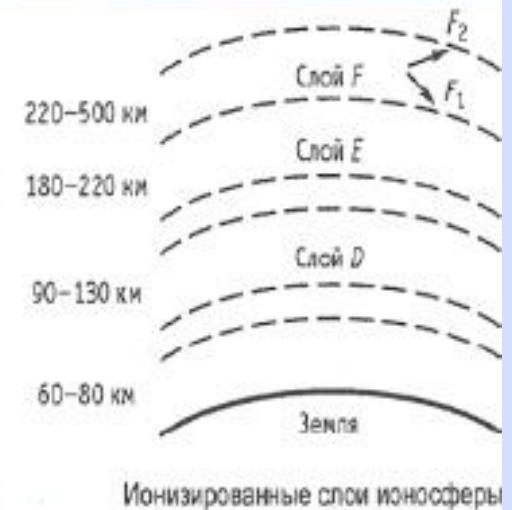
3. Второй закон Ньютона

$$\frac{d_a \vec{V}_{a,3}}{dt} = \sum (\text{Forces/mass})$$

Процессы подсеточных масштабов

- ❑ Неадиабатические источники тепла (радиация, фазовые переходы влаги, облачность, осадки и т.д.)
- ❑ Турбулентность в пограничном слое атмосферы, верхнем слое океана и придонном пограничном слое
- ❑ Конвекция и гравитационные волны
- ❑ Цикл углерода и метана; фотохимические процессы
- ❑ Перенос тепла и влаги в почве, растительном и снежном покрове; гидрологический цикл суши
- ❑

- Нейтральный воздух
 - тропосфера (~ 0-10 км)
 - стратосфера (~ 10-50 км)
- Воздух с заряженными частицами
 - мезосфера (~ 50-90 км) - D-слой ионосферы



Модель общей циркуляции
атмосферы

Гидродинамика и термические процессы

Фотохимическая модель

D-слоя ионосферы

Ионизация, рекомбинация ионов

Математическая постановка задачи

Система уравнений гидротермодинамики атмосферы в сферической системе координат

Уравнение для x-компоненты скорости

$$\frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u}{a}tg\psi\right)v + \frac{1}{a\cos\psi} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial\lambda}\right) = F_u,$$

Уравнение для y-компоненты скорости

$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u}{a}tg\psi\right)u + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\psi} + \frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial\psi}\right) = F_v,$$

уравнение гидростатики

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\eta} = -\frac{RT}{p} \frac{\partial p}{\partial\eta},$$

уравнение притока тепла

$$\frac{dT}{dt} - \frac{RT}{pc_p} \frac{dp}{dt} = F_T + \epsilon,$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} \left(\frac{\partial p}{\partial\eta}\right) + \frac{1}{a\cos\psi} \left[\frac{\partial}{\partial\lambda} \left(u \frac{\partial p}{\partial\eta}\right) + \frac{\partial}{\partial\psi} \left(v \frac{\partial p}{\partial\eta} \cos\psi\right) \right] + \frac{\partial}{\partial\eta} \left(\dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial\eta}\right) = 0,$$

уравнение для влажности

$$\frac{dq}{dt} = F_q - (C - E).$$

$\eta(p, p_s)$ – гибридная вертикальная координата, основанная на давлении.

Параметризации:

- перенос коротковолновой и длинноволновой радиации
- конденсация и испарение влаги
- сопротивление гравитационных волн
- турбулентная вязкость и диффузия
- глубокая и мелкая конвекция
- процессы в почве и растительности (граничные условия для атмосферы)

Численная сетка и параллельная реализация:

- 2° по широте, 2.5° по долготе
- 80 вертикальных уровней
- шаг по времени $\Delta t = 2$ мин
- реализация на MPI, 32-48 ядер

Модель фотохимических процессов

Рассматривается 4 иона и свободные электроны:

$$\phi_1 = [NO^+], \phi_2 = [NO^+(H_2O)], \phi_3 = n_e, \phi_4 = [O_2^-], \phi_5 = [O_3^-] + [O_4^-].$$

Уравнения переноса-диффузии-реакции :

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \phi_i) = \nabla \cdot (k \nabla \phi_i) + R_i, \quad i = 1, \dots, 5$$

Рассматриваются 17 фотохимических реакций.

Соответствующие тенденции имеют вид:

$$\frac{d\phi_1}{dt} = P - B\phi_1 - k_{13}\phi_1\phi_3 - k_c\phi_1(\phi_4 + \phi_5),$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = B\phi_1 - k_{23}\phi_2\phi_3 - k_c\phi_2(\phi_4 + \phi_5),$$

$$\frac{d\phi_3}{dt} = P - k_{13}\phi_1\phi_3 - k_{23}\phi_2\phi_3 - k_3\phi_3 + k_4\phi_4,$$

$$\frac{d\phi_4}{dt} = k_3\phi_3 - (k_4 + k_5)\phi_4 - k_c\phi_4(\phi_1 + \phi_2),$$

$$\frac{d\phi_5}{dt} = k_5\phi_4 - k_c\phi_5(\phi_1 + \phi_2).$$

Некоторые свойства системы:

- положительная определенность решения
- система диссипативна
- система имеет поглощающее множество

Конечно-разностная схема:

- полунявная схема (быстрые реакции - неявно, быстрые - явно)
- сохранение суммарного заряда
- неотрицательность решения

- Система климатических уравнений содержит в качестве своего решения не только медленные синоптические процессы, но и быстрые гравитационные и звуковые волны. Поэтому соответствующая конечно-разностная схема требует или небольшого шага по времени или исключения этих волн.
- Например, если шаг сетки по горизонтали более 10 км, то можно в третьем скалярном уравнении движения

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} - g + F_r + \left(2\Omega + \frac{u}{r \cos\varphi}\right) u \cos\varphi + \frac{v^2}{r}$$

оставить только градиент давления и силу тяжести, т.е. перейти к гидростатическому приближению

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = -g \cdot$$

- Так как остальные уравнения не упрощаются, то модель атмосферы, описываемая такой системой принято называть *квазигидростатической*. Показано, что квазигидростатичность сохраняет правильное описание медленных атмосферных процессов, но позволяет устранить (отфильтровать) внутренние акустические волны и несколько исказить внутренние гравитационные волны, особенно распространяющиеся в горизонтальном направлении.

- Если шаг сетки по горизонтали менее 10 км, то третье скалярное уравнение движения необходимо использовать без упрощений, в этом общем случае модель атмосферы принято называть *негидростатической*. Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды используют негидростатические модели атмосферы, в то время как системы оперативного глобального прогноза погоды пока в основном используют квазигидростатические модели атмосферы.

Уравнения мезомасштабной гидротермодинамики атмосферы

$$\frac{\partial u p_s}{\partial t} + \frac{\partial u^2 p_s}{\partial x} + \frac{\partial v u p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} u p_s}{\partial \sigma} = -p_s \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \sigma \frac{\partial p_s}{\partial x} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + f v p_s + p_s (D_u + R_u),$$

$$\frac{\partial v p_s}{\partial t} + \frac{\partial v u p_s}{\partial x} + \frac{\partial v^2 p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} v p_s}{\partial \sigma} = -p_s \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \sigma \frac{\partial p_s}{\partial y} \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} - f u p_s + p_s (D_v + R_v),$$

$$\frac{\partial \tilde{w} p_s}{\partial t} + \frac{\partial u \tilde{w} p_s}{\partial x} + \frac{\partial v \tilde{w} p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} \tilde{w} p_s}{\partial \sigma} = -S_v p_s \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} + p_s g \left(\frac{\theta'}{\theta_s} - q_r \right) + p_s (D_w + R_w),$$

$$\frac{\partial \theta' p_s}{\partial t} + \frac{\partial u \theta' p_s}{\partial x} + \frac{\partial v \theta' p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} \theta' p_s}{\partial \sigma} = -S_v \tilde{w} p_s \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} + p_s \frac{L_v}{c_p} \left(\frac{p_0}{p} \right)^k (C - E) + p_s (D_\theta + R_\theta),$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{\partial u p_s}{\partial x} + \frac{\partial v p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} p_s}{\partial \sigma} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 \phi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi'}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial \sigma} S(\sigma) \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma} = F \right)$$

$$\frac{\partial q_v p_s}{\partial t} + \frac{\partial u q_v p_s}{\partial x} + \frac{\partial v q_v p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_v p_s}{\partial \sigma} = p_s (E - C) + p_s (D_{q_v} + R_{q_v}),$$

$$\frac{\partial q_c p_s}{\partial t} + \frac{\partial u q_c p_s}{\partial x} + \frac{\partial v q_c p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_c p_s}{\partial \sigma} = p_s (C - A - C_L) + p_s (D_{q_c} + R_{q_c}),$$

$$\frac{\partial q_r p_s}{\partial t} + \frac{\partial u q_r p_s}{\partial x} + \frac{\partial v q_r p_s}{\partial y} + \frac{\partial \dot{\sigma} q_r p_s}{\partial \sigma} = p_s (A + C_L - E) - g \frac{\partial \rho V_r q_r}{\partial \sigma} + p_s (D_{q_r} + R_{q_r}).$$

Современные системы оперативного прогноза погоды состоят из 6 полностью равноправных подсистем:

- наблюдательная подсистема,
- телекоммуникационная подсистема,
- вычислительная подсистема,
- подсистема усвоения данных,
- подсистема моделирования процессов в атмосфере, почве и океане,
- подсистема постпроцессинга.

Плохая работа или плохое использование любой из этих подсистем ухудшает качество прогноза погоды, даже если идеально работают все остальные подсистемы. В этом смысле и понимается полноправность подсистем.

