

Суперкомпьютерное моделирование в задачах физики климатической системы

Лыкосов Василий Николаевич,
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Институт вычислительной математики РАН,
Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

E-mail: lykossov@inm.ras.ru

Научно-практическая школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии
31 октября - 2 ноября 2012 г.,
г. Новосибирск

План

- ❑ Введение
- ❑ История вопроса
- ❑ Физико-математические основы моделирования климатических процессов
- ❑ Воспроизведение современного климата и оценка его будущих изменений
- ❑ От климатических моделей к моделям системы Земля
- ❑ Моделирование региональных и локальных процессов
- ❑ Вместо заключения
- ❑ Литература

ВВЕДЕНИЕ

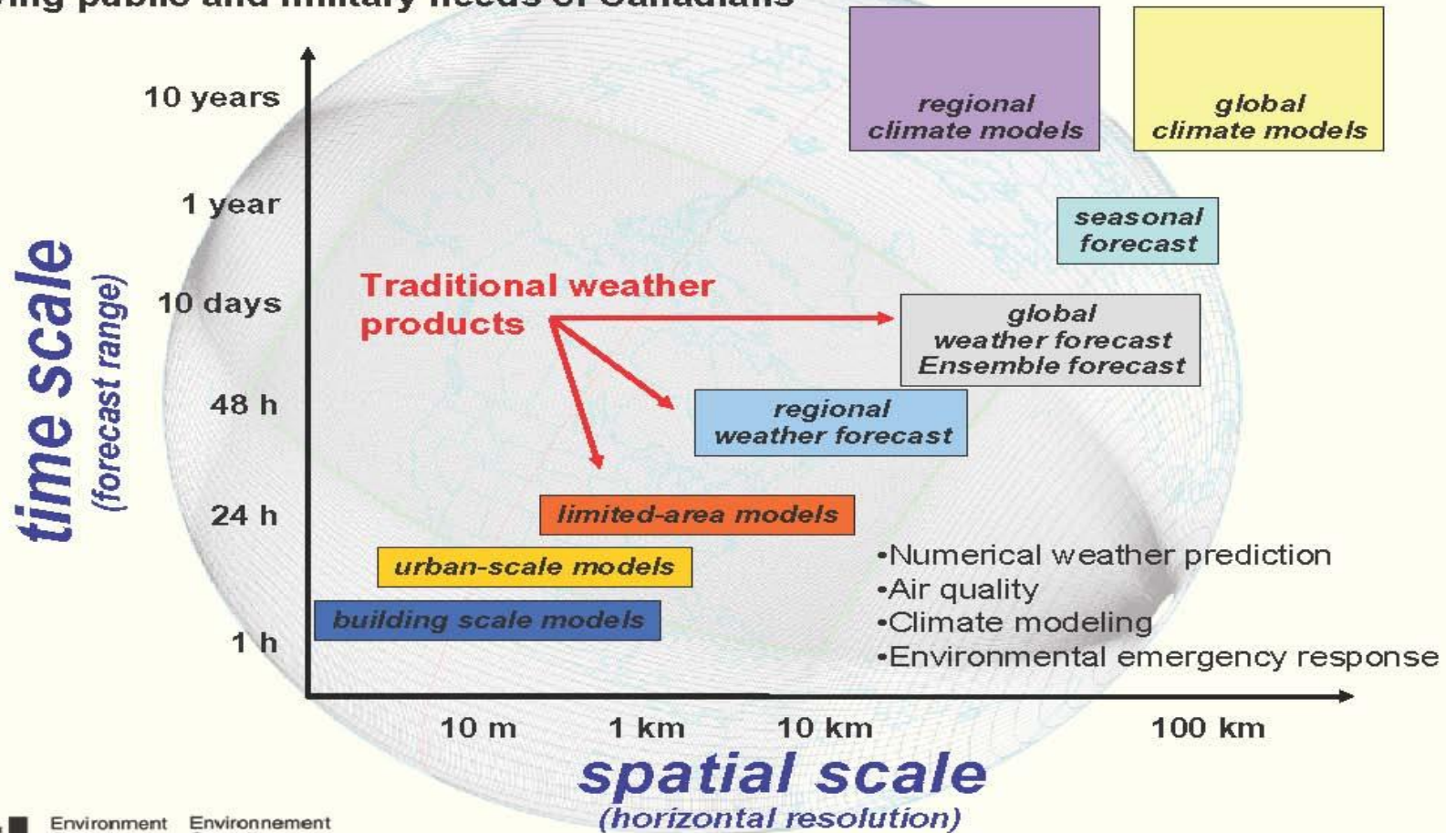
Климатическая система: погода и климат

- 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).

Michel Desgagné (Reading, 13 HPC Workshop, 3-7/11/2008)

High performance computing at the Canadian Meteorological Centres

Uninterrupted (24/7, year-round) weather and environmental forecasts, serving public and military needs of Canadians



История вопроса

Vilhelm Bjerknes (1862 – 1951)



**Das Problem von der Wettervorhersage,
betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der
Physik, Meteor. Z., 1904, B. 21, S. 1-7.**

**Норвежский физик и метеоролог,
основатель Бергенской (фронтологической)
научной школы в метеорологии. Первым
начал изучать проблему предсказания
погоды с точки зрения математики и
механики, используя уравнения
гидромеханики для описания состояния
атмосферы.**

Если, как полагает любой ученый, верно, что последующие состояния атмосферы формируются из предыдущих в соответствии с физическими законами, то очевидны необходимые и достаточные условия для рационального решения проблем прогноза: достаточно точное знание начального состояния атмосферы и достаточно точное знание законов, согласно которым одно состояние атмосферы развивается из другого.

(Bjerknes, 1904)

Я буду более чем счастлив, если смогу продолжать работу до тех пор, пока в результате многолетних вычислений не буду в состоянии предсказывать погоду с одного дня на другой. Если расчеты окажутся в согласии с фактами, это будет означать научную победу. Метеорология тогда стала бы точной наукой...

(Bjerknes, 1914)

Lewis Fry Richardson (1881 – 1953)



**Weather Prediction by Numerical Process
1922, Cambridge University Press, 236 pp.**

**Английский метеоролог, предложил
метод прогноза погоды на основе
численного решения уравнений
гидродинамики атмосферы. Попытался
дать прогноз на один день**

**(20 мая 1910 г.), используя в качестве
начальных условий данные метеорологических наблюдений в 7 час
утра. Прогноз был неуспешен: за первые 6 час. модельного
времени давление выросло на 145 гПа! (Проблема контроля и
подготовки согласованных начальных данных). Первым высказал
идею параллельных вычислений.**

Представьте себе большой зал, похожий на театр, но с галереями и балконами, расположенными по кругу и проходящими через то место, где обычно находится сцена. Стены этого зала разрисованы в виде карты Земного шара. Потолок представляет собой северные полярные области, Англия расположена на галерее, тропики – там, где балконы верхнего яруса, Австралия – где бельэтаж, а Антарктида – где партер. Громадное количество вычислителей заняты работой: каждый рассчитывает погоду для той части Земного шара, где он сидит, отвечая за вычисления одного уравнения или даже части уравнения. Работа для каждого региона координируется исполнителем более высокого ранга. Многочисленные светящиеся числа показывают мгновенные значения так, что соседние вычислители могут их прочитать. Каждое число высвечивается в трех соприкасающихся зонах, поддерживая тем самым коммуникации с севером и югом. Из пола партера на половину высоты зала возвышается столб с кафедрой, за которой находится человек, ответственный за весь театр. Он окружен несколькими ассистентами и курьерами. Одна из его обязанностей – поддерживать постоянную скорость вычислений в различных частях Земного шара. В этом отношении он похож на дирижера оркестром, в котором инструментами являются логарифмические линейки и вычислительные машины. Но вместо того, чтобы размахивать палочкой, он светит розовым лучом на области, расчет для которых идет быстрее остальных, а синим – на запаздывающие области.

(Richardson, 1922)

Илья Афанасьевич Кибель (1904 – 1970)



“Приложение к метеорологии уравнений механики бароклинной жидкости”, 1940, Изв. АН СССР, Серия геогр., 5.

Советский математик, гидромеханик и метеоролог, член-корреспондент АН СССР (1943). В 1940 г. вывел замкнутую упрощенную систему уравнений динамической метеорологии и первым предложил практический метод краткосрочного гидродинамического прогноза полей давления и температуры на срок порядка суток.

John von Neumann (1903 – 1957)



J.G. Charney, R. Fjortoft, J. von Neuman. "Numerical integration of the barotropic equation", Tellus, 1950, v. 2, p. 237-254.

Венгерско-немецкий математик, сделавший важный вклад в квантовую физику, квантовую логику, функциональный анализ, теорию множеств, информатику, экономику и другие отрасли науки. Наиболее известен как праотец современной архитектуры компьютеров.

ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) с тактовой частотой 100 кГц, на десятичной основе, с памятью для 20 чисел (память для программы отсутствовала) и производительностью 5000 сложений и 300 умножений в секунду. Для прогноза на сутки с шагом 3 часа по ограниченной территории на сетке из 270 узлов с шагом 736 км потребовалось почти 24 часа.

Гурий Иванович Марчук

Численные методы в прогнозе погоды
Л.: Гидрометеоздат , 1967.



Российский математик и физик, внес большой вклад в развитие вычислительной математики, математического моделирования процессов в ядерной энергетике и в окружающей среде, в теорию климата и математическую иммунологию. По его инициативе в 1973 г. было принято решение Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР о разработке в СССР математических моделей на основе методов расщепления с использованием **параллельных вычислений**.

Валентин Павлович Дымников



Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. Москва, ВИНТИ, 1994 г.

Российский физик и математик, внес большой вклад в развитие вычислительной математики, геофизической гидродинамики и математического моделирования климатических процессов. Выполнил большой цикл исследований по теории устойчивости и предсказуемости атмосферных процессов. Заложил основы математической теории климата.

Валентин Васильевич Воеводин (1934 – 2007)



В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин.

**Параллельные вычисления
СПб.: БХВ-Петербург, 2002**

Российский математик, внес большой вклад в развитие вычислительной математики. Выполнил обширный цикл исследований в области численных методов линейной алгебры и структуры алгоритмов. С единых позиций рассмотрел численные методы решения сложных задач, архитектуры параллельных вычислительных систем и технологии параллельного программирования.

**Физико-математические основы
моделирования климатических
процессов**

Математические модели климатической системы

- ❑ Основа современных моделей климатической системы - совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана.
- ❑ Центральное направление их развития - все более точное описание всех физических процессов, участвующих в формировании погоды и климата.
- ❑ Принимается, что локально справедливы уравнения классической равновесной термодинамики.
- ❑ Для описания динамики атмосферы и океана привлекаются осредненные (по пространственно-временным масштабам) уравнения Навье-Стокса для сжимаемой жидкости (уравнения Рейнольдса).
- ❑ Считается, что существует их замыкание: эффекты процессов подсеточных масштабов могут быть выражены через характеристики процессов крупных (разрешаемых) масштабов.

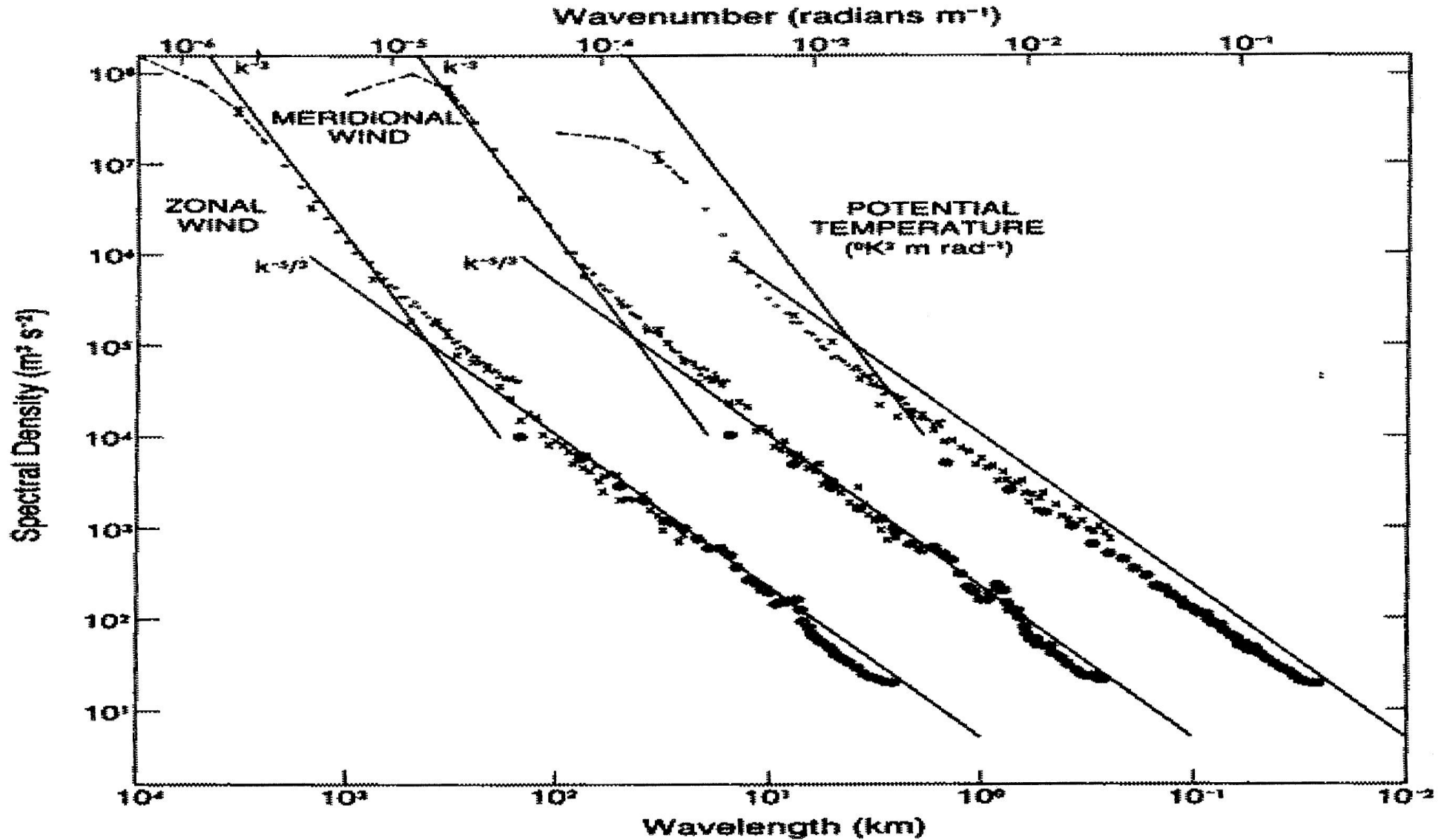


FIG. 1. Variance power spectra of wind and potential temperature near the tropopause from GASP aircraft data. The spectra for meridional wind and temperature are shifted one and two decades to the right, respectively; lines with slopes -3 and $-5/3$ are entered at the same relative coordinates for each variable for comparison. [Reproduced with permission from Nastrom and Gage (1985).]

Три основных диапазона атмосферной турбулентности:

макротурбулентность с горизонтальными масштабами от сотен километров до планетарных ($\approx 10^4$ км),

мезотурбулентность (с масштабами от километров до сотен километров) и

микротурбулентность с масштабами менее километра.

The hierarchy of atmospheric models



GLOBAL MODELS resolution 10-100 km

(GFDL, ECHAM, HadCM, INM RAS, ...)

Planetary and synoptic scale circulations:
trade-winds, monsoons, cyclones and anticyclons, ...



REGIONAL MODELS resolution 1-10 km

(MM5, WRF, Meso-NH, NH3D, ...)

Circulations of meso- α , β , γ scales:
Breezes, foehns, bora, squall lines...



LARGE EDDY SIMULATION resolution 10-100 m

Coherent structures in atmospheric boundary layer,
circulations in urban areas...

Уравнения крупномасштабной динамики атмосферы

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

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma}, \quad \left(\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma} \right)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p_s u}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_s v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial p_s \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0, \quad (\sigma = p / p_s, \Phi = gz)$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{RT}{c_p \sigma p_s} \left[p_s \dot{\sigma} + \sigma \left(\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \right) \right] = F_T + \varepsilon,$$

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

Параметризация
процессов
подсеточных
масштабов

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
- ❑

Математическое моделирование климата в ВЦ СОАН СССР и ИВМ РАН

- 1973 г.: Решение Отделения океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР о разработке математических моделей на основе методов расщепления с использованием **параллельных вычислений**.
- 1974 г.: Создание в ВЦ СОАН СССР (г. Новосибирск, директор – Г.И. Марчук) лаборатории общей циркуляции атмосферы и океана (В.П. Дымников – зав. лаб., И.М. Бобылева, В.Я. Галин, В.Б. Залесный, В.Н. Лыкосов, В.Л. Перов).
- 1980 г.: Организация Г.И. Марчуком в Москве Отдела (с 1991 г. - Институт) вычислительной математики АН СССР (РАН).
- 2003 г.: Первая реализация параллельной версии климатической модели на вычислительных системах кластерного типа (кандидатская диссертация В.Н. Глухова, выполненная под руководством В.В. Воеводина).

Модель общей циркуляции атмосферы и океана Вычислительного центра СО АН СССР (Марчук и др., 1984)

Совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана (использованы неявная схема интегрирования по времени и метод расщепления). Синхронизация времен термической релаксации атмосферы и океана (1 «атмосферный» год = 100 «океаническим» годам).

В атмосфере разрешение составляло 10x6 градусов по долготе и широте и 3 уровня по вертикали до высоты 14 км (**3240** узлов сетки). Шаг по времени **40 минут**. В океане разрешение 5x5 градусов по долготе и широте, по вертикали 4 уровня (**7200** узлов сетки) . Шаг по времени **2 суток**.

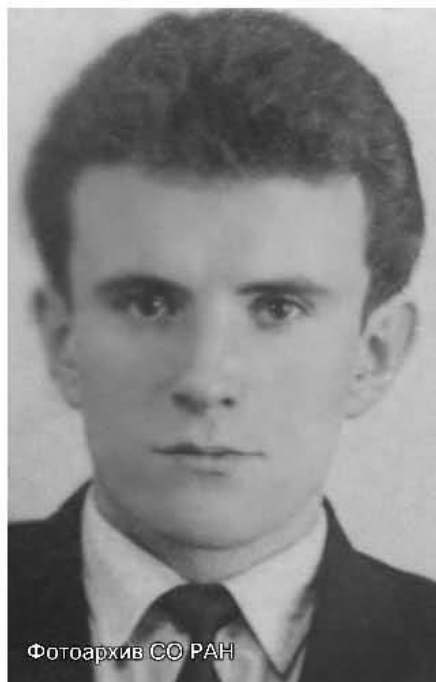
Единичный эксперимент: расчет январской циркуляции системы атмосфера – океан на **40** модельных «атмосферных» **дней** (11 «океанических» лет) занял на БЭСМ-6 около **трех месяцев реального времени**.

1
9
7
0

Фотоархив СО РАН
Фотоархив СО РАН



Фотоархив СО РАН



Фотоархив СО РАН



Фотоархив СО РАН



Фотоархив СО РАН



Фотоархив СО РАН

Участники симпозиума по оптимизации в ВЦ СО АН СССР (1975 г.)



**БЭСМ-6: Среднее быстродействие - до 1 млн. одноадресных команд/сек
Длина слова - 48 двоичных разрядов и два контрольных разряда
Рабочая частота - 10 МГц , оперативная память – 32768 слов**



Климатическая модель Института вычислительной математики РАН (Дымников и др., 2005, Володин и Дианский, 2006, <http://ksv.inm.ras.ru/index>)

Совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана. В атмосфере разрешение составляет 2.5x2 градуса по долготе и широте и 21 уровень по вертикали до высоты 30 км (272160 узлов сетки). Шаг по времени 6 минут. В океане разрешение 1x0.5 градуса по долготе и широте, по вертикали 40 уровней (3 425 600 узлов сетки). Шаг по времени 2 часа.

Модель реализована на суперкомпьютерах «Чебышев» и «Ломоносов»

За **сутки** реального времени рассчитывается эволюция климатической системы на **8 лет** модельного времени («Чебышев»). Таким образом, для проведения одного численного эксперимента требуется **1 - 2 месяца** реального времени.

За **сутки** реального времени рассчитывается динамика атмосферы на **3.3 года** модельного времени («Ломоносов») при помощи модели (Д.В. Кулямин) разрешением 2.5x2 градуса по долготе и широте и 80 уровней по вертикали до высоты 90 км (1 036 800 узлов сетки).

