

**Международная научная конференция по
региональным проблемам гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
2 – 4 октября 2012 г., Казань, Россия**

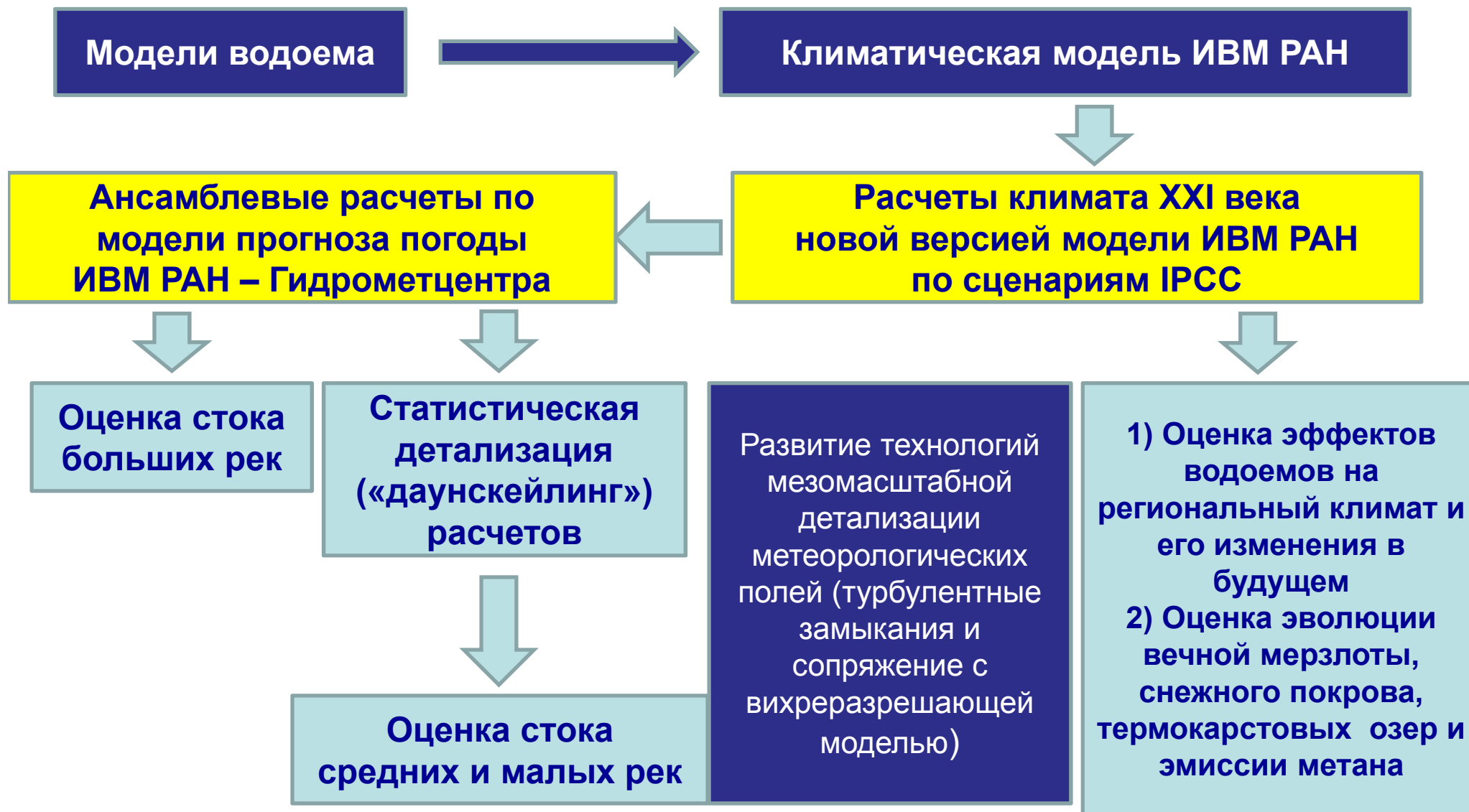
Суперкомпьютерное моделирование региональных климатических процессов