В настоящее время во всех крупных прогностических центрах мира основой технологии прогноза погоды является крупномасштабная (как правило, глобальная) гидродинамическая модель с постепенно, уменьшающимся, но все еще достаточно грубым пространственным разрешением.

Свойства оперативных глобальных моделей атмосферы

Страна, Система или модель	ПРОГНОЗ: схема, количество уровней; шаг сетки, заблаговременность прогноза (сутки)	АНСАМБЛЬ: схема, кол-во уровней; кол-во членов ансамбля, шаг сетки (км), заблаговременность прогноза (сутки)	Вычислительная система, состав, пиковая производительность Тфлопс
ECMWF, IFS	T _L 799 L91; 25км, 10 суток	T _L 399 L62; 51; 50км, 0-10 сут T _L 255 L62; 51; 60км, 11- 15 сут	IBM p690, 2x68 узлов, 20
Великобритания, UM	KP, L50; 40км, 6	L38; 24; 90км, 15	NEC SX6, 34 узла; NEC SX8 16 узлов, 4
Германия, GME	KP, L40; 40км, 7	-----	IBM p690; 2x52 узлов, 2x3.1
Россия, CM	T85 L31, 150км, 10	-----	Itanium 4x4; 0.1
США, GFS	T382 L64; 52км, 0-7 T190 L64; 104км, 7-16	T126 L28, 45; 160км, 16 суток	IBM p655 (Cluster 1600), 7.8
Франция, ARPEGE IFS (EC)	T _L 358 L41; 23-133км, 0-4 T _L 511 L60; 40км, 4-7	T _L 358 L41, 11; 23-133км; 2.5 суток	Fujitsu VPP5000, 31 процессор, 1.2
Япония GSM	TL319 L40; 56 км, 9	T159 L40; 51; 112 км, 9 суток	HITACHI 11000/K1, 2×80 узлов×16 пр, 21

Существует три подгруппы мезомасштабных процессов:

- α - мезомасштаб (200 км -2000 км),
- β - мезомасштаб (20 км -200 км),
- γ - мезомасштаб (2 км -20 км).

Для описания волны требуется интервал, не менее 4 шагов сетки. Поэтому, строго говоря, к α – мезомасштабным моделям атмосферы можно отнести модели с шагами сетки не более 50 км, к β - мезомасштабным моделям атмосферы - с шагами сетки не более 5 км и, наконец, γ - мезомасштабным моделям атмосферы - с шагами сетки не более 500 м.

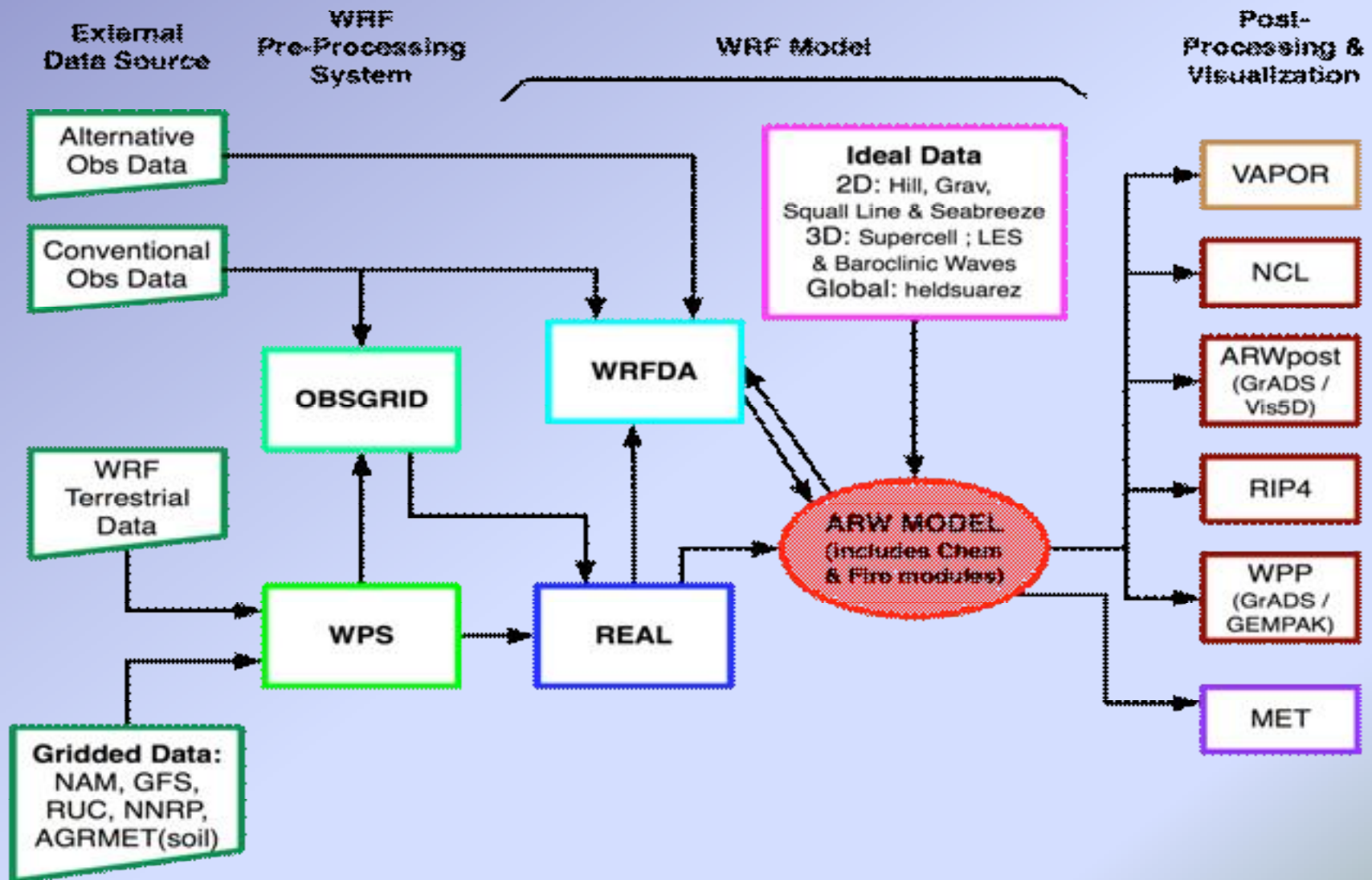
Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды основываются на работе совместно с системой глобального прогноза погоды. А именно, подсистема глобального моделирования процессов в атмосфере, почве и океане должна поставлять начальные и прогностические данные на боковых границах области мезомасштабного прогноза и поле начального приближения для восстановления начального поля по данным наблюдения, если не существует соответствующая подсистема усвоения данных.

История развития модели WRF

- В США работы над негидростатическими моделями, ориентированными на воспроизведение достаточно широкого круга мезомасштабных атмосферных процессов, начались примерно в 1977 году, но не в метеорологической службе, как в Европе, а в университетах или **Национальном центре по исследованию атмосферы (NCAR, National Center for Atmospheric Research), который является междуниверситетской организацией.** Практически одновременно и параллельно развивались две наиболее известные негидростатические системы: RAMS и MMN. Первая из них была разработана в Университете шт. Колорадо. Сокращение RAMS происходит от Regional Atmospheric Modeling System. Второе сокращение никогда не встречается, буква N поставлена здесь вместо номера, который менялся с годами, начиная с N = 1 до N = 5. В последние 15 лет наращивание номеров прекратилось и название модели застыло на **MM5**: Mesoscale Model 5 (модель пятого поколения). В дальнейшем менялись только номера версий.

- На протяжении последних 15 лет модель MM5 широко распространилась по всему миру.
- Интересно отметить, что в самих США модель MM5 никогда не имела статуса оперативной модели **NCEP (National Centers for Environmental Prediction)**, в то время как используется во многих странах для составления оперативных краткосрочных прогнозов в метеорологических службах.
- Модель MM5 послужила прародительницей для модели WRF-ARW. Здесь WRF является сокращением от Weather Research and Forecasting, а ARW – сокращением от Advanced Research WRF. Первое из этих сокращений создает объединяющее начало для двух динамических ядер: ARW, разработанного в NCAR, и NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), разработанного в NCEP. Предполагается, что в будущем это будет единая прогностическая система, в которой можно обращаться к различным динамическим ядрам (ARW или NMM) и к одному и тому же набору параметризаций. В настоящее время обе модели представляют собой по существу отдельные прогностические системы, требующие самостоятельной процедуры установки, хотя в них имеется достаточно много общих элементов.

WRF Modeling System Flow Chart



Использование вложенных сеток

В модели WRF имеется возможность использования вложенных сеток. При этом в настоящее время существуют следующие ограничения. Вложения могут производиться только в горизонтальной плоскости, поэтому по вертикали область расчетов должна быть одинаковой на всех сетках. Вложенные сетки должны быть ориентированы точно так же, как и материнская сетка и, наконец, шаг каждой дочерней сетки должен быть в целое число раз меньше, чем шаг родительской сетки. Имеется также возможность решения задачи на подвижной сетке.

Современные системы оперативного мезомасштабного прогноза погоды

В настоящее время в Европе метеослужбы разделились на несколько групп для эксплуатации и усовершенствования оперативных систем мезомасштабного прогноза погоды:

- ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) – основой являются разработки метеослужбы Франции; внутри группы ALADIN страны центральной Европы (Австрия, Венгрия, Румыния, Словакия, Словения, Чешская республика, Хорватия) создали подгруппу LACE (Limited Area modelling in Central Europe) с региональным центром в Праге;
- COSMO (COnsortium for Small-scale MOdelling) – основой являются разработки метеослужбы Германии (с 2007 сюда входит и Россия);
- HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) – основой являются совместные разработки метеослужб скандинавских стран и Испании, при этом с самого начала создания этой группы Франция принимает участие на уровне научных разработок.