Суперкомпьютер МГУ «Ломоносов»



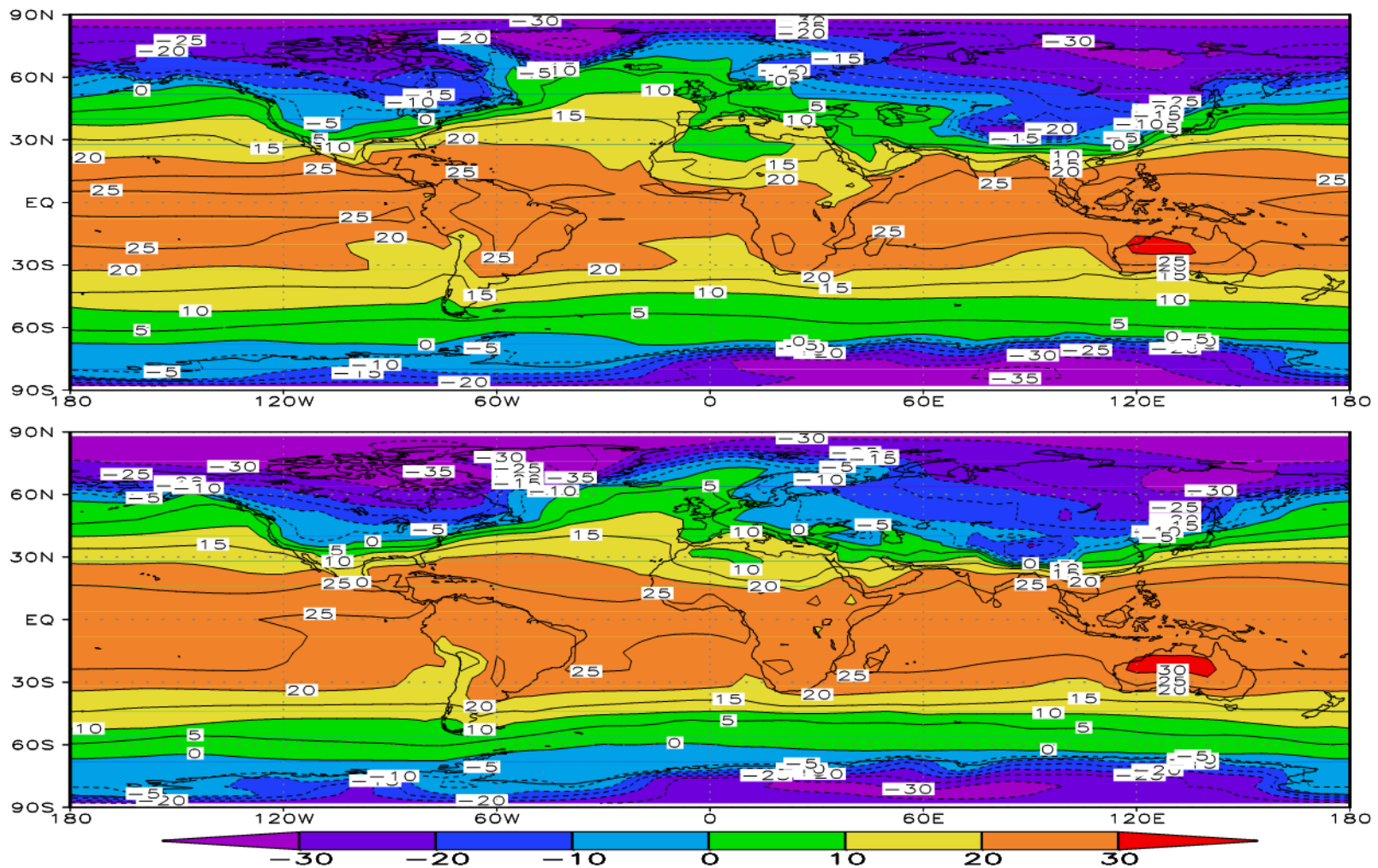
Основные технические характеристики суперкомпьютера "Ломоносов"

(<http://parallel.ru/cluster/lomonosov.html>)

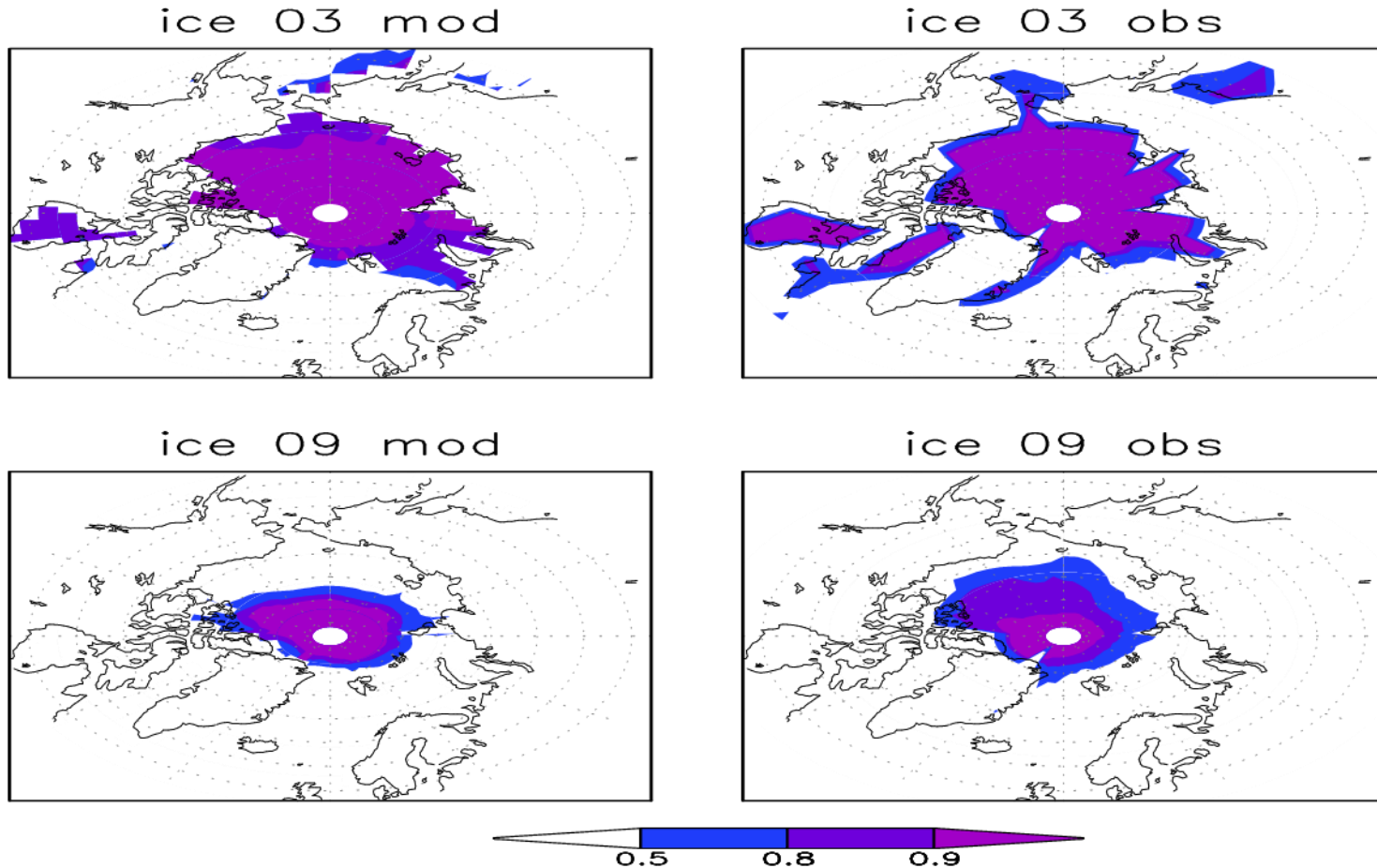
Пиковая производительность	1,7 Пфлопс
Производительность на тесте Linpack	901.9 Тфлопс
Число вычислительных узлов x86	5 104
Число графических вычислительных узлов	1 065
Число вычислительных узлов PowerXCell	30
Число процессоров/ядер x86	12 346 / 52 168
Число графических ядер	954 240
Оперативная память	92 ТБ
Общий объем дисковой памяти вычислителя	1,75 ПБ
Основной тип процессора	Intel Xeon X5570/Intel Xeon 5670, Nvidia X2070
Число типов вычислительных узлов	8
Основной тип вычислительных узлов	TB2-XN
System/Service/Management Network	QDR Infiniband 4x/10G Ethernet/Gigabit Ethernet
Система хранения данных	Параллельная файловая система Lustre, файловая система NFS, иерархическая файловая система StorNext, система резервного копирования и архивирования данных
Операционная система	Clustrx T-Platforms Edition
Занимаемая площадь	252 м ²
Потребление энергии	2,6 МВт
Вес всех составляющих	Более 75 тонн
Производитель	Т-Платформы

**Воспроизведение
современного климата и
оценка его будущих изменений**

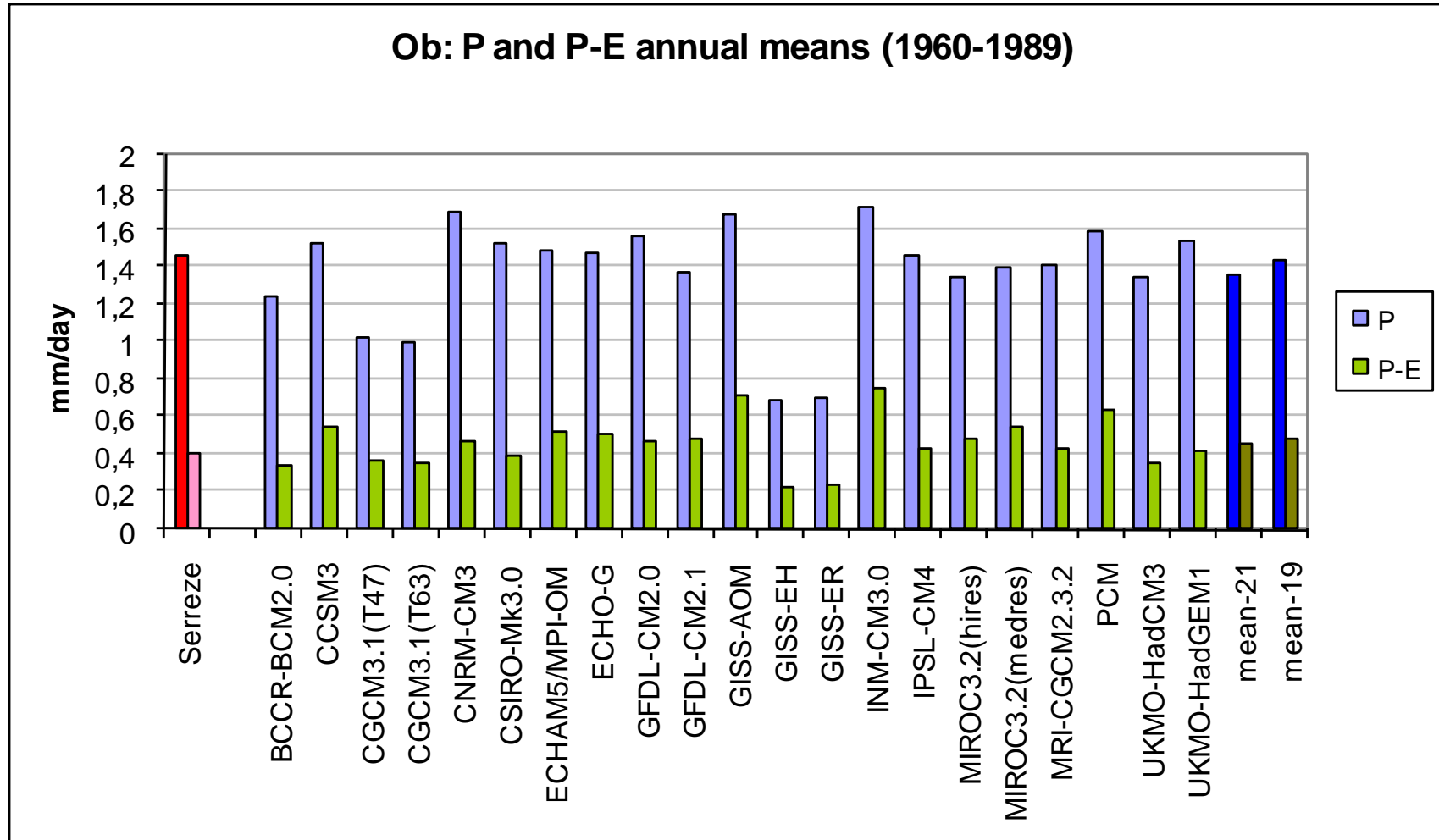
Приповерхностная температура воздуха зимой: модель ИВМ (верх) и наблюдения (низ)



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



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



Сценарии МГЭИК (IPCC)

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

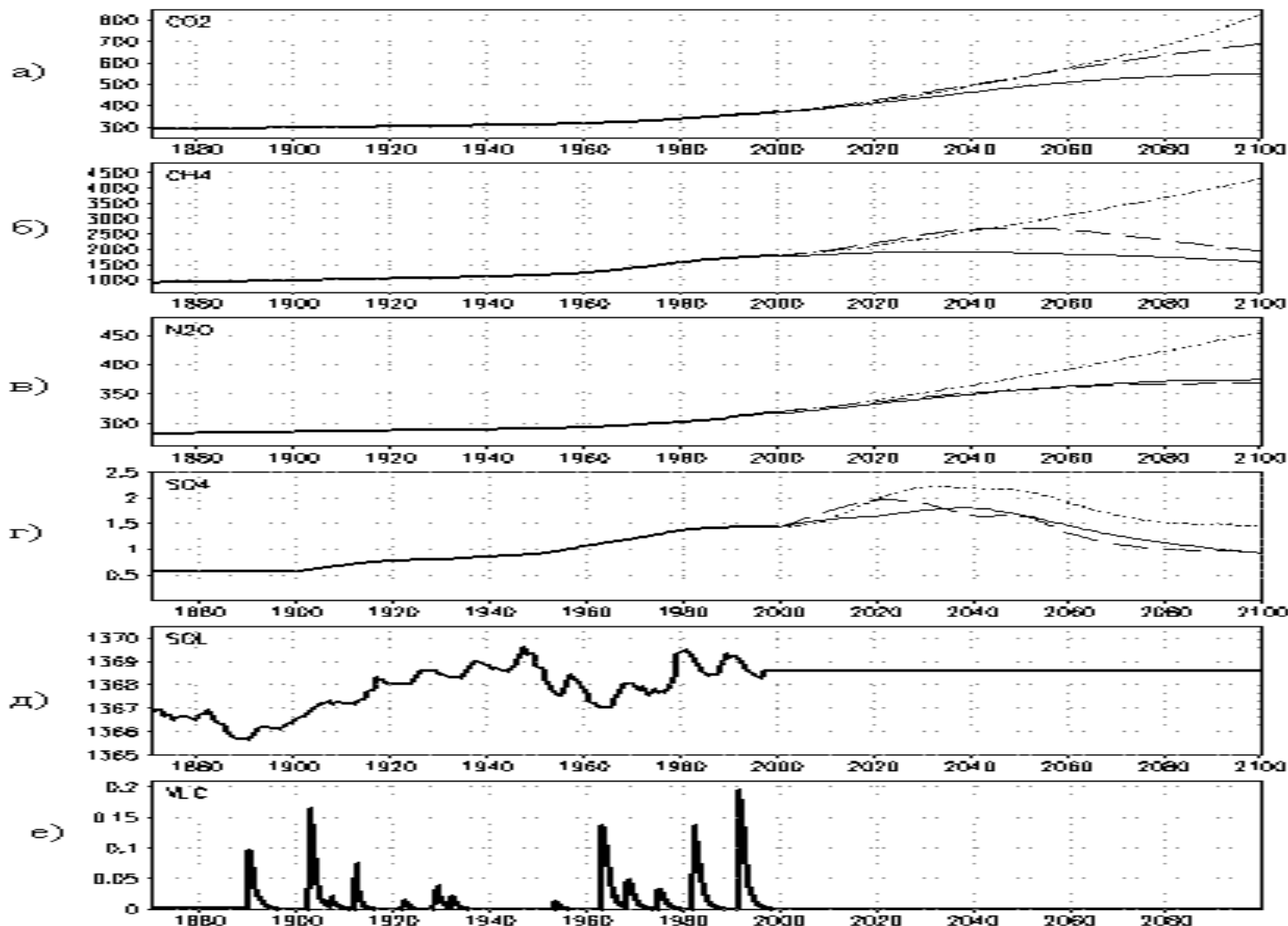
A2: Неоднородный мир; быстрый рост популяции, а экономический рост и смена технологий происходят медленнее, чем по другим сценариям.

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

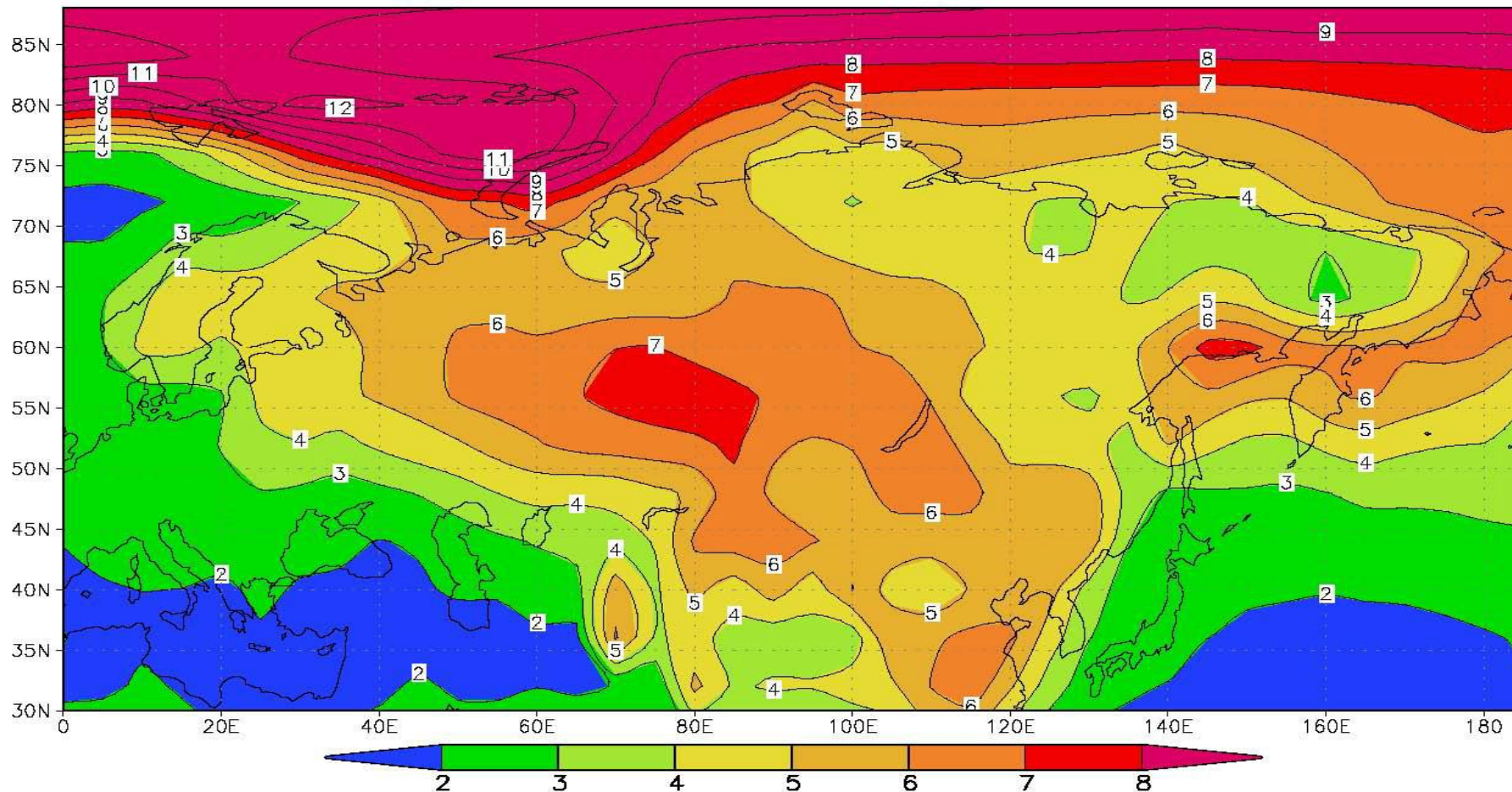
B2: Мир, базирующийся на локальных решениях глобальных проблем; умеренный рост популяции, промежуточные уровни экономического развития и более диверсифицированные технологические изменения по сравнению с сценариями A1 и B1.