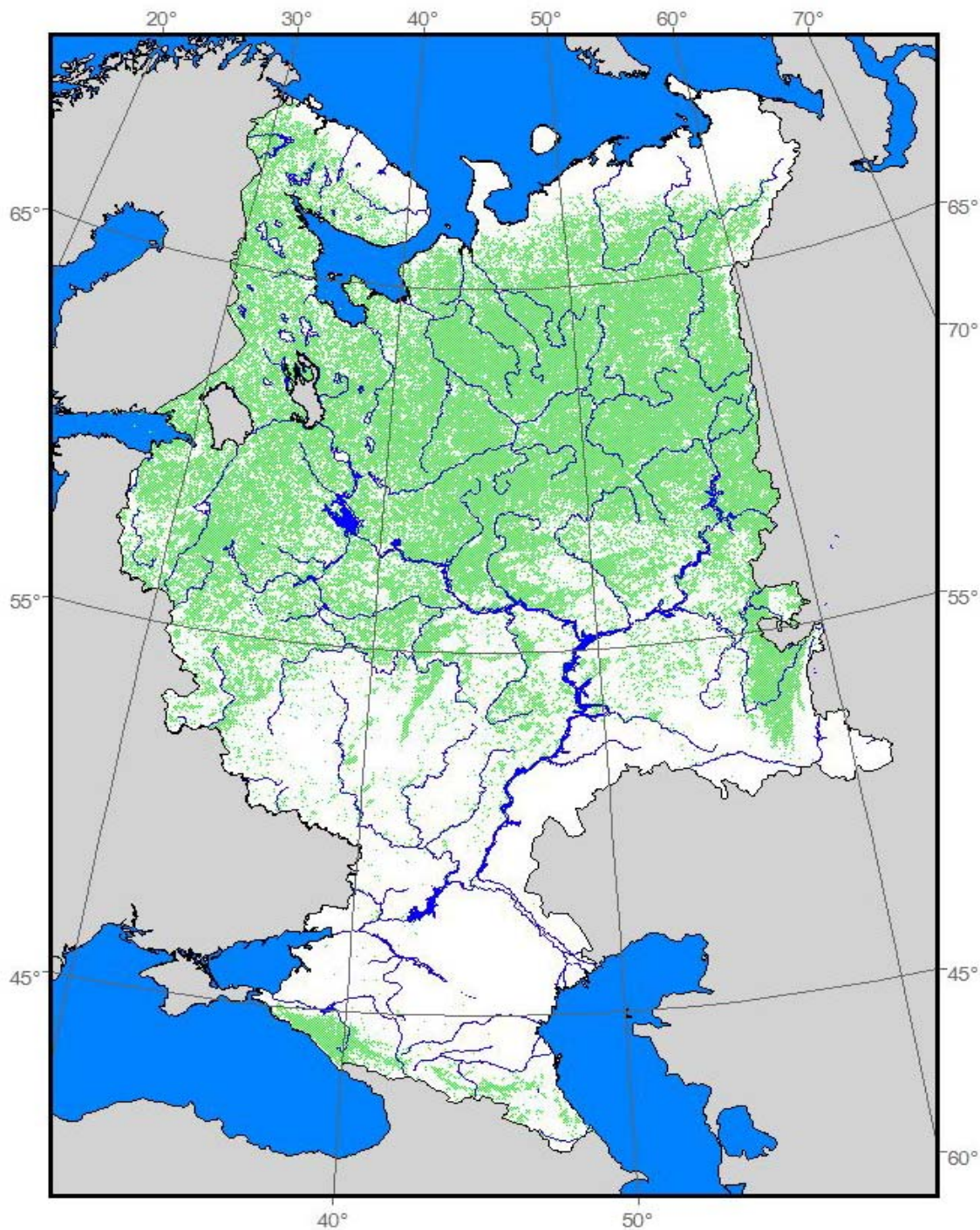
В.Н. Лыкосов

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

E-mail: lykosov@inm.ras.ru

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

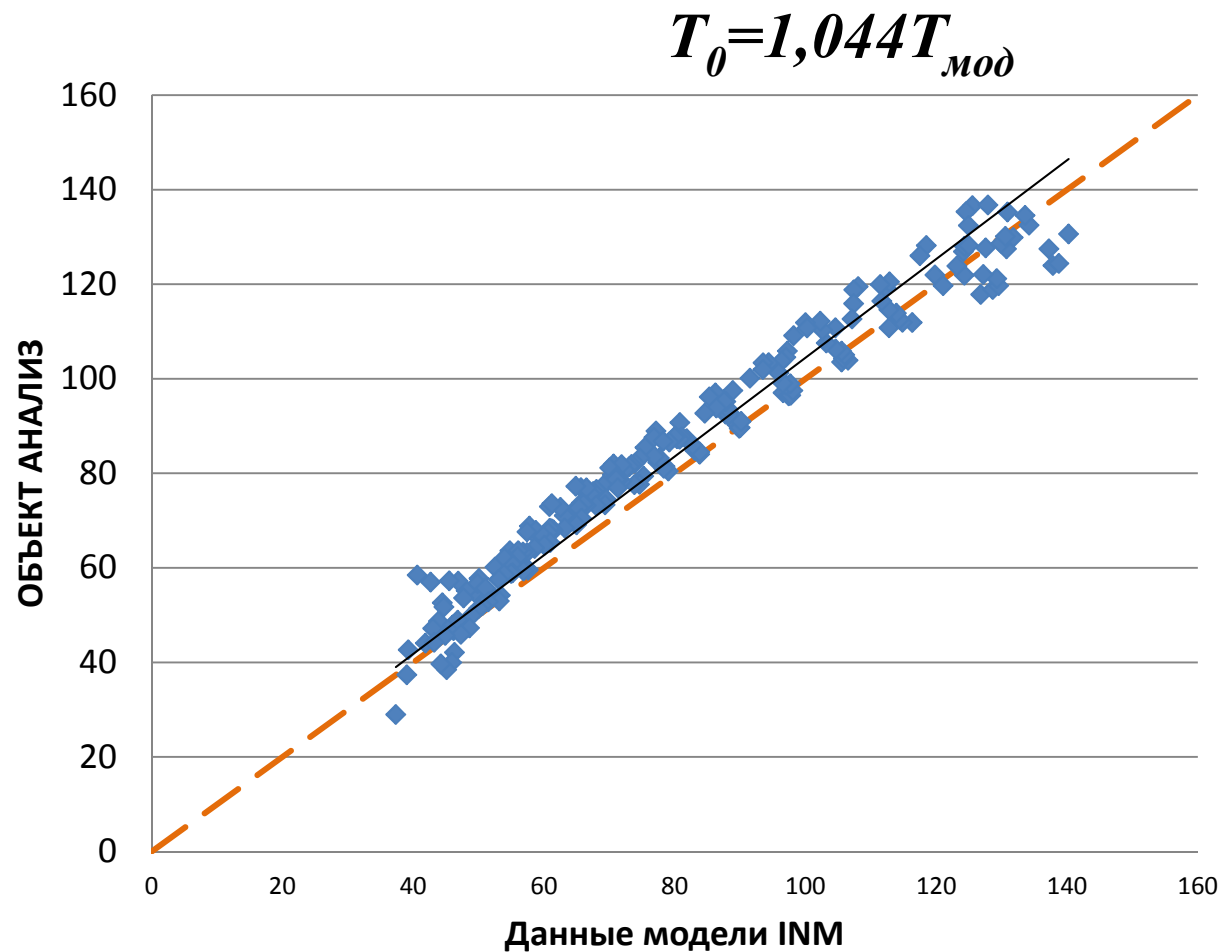




Территория Восточно-Европейской равнины (Кислов и др., 2008, Сидорова, 2010)

- 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.

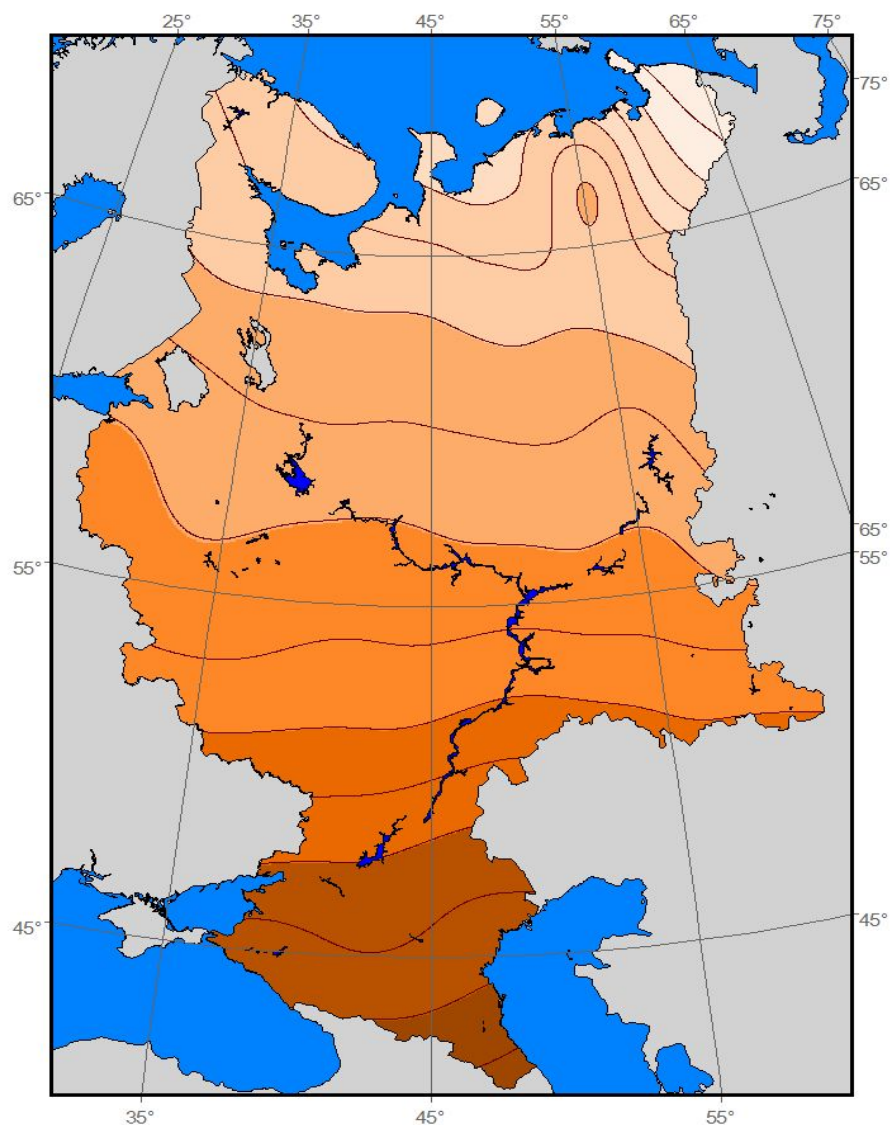


*коэффициент
корреляции
 $r = 0,975$,
остаточное
среднеквадратическое
отклонение
(ост.СКО) $\pm 5,8^\circ$
при среднем
по территории
значении $84,3^\circ$*

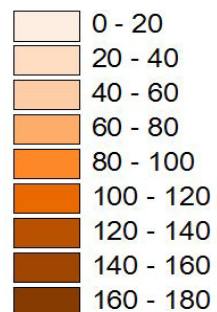
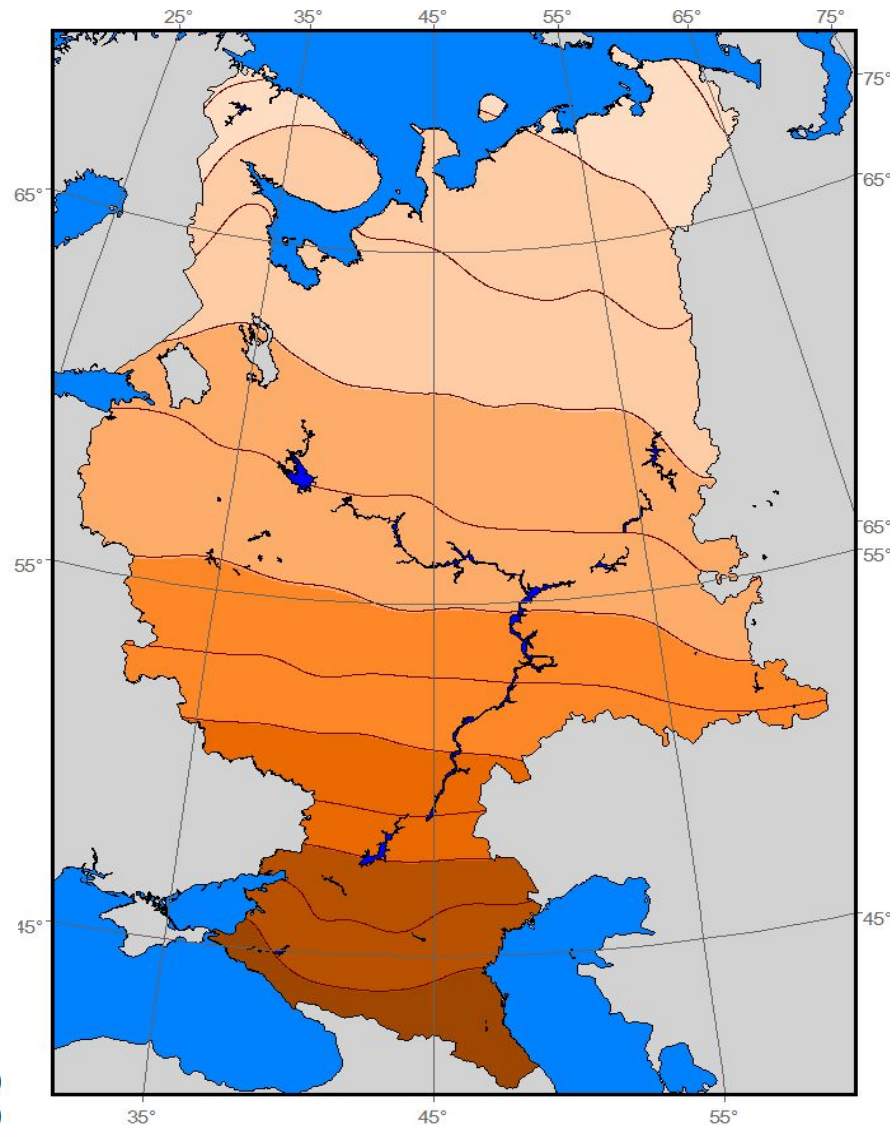
Черная линия – линия тренда соответствующая уравнению регрессии,
Оранжевый пунктир – линия $x = y$