Мезомасштабные модели (MM5, WRF)

Гидродинамика

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

$$\frac{dv}{dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_v$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_w$$

$$C_p T \frac{d \ln \theta}{dt} = \varepsilon + F_\theta$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

$$p = \rho R T$$

Физика

Микрофизика облаков + осадки

Параметризация конвективных процессов

Поверхностный слой

Планетарный пограничный слой

Радиационный блок

Модель подстилающей поверхности

Мезомасштабные явления

- Горно-долинная и бризовая циркуляция
- Тропические циклоны
- Атмосферные фронты

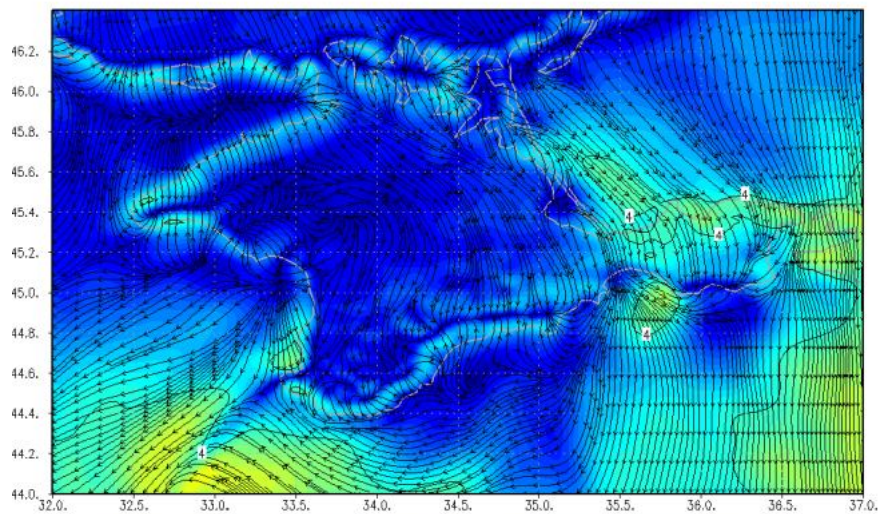
Эффекты орографии

- Волны Ли
- Склоновые ветра
- Вихри Ли
- Анабатические и кататические ветра
- Дренажные ветра