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

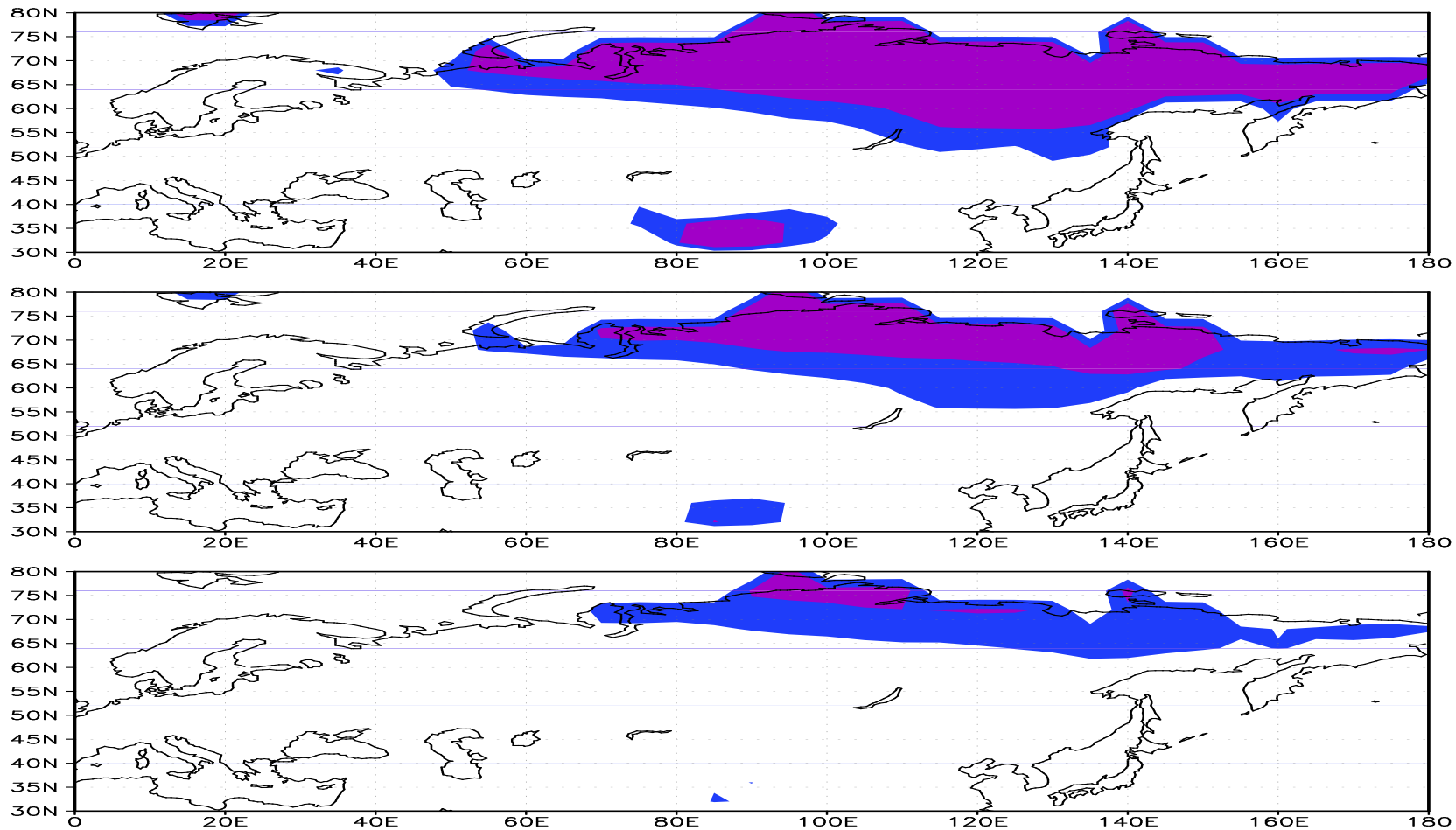
Изменение содержания (а) углекислого газа (частей на миллион), (б) метана (частей на миллиард), (в) закиси азота (частей на миллиард), (г) интегрального сульфатного аэрозоля (мг/м), (д) солнечной постоянной (Вт/м) и (е) интегральной оптической толщины вулканического аэрозоля (безразм.) в экспериментах ХХ (жирная сплошная линия), В1 (тонкая сплошная линия), А1В (штриховая линия) и А2 (пунктирная линия).



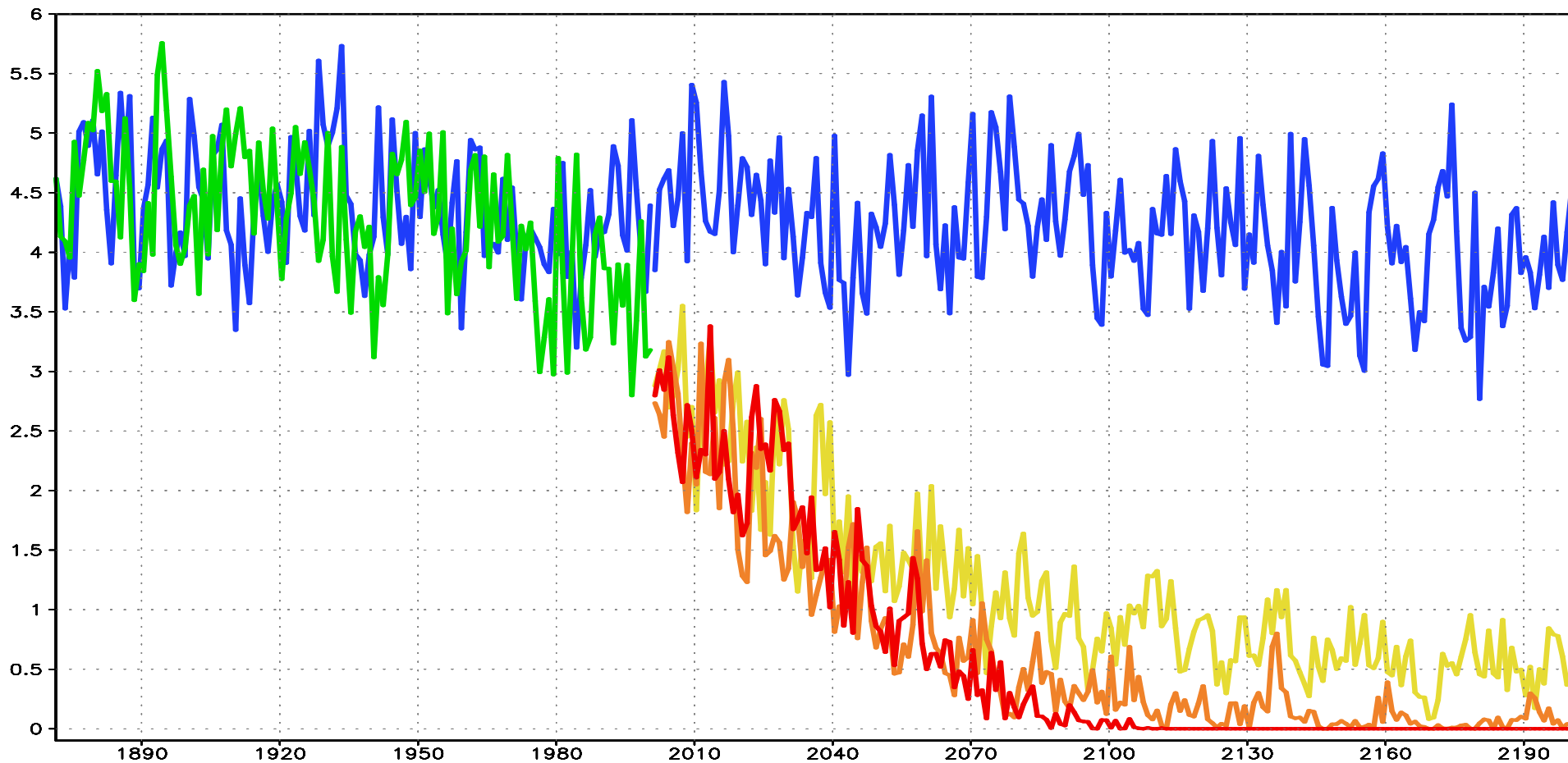
Возможные изменения зимней температуры приземного воздуха в конце XXI века (осредненной за период 2081-2100 гг.) по сравнению с данными для конца XX века (осреднение за 1981-2000 гг.) по результатам модели Института вычислительной математики РАН для сценария A1B



Пространственное распределение непрерывной (фиолетовый цвет) и спорадической (голубой цвет) вечной мерзлоты по данным численных экспериментов с климатической моделью ИВМ РАН: 1981-2000 гг. (верх), 2081-2100 гг. при сценарии B1 (середина) и в 2081-2100 гг. при сценарии A2 (низ)

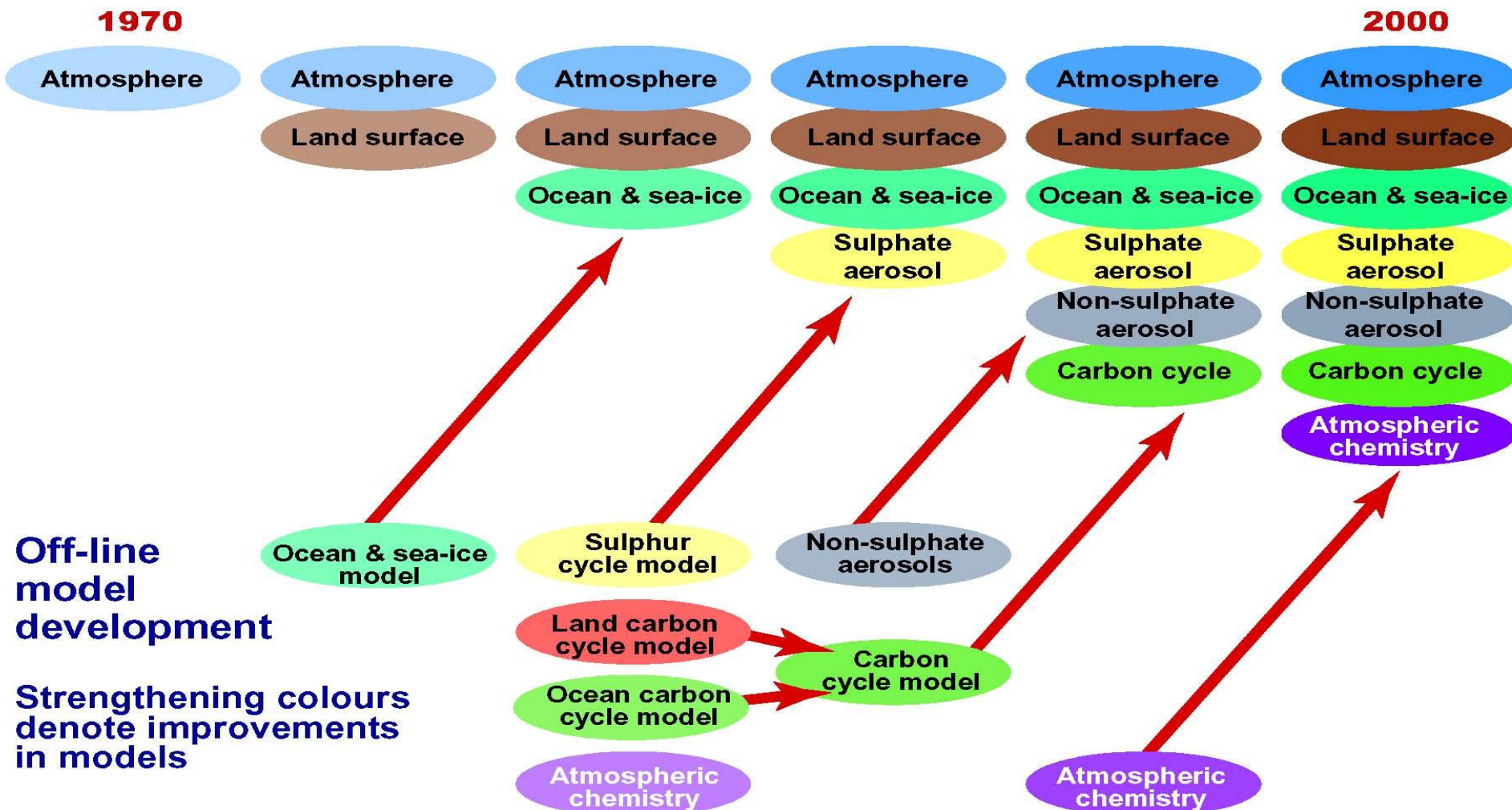


Площадь морского льда в северном полушарии, млн. кв. км в марте (а) и сентябре (б) по данным контрольного эксперимента (голубая кривая), эксперимента по воспроизведению климата XX века (зеленая), экспериментов В1 (желтая), А1В (оранжевая), А2 (красная кривая).



От климатических моделей к моделям системы Земля

Towards Comprehensive Earth System Models



T. Reichler & J. Kim, 2008

TABLE 1. Climate variables and corresponding validation data. Variables listed as “zonal mean” are latitude–height distributions of zonal averages on twelve atmospheric pressure levels between 1000 and 100 hPa. Those listed as “ocean,” “land,” or “global” are single-level fields over the respective regions. The variable “net surface heat flux” represents the sum of six quantities: incoming and outgoing shortwave radiation, incoming and outgoing longwave radiation, and latent and sensible heat fluxes. Period indicates years used to calculate observational climatologies.

Variable	Domain	Validation data	Period
Sea level pressure	ocean	ICOADS (Woodruff et al. 1987)	1979–99
Air temperature	zonal mean	ERA-40 (Simmons and Gibson 2000)	1979–99
Zonal wind stress	ocean	ICOADS (Woodruff et al. 1987)	1979–99
Meridional wind stress	ocean	ICOADS (Woodruff et al. 1987)	1979–99
2-m air temperature	global	CRU (Jones et al. 1999)	1979–99
Zonal wind	zonal mean	ERA-40 (Simmons and Gibson 2000)	1979–99
Meridional wind	zonal mean	ERA-40 (Simmons and Gibson 2000)	1979–99
Net surface heat flux	ocean	ISCCP (Zhang et al. 2004), OAFLEX (Yu et al. 2004)	1984 (1981) –99
Precipitation	global	CMAP (Xie and Arkin 1998)	1979–99
Specific humidity	zonal mean	ERA-40 (Simmons and Gibson 2000)	1979–99
Snow fraction	land	NSIDC (Armstrong et al. 2005)	1979–99
Sea surface temperature	ocean	GISST (Parker et al. 1995)	1979–99
Sea ice fraction	ocean	GISST (Parker et al. 1995)	1979–99
Sea surface salinity	ocean	NODC (Levitus et al. 1998)	variable

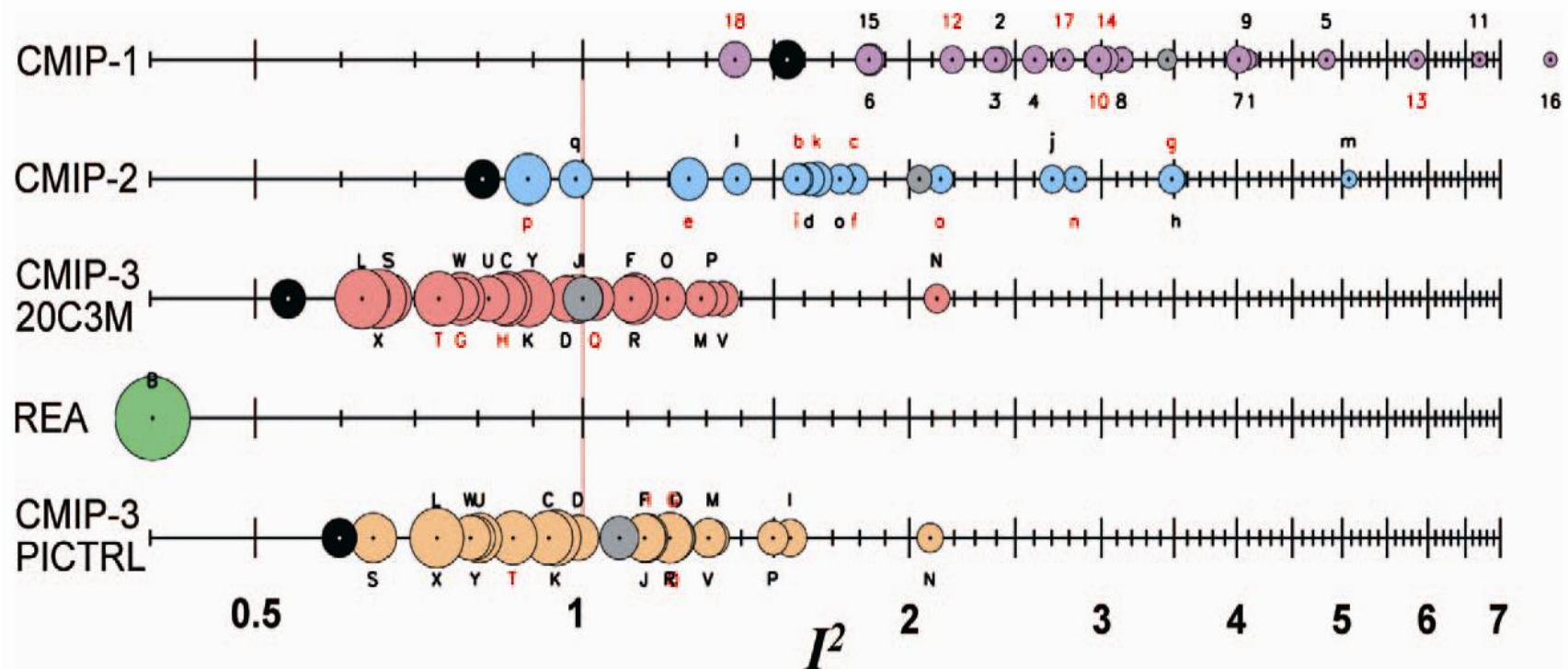


FIG. 1. Performance index I^2 for individual models (circles) and model generations (rows). Best performing models have low I^2 values and are located toward the left. Circle sizes indicate the length of the 95% confidence intervals. Letters and numbers identify individual models (see supplemental online material at doi:10.1175/BAMS-89-3-Reichler); flux-corrected models are labeled in red. Grey circles show the average I^2 of all models within one model group. Black circles indicate the I^2 of the multimodel mean taken over one model group. The green circle (REA) corresponds to the I^2 of the NCEP/NCAR reanalyses. Last row (PICTRL) shows I^2 for the preindustrial control experiment of the CMIP-3 project.

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.



World Modelling Summit for Climate Prediction



ICSU
International Council for Science

ECMWF, Reading, May 6 – 9, 2008

<http://www.ecmwf.int/publications/cms/get/ecmwfnews/1213113497484>

Earth System Model

R. Loft. The Challenges of ESM Modeling at the Petascale

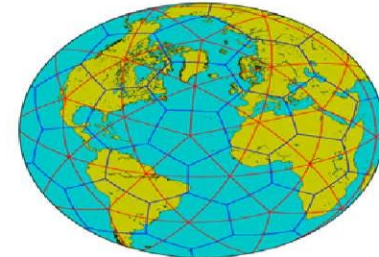
ESM Vision

Coupled Ocean-Land-Atmosphere Model

~1 km x ~1 km (cloud-resolving)
100 levels, **whole atmosphere**
Unstructured, adaptive grids

~100 m
10 levels
Landscape-resolving

~10 km x ~10 km (eddy-resolving)
100 levels
Unstructured, adaptive grids



Assumption: Computing power enhancement by a factor of 10^4 - 10^6

Площадь поверхности Земли: 510 072 000 км²

Palmer T.N. Towards the probabilistic Earth-system simulator: a vision for the future of climate and weather prediction. - Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2012, v. 138, no. 665, p. 841-861.

Масштаб времени: $\tau(k) \propto k^{-3/2} E^{-1/2}(k)$, $[k] = m^{-1}$, $[E] = m^3 / c^2$

Пусть $\tau(k)$ характеризует время, за которое ошибки в спектральной компоненте модельного решения с волновым числом k за счет нелинейных взаимодействий повлияют на точность воспроизведения компоненты с волновым числом $k/2$. Пусть также k_L соответствует (условной) правой границе длинноволновой (крупномасштабной) части спектра.

Вопрос: каково время T , за которое ошибки в коротковолновой части спектра (на больших волновых числах $2^N k_L$, $N \gg 1$) повлияют на воспроизведение крупномасштабных процессов?

$$T(N) = \tau(2^N k_L) + \tau(2^{N-1} k_L) + \dots + \tau(2^0 k_L) = \sum_{n=0}^N \tau(2^n k_L)$$

$$E(k) \propto k^{-3} \quad \rightarrow \quad \tau(k) = \text{const} \quad \rightarrow \quad T(N) \propto N$$

$$E(k) \propto k^{-5/3} \quad \rightarrow \quad \tau(k) \propto k^{-2/3} \quad \rightarrow \quad \lim_{N \rightarrow \infty} T(N) \propto 2.7 \tau(k_L)$$

**On the relation between index
cycles of the atmosphere
circulation and spatial
spectrum of the kinetic energy
in the model of the general
circulation of the atmosphere**

G.I. Marchuk, V.P. Dymnikov and
V.N. Lykossov

Research Department

May 1981

This paper has not been published and should be regarded as an Internal Report from ECMWF.
Permission to quote from it should be obtained from the ECMWF.



European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen

2.2 Small-scale diffusion

The rates of change of momentum, temperature and moisture caused by small-scale diffusion consist of two parts, $F = F^H + F^V$, where subscripts H and V denote the contributions of horizontal diffusion and vertical mixing, respectively. The vertical diffusion and its parameterization in model have been described above.