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

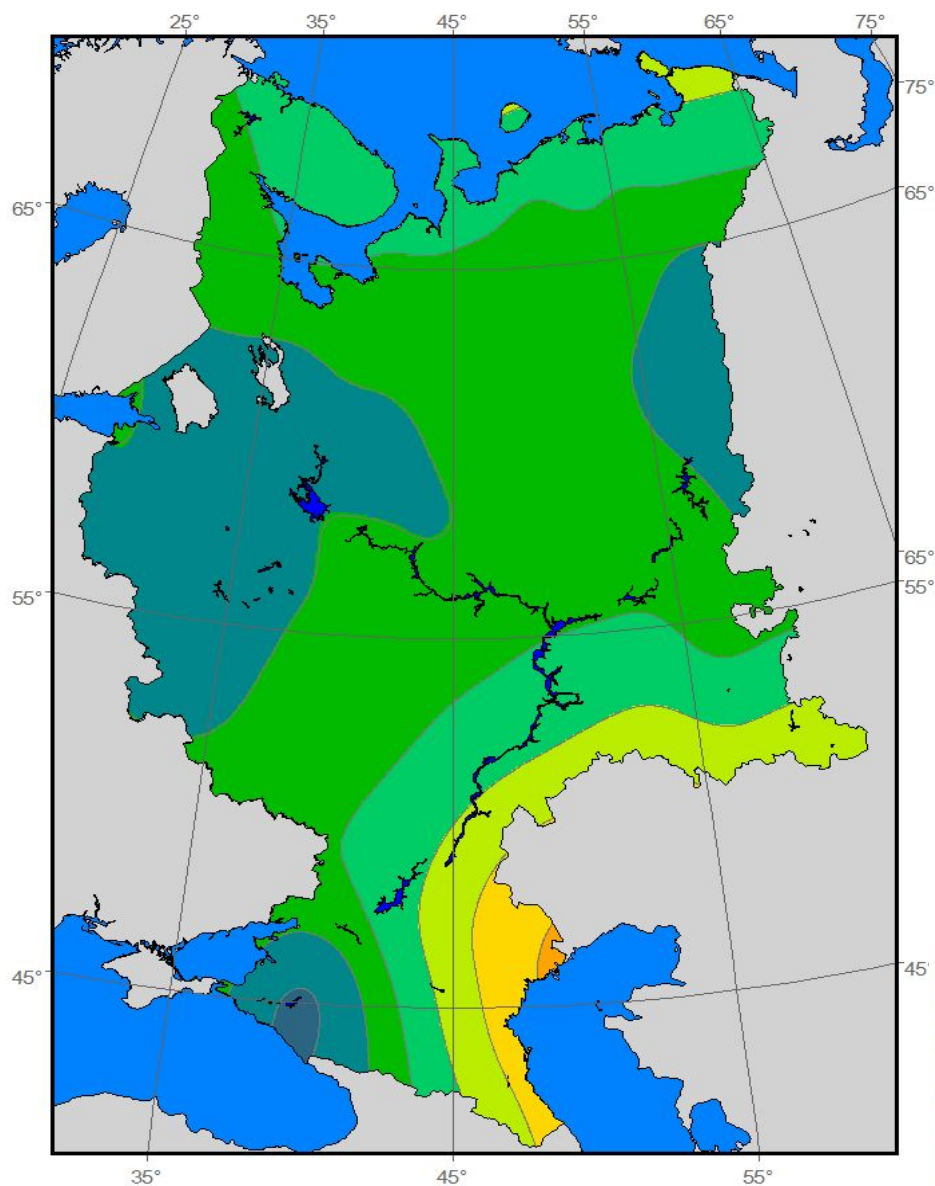
Фактические данные



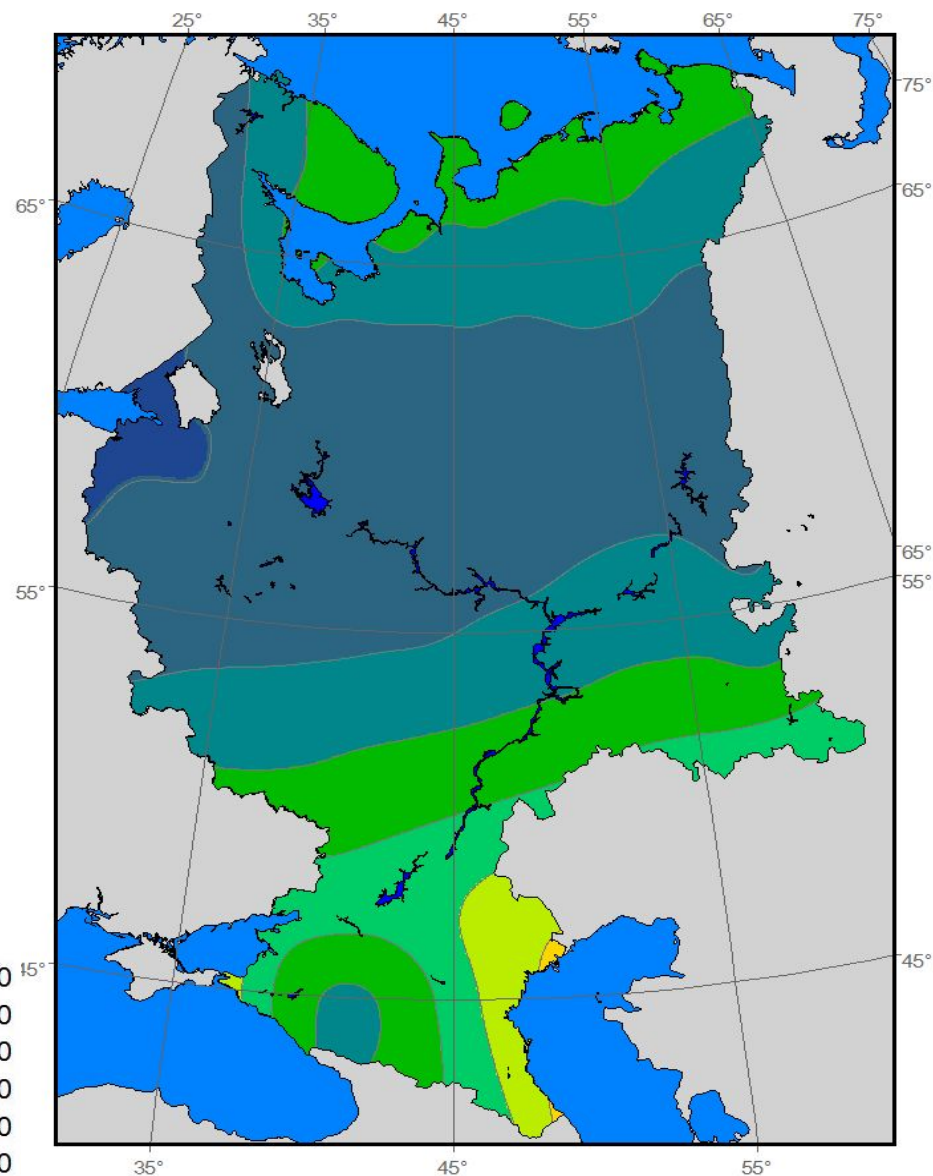
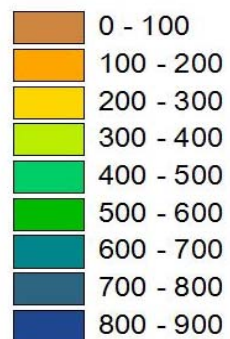
Данные моделирования ИВМ РАН