Бризовая циркуляция над Крымом, скорость ветра, 10м

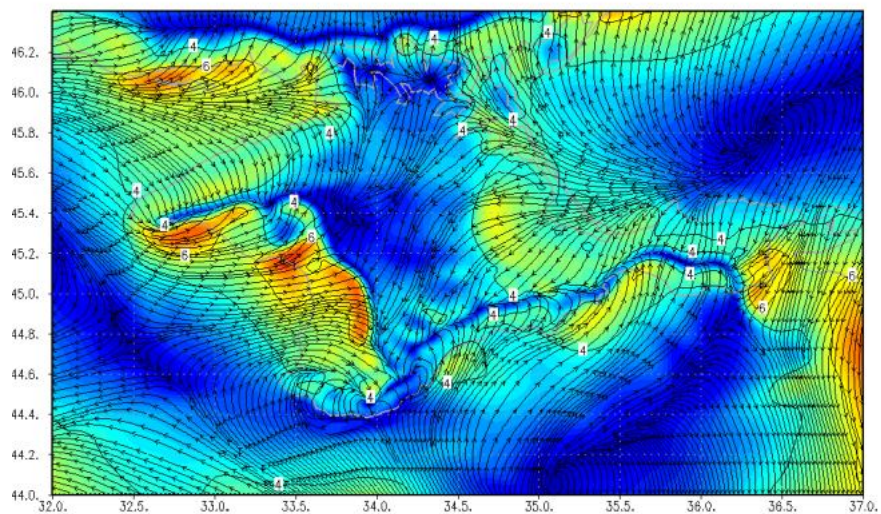
08Z

wind, m/s, 10m



14Z

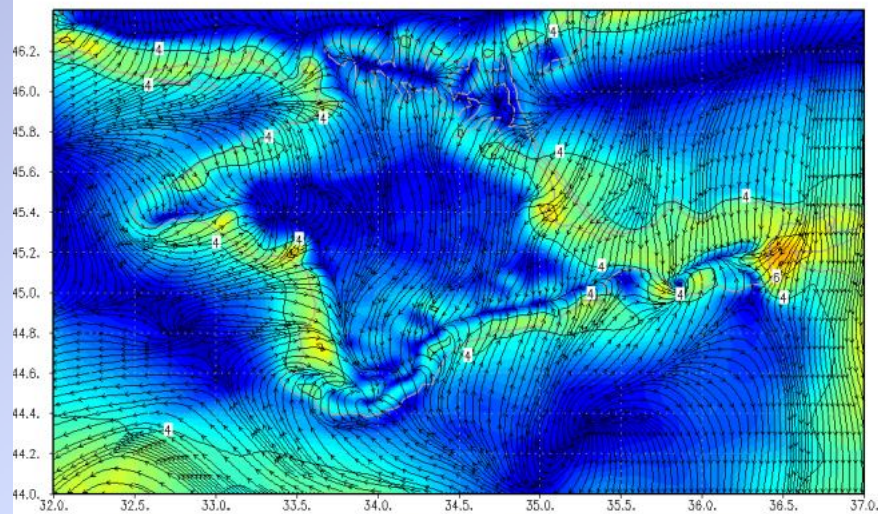
wind, m/s, 10m



0 1.25 2.5 3.75 5 6.25 7.5 8.75 10 11.2 13

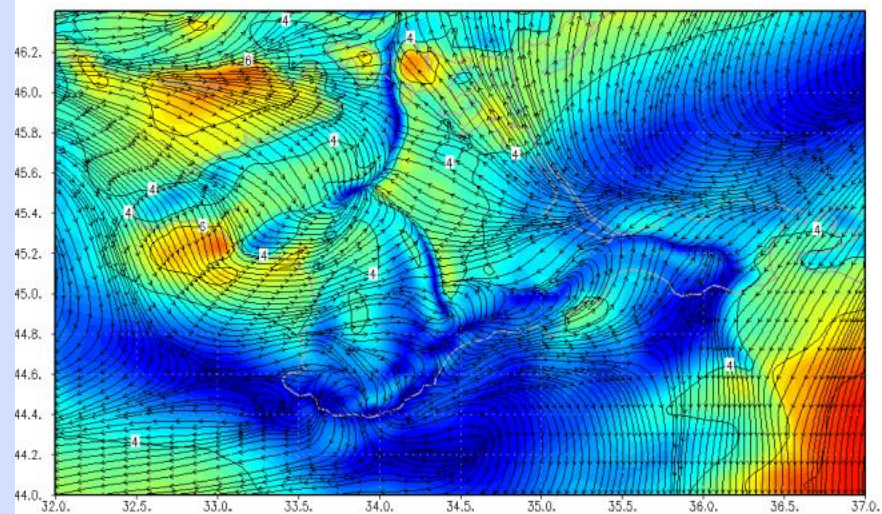
11Z

wind, m/s, 10m

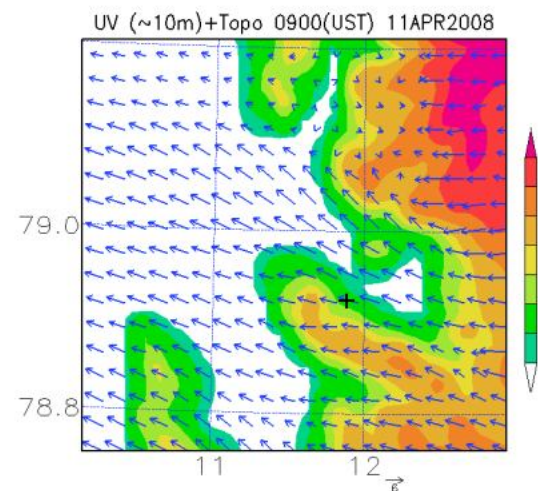
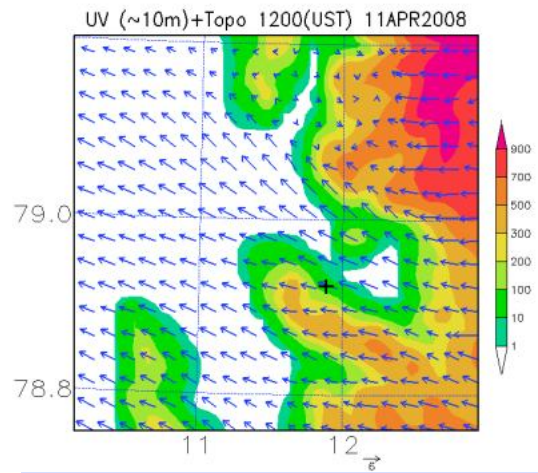
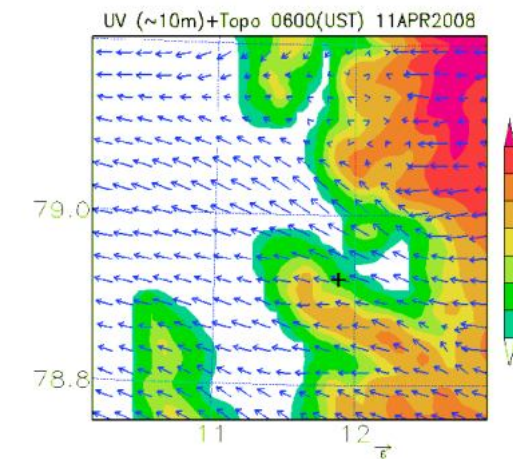
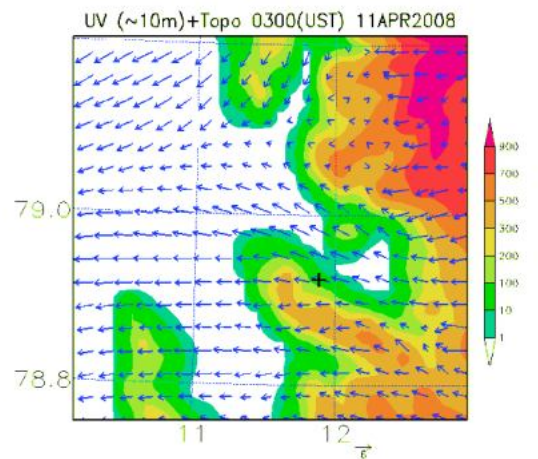
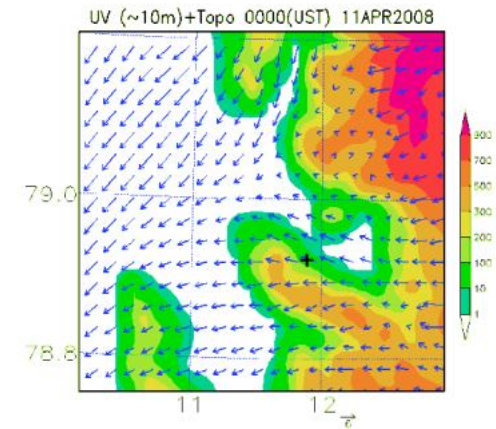
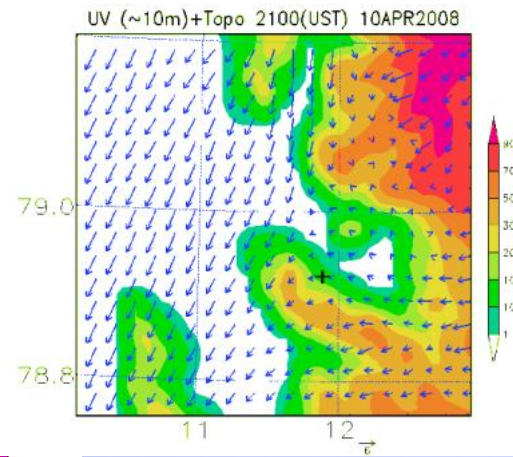
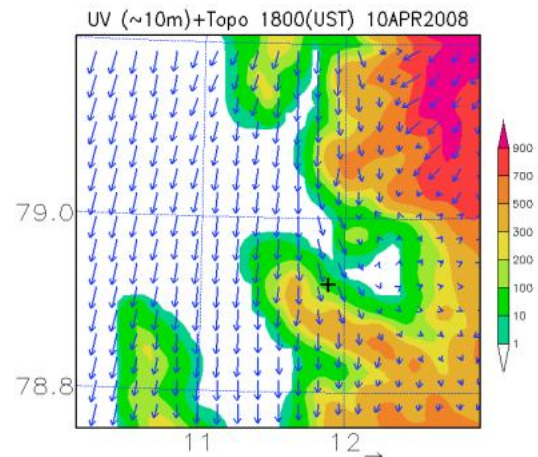


17Z

wind, m/s, 10m

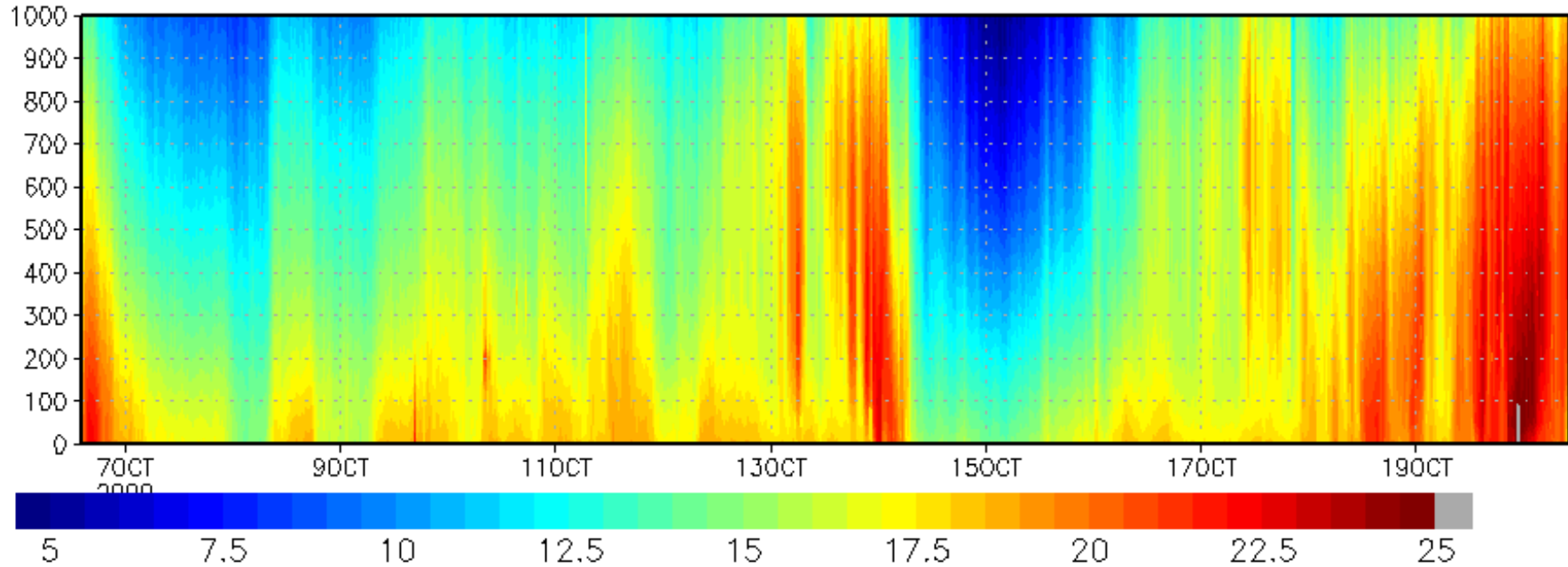


0 1.25 2.5 3.75 5 6.25 7.5 8.75 10 11.2 13

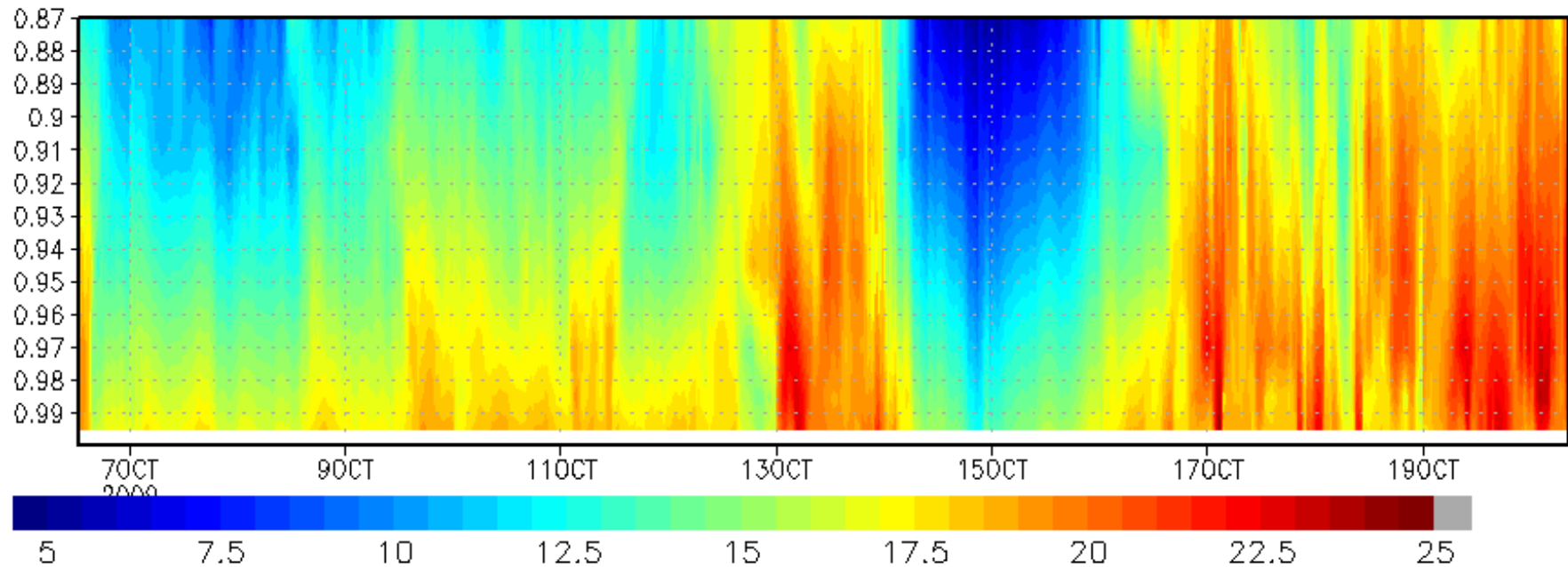


Результат моделирования кататического потока с помощью мезомасштабной модели в районе зарива Кингсфьорден (Шпицберген)

temperature,deg C, observation



temperature, deg C, model



Характеристики негидростатических моделей в их оперативных вариантах

Страна, название модели	Срок прогноза (часы)	Шаг сетки по горизонтали (км)	Количество уровней по вертикали	Источник информации на боковых границах	Система усвоения данных
Канада Reg-GEM	48	15	58	GEM	4DVAR
Китай GRAPES_ Meso	Не известен	30	33	GRAPES	Не известна
США WRF-NMM WRF-ARW	84	12	60	GFS	3DVAR (GSI)
Япония NHM	33	5	50	RSM	Meso 4DVAR

Геофизические пограничные слои

Атмосферный пограничный слой $H_{ABL} \sim 10^2 - 10^3$ м

Верхний пограничный слой океана $H_{UOL} \sim 10^1 - 10^2$ м

Придонный пограничный слой океана $H_{OBL} \sim 10^0 - 10^1$ м



Стратификация

Солнечная радиация

Наличие облачности и фазовые переходы в АПС

Сильно шероховатая орографически и гидрологически неоднородная поверхность в АПС

Генерация турбулентности за счет обрушения ветровых волн в ВПСО

...