The horizontal turbulent small-scale diffusion must not affect the total angular momentum of the system. This imposes certain constraints on finite-difference approximations of diffusive terms satisfying dissipative conditions and the conservation of global angular momentum if these terms are represented as

$$F_u^H = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi p_s} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} p_s K_H \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \phi} p_s K_H \cos^3 \phi \frac{\partial \frac{u}{\cos \phi}}{\partial \phi} \right] \quad (20a)$$

$$F_s^H = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi p_s} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} p_s K_H \frac{\partial s}{\partial \lambda} + \cos \phi \frac{\partial}{\partial \phi} p_s K_H \cos \phi \frac{\partial s}{\partial \phi} \right] \quad (20b)$$

where $S = v, T, q$. In (20) K_H is the horizontal diffusion coefficient, which

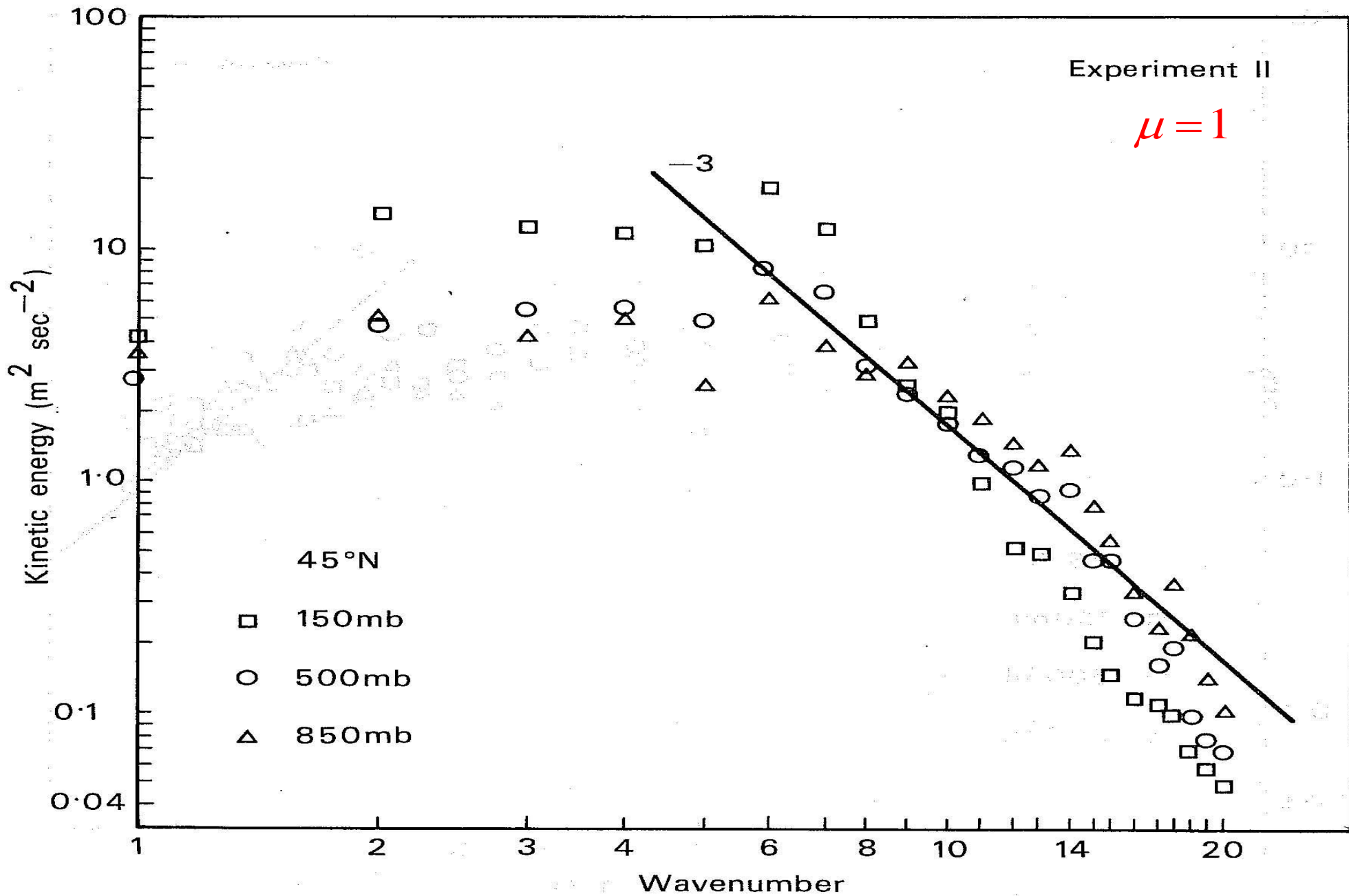


Fig. 3 Same as Fig. 2 but for Experiment II.

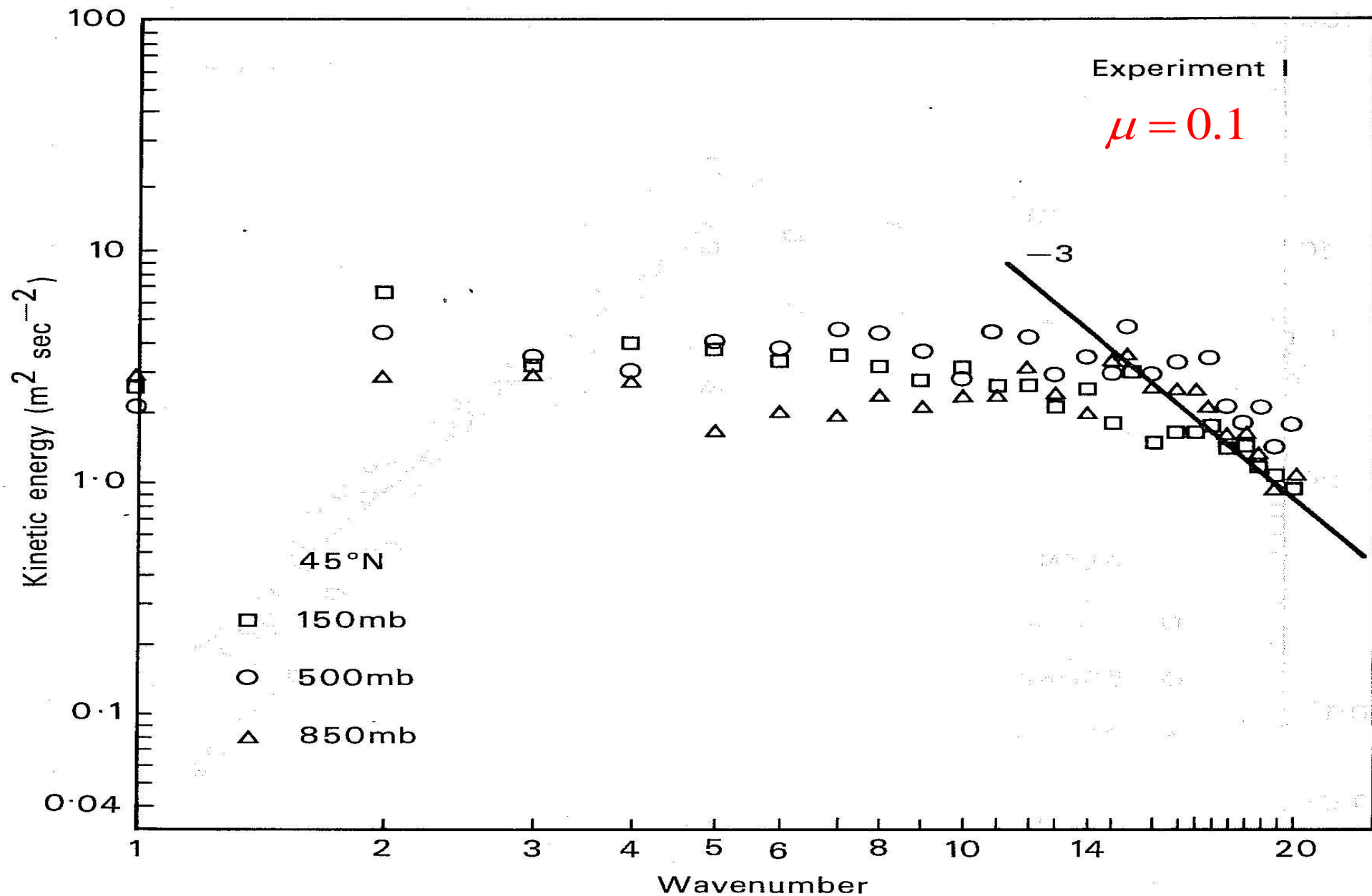


Fig. 2 Spectral distribution of eddy kinetic energy at 45°N (Experiment I).

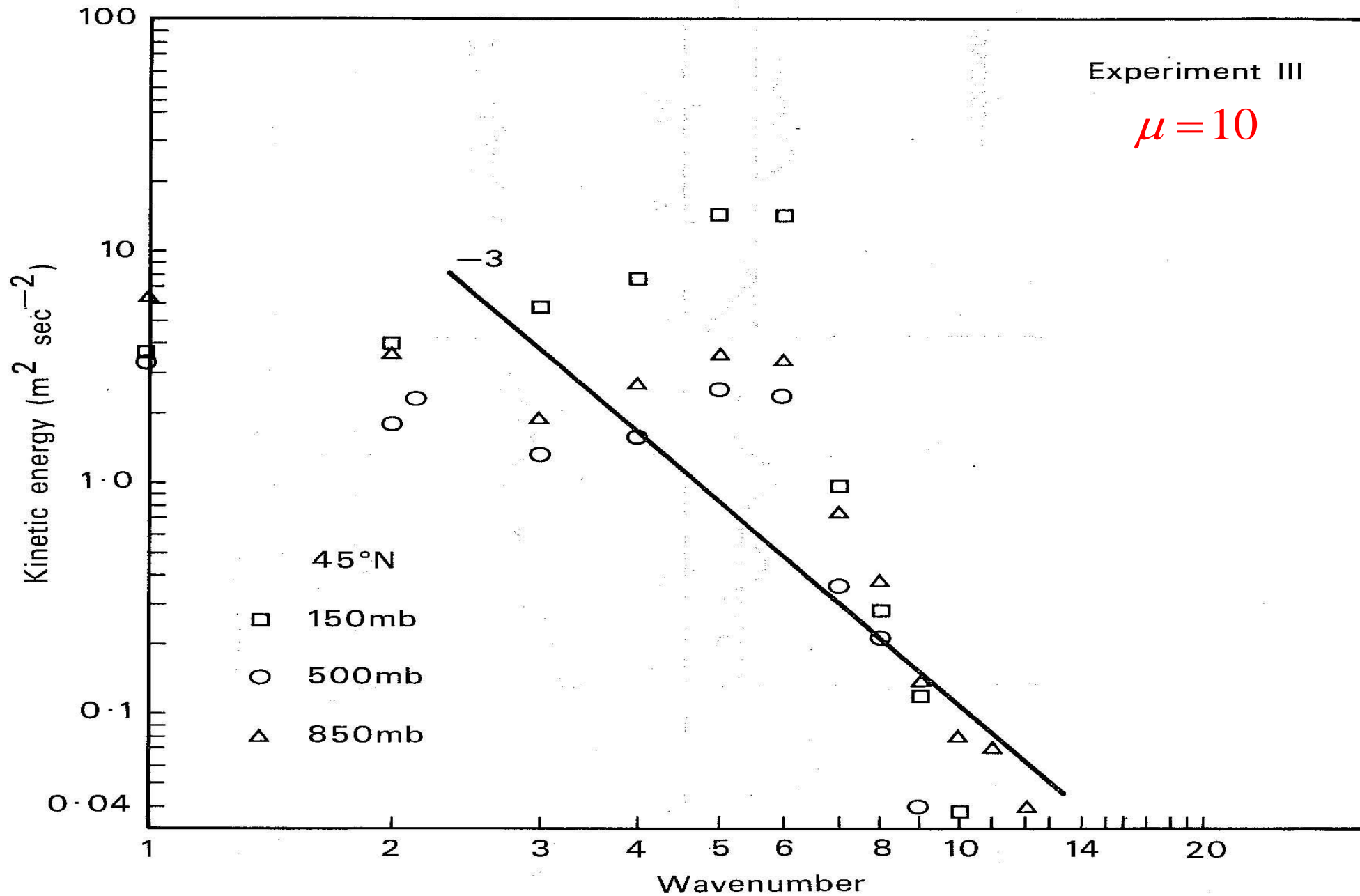
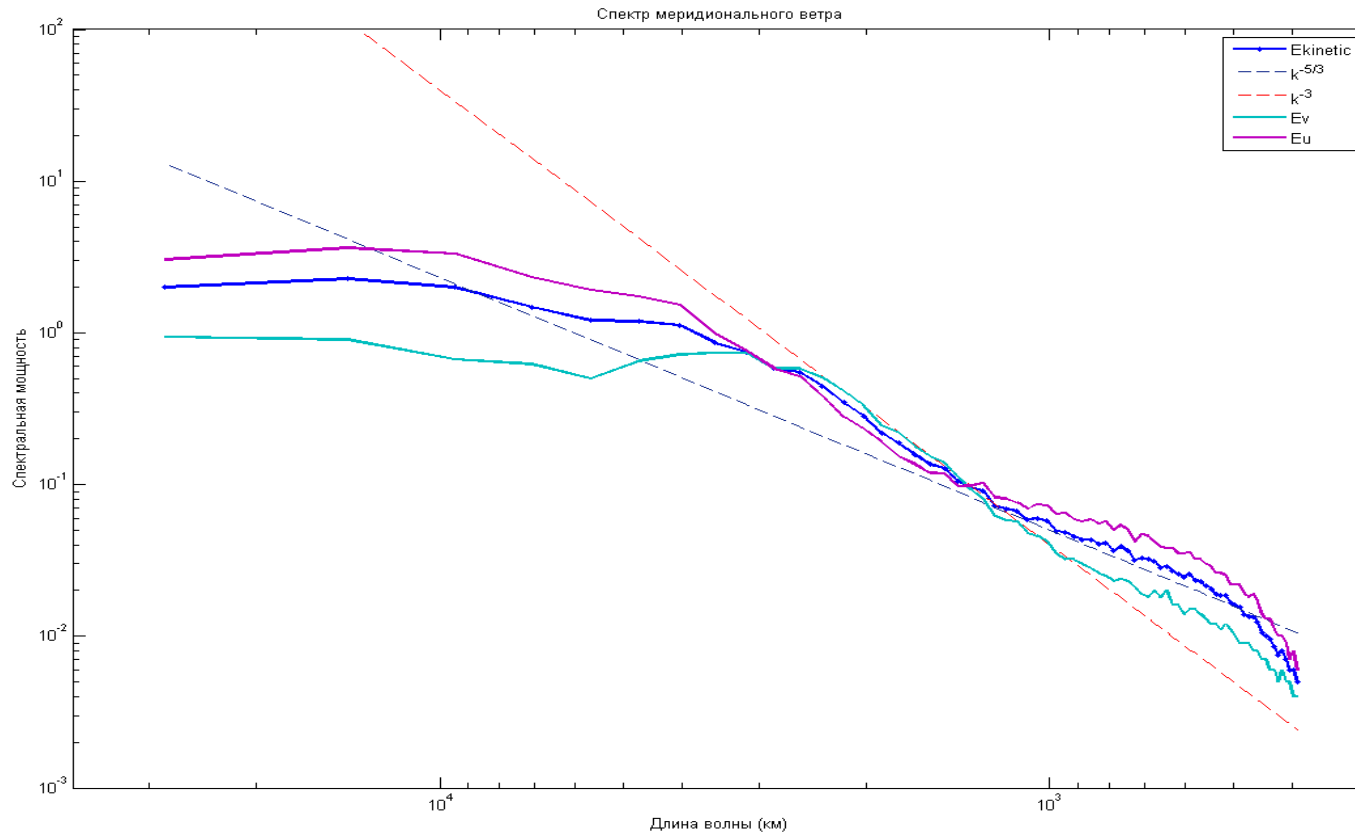
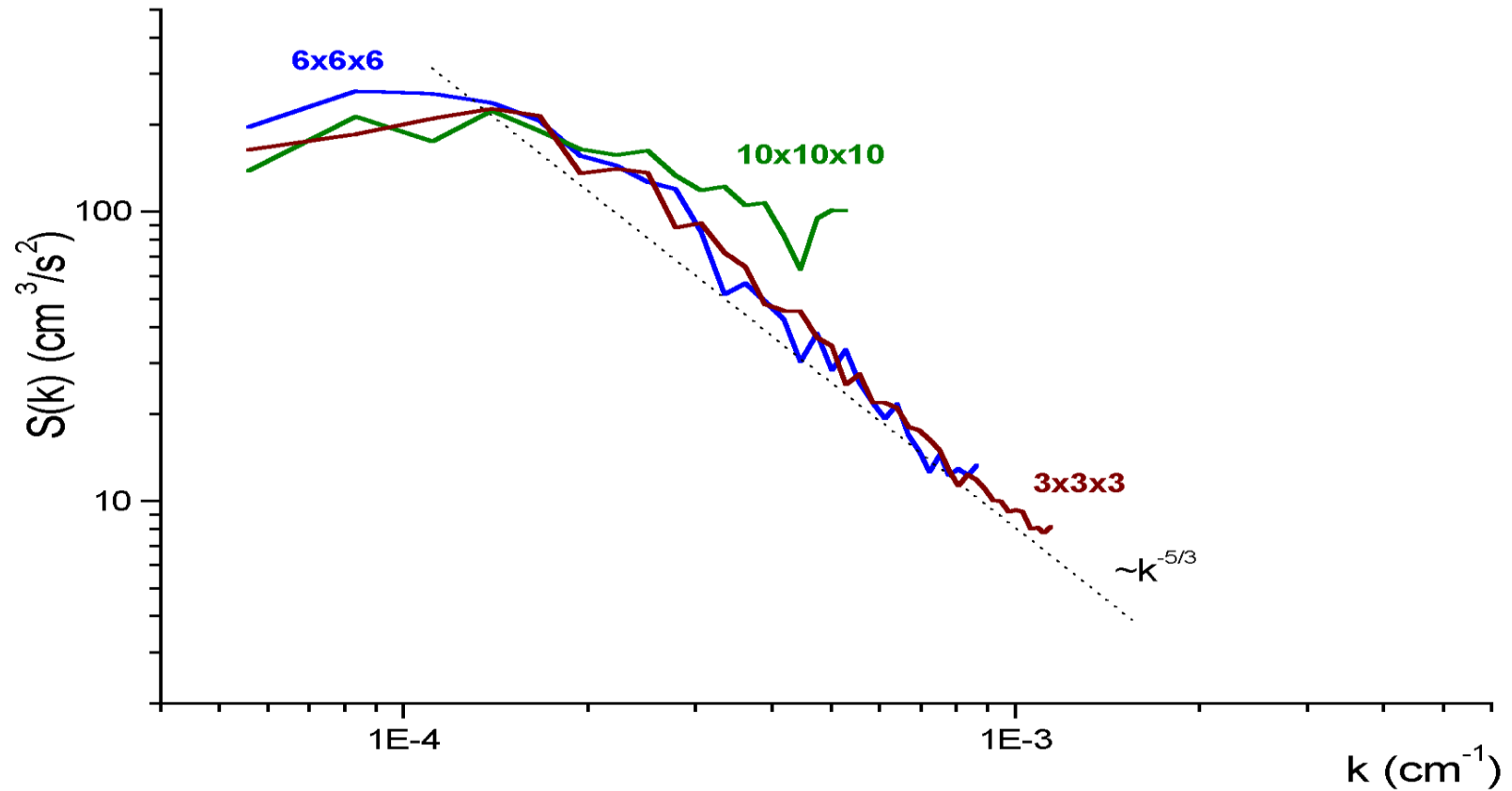


Fig. 4 Same as Fig. 2 but for Experiment III.

Средние спектральные распределения квадратов зональной и меридиональной горизонтальных составляющих скорости ветра, а также кинетической энергии по результатам моделирования с помощью модели ОЦА ИВМ РАН 2 x2.5 x80 для зимних месяцев на высоте 200 мбар, для 60 с.ш.





Spectra of kinetic energy calculated using results of large-eddy simulation of the convective upper oceanic layer under different spatial resolution (m^3)

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.

Koshyk and Hamilton (2001): модель ОЦА GFDL (USA) с горизонтальным разрешением около 35 км => в тропосфере спектральное распределение рассчитанной кинетической энергии соответствовало закону степени «-3» на масштабах от 5000 до 500 км и закону степени «-5/3» на меньших масштабах. В стратосфере и мезосфере – подобные же распределения, но переход от одного закона к другому – на масштабах 2000 и 4000 км, соответственно, что противоречит данным наблюдений и может свидетельствовать о недостатках **параметризации подсеточных процессов**.

Эксперименты с региональной моделью WRF (Skamarock, 2004) с различным горизонтальным разрешением (22, 10 and 4 км): рассчитанные спектры в мезомасштабном диапазоне хорошо соответствуют наблюдаемым, включая переход от показателя «-5/3» к показателю «-3». Однако модельный спектр в коротковолновой его части оказался сильно зависящим от свойств **вычислительной технологии** (в частности, от уровня **схемной диссипации**).