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

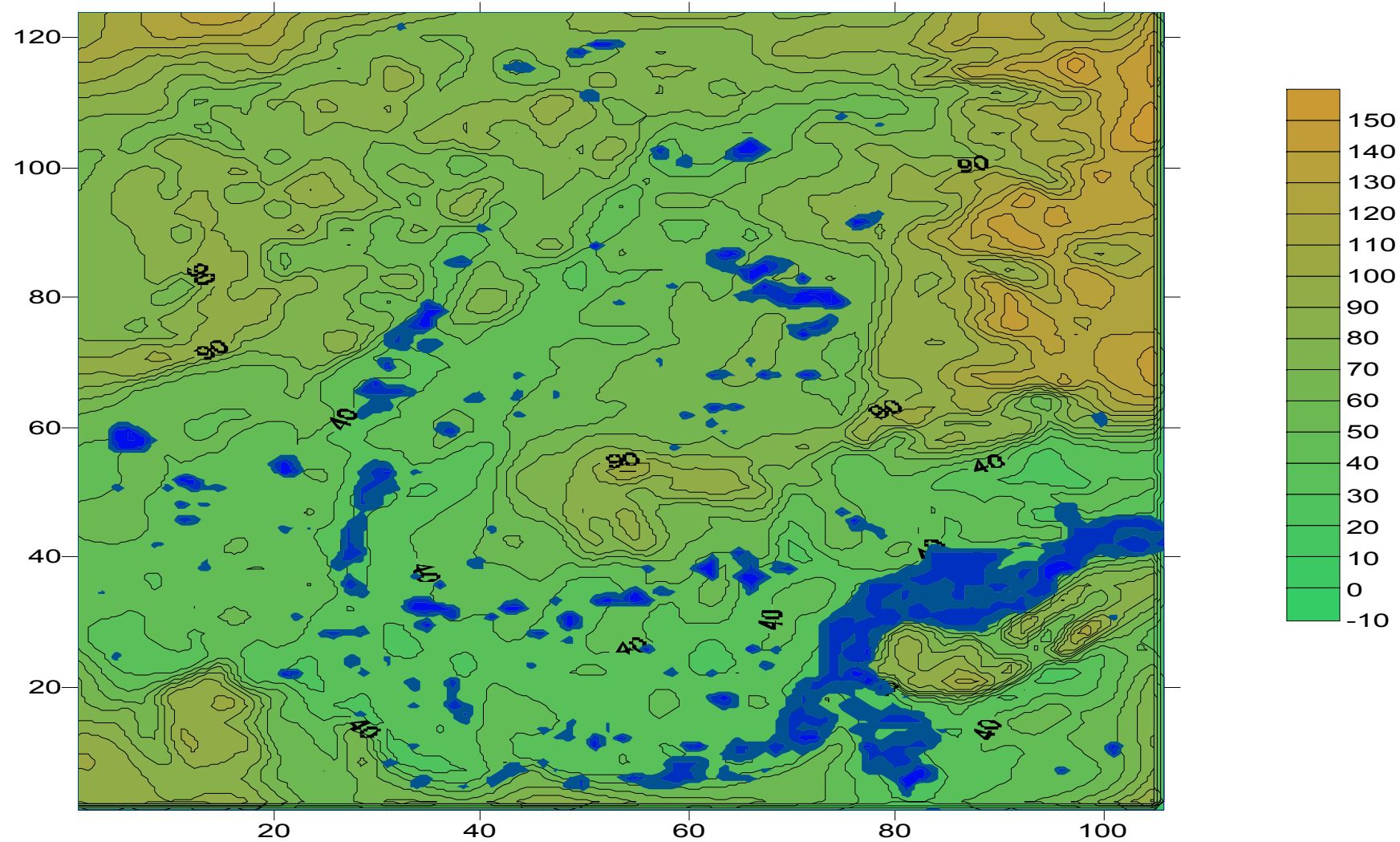


Фактические данные



Данные моделирования ИВМ РАН

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





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

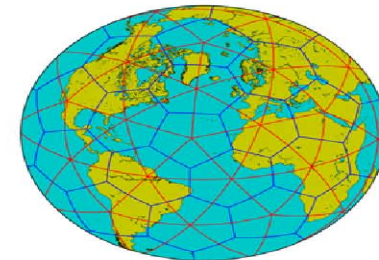
ESM Vision

Coupled Ocean-Land-Atmosphere Model

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

~100 m
10 levels
Landscape-resolving

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



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

ESSL - The Earth System Laboratory

4/11/08

Площадь поверхности Земли: 510 072 000 км²

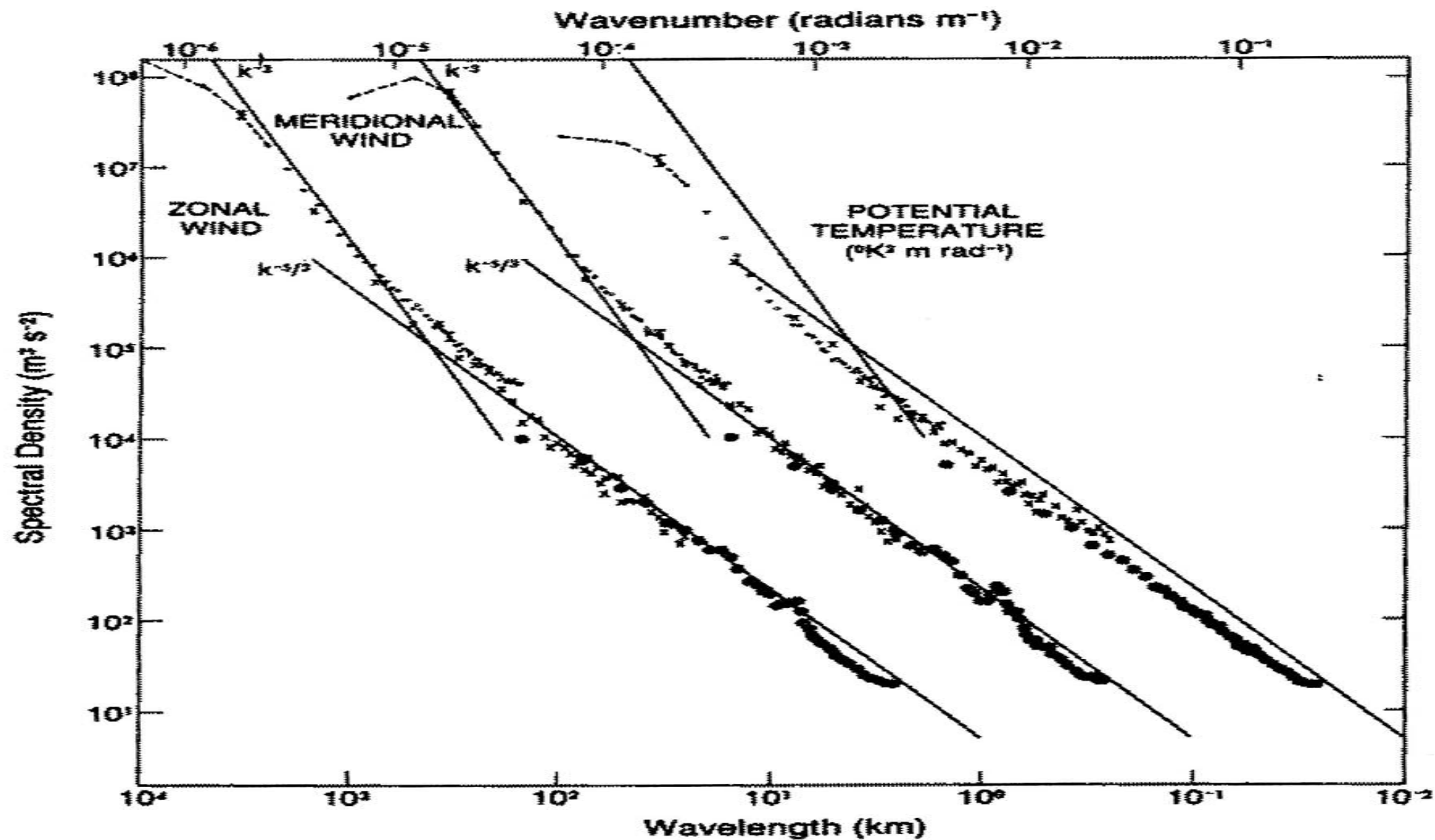


FIG. 1. Variance power spectra of wind and potential temperature near the tropopause from GASP aircraft data. The spectra for meridional wind and temperature are shifted one and two decades to the right, respectively; lines with slopes -3 and $-5/3$ are entered at the same relative coordinates for each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

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: $\tau(k) \sim k^{-3/2} E^{-1/2}(k)$, $[k] = \mathcal{M}^{-1}$, $[E] = \mathcal{M}^3 / \mathcal{C}^2$

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?

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

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

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

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.

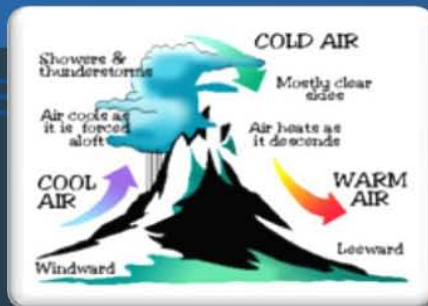
The hierarchy of atmospheric models



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
- ☐

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.

**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**



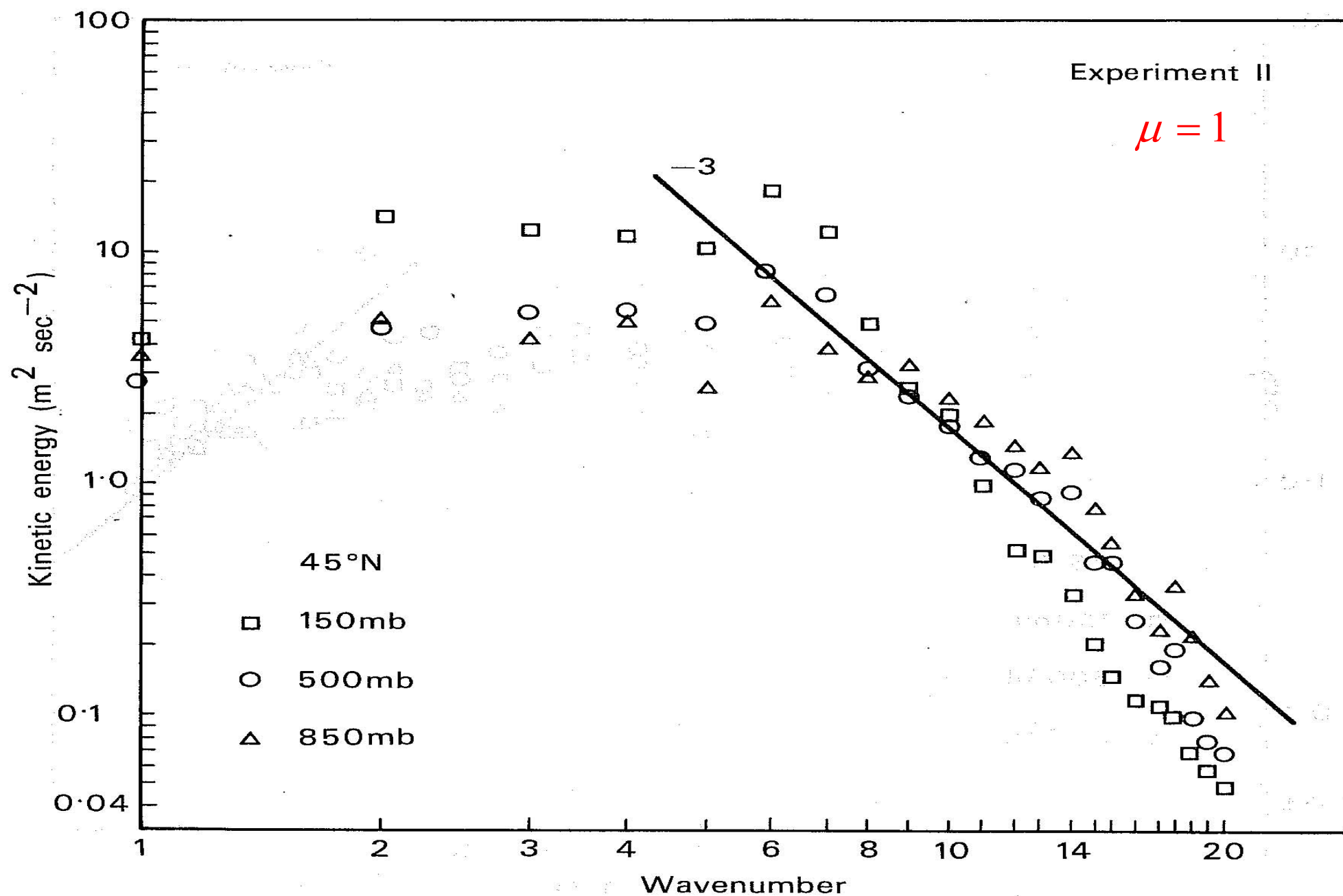


Fig. 3 Same as Fig. 2 but for Experiment II.