Очень большие числа Рейнольдса

Атмосферный пограничный слой - $Re \sim 10^9$

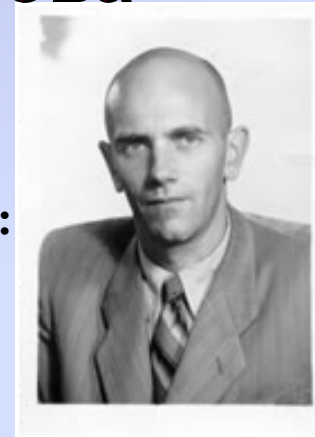
Верхний слой океана - $Re \sim 10^6 - 10^7$

Придонный слой океана - $Re \sim 10^5 - 10^6$

Теория подобия Монина-Обухова



Турбулентный режим на всех участках спектра, кроме интервала диссипации, полностью определяется тремя размерными параметрами:



$$u_* = \left(-\overline{u'w'}\right)^{1/2} \quad \frac{Q}{c_p \rho} = \overline{w'T'} \quad \frac{g}{T_0}$$

$$L = -\frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{T_0} \frac{Q}{c_p \rho}} \quad V = \frac{u_*}{\kappa} \quad T_* = -\frac{1}{\kappa u_*} \frac{Q}{c_p \rho}$$

$$T(z), U(z), q(z) = f(\zeta) \quad \zeta = z/L$$

- ❖ Рельеф местности плоский и подстилающая поверхность достаточно однородна, так что поля скорости ветра и температуры однородны по горизонтали
- ❖ Никаких резких изменений погоды не происходит, и в течение интервалов времени, в которых естественный суточный ход погоды мало заметен, поля скорости ветра и температуры статистически стационарны.

Слой постоянных потоков

- Согласно теории подобия Монина-Обухова, безразмерные вертикальные профили скорости ветра, температуры и влажности в приземном слое описываются некоторыми универсальными функциями, зависящими от безразмерной переменной z/L , где L - так называемый масштаб длины Монина - Обухова.
- В практическом плане, эта процедура эквивалентна аэродинамическому методу, сводящемуся к расчету приповерхностных потоков импульса, тепла и влаги с помощью коэффициентов обмена, значений скорости ветра и дефицитов соответствующих субстанций.
- Асимптотическое поведение универсальных функций (при сильно устойчивой или сильно неустойчивой стратификации плотности) изучено достаточно подробно, но требуются данные наблюдений, чтобы восстановить их поведение для промежуточных режимов.
- Этот подход хорошо зарекомендовал себя в условиях статистически однородной подстилающей поверхности, прост в реализации и было вполне естественным использовать его в моделях общей циркуляции атмосферы.
- Вместе с тем, в размерах элементарной ячейки сетки модели подстилающая поверхность редко бывает однородной.
- Наличие растительного и снежного покрова, специфика турбулентного перемешивания внутри растительности, особенно, в лесу, радиационные процессы, сальтация и диффузия частиц почвы и снега в атмосферу, перенос брызг с поверхности океана в штормовых условиях - все это существенно воздействует на процессы турбулентного взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью.



$$U(z) = \frac{u_*}{K} \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)$$

U – средняя скорость ветра

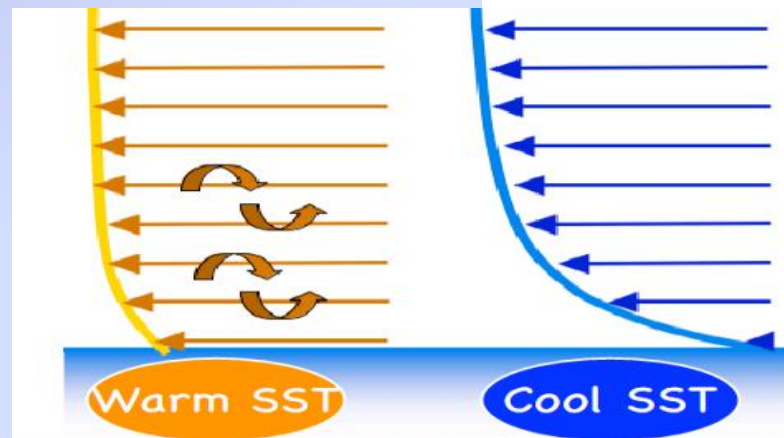
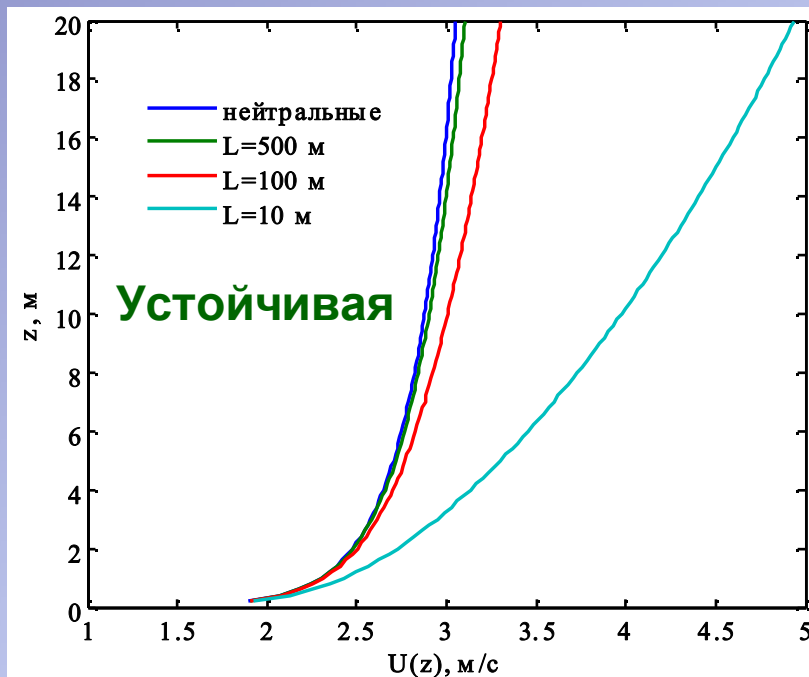
u^* – динамическая скорость

K – постоянная Кармана

z – высота измерений

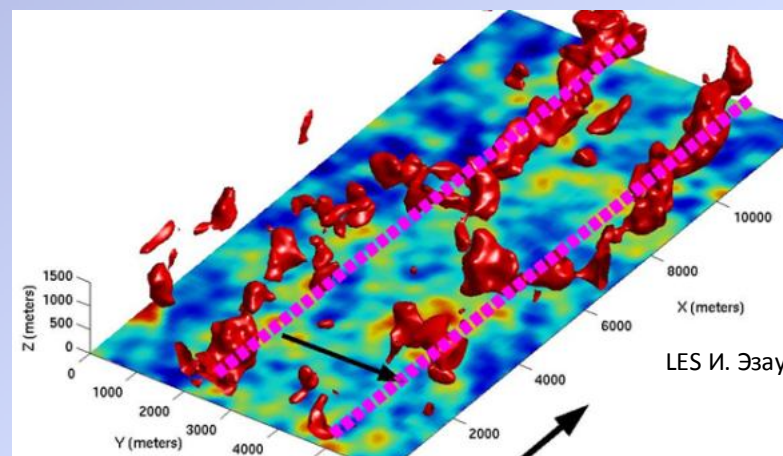
z_0 – параметр шероховатости

Отклонение профиля ветра от логарифмического при различных условиях стратификации

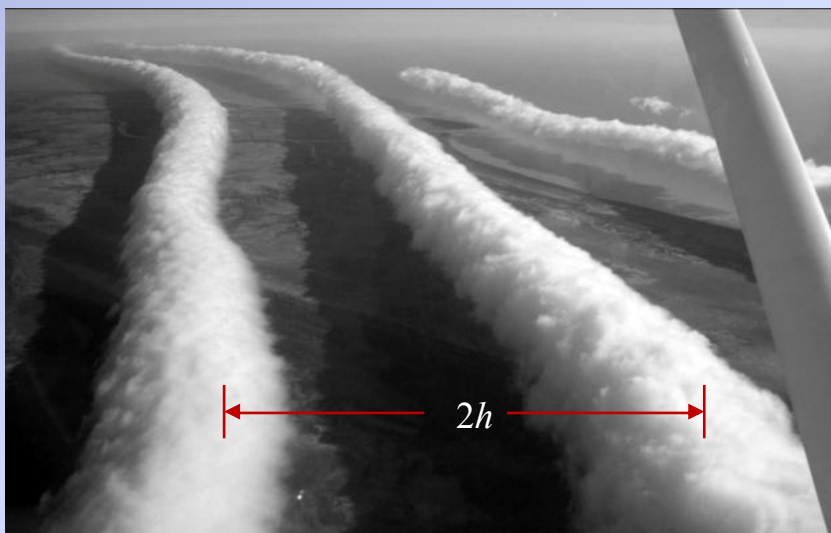


Примеры самоорганизации в турбулентных течениях

ТУРБУЛЕНТНАЯ КОНВЕКЦИЯ



Развитие облачных структур



Облака над Северным ледовитым океаном



Вихреразрешающее моделирование

Области применения



Приложения LES:

- фундаментальные задачи теории геофизической турбулентности
- параметризация турбулентного обмена в моделях погоды и климата
- интерпретация измерений турбулентности
- прикладные задачи
 - расчет нагрузок на архитектурные сооружения
 - расчет переноса загрязнений с городской среде
 - ...