Takashi Y.O., Hamilton K., Ohfuchi W. Explicit global simulation of the mesoscale spectrum of atmospheric motions. – *Jeophys. Res. Lett.*, 2006, v. 33, L121812, doi: 10.1029/2006GL026429

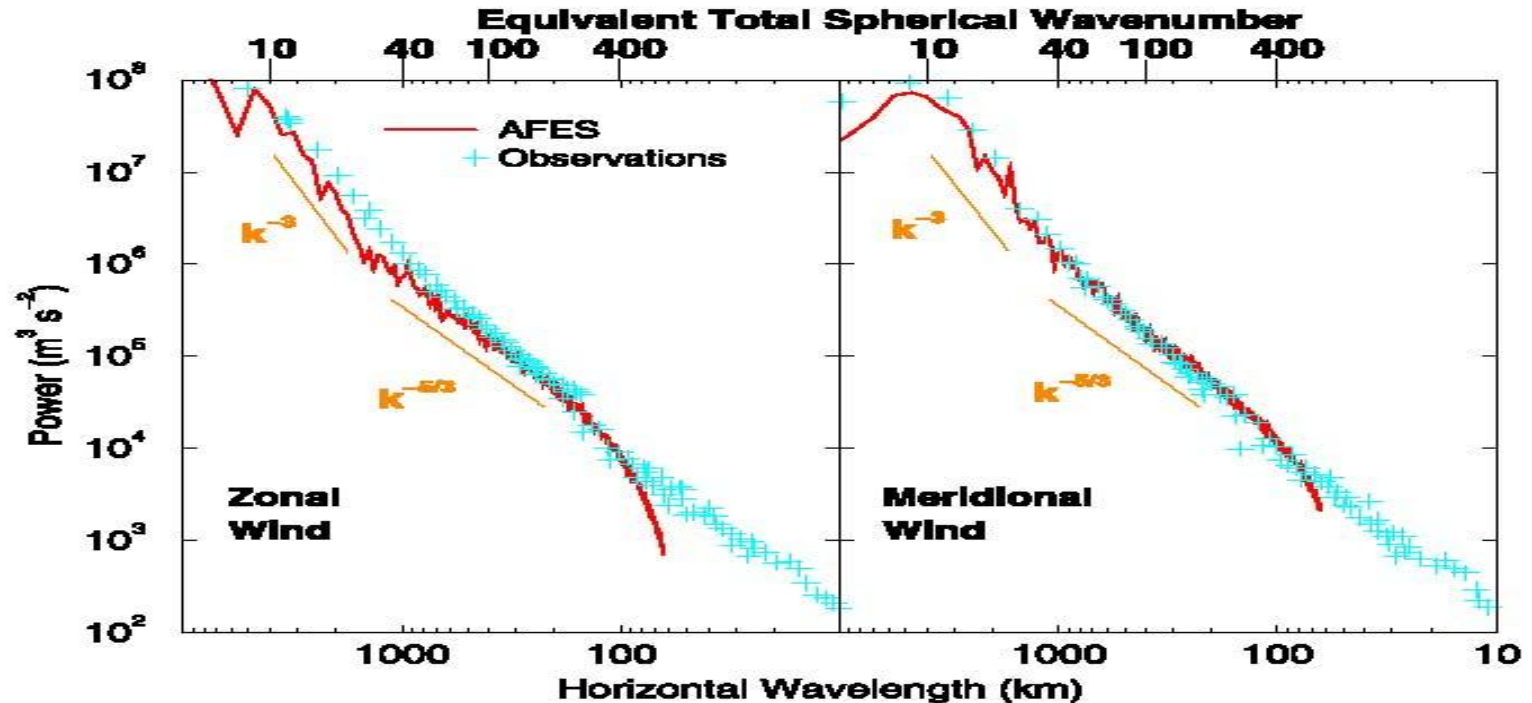


Figure 1. The one-dimensional horizontal power spectra of (left) zonal wind and (right) meridional wind variations near the tropopause. The red curves are computed from wind values taken along the 45N latitude circle at 200 hPa in the T639L24 AFES. The crosses are from *Nastrom and Gage* [1985] and are computed from wind observations taken by commercial airliners. Orange lines show -3 and $-5/3$ slopes.

**Моделирование
региональных и локальных
процессов**

Система оценки региональных гидрологических последствий изменений климата (Грант РФФИ 09-05-13562-офи_ц)

Модели водоема

Климатическая модель ИВМ РАН

Ансамблевые расчеты по модели прогноза погоды ИВМ РАН – Гидрометцентра

Расчеты климата XXI века новой версией модели ИВМ РАН по сценариям IPCC

Оценка стока больших рек

Статистическая детализация («даунскейлинг») расчетов

Развитие технологий мезомасштабной детализации метеорологических полей (турбулентные замыкания и сопряжение с вихреразрешающей моделью)

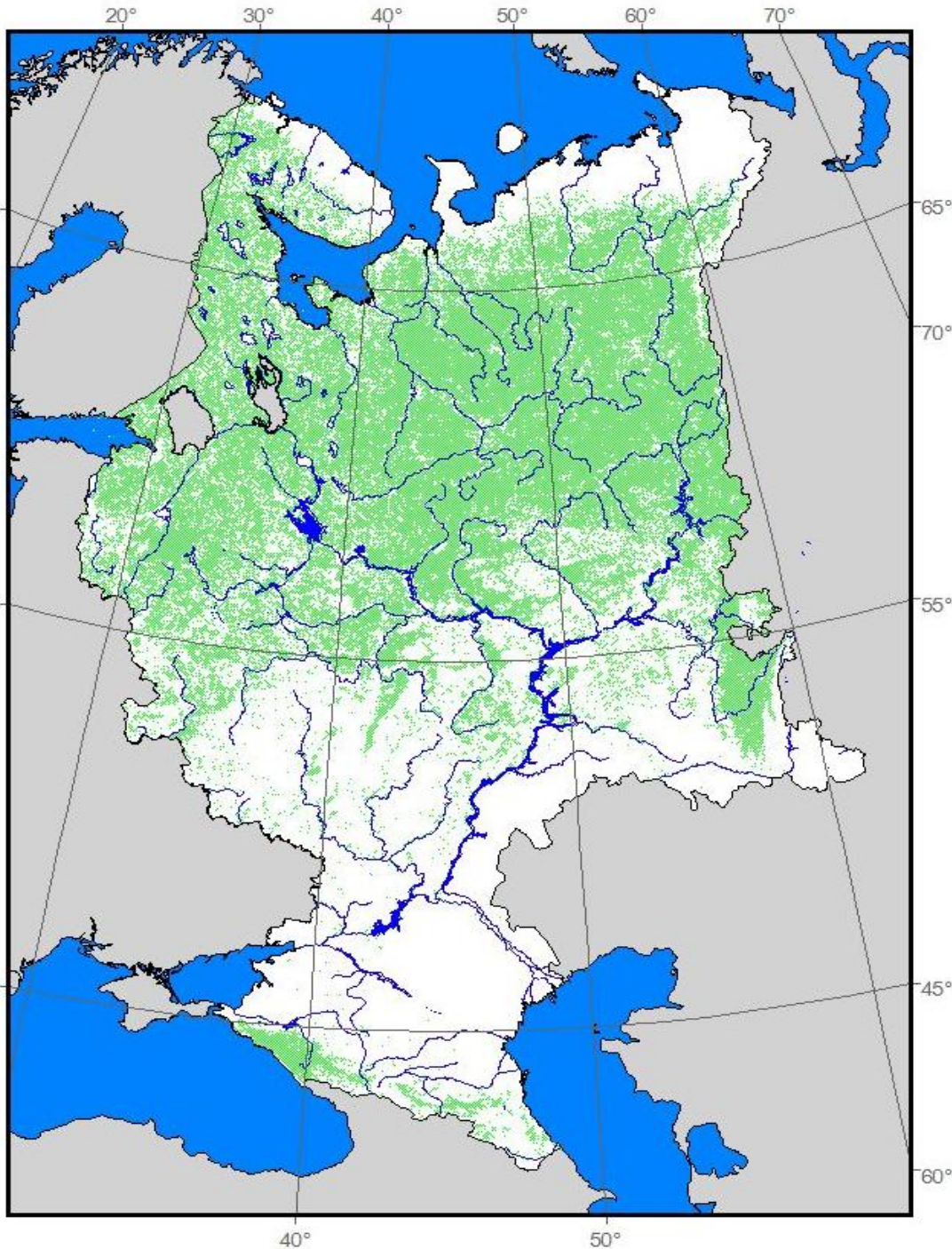
Оценка стока средних и малых рек

- 1) Оценка эффектов водоемов на региональный климат и его изменения в будущем
- 2) Оценка эволюции вечной мерзлоты, снежного покрова, термокарстовых озер и эмиссии метана

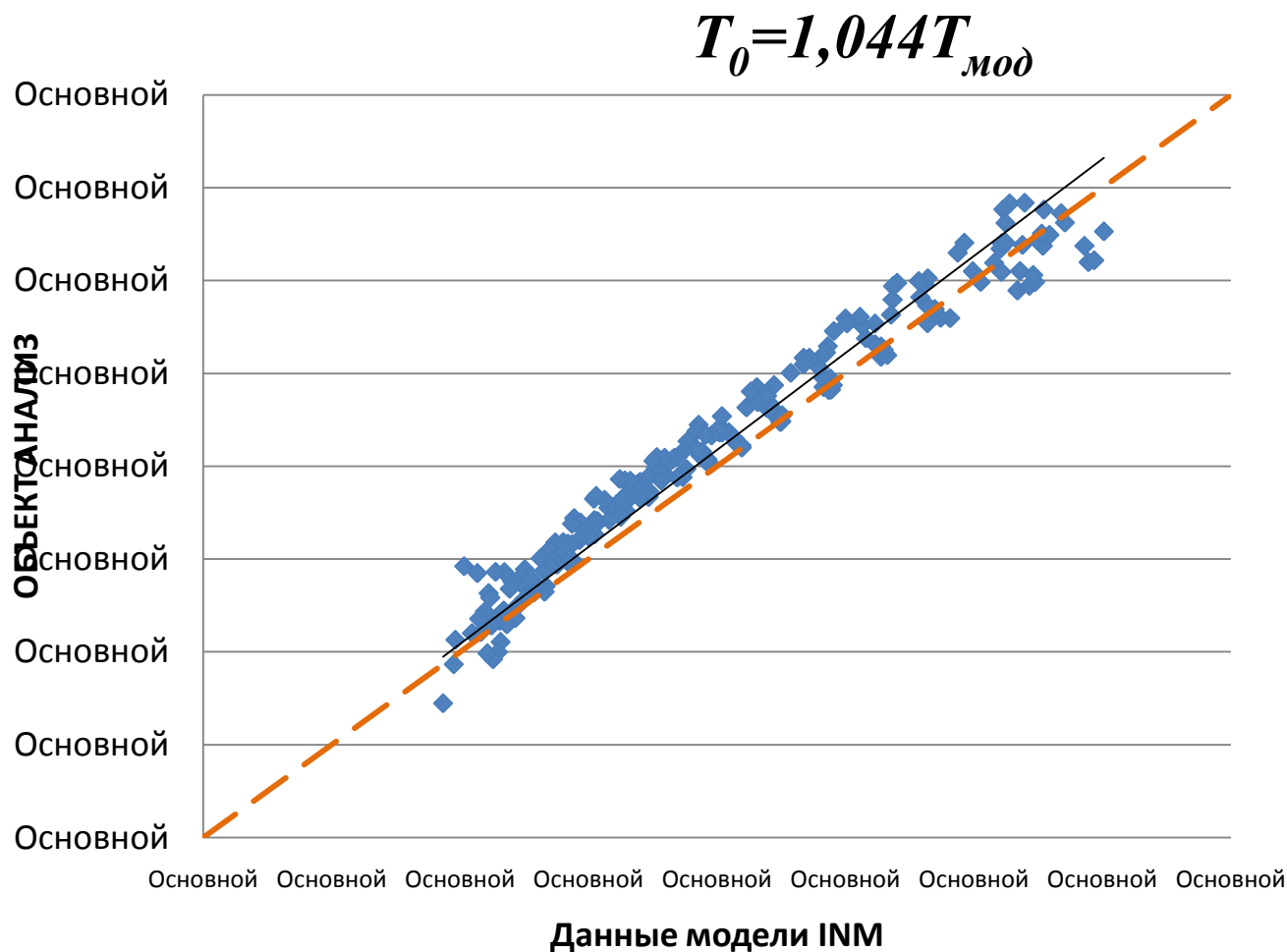
Территория Восточно-Европейской равнины

(Кислов и др., 2008, Сидорова, 2010)

- Площадь около 5 млн. км²
- Значительная пространственная однородность физико-географических условий
- Хорошая обеспеченность данными гидрометеорологических наблюдений и результатами климатического моделирования



Воспроизводимость суммы положительных температур за год (T_0), °С климатической моделью ИВМ РАН для периода 1961-1989гг.

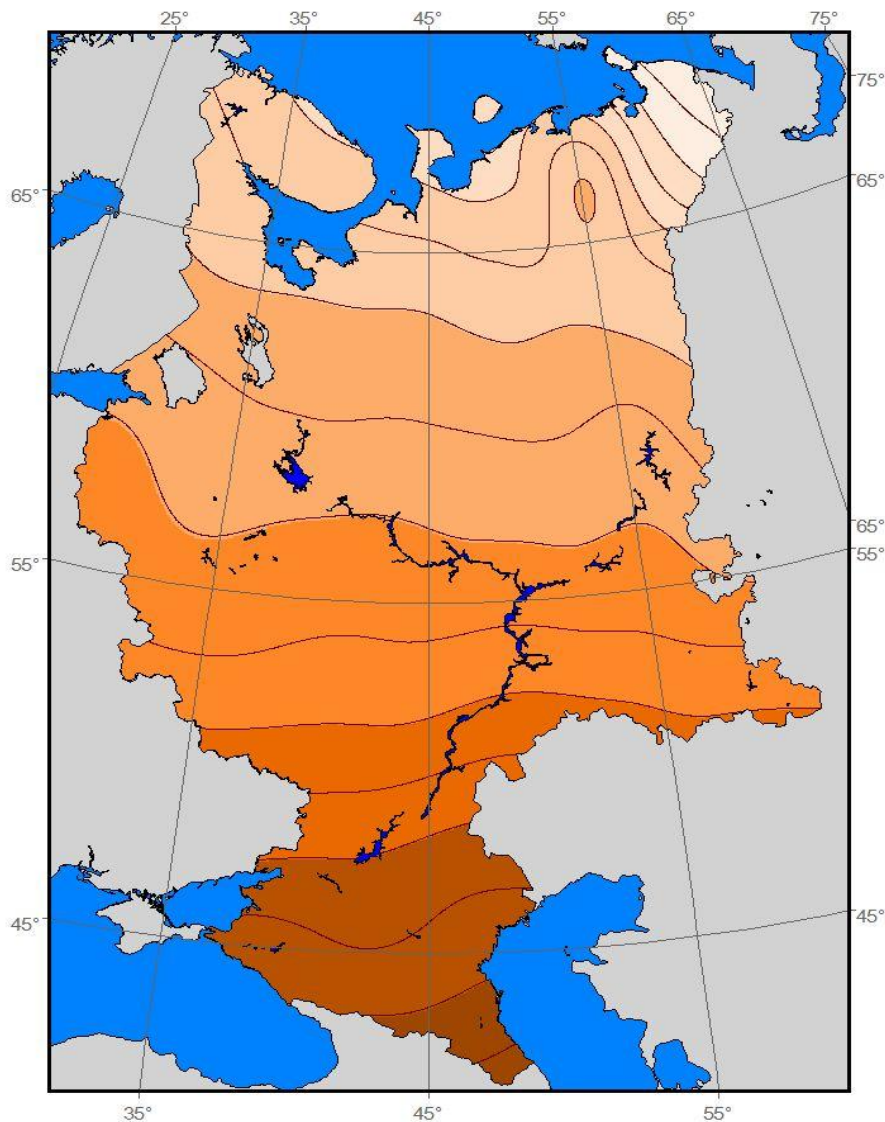


*коэффициент
корреляции
 $r = 0,975$,
остаточное
среднеквадратическое
отклонение
(ост.СКО) $\pm 5,8^\circ$
при среднем
по территории
значении $84,3^\circ$*

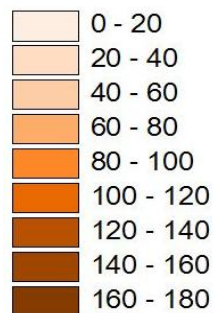
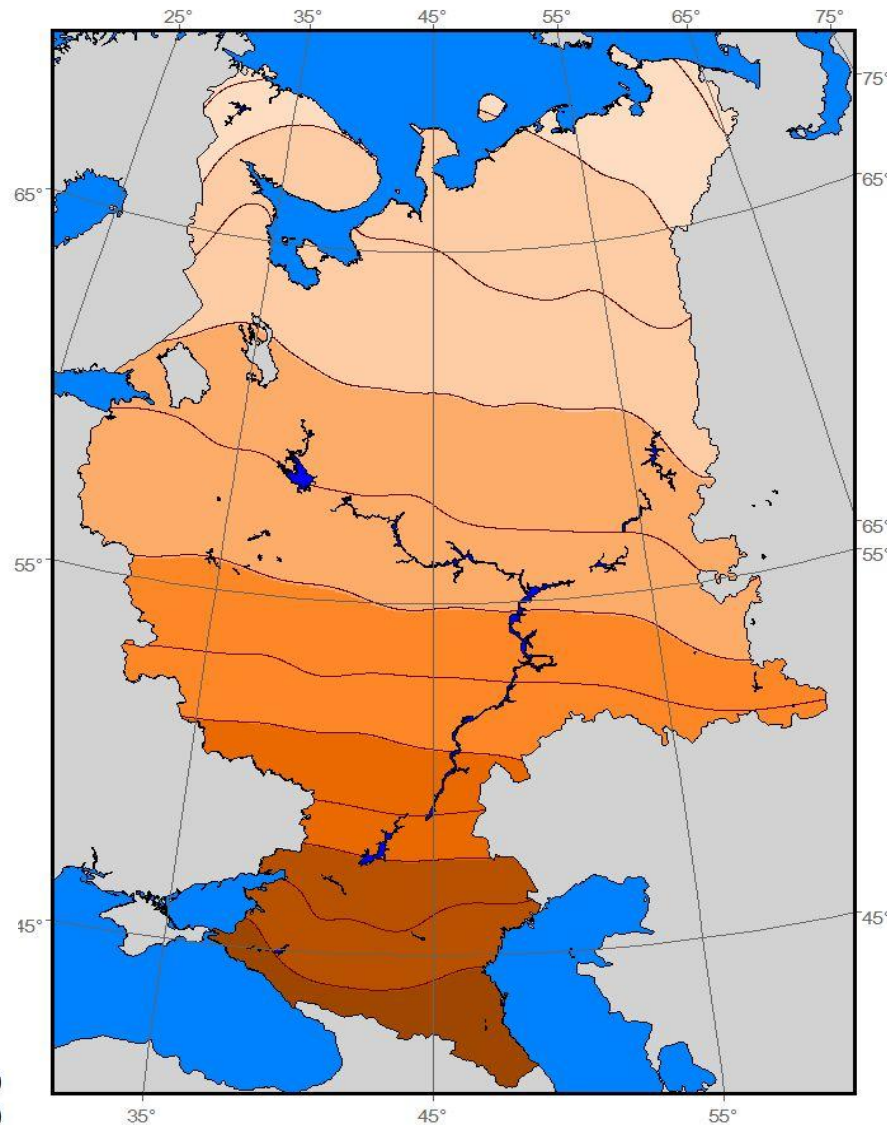
Черная линия – линия тренда соответствующая уравнению регрессии,
Оранжевый пунктир – линия $x = y$

Воспроизводимость суммы положительных температур за год (T_0), °С климатической моделью ИВМ РАН для периода 1961-1989гг.