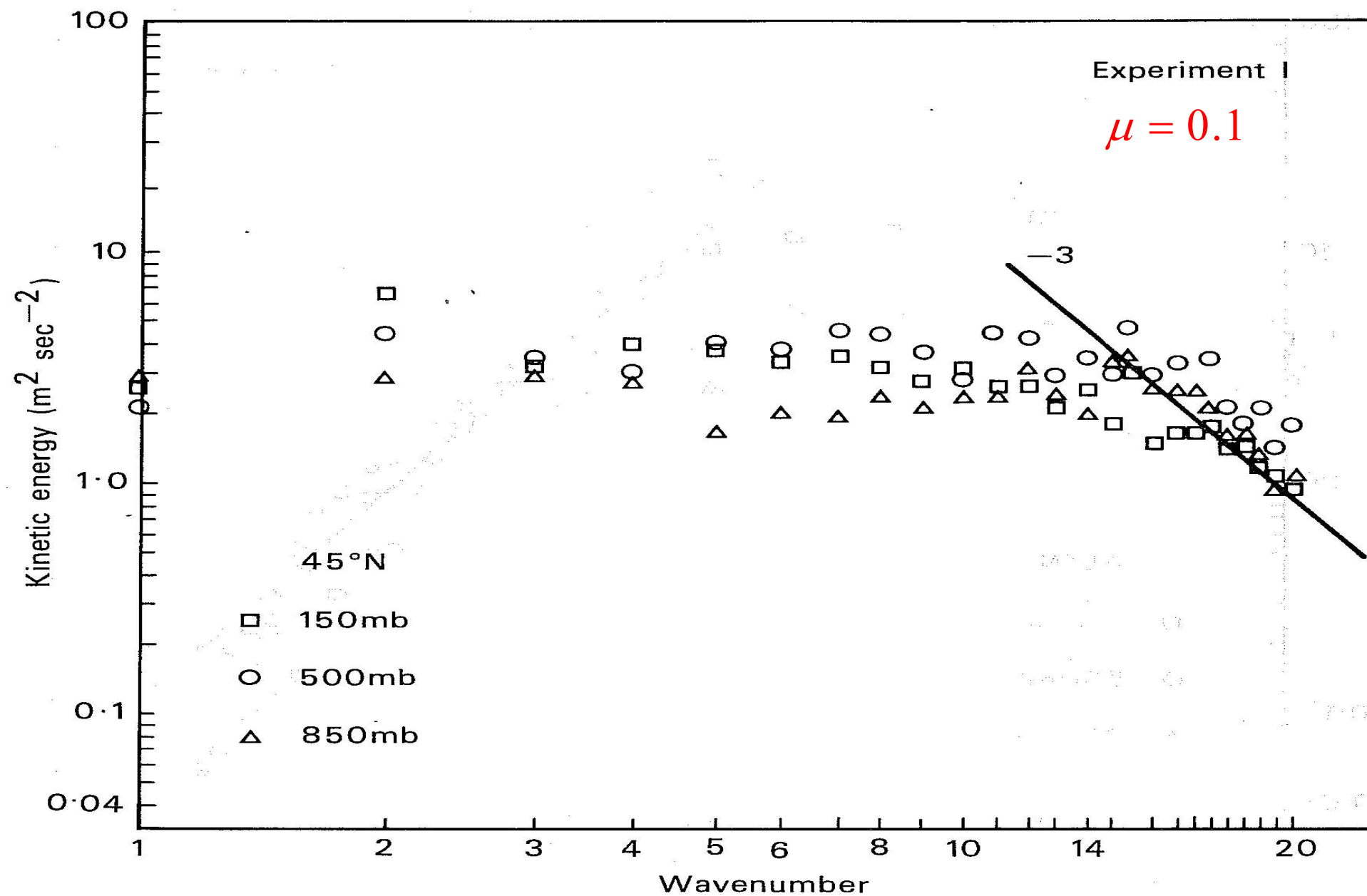


Fig. 2 Spectral distribution of eddy kinetic energy at 45°N (Experiment I).

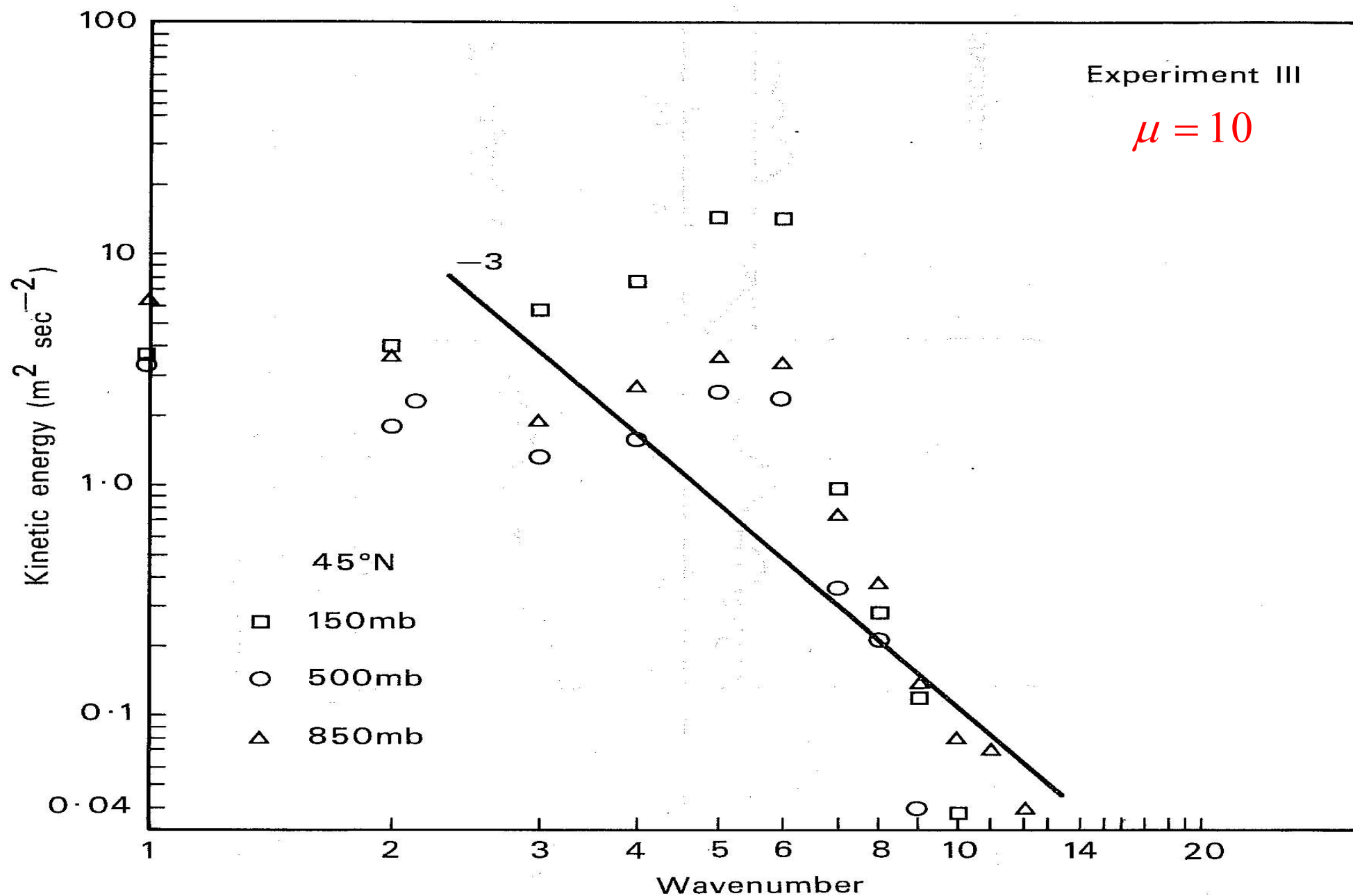


Fig. 4 Same as Fig. 2 but for Experiment III.

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»