Три подхода к численному моделированию турбулентности

1. Прямое численное моделирование (в англоязычной литературе – direct numerical simulation, DNS).

В рамках этого подхода численно решаются системы алгебраических уравнений, с высокой точностью аппроксимирующие исходную систему дифференциальных уравнений Навье-Стокса. DNS (безусловно самый обоснованный и самый точный метод) требует **детального пространственно-временного разрешения** и, следовательно, ведет к **большим вычислительным затратам**. Поэтому DNS редко применяется в практических задачах и чаще всего служит инструментом для получения больших массивов данных о турбулентных потоках простой структуры.

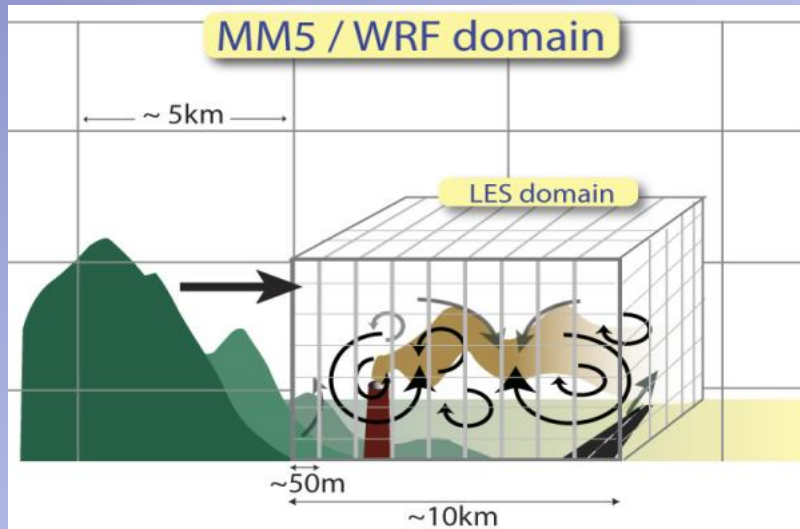
2. Решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds averaged Numerical Simulation, RANS).

В данном случае модель воспроизводит только средние значения скорости (и, при необходимости, скалярных величин, например температуры, влажности воздуха, концентрации примеси), а влияние всех флуктуаций учитывается при помощи турбулентных замыканий. Под осреднением в RANS понимается осреднение по ансамблю состояний. В силу предполагаемой эргодичности и в случае наличия статистически однородных направлений модели RANS могут быть не только трехмерными, но и двумерными и одномерными. Последние, как правило, **используются в качестве блоков, параметризующих турбулентность в геофизических пограничных слоях в глобальных, региональных и мезомасштабных моделях атмосферы и океана**.

3. Вихреразрешающее моделирование или моделирование методом крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES).

Основой вихреразрешающего моделирования турбулентных потоков с очень большими числами Рейнольдса ($Re \gg 1$) является подтверждаемая экспериментально гипотеза о независимости статистических характеристик крупномасштабных турбулентных движений от молекулярной вязкости. Согласно этому предположению, возможно построение **численной модели, явно описывающей нестационарную динамику только относительно крупных вихрей** (вихрей, вносящих основной вклад в энергию турбулентного потока и определяющих взаимодействие турбулентности со средним движением). При этом вычислительные затраты необходимые для реализации такой модели не должны зависеть от числа Рейнольдса, поскольку нет необходимости явно и точно рассчитывать все мелкие вихри. **Влияние мелкомасштабной (“подсеточной/подфильтровой”) турбулентности учитывается при помощи турбулентных замыканий**.

Вихре-разрешающие модели



Основные уравнения

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} + 2[\boldsymbol{\Omega}, \mathbf{v}] = -\nabla p - \mathbf{g} \beta \theta - \text{div} \boldsymbol{\tau}$$

$$\text{div} \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \theta = -\text{div} \boldsymbol{\tau}_\theta$$

$$\tau_{ij} = -2K_m S_{ij}$$

$$K_m = C_s^2 \Delta^2 |S|$$

Direct Numerical Simulation – DNS

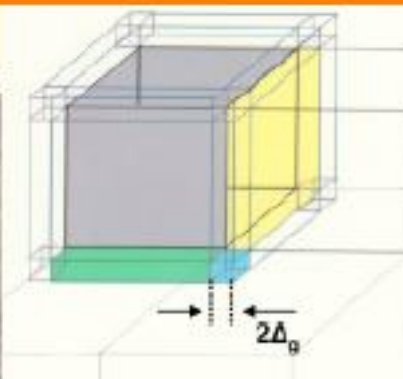
Large Eddy Simulation – LES

Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS

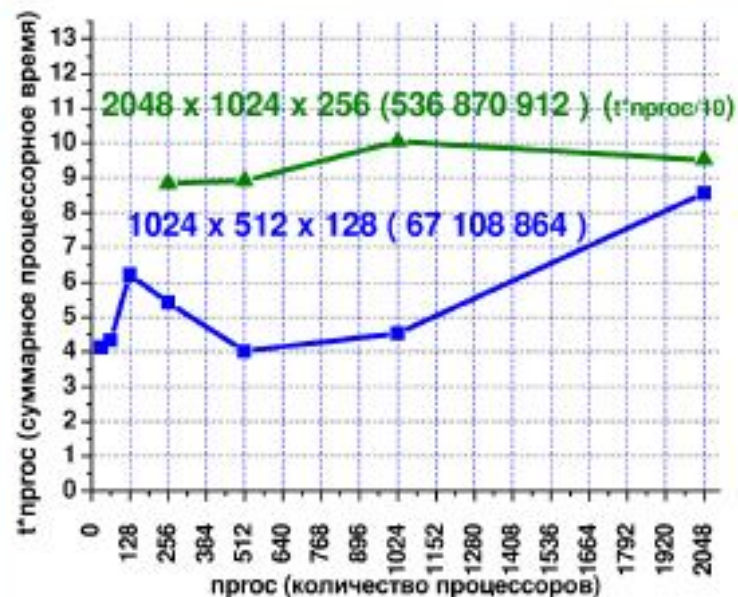
Численная схема и параллельная реализация

- Разнесенная равномерная C-сетка
- Аппроксимация по пространству - консервативная схема 4-го порядка (Morinishi et al. 1998)
- Аппроксимация по времени - явная схема 2-го порядка Адамса-Бэшфорта
- Граничные условия по горизонтали - периодические и непериодические (на вход могут задаваться условия Дирихле)
- Итерационные решатели для уравнения Пуассона и турбулентного замыкания
- Параллельная реализация - MPI, трехмерное разбиение области

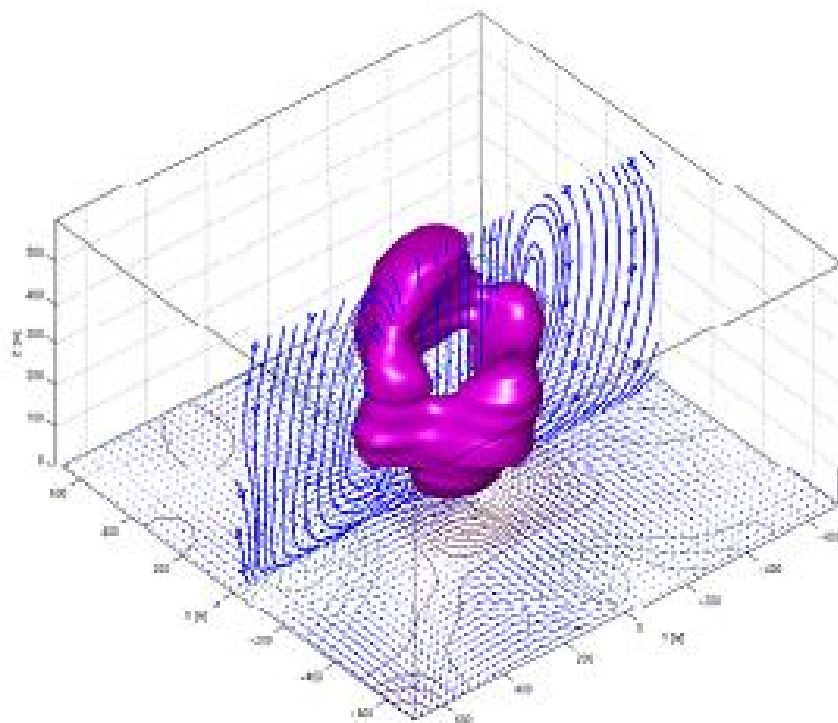
Подобласть MPI-разбиения



Распределение времени счета по алгоритмам



Портрет конвективного вихря (LES)