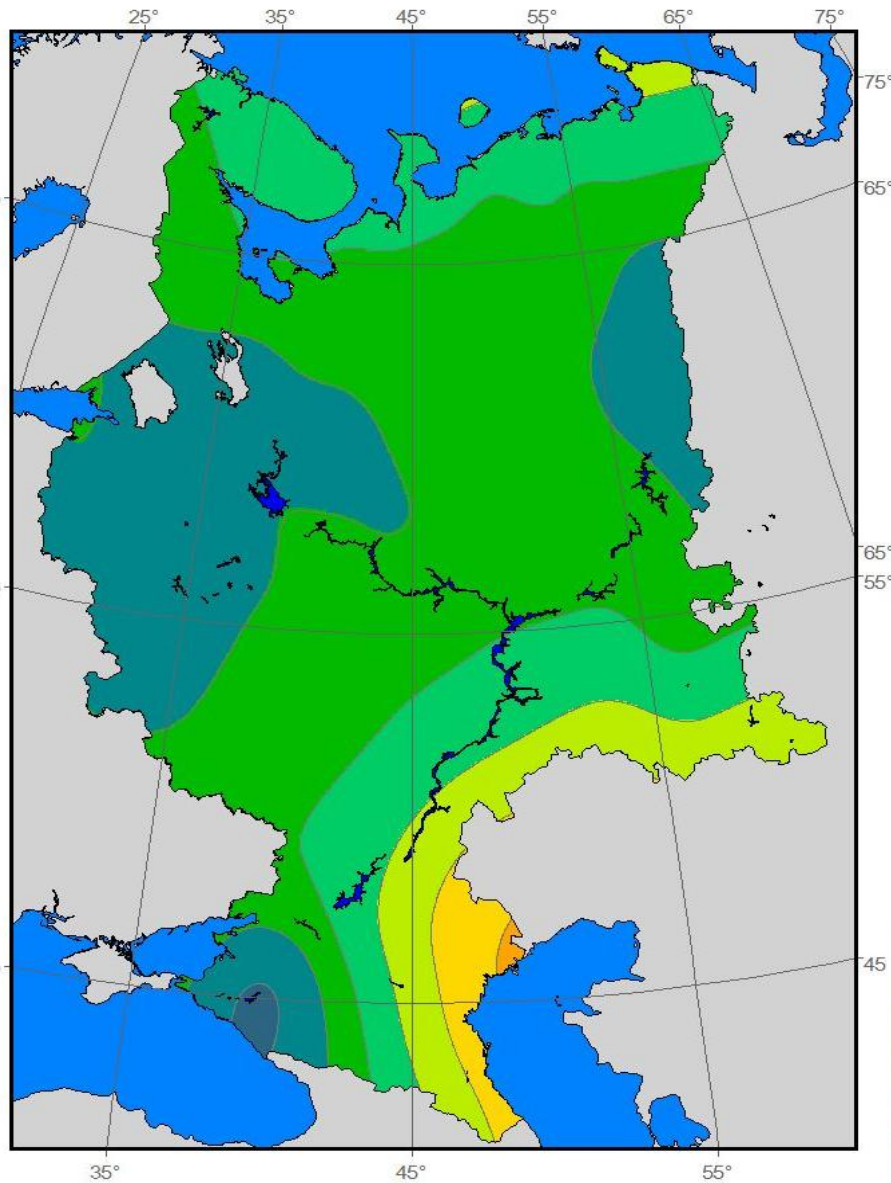
Фактические данные



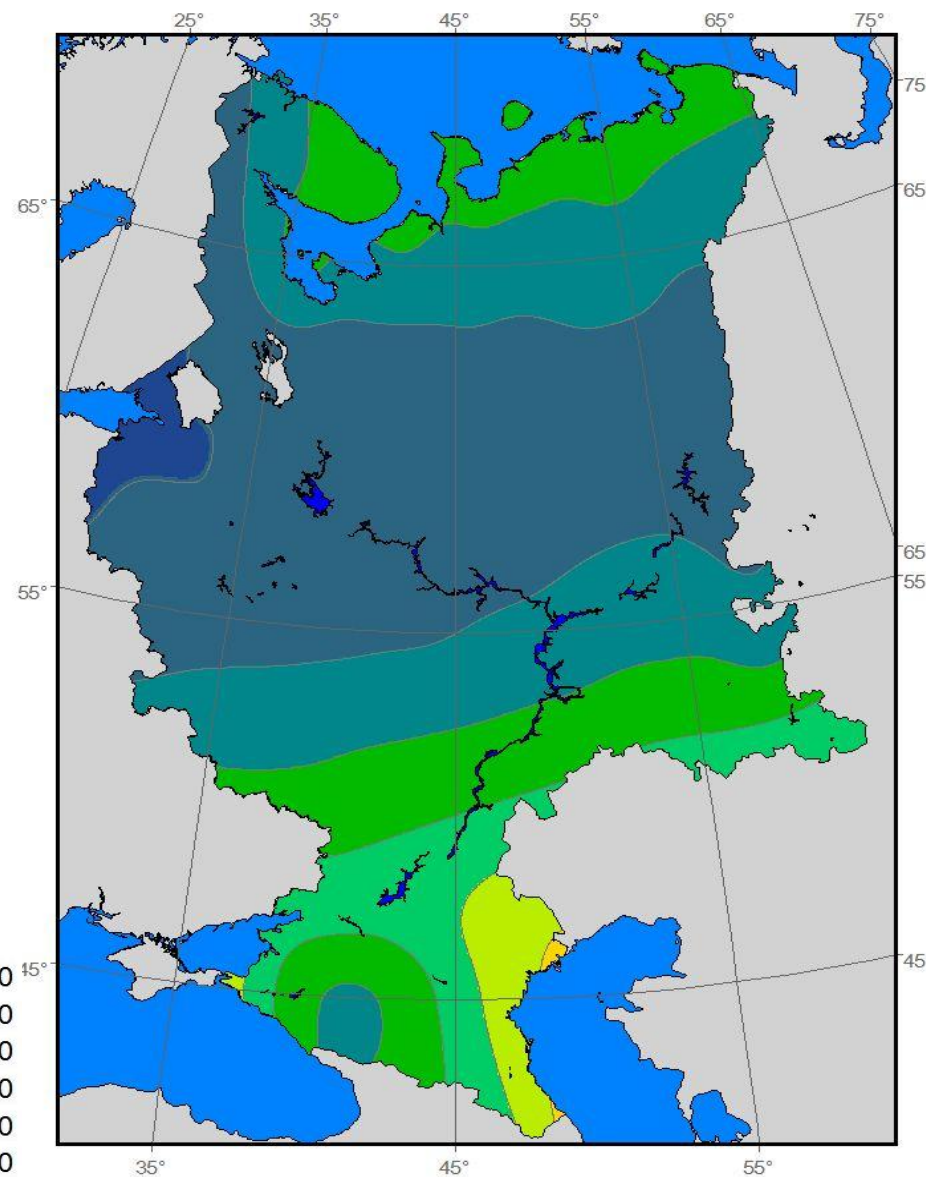
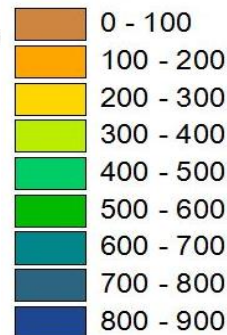
Данные моделирования ИВМ РАН



Воспроизводимость суммы осадков за год (P), мм климатической моделью ИВМ РАН для периода 1961-1989гг.

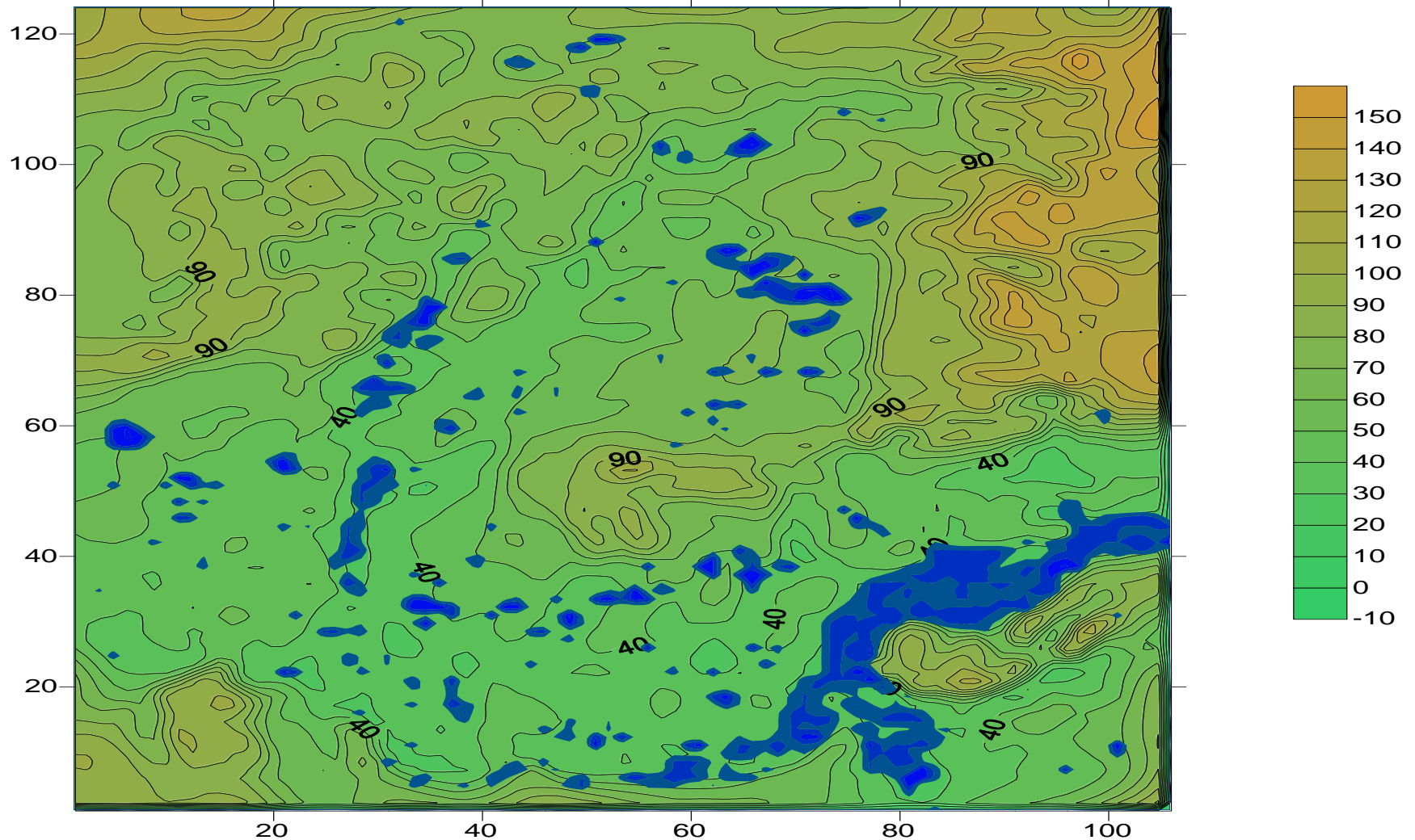


Фактические данные

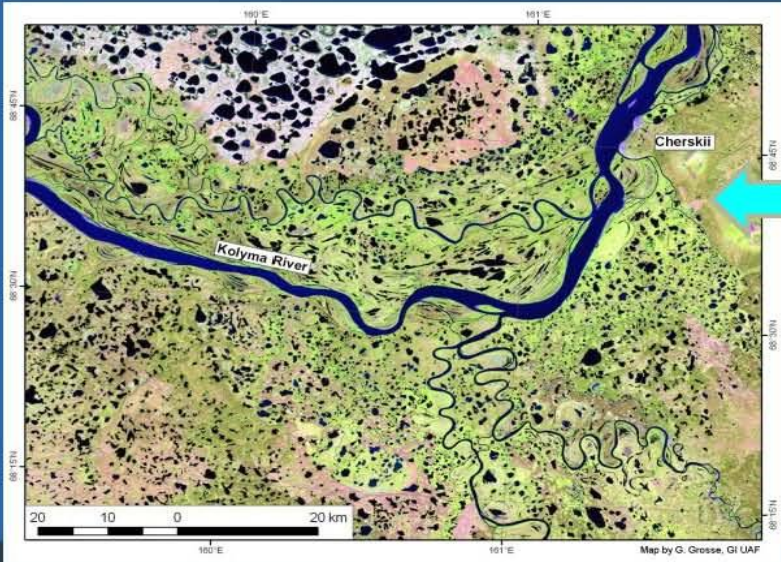


Данные моделирования ИВМ РАН

Западная Сибирь, 54.5-58.6 с.ш., 63.1-66.6 в.д., рельеф и водные объекты



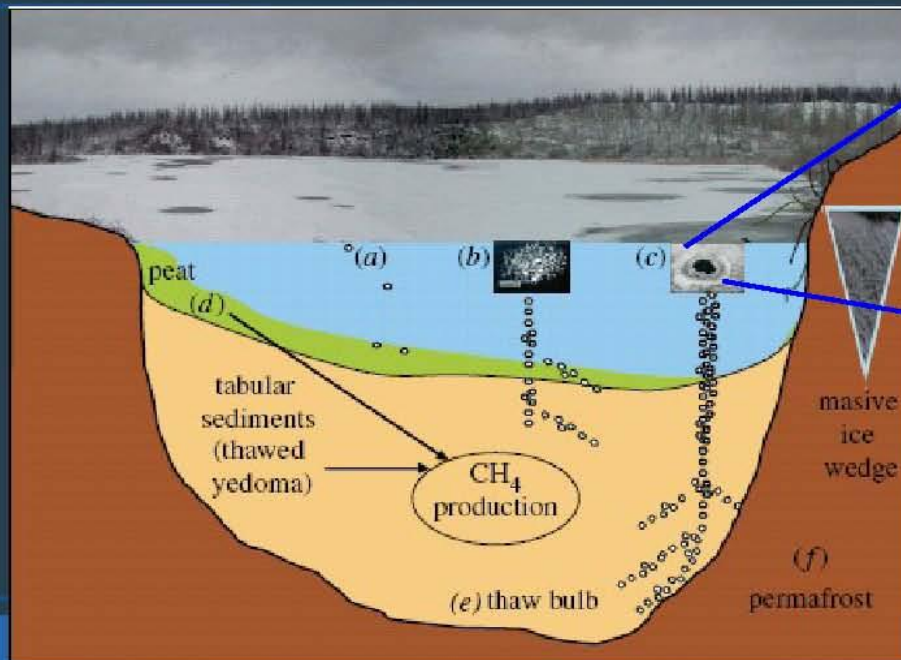
Emissions of methane by thermokarst lakes



- thermokarst lakes in Northern Siberia occupy 22-48% of the area
- satellite images indicate expanding of thermokarst lakes area



Unfreezing “hotspot” – the source of methane during wintertime



- 8 - 50% of anthropogenic emissions in XXI century depending on IPCC scenario (K. Walter et al., 2006, *Nature*)

Уравнения мезомасштабной гидротермодинамики атмосферы

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

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

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

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

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

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

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

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

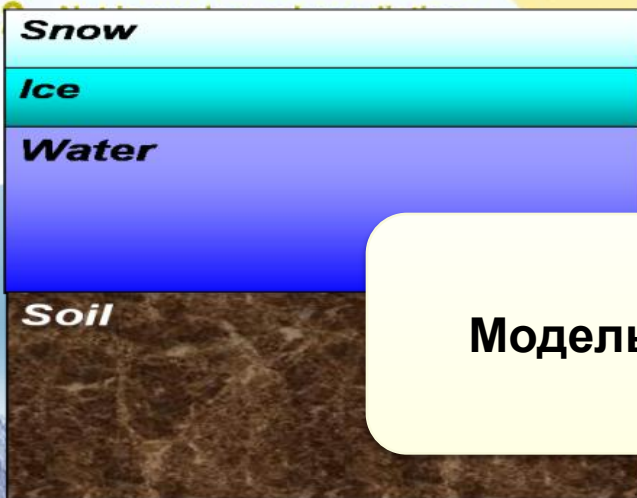
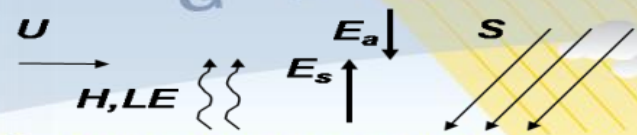
РАЗВИТИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ В НИВЦ МГУ (Степаненко и др., 2006, Степаненко и Микушин, 2008)



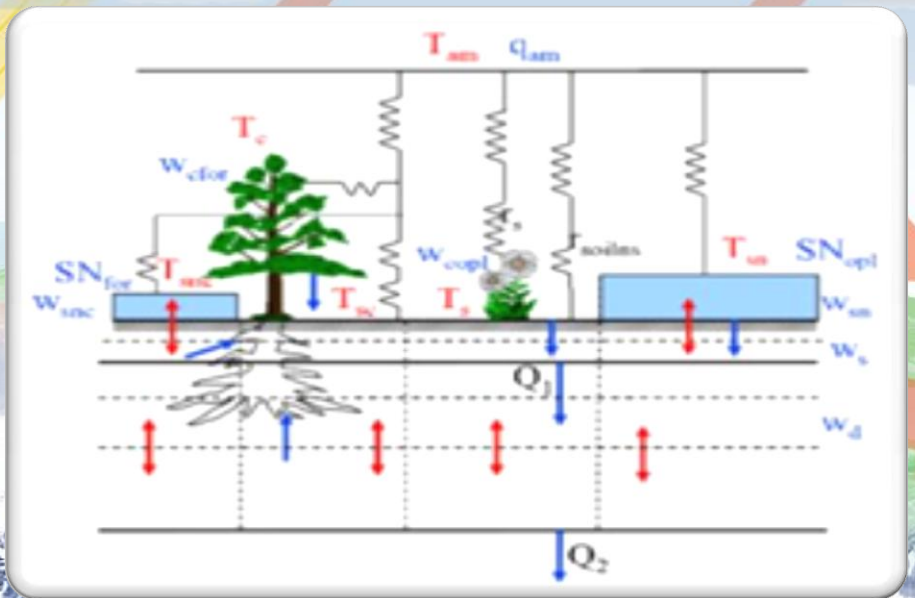
Модель переноса атмосферных аэрозолей

Модель переноса
солнечного и
теплового излучения

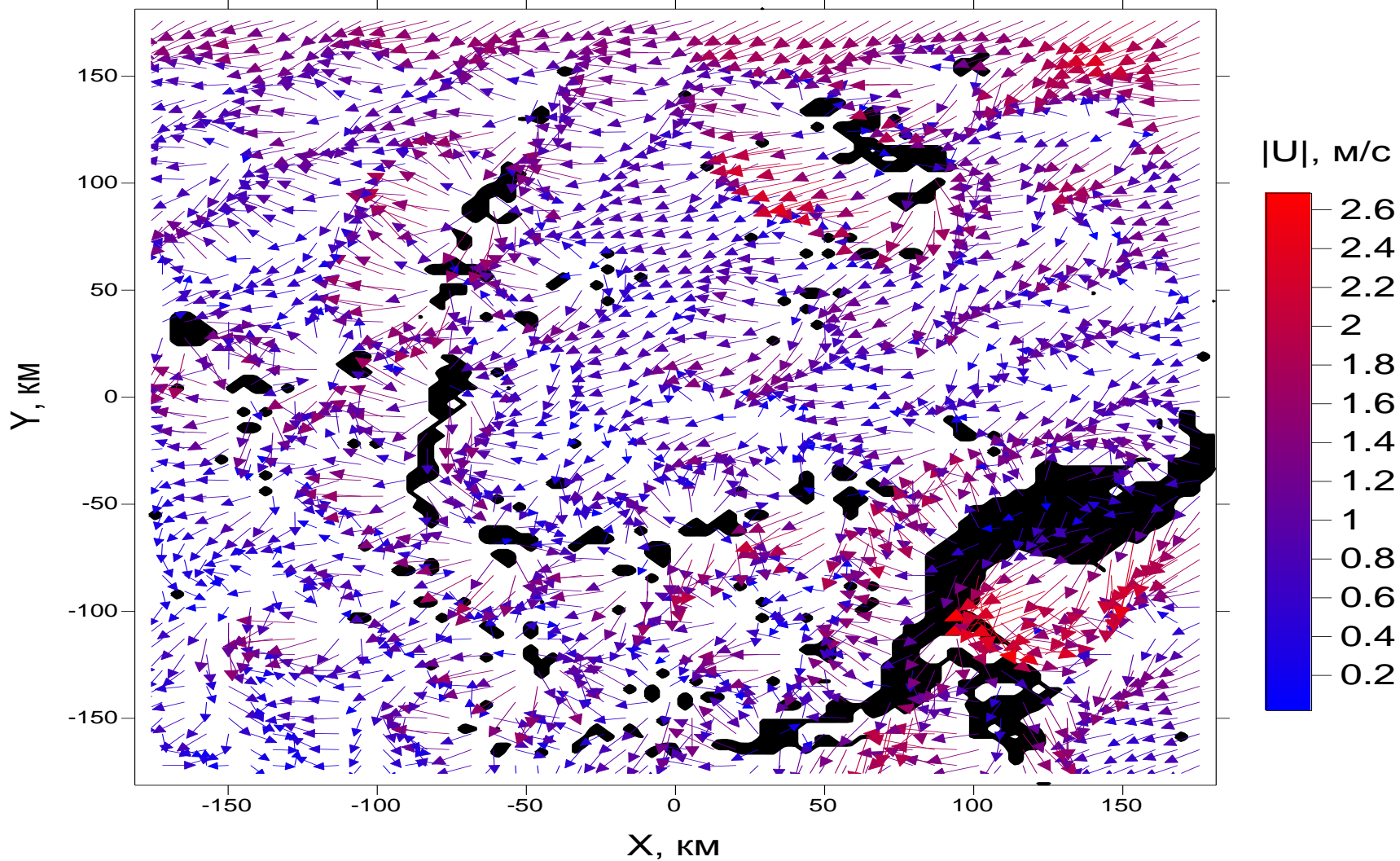
Модель снежного покрова и
деятельного слоя суши



Модель водоема



Скорость ветра

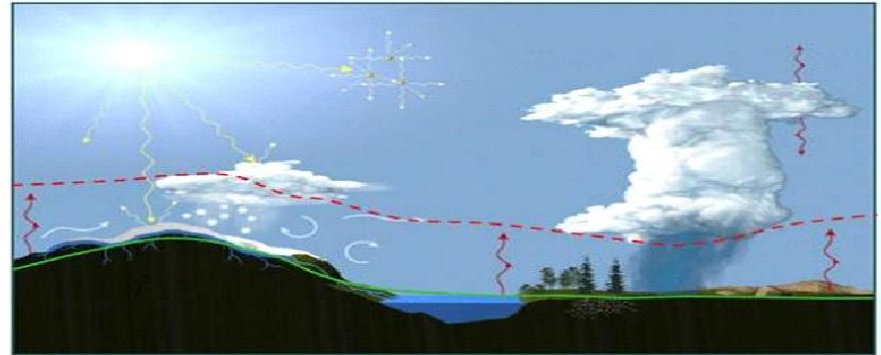


Геофизические пограничные слои

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 - $Re \sim 10^5 - 10^6$

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).

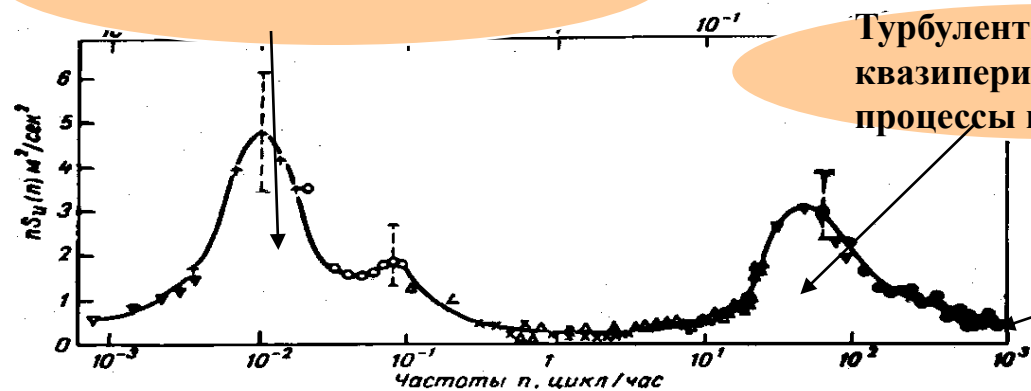
В данном случае модель воспроизводит только средние значения скорости (и, при необходимости, скалярных величин, например температуры, влажности воздуха, концентрации примеси), а влияние всех флуктуаций учитывается при помощи турбулентных замыканий. Под осреднением в RANS понимается осреднение по ансамблю 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**.

Синоптическая изменчивость

$$L \sim 10^3 \text{ м}, U \sim 10^1 \text{ м/с}, (\nu/\rho_0) \sim 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$



Спектр скорости ветра в приземном слое атмосферы (по Ван дер Ховену (1957)), n — частота, $S_u(n)$ — спектральная плотность.

Турбулентные и квазипериодические процессы в ПСА

$$\tilde{\eta} = \eta/L$$

$$\tilde{\eta} = O(Re^{-3/4})$$

$$Re = \frac{UL}{(\nu/\rho_0)}$$

$$Re \sim 10^9$$

$$\tilde{\eta} \sim 10^{-7}$$

$$N = \tilde{\eta}^{-3} \sim 10^{21}$$

Требования к DNS

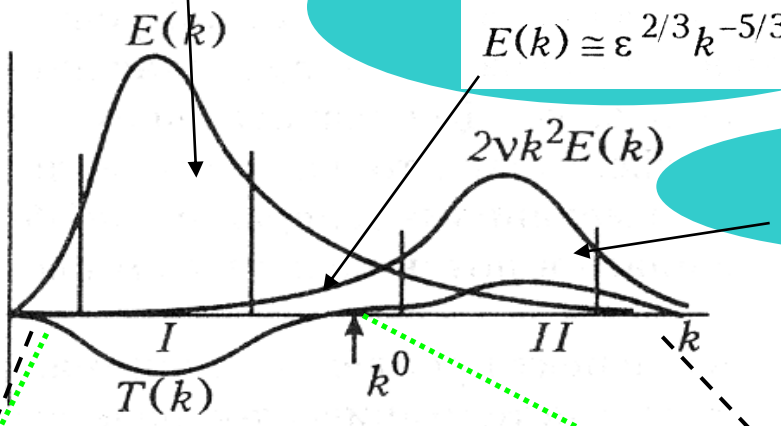
Современные компьютеры не способны выполнять такие вычисления!

Интервал генерации

Инерционный интервал

$$E(k) \cong \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$$

Интервал диссипации



Принципиальная невозможность корректно задать граничные условия.

В DNS необходимо явно описать все особенности подстилающей поверхности.

LES - наиболее перспективный подход для решения практических задач по моделированию турбулентных процессов в геофизических ПС.

DNS (Direct Numerical Simulation)

LES (Large Eddy Simulation)

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

три подхода к моделированию турбулентности

LES

$$F(a(x, t)) \equiv \bar{a}(x, t) = \int_{R^3} G(x - x', \Delta_f) a(x', t) dx'$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \bar{F}_i^e,$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j.$$

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i$$

$$\tau_{ij} = L_{ij}^g + C_{ij}^g + R_{ij}^g$$

$$\tau^g(\varphi, \psi) = \overline{\varphi \psi} - \bar{\varphi} \bar{\psi}$$

$$C_{ij}^g = \tau^g(\bar{u}_i, u'_j) + \tau^g(\bar{u}_j, u'_i),$$

$$R_{ij}^g = \tau^g(u'_i, u'_j).$$

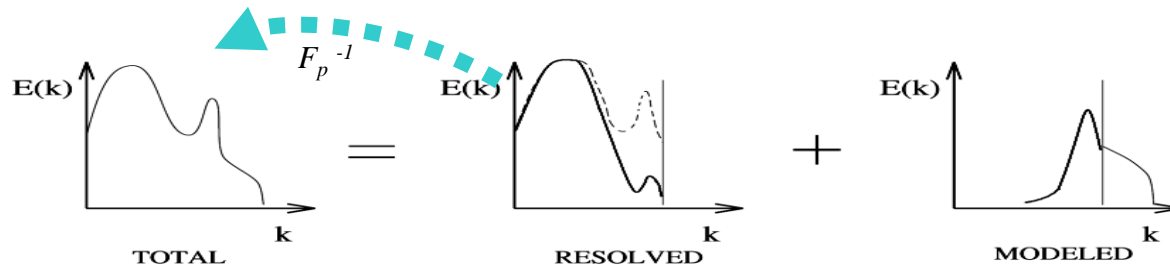
Воспроизводится явно на сетке модели

$$L_{ij}^g = \tau^g(\bar{u}_i, \bar{u}_j)$$

Параметризуется с учетом заданного оператора фильтрации (динамическое локализованное замыкание)

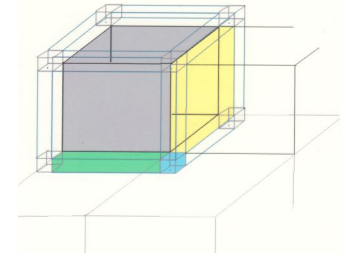
$$\tau_{ij}^{mix} = \tau_{ij}^{smag} + \tau_{ij}^{ssm} = -2(C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} + (\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$$

LES с явной фильтрацией. Пространственный фильтр задан явно и используется при построении «подсеточной/подфильтровой модели». Воспроизводится «сглаженное» течение. Применение оператора приближенно равного обратному оператору фильтрации восстанавливает подавленные гармоники.



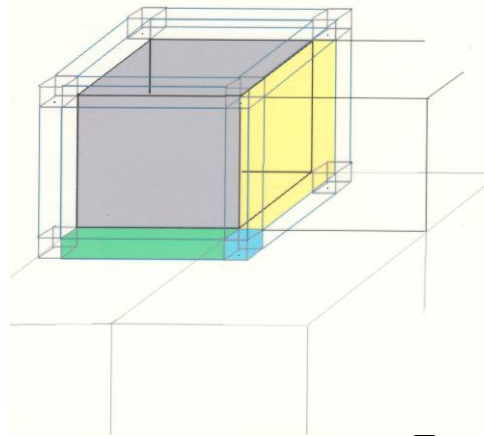
Численная реализация

- Разнесенная сетка.
- Консервативная конечно-разностная схема четвертого порядка точности для всех переменных модели.
- Явная схема интегрирования по времени.
- Периодические или неперидические граничные условия.
- Итерационные солверы для решения уравнения Пуассона и минимизации функционала в турбулентном замыкании.
- Возможность проведения расчетов в областях сложной конфигурации (например обтекание объектов городской застройки)
- Распараллеливание - MPI, 3-D декомпозиция расчетной области



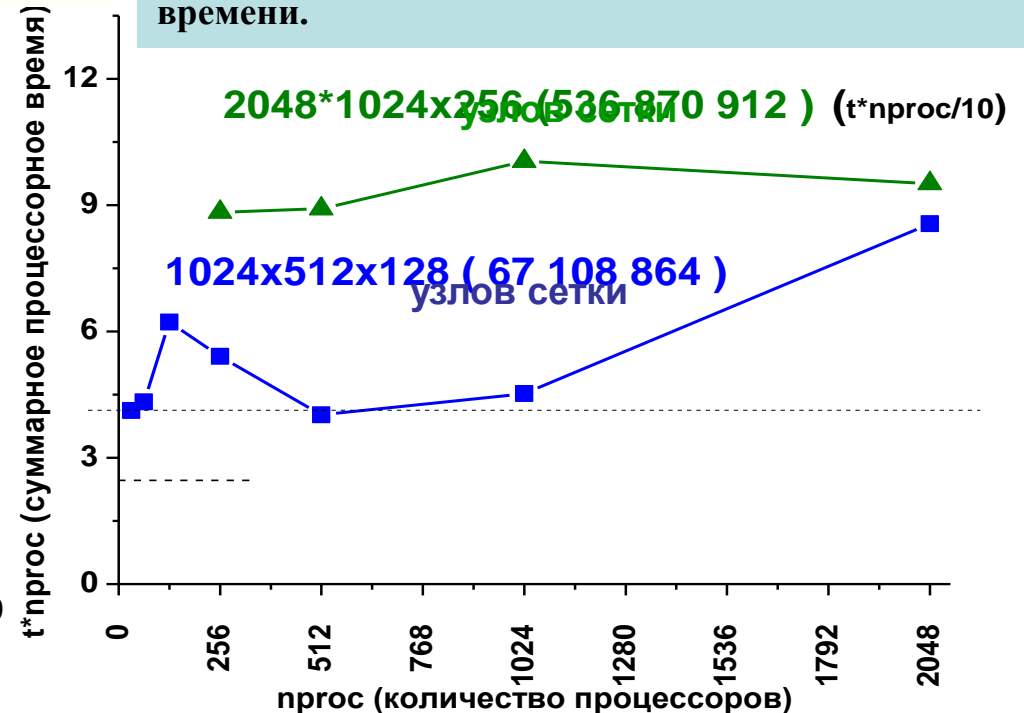
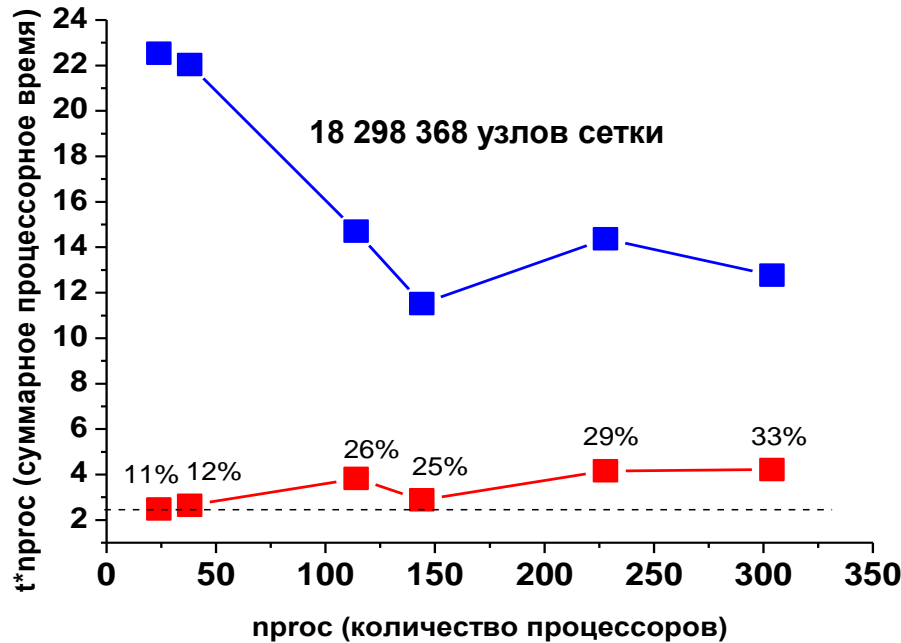
Проведена серия расчетов с размером сеточной области до 2048 x 2048 x 80. Расчеты проводились на суперкомпьютерах «Ломоносов» и «Чебышев».

Параллельные вычисления на суперкомпьютерах «Чебышев» и «Ломоносов»



Параллельная реализация модели (MPI)

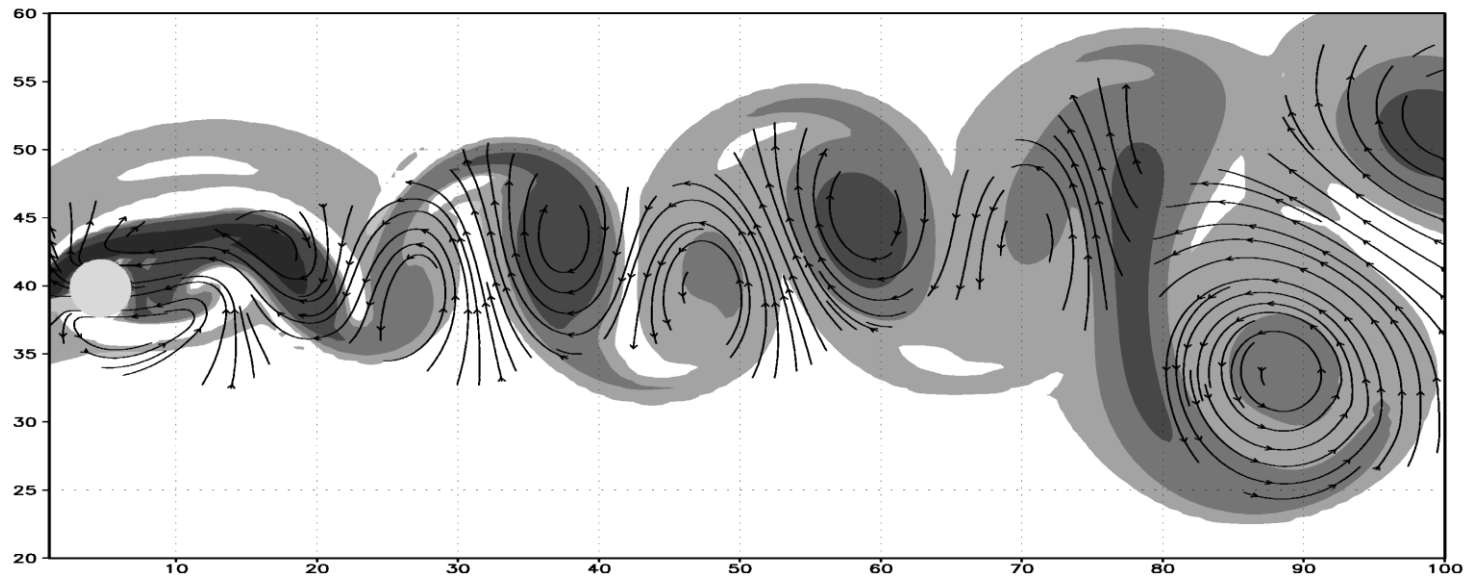
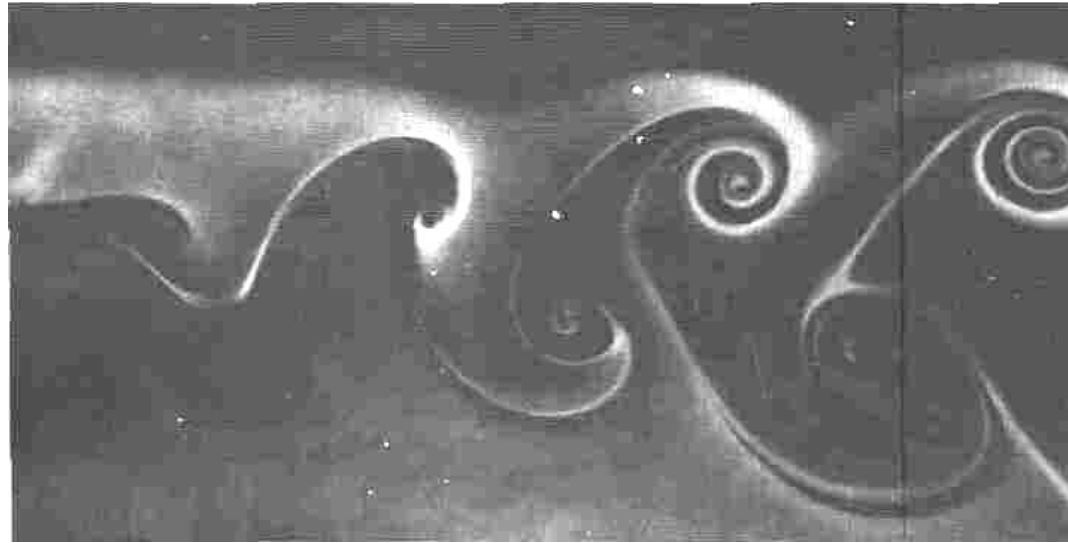
- Расчетная область разбивается на подобласти.
- Каждый процессор обрабатывает только свою часть расчетных узлов и имеет доступ к части памяти, в которой хранятся значения переменных в данной подобласти.
- Процессоры обмениваются между собой необходимой информацией на каждом шаге по времени.



Анализ производительности параллельных вычислений позволяет оптимизировать вычисления.

Использование большого количества процессоров иногда позволяет не только уменьшить физическое время выполнения задачи, но и снижает суммарные вычислительные затраты («суперлинейное» ускорение).

**Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром, $Re = 200$,
Альбом течений жидкости и газа, Москва, Мир 1986**



Термическая конвекция в атмосфере

Организованные крупномасштабные структуры в пограничном слое атмосферы (конвективные ячейки, крупномасштабные валики, спиралевидные вихри)

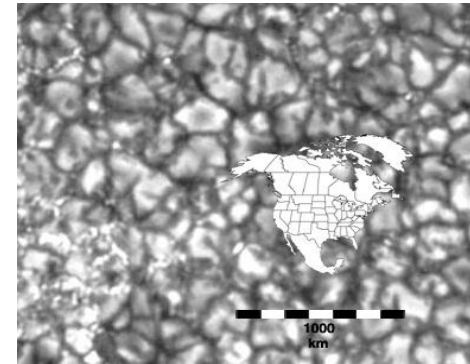
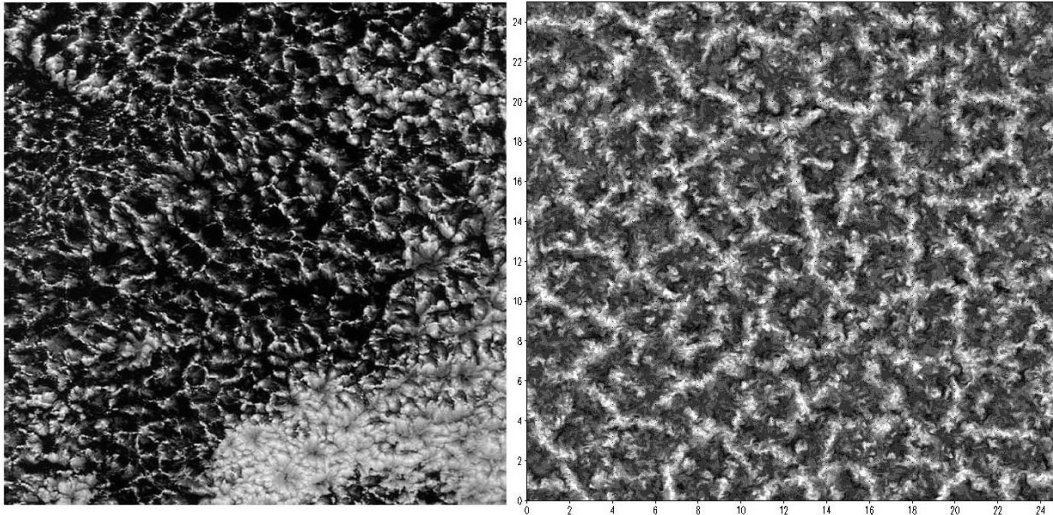
- Какое влияние оказывают эти структуры на процессы обмена теплом импульсом и влагой между атмосферой и подстилающей поверхностью и как взаимодействуют с мелкомасштабной турбулентностью?

Рост масштабов конвективных ячеек (над морской поверхностью размеры ячеек могут достигать 30-40 км)

- Чем определяется скорость роста ячеек и чем ограничивается максимальный размер ?

Пространственные спектры температуры и скорости $S \sim k^{-5/3}$ на масштабах 10-100 км (данные самолетных измерений)

- Чем определяются такие спектральные распределения? Могут ли численные модели воспроизводить наблюдаемую структуру циркуляции?



Конвективные ячейки на Солнце (гранулы). Существует нерешенная проблема возникновения супер-гранул.

Конвективные ячейки в пограничном слое атмосферы (фотография слоисто-кучевой облачности из космоса (слева) и вертикальная компонента скорости в численной модели конвективного пограничного слоя (справа)).

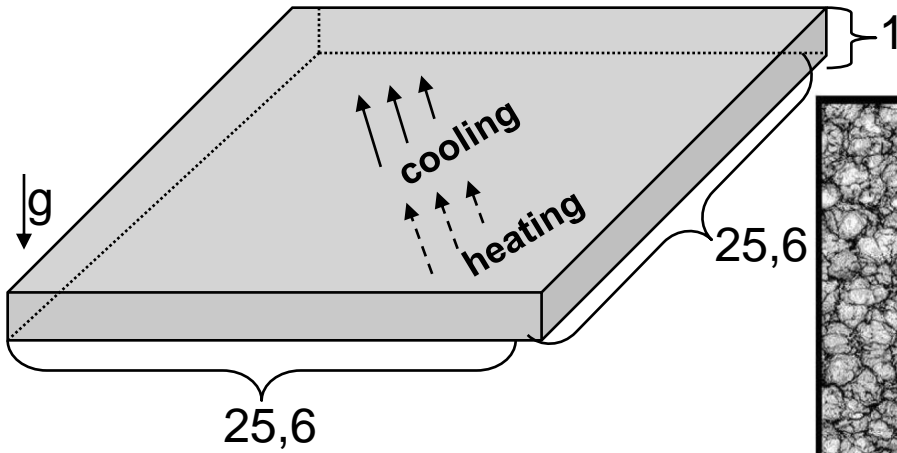
A.V. Glazunov, V.P. Dymnikov, V.N. Lykossov. Mathematical modeling of spatial spectra of atmospheric turbulence. - Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling, 2010, v. 25, p. 431-451.

С помощью вихреразрешающей (LES) модели исследована (с точки зрения воспроизведения спектральных свойств) **термическая конвекция Рэлея-Бенара** в двояко-периодическом канале с твердыми стенками как аналог многомасштабной атмосферной турбулентности.

Большое **отношение его горизонтального размера к вертикальному (26.1)** обеспечило существование квазидвумерных крупномасштабных компонент течения, а размер равномерной расчетной сетки в несколько **десятков миллионов узлов** позволил явно воспроизвести динамику мелкомасштабной трехмерной турбулентной составляющей.

Декомпозиция изучаемого турбулентного течения на **баротропную** (осредненную по вертикали) и **бароклинную** компоненты позволила предложить схему преобразований кинетической энергии в изучаемой системе, объясняющую некоторые спектральные свойства наблюдающейся атмосферной турбулентности.

Rayleigh-Bernard convection



equidistant grid 1024x1024x40

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \delta_{i3} \alpha (\bar{\Theta} - \langle \Theta \rangle_{x_1, x_2})$$

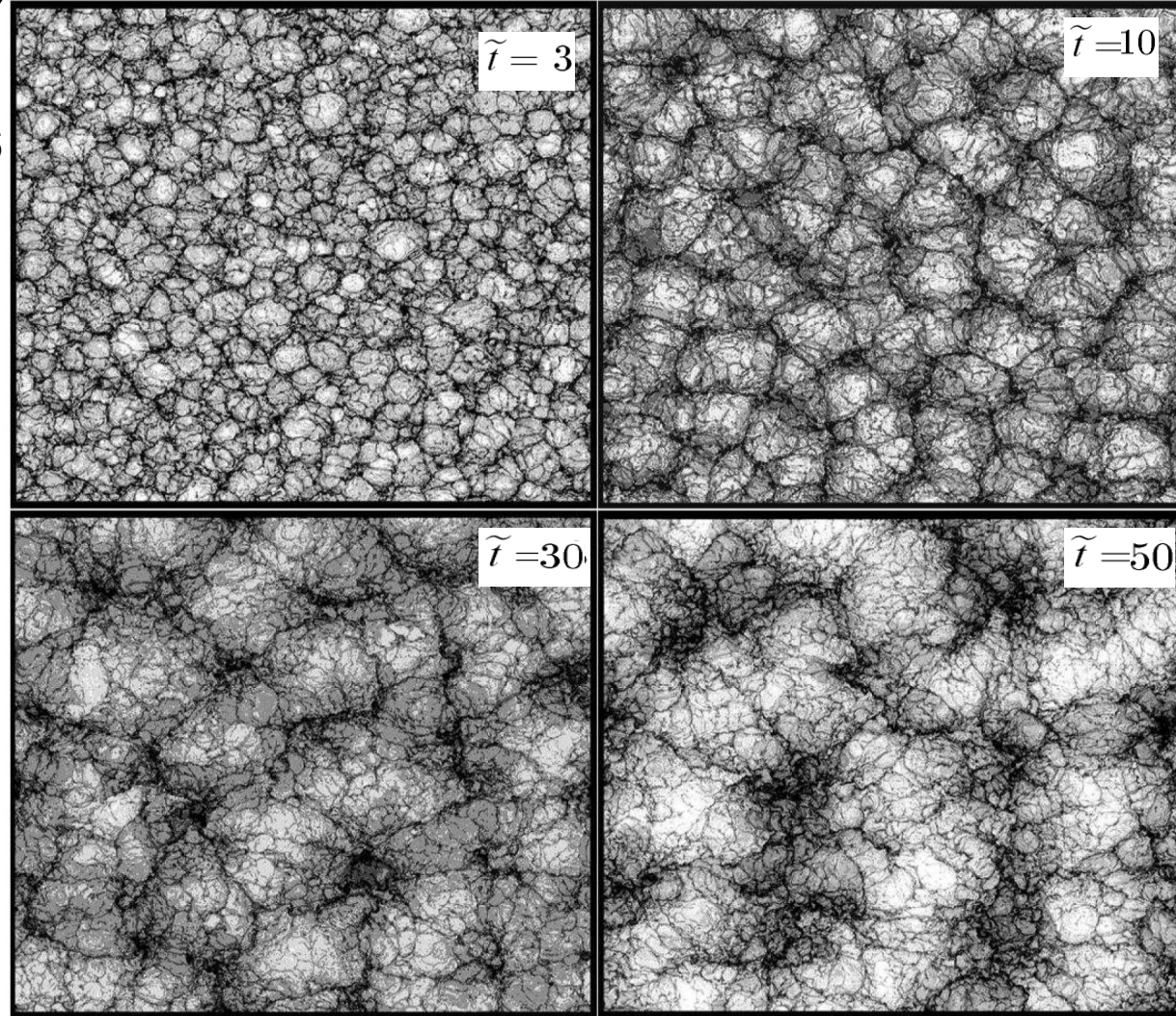
$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\Theta} \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} K_{\Theta} \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_i}$$

Large aspect ratio of domain provides existing of quasi-two-dimensional modes.

Spatial grid step is sufficient to reproduce part of inertial interval of 3-dimensional turbulence

$$t_* = L_3 / w_* = (L_3^2 / \alpha H)^{1/3}$$

$$\tilde{t} = t / t_*$$



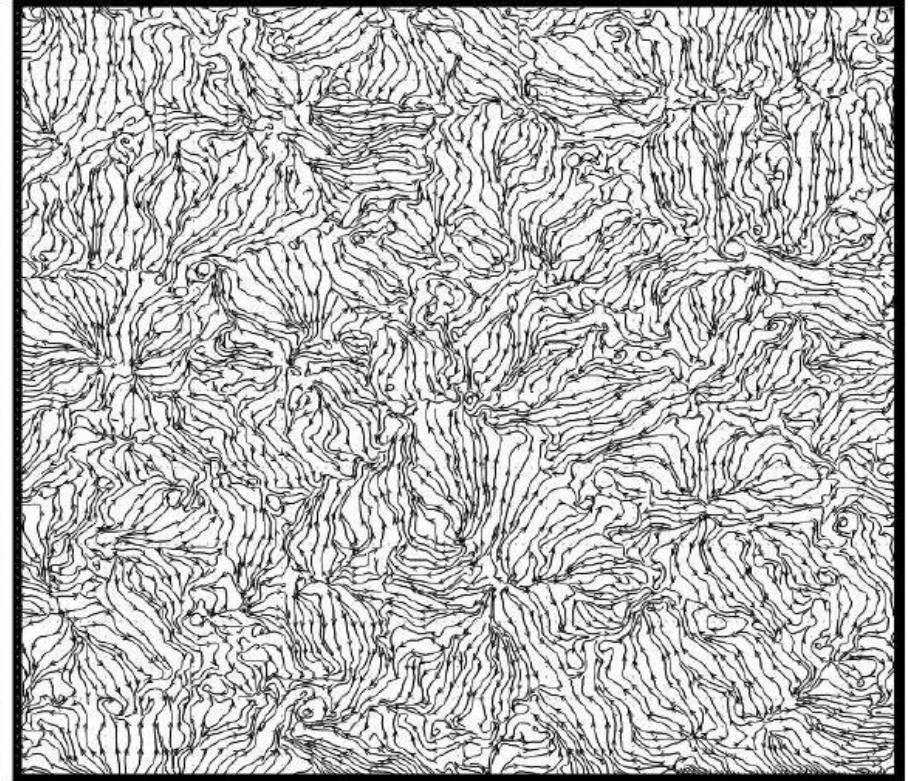
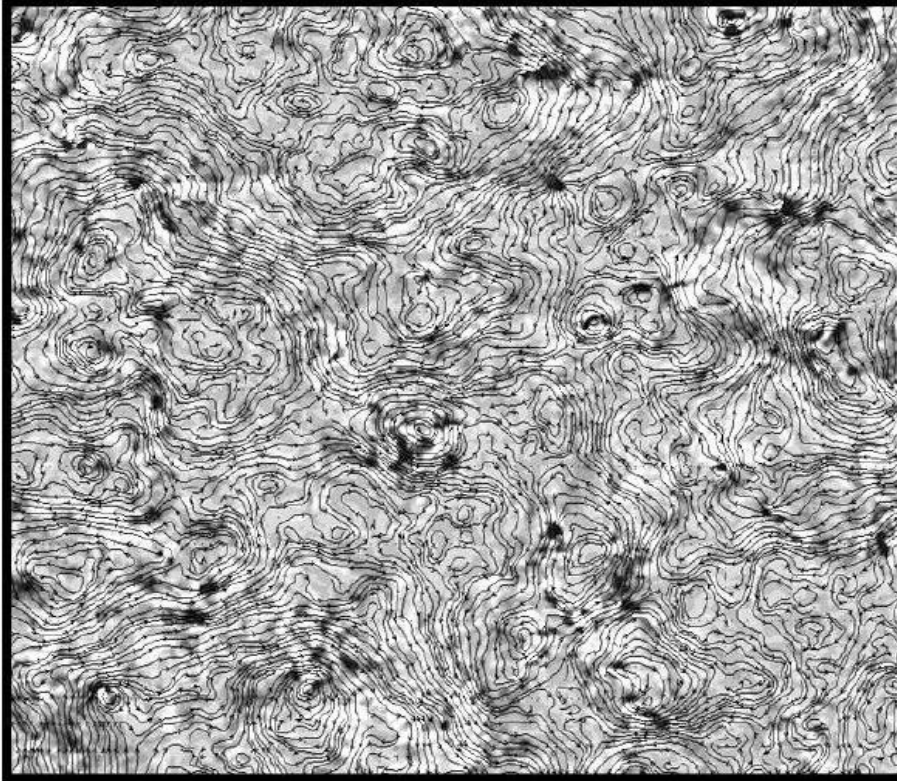
Potential temperature at level $L_3/8$

For convective APBL with $H \sim 100 \text{ W/m}^2$ $L_3 \sim 1 \text{ km}$ – anomalies with spatial scale $\sim 10 \text{ km}$, characteristic time $\sim 15 \text{ hours}$.

Barotropic and baroclinic components of the flow

$$\tilde{u}_i = F^{bt} u_i = \frac{1}{L_3} \int_0^{L_3} u_i dx_3, \quad (i = 1, 2), \quad u_i^{bc} = u_i - \tilde{u}_i$$

$$\tilde{u}_3 = 0,$$



$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial R_{ij}^{bc}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \widetilde{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{i3}(x_1, x_2, L_3) - \tau_{i3}(x_1, x_2, 0)}{L_3},$$

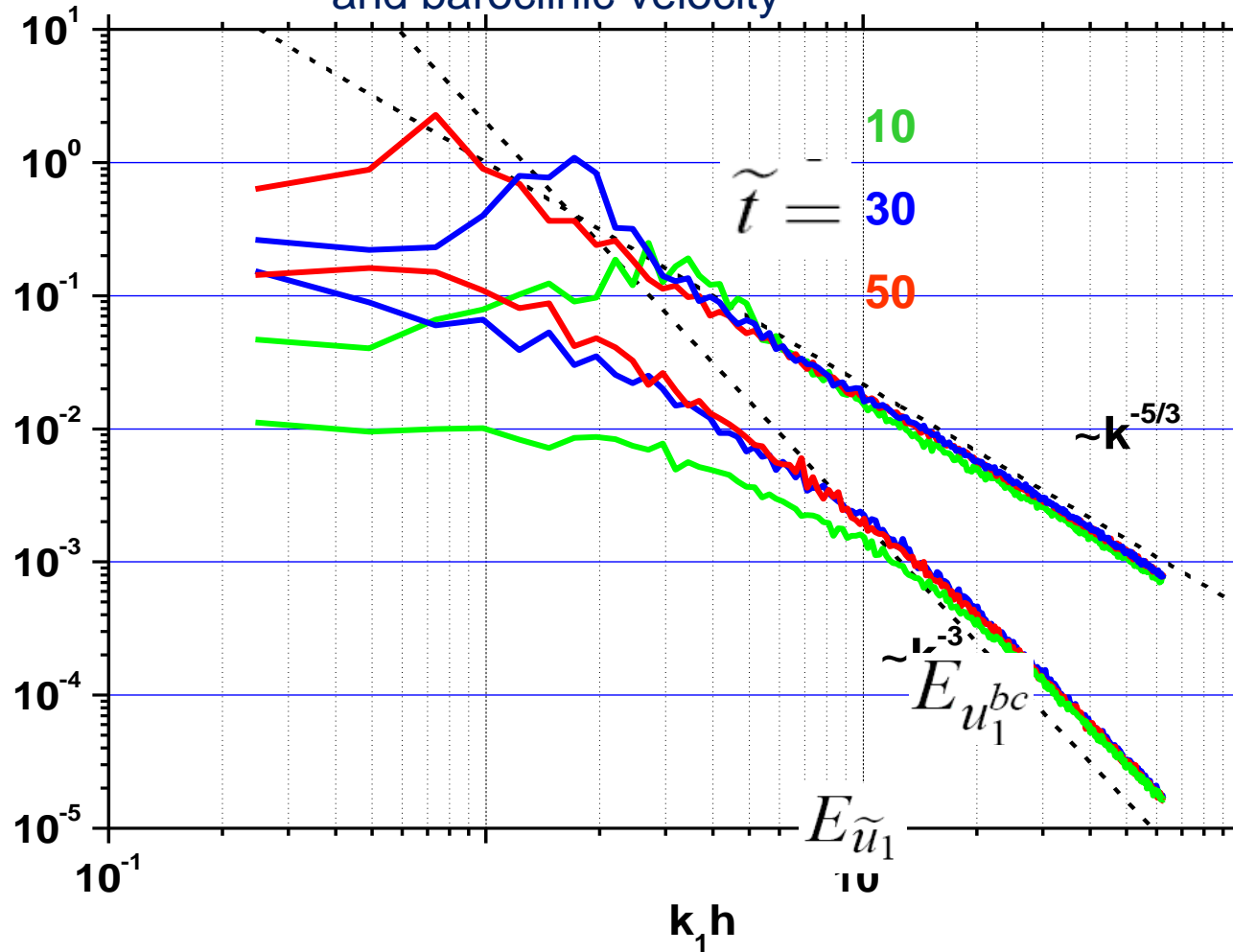
$$R_{ij}^{bc} = \widetilde{u_i^{bc} u_j^{bc}}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (i, j = 1, 2).$$

Energy production for
barotropic component

$$P^{bt} = R_{ij}^{bc} \tilde{S}_{ij}$$

One-dimensional one-component (u_1 along x_1) spectra of barotropic and baroclinic velocity



$$E_{u_1}(k_1) = \int_{-k_2^{max}}^{k_2^{max}} E_{u_1}(k_1, k_2) dk_2, \quad k_2^{max} = \frac{\pi L_2}{\Delta x_2} \quad E_{u_1}(k_1, k_2) = \hat{u}_1(\mathbf{k}) \hat{u}_1^*(\mathbf{k})$$

Вместо заключения

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.

Основные вычислительные характеристики моделей (Степаненко и др., 2009)

Характеристика модели	Климатическая модель	Региональная модель	Вихреразрешающая модель
Разрешение по пространству и времени, количество узлов сетки	100-200 км, 300-400 сек, $\sim 10^5 - 10^6$	1-10 км, 10-60 сек, $\sim 10^6 - 10^7$	1 -10 м, 1-5 сек, $\sim 10^7 - 10^8$
Технологии распределения вычислений	MPI, OpenMP	MPI	MPI
Декомпозиция расчетной области	двумерная	двумерная	двумерная, трехмерная
Используемые в расчетах суперкомпьютеры	Кластер ИВМ РАН, “Чебышев” , “Ломоносов”	“Чебышев”, “Ломоносов”	“Чебышев”, МВС-50К, “Ломоносов”
Суммарное процессорное время, модельное время	$10^3 - 10^4$ час, 10 – 100 лет	$10^2 - 10^3$ час, 1 – 10 сут	$10^2 - 10^3$ час, $10^{-1} - 1$ сут

Переход на более детальное разрешение не может быть осуществлен «механически» (только за счет отказа от гидростатического приближения), без существенной переработки существующих вычислительных технологий и, в некоторых случаях, переформулировки параметризаций и систем уравнений, используемых в настоящее время для приближенного описания гидротермодинамики климатической системы, а в перспективе – Земной системы. Это – одна из тех проблем, для успешного решения которой необходима подготовка высококвалифицированного научно-технического и кадрового потенциала, способного эффективно использовать современные и будущие суперкомпьютерные ресурсы.

Проект комиссии Президента РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России «Создание системы подготовки высококвалифицированных кадров в области суперкомпьютерных технологий и специализированного программного обеспечения». Серия книг **«Суперкомпьютерное образование»** (<http://msupublishing.ru>), инициатор издания: Суперкомпьютерный консорциум университетов России (<http://hpc-education.ru/>).

Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: Учеб. пособие / В.Н. Лыкосов и др. Предисл.: В.А. Садовничий. — М.: Издательство Московского университета, 2012. – 408 с.)

Литература

1. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. - СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
2. Володин Е.М., Дианский Н.А. Моделирование изменений климата в 20 – 22 столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, т. 42, с. 291-306.
3. Глазунов А.В. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. - Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009, т. 45. с. 7-42.
4. Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. – М.: ВИНТИ, 1994.
5. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. Моделирование климата и его изменений. - В: «Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования». М.: Наука, 2005, т. 2, с. 38-175.
6. Кибель И.А. Приложение к метеорологии уравнений механики бароклинной жидкости. - Изв. АН СССР, Серия геогр., 1940, № 5.

7. Лыкосов В. Н., Глазунов А. В., Кулямин Д. В., Мортиков Е. В., Степаненко В.М. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: Учеб. пособие / В. Н. Лыкосов и др. Предисл.: В. А. Садовничий. — М.: Издательство Московского университета, 2012. – 408 с.)

8. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды. - Л.: Гидрометеиздат, 1967.

9. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б., Лыкосов В.Н., Галин В.Я. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1984, 320 с.

10. Степаненко В.М., Миранда П.М., Лыкосов В.Н. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы с гидрологически неоднородной сушей. - Вычислительные технологии, 2006, т. 11, ч. 3, с. 129-136.

11. Степаненко В.М., Микушин Д.Н. Численное моделирование мезомасштабной динамики атмосферы и переноса примеси над гидрологически неоднородной поверхностью. – Вычислительные технологии, 2008, т. 13, вып. 3, с. 103-110.

12. Степаненко В.М., Глазунов А.В., Микушин Д.Н., Лыкосов В.Н. Суперкомпьютерное моделирование климатических процессов. - Сб. статей "Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности", 2009, 6 с. (<http://www.hpc-russia.ru/5.pdf>).

13. Bjerknes V. Das Problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik. - Meteor. Z., 1904, B. 21, S. 1-7.

14. Bjercknes V. Meteorology as an exact science. – Mon. Wea. Rev., 1914, v. 42, p. 11–14.
15. Charney J.G., R. Fjortoft, J. von Neuman. Numerical integration of the barotropic equation. - Tellus, 1950, v. 2, p. 237-254.
16. Glazunov A.V., Dymnikov V.P., Lykossov V.N. Mathematical modeling of spatial spectra of atmospheric turbulence. - Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling, 2010, v. 25, p. 431-451.
17. Kattsov V.M., J.E. Walsh, W.L. Chapman, V.A. Govorkova, T.V. Pavlova, and X. Zhang, 2007: Simulation and projection of arctic freshwater budget components by the IPCC AR4 global climate models. - J. Hydrometeor., v. 8, p. 571-589.
18. Koshyk J.N., Hamilton K. The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere-stratosphere-mesosphere GCM. – J. Atmos. Sci., 2001, v. 58, pp. 329-348.
19. Marchuk G.I., Dymnikov V.P., Lykossov V.N. On the relation between index cycles of the atmosphere circulation and spatial spectrum of the kinetic energy in the model of the general circulation of the atmosphere. - Series: ECMWF, Technical Memoranda, 1981, No. 31, 34 p.
20. Nastrom G.D., Gage K.S. A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft. – J. Atmos. Sci., 1985, v. 42, pp. 950-960.

- 21. Palmer T.N. Towards the probabilistic Earth-system simulator: a vision for the future of climate and weather prediction. - Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2012, v. 138, no. 665, p. 841-861.**
- 22. Reichler T., J. Kim. How well do coupled models simulate today's climate? – Bull. Amer. Met. Soc., 2008, v. 89, p. 303 – 311.**
- 23. Richardson L.F. Weather Prediction by Numerical Process. – Cambridge University Press, 1922, 236 p.**
- 24. Skamarock W.C. Evaluating mesoscale NWP models using kinetic energy spectra. – Mon. Wea. Rev., 2004, v. 132, pp. 3019-3032.**
- 25. Takashi Y.O., Hamilton K., Ohfuchi W. Explicit global simulation of the mesoscale spectrum of atmospheric motions. – Geophys. Res. Lett., 2006, v. 33, L121812.**



Спасибо за внимание!