

Школа молодых ученых и международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде: “CITES-2013”
25 августа – 5 сентября 2013, Петрозаводск, Россия

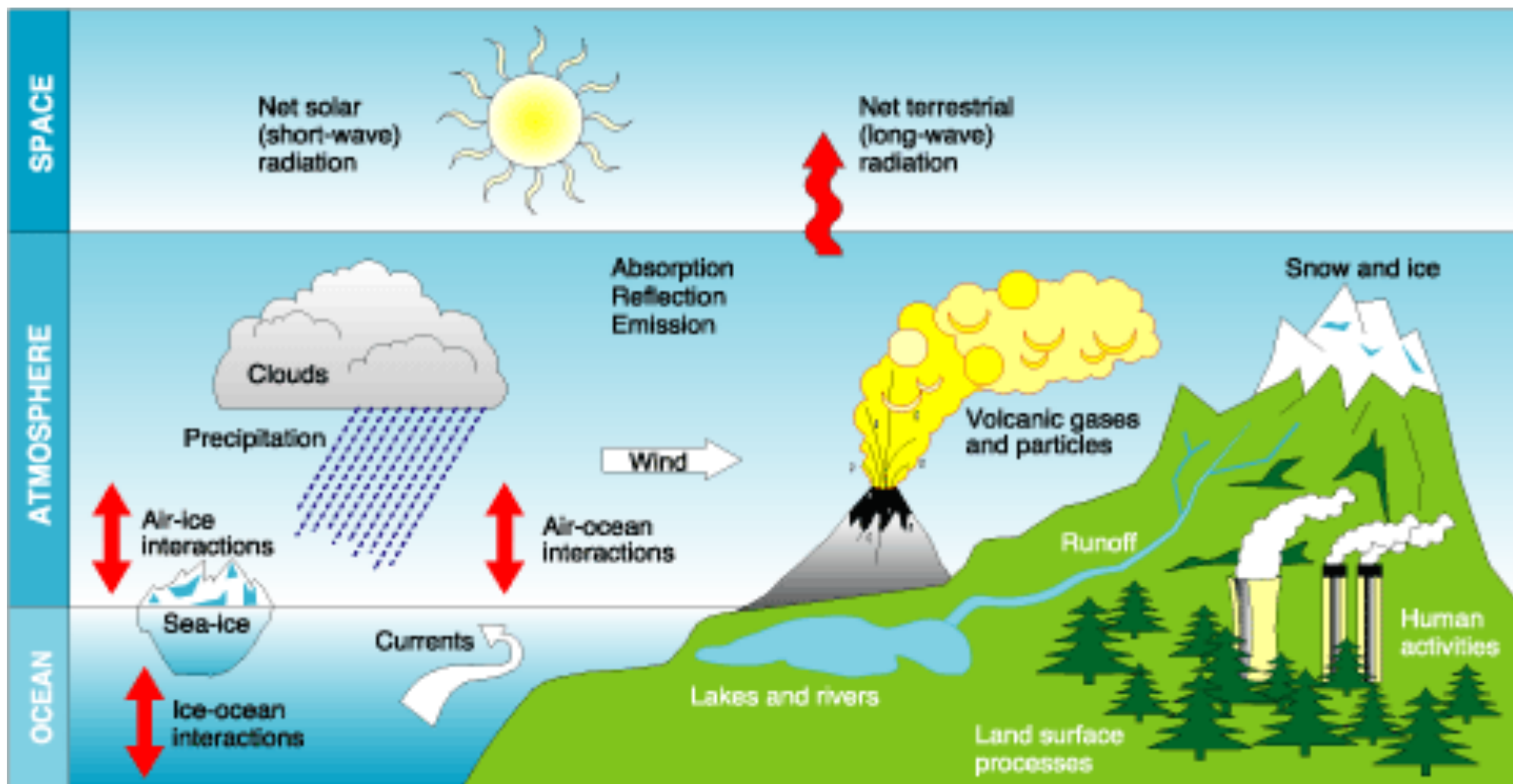
Региональные аспекты взаимодействия атмосферы и гидросферы

В.Н. Лыкосов