Размеры

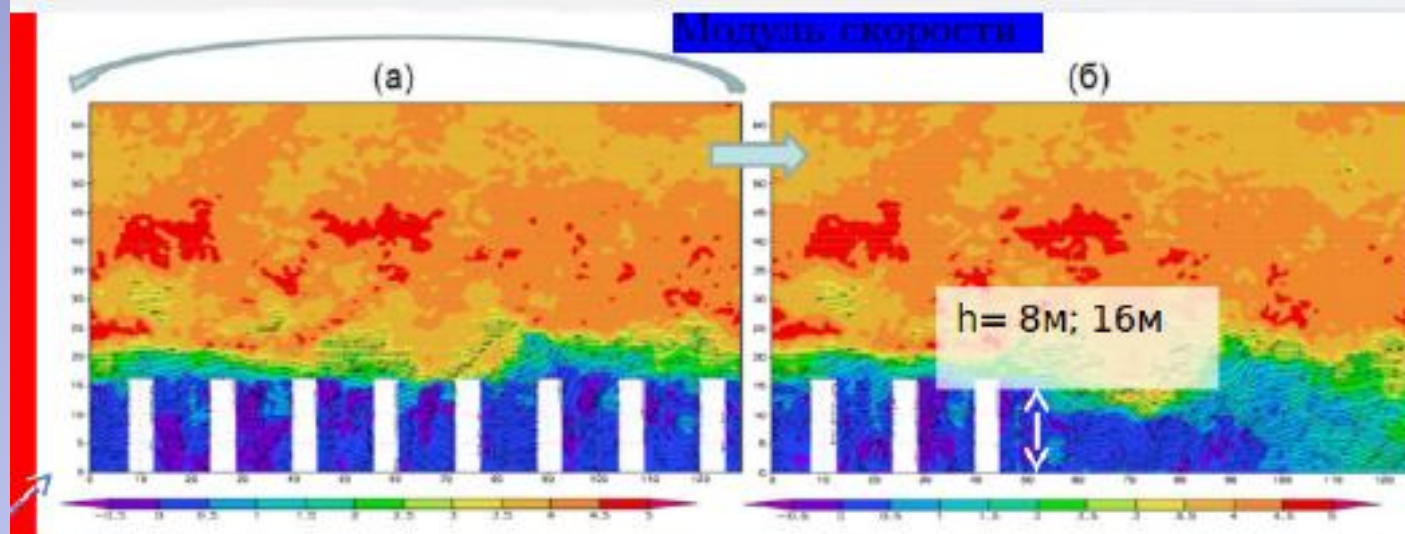
1.4×1.4×0.6 км

Скорости

Вертикальная и
горизонтальная
скорости 1-2 м/с

Пример применения - 1: турбулентный поток над лесным озером

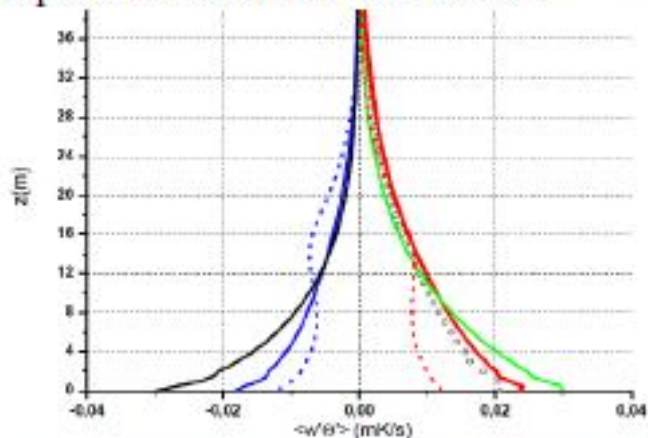
Мотивация и основные результаты



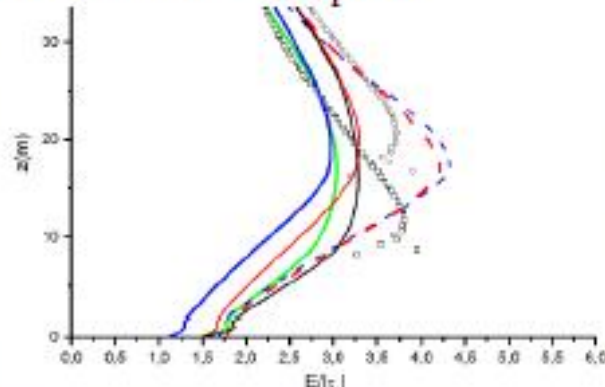
Параметры расчетов:

- $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.5 \text{ м}$
- $\Delta t = 0.025 \text{ с}$
- $1024 \times 512 \times 128$ узлов
- $T = 1 \text{ ч}$
- 2048 MPI-процессов

Вертикальный поток тепла



Турбулентная кинетическая энергия



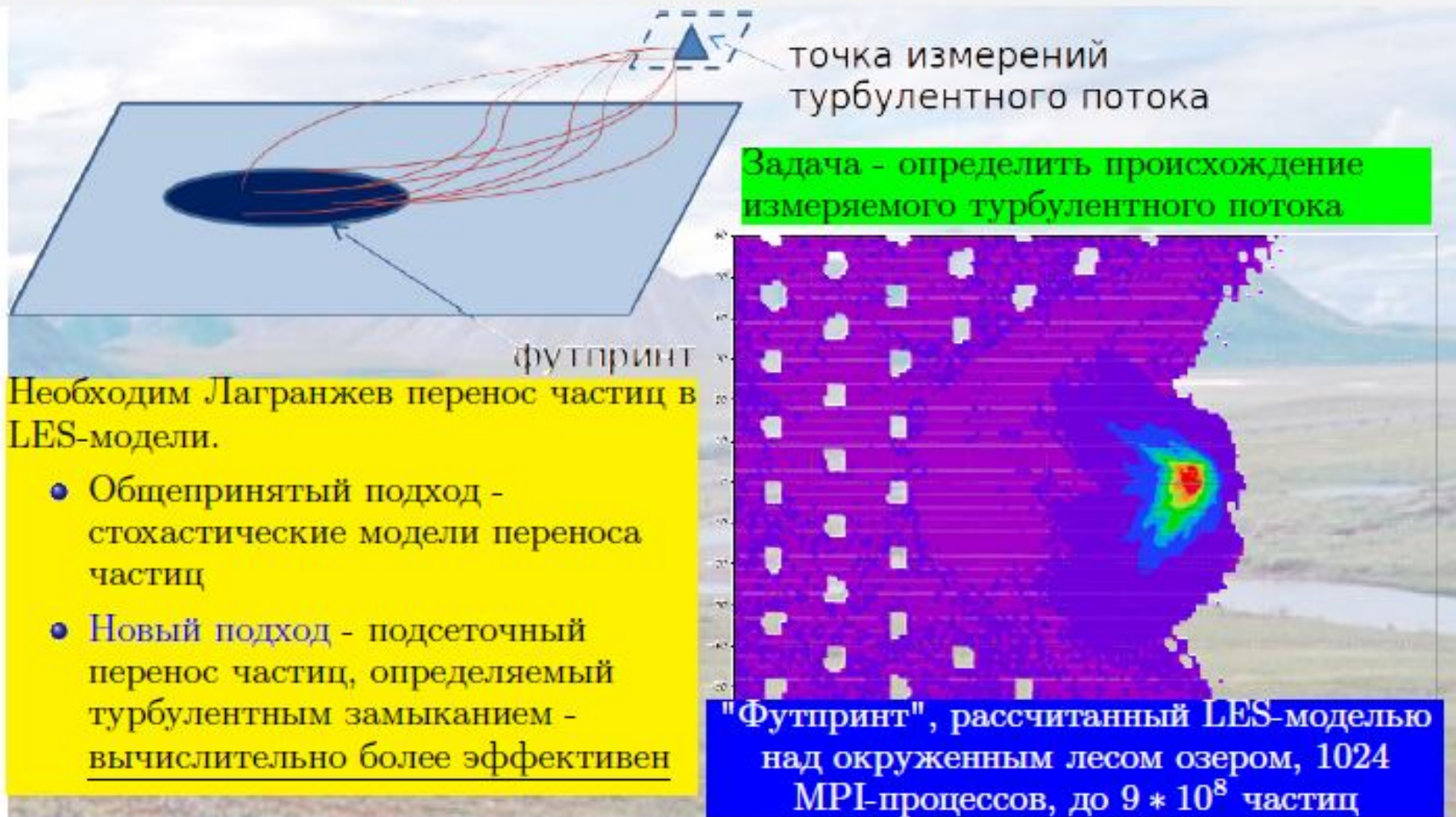
Основные выводы:

- Слой постоянных потоков отсутствует
- Стратификация почти не влияет на потоки

Традиционные теории приземного слоя неприменимы!

Пример применения - 2: расчеты областей "футпринтов" для пульсационных измерений

Мотивация и основные результаты



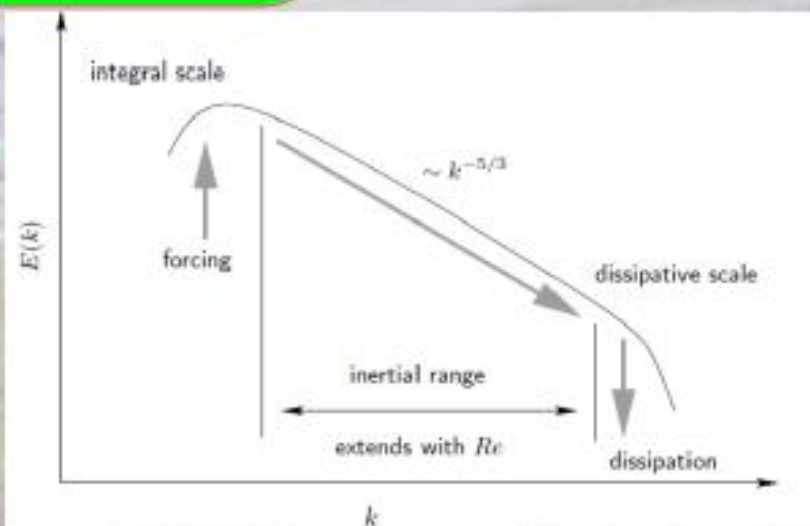
Прямое моделирование турбулентности (DNS)

Основные характеристики метода



Характеристики метода:

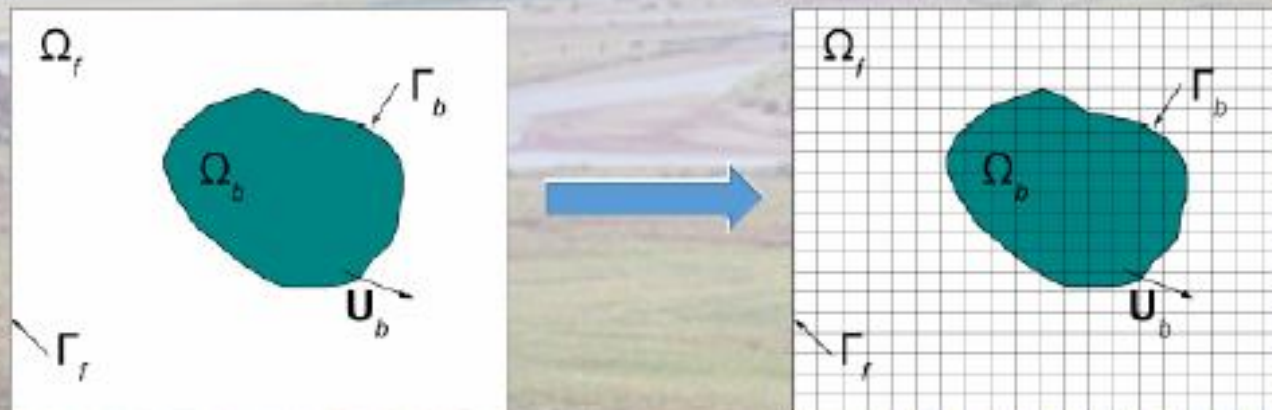
- Воспроизведение всех масштабов течения
- Современные сетки составляют порядка 10^{10} ячеек
- Необходимость эффективных численных методов
- Оптимизация программной реализации на современных вычислительных системах



Прямое моделирование турбулентности (DNS)

Численная схема

- Конечно-разностный метод дискретизации системы уравнений Навье-Стокса на прямоугольных сетках
 - Консервативные схемы 2-го и 4-го порядка
- Метод дробных шагов для интегрирования уравнений по времени
 - Явные схемы аппроксимации по времени
- Итерационный метод решения уравнения Пуассона
 - Предобуславливатель – геометрический многосеточный метод
- Метод погруженной границы для расчета течений в областях со сложной и нестационарной геометрией

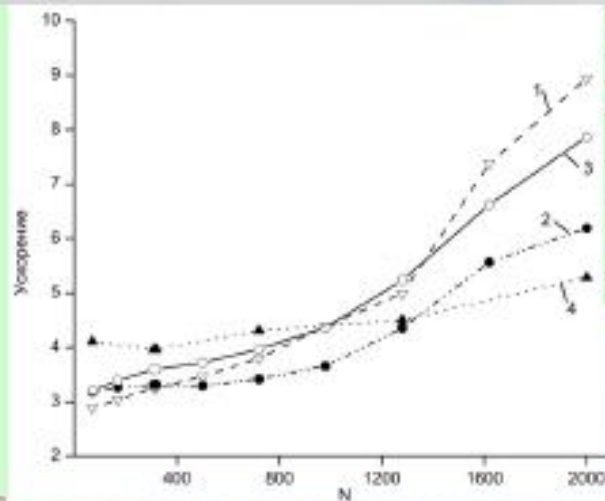


Прямое моделирование турбулентности (DNS)

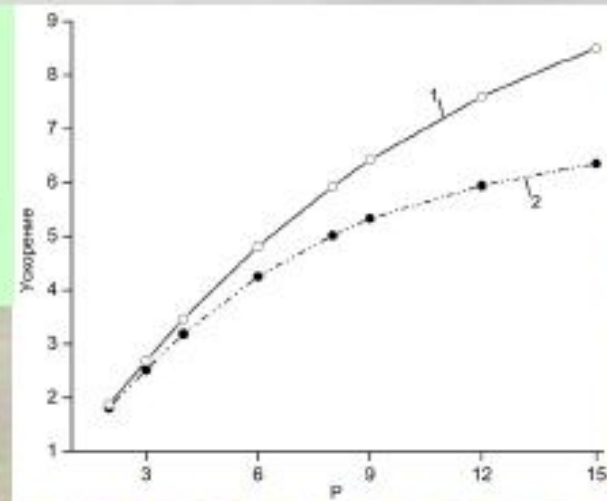
Параллельная реализация

- Программная реализация на архитектуре центрального процессора
 - Пространственная декомпозиция области на ядра центрального процессора
 - C/C++, OpenMP + MPI
- Программная реализация на графических процессорах
 - Пространственная декомпозиция области на графические карты
 - C/C++, CUDA + MPI
 - Актуальная задача – оптимизация численных методов с учетом многоядерной архитектуры ускорителей

Ускорение расчетов на графической карте относительно 4-х ядер центрального процессора



Ускорение реализации на графических процессорах



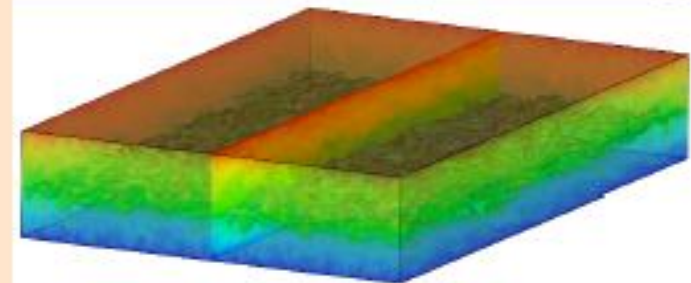
Пример приложения технологии DNS

Турбулентное течение Куэтта

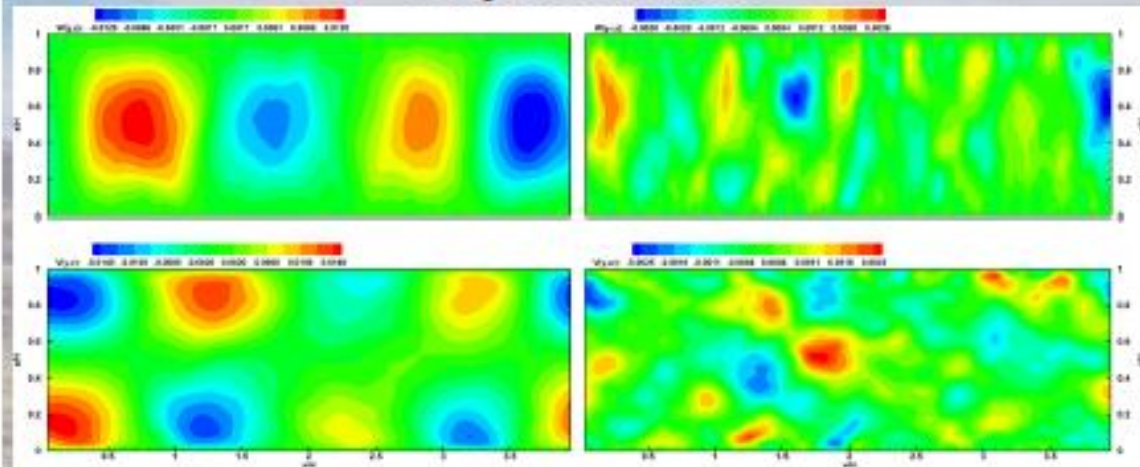
- Идеализированное течение между двумя параллельными пластинами
 - Модель пограничного слоя
 - Сложность реализации в лабораторных условиях
 - Численное моделирование – возможность уточнения параметризаций, принятых в региональных и глобальных моделях

Параметры эксперимента:

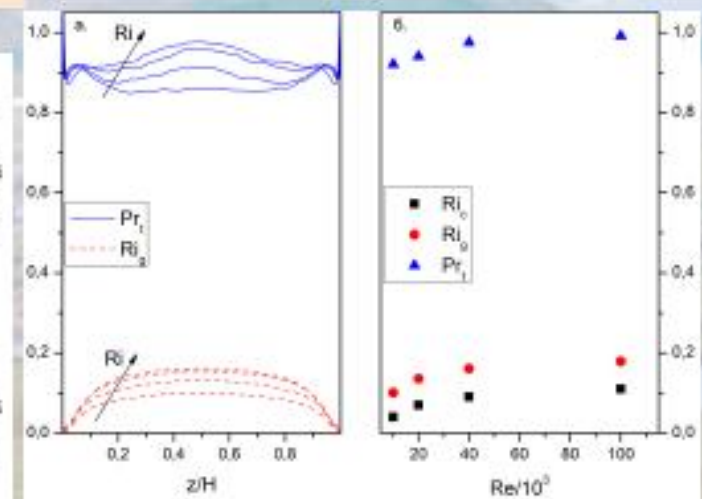
- $Re = 10^5$
- сетка 10^8 точек, $2 \cdot 10^3$ ядер



Скорость течения



Разрушение крупномасштабных структур при усилении стратификации



Зависимость турбулентного числа Прандтля от параметров стратификации



Спасибо за внимание!