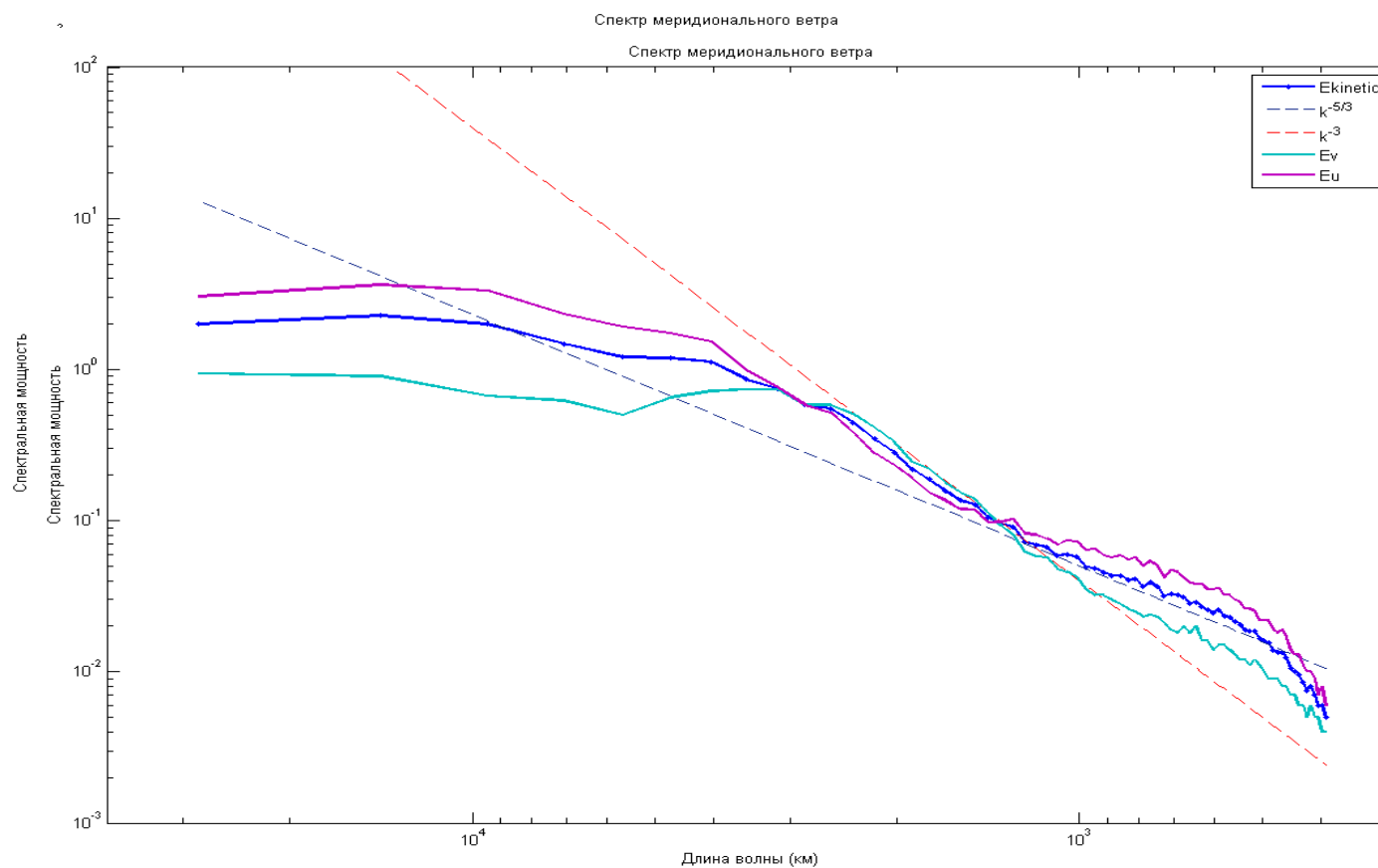
За **сутки** реального времени рассчитывается эволюция климатической системы на **8 лет** модельного времени («Чебышев»). Таким образом, для проведения одного численного эксперимента требуется **1 - 2 месяца реального времени**.

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”



Средние спектральные распределения квадратов зональной и меридиональной горизонтальных составляющих скорости ветра, а также кинетической энергии по результатам расчетов с помощью модели ОЦА ИВМ РАН $2.5^\circ \times 2^\circ \times 80$ для зимних месяцев на высоте 200 мбар, для 60° с.ш. (Д. Кулямин)



Уравнения мезомасштабной гидротермодинамики атмосферы

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

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

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

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

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

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

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

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

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. – Geophys. Res. Lett., 2006, v. 33, L121812 : 10.1029/2006GL026429

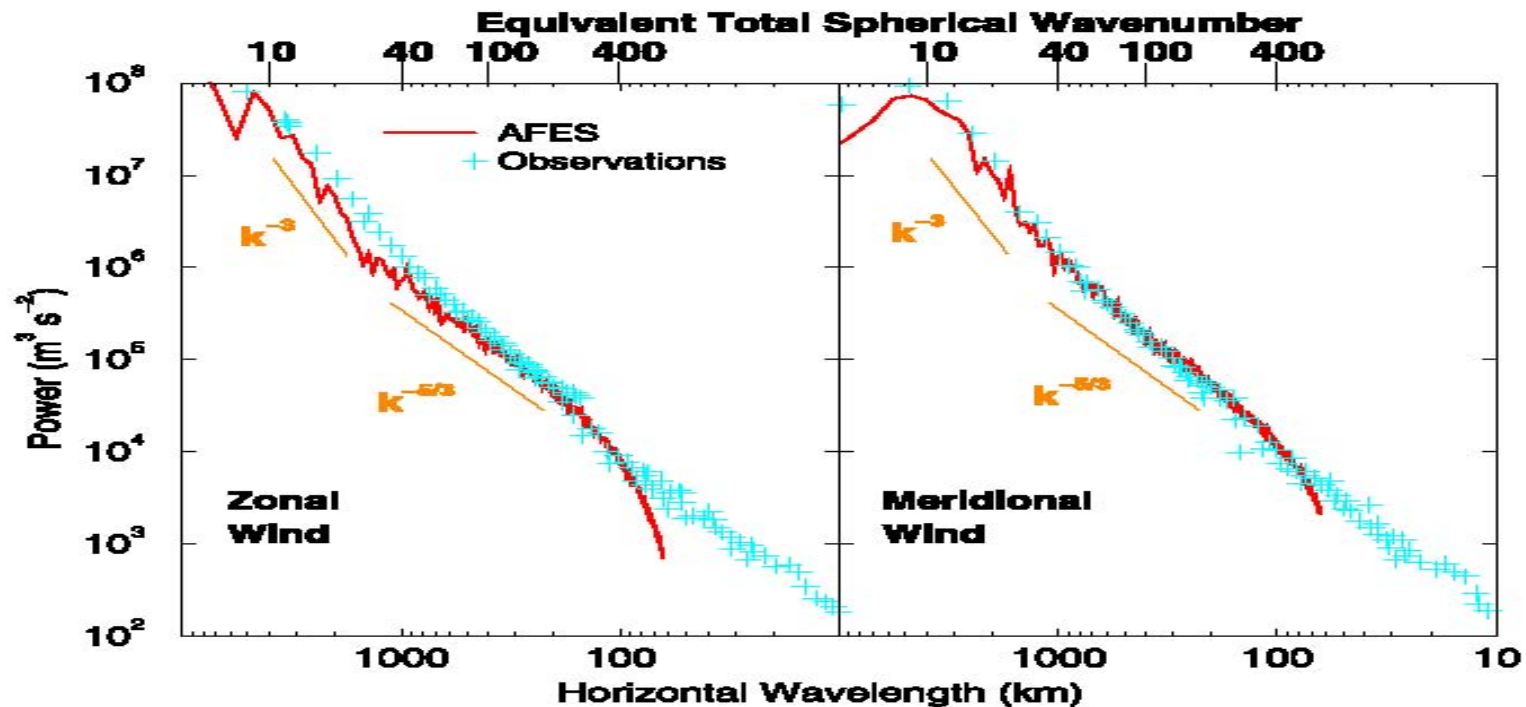


Figure 1. The one-dimensional horizontal power spectra of (left) zonal wind and (right) meridional wind variations near the tropopause. The red curves are computed from wind values taken along the 45N latitude circle at 200 hPa in the T639L24 AFES. The crosses are from *Nastrom and Gage* [1985] and are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

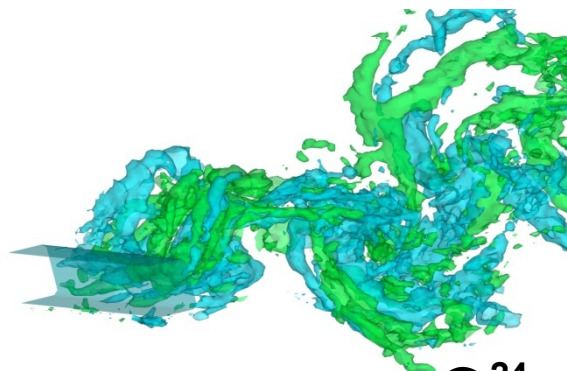
Glazunov A.V., Dymnikov V.P., Lykossov V.N. Mathematical modeling of spatial spectra of atmospheric turbulence. – Russ. J. Numer. Anal. Math. Modeling, 2010. – V. 25. – P. 431–451.

С помощью вихреразрешающей (LES) модели (Глазунов, 2009) 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.

Анализ эффективности параллельных вычислений на суперкомпьютере СКИФ-МГУ
«Чебышев» ; размерность задачи 456x152x264 (18 298 368 узлов сетки);
суммарное процессорное время $\sim 10^3$ часов .

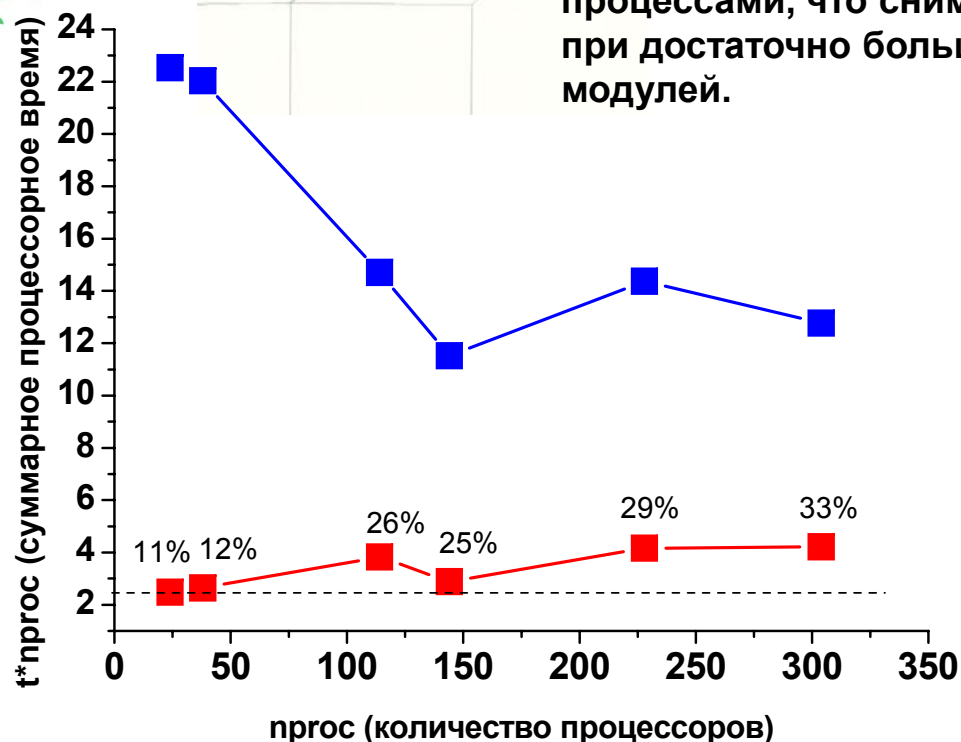


При использовании **304** процессоров суммарное время счета уменьшается приблизительно в **1,7** раза по сравнению с расчетом на **38** процессорах, а физическое время счета уменьшается в **13,8** раза (при линейной масштабируемости параллельных вычислений ускорение было бы равно **8**)



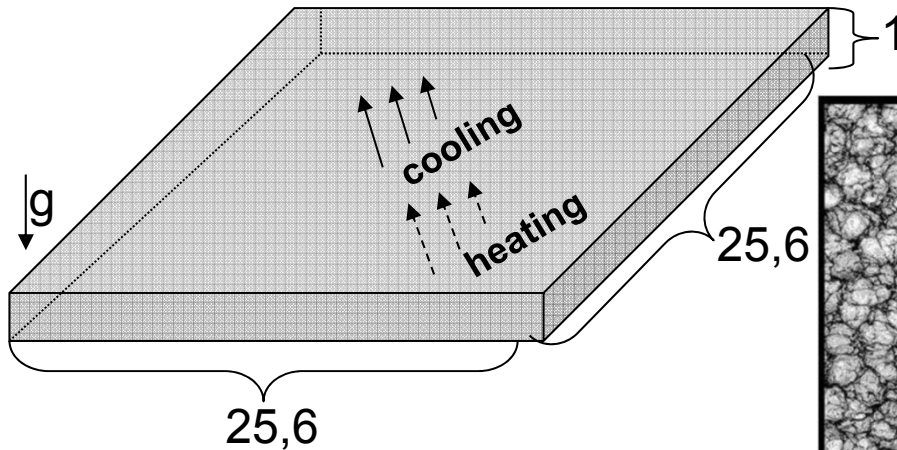
Параллельная реализация модели

- Используется MPI
- Возможна 2-D и 3-D декомпозиция расчетной области.
- Оперативная память распределена между процессами, что снимает ограничения по памяти при достаточно большом количестве расчетных модулей.



Несмотря на увеличение доли межпроцессорных обменов, с увеличением количества процессоров суммарное время выполнения задачи уменьшается за счет более эффективного использования кэш-памяти

Rayleigh-Bernard convection



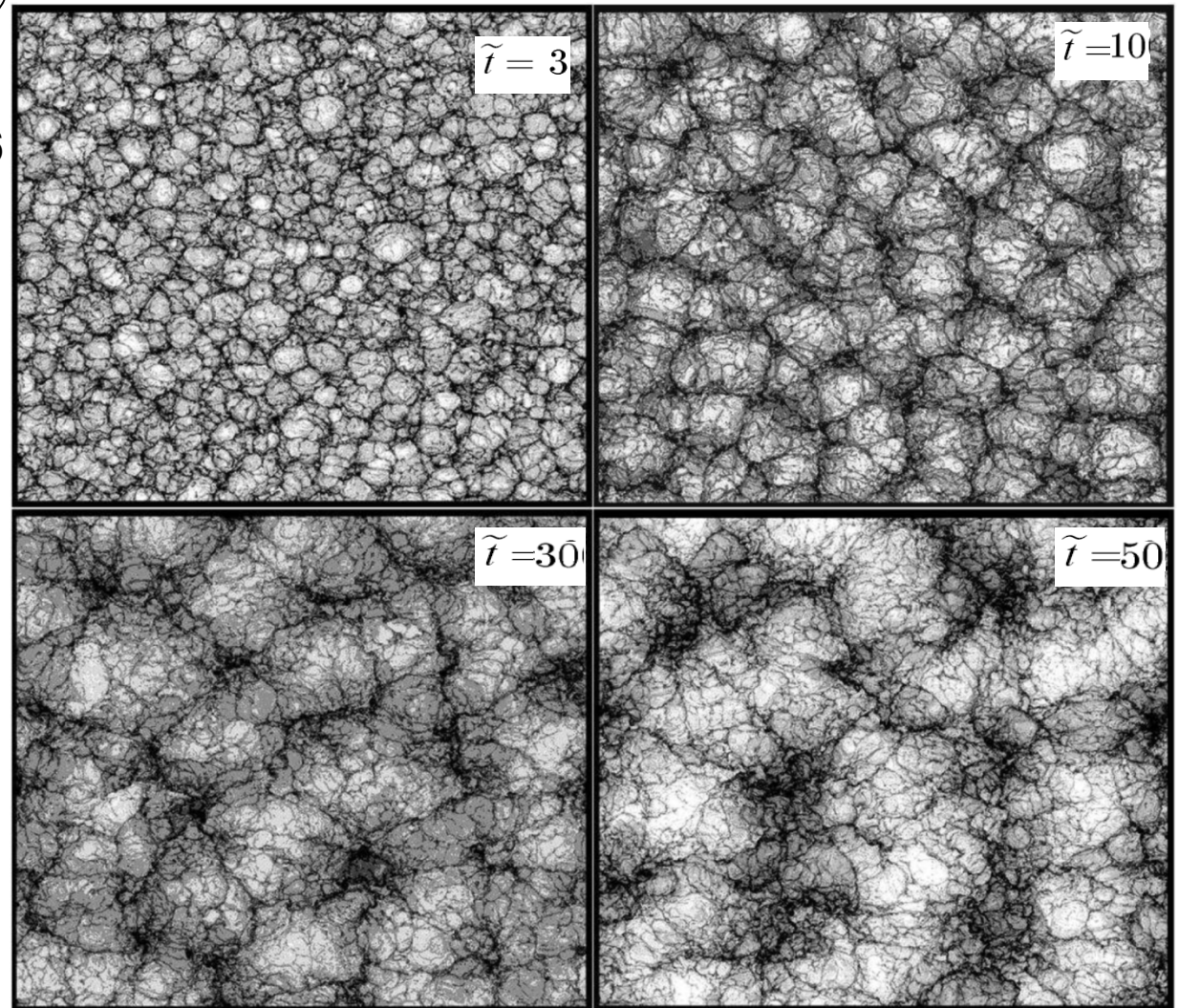
equidistant grid 1024x1024x40

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

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

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-dimentional turbulence



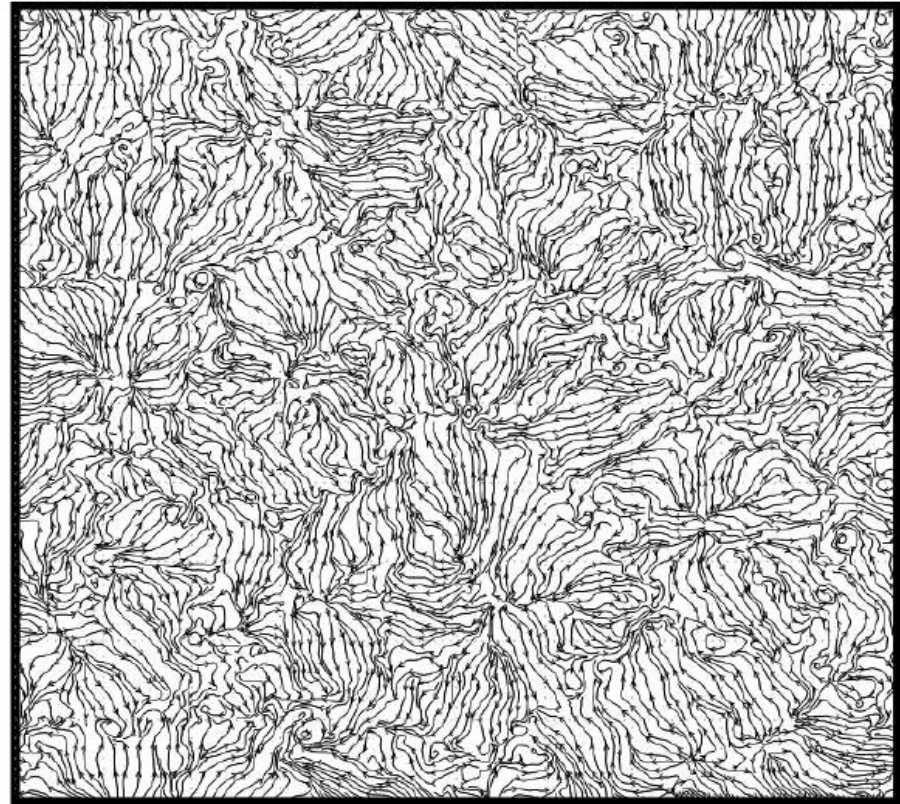
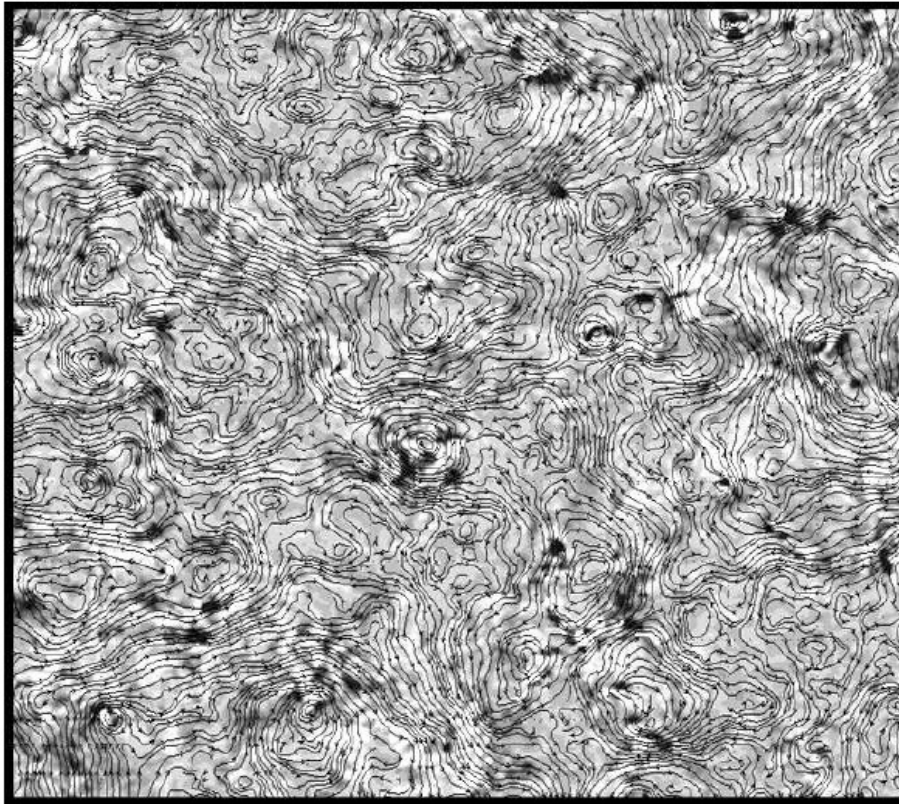
Potential temperature at level $L_3/8$

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

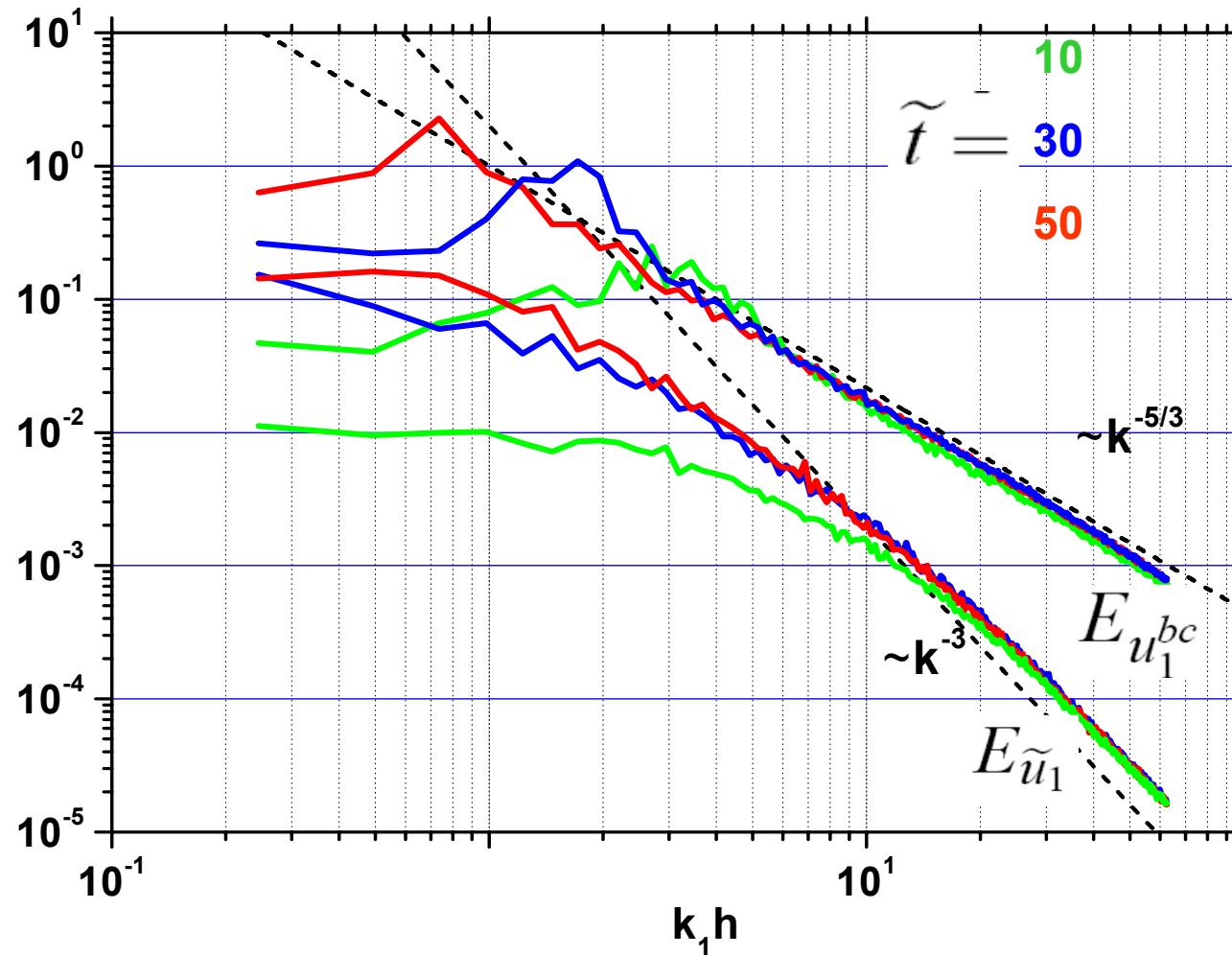
For convective APBL with $H \sim 100 \text{ W/m}^2$ $L_3 \sim 1 \text{ km}$ – anomalies with spatial scale $\sim 10 \text{ km}$, characteristic time $\sim 15 \text{ hours}$.

Barotropic and baroclinic components of the flow

$$\begin{aligned}\tilde{u}_i &= F^{bt} u_i = \frac{1}{L_3} \int_0^{L_3} u_i dx_3, \quad (i = 1, 2), & u_i^{bc} &= u_i - \tilde{u}_i \\ \tilde{u}_3 &= 0,\end{aligned}$$



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.

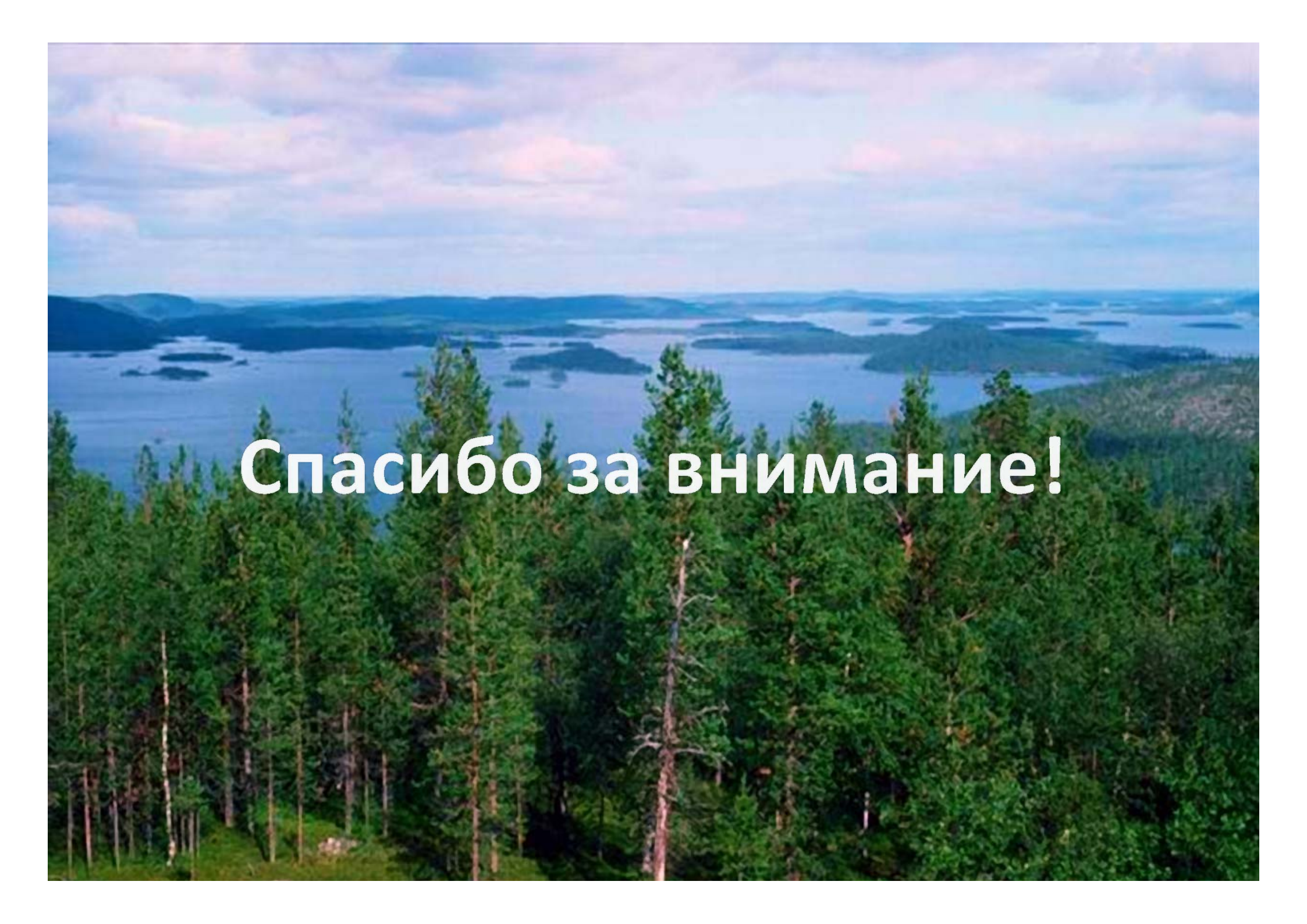
Рост мощности современных и будущих вычислительных систем сопровождается существенными изменениями в их архитектуре, в частности, переходом к массивно-параллельным компьютерам, что требует разработки хорошо масштабируемых вычислительных алгоритмов для использования на большом количестве процессорных 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.

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.)



Спасибо за внимание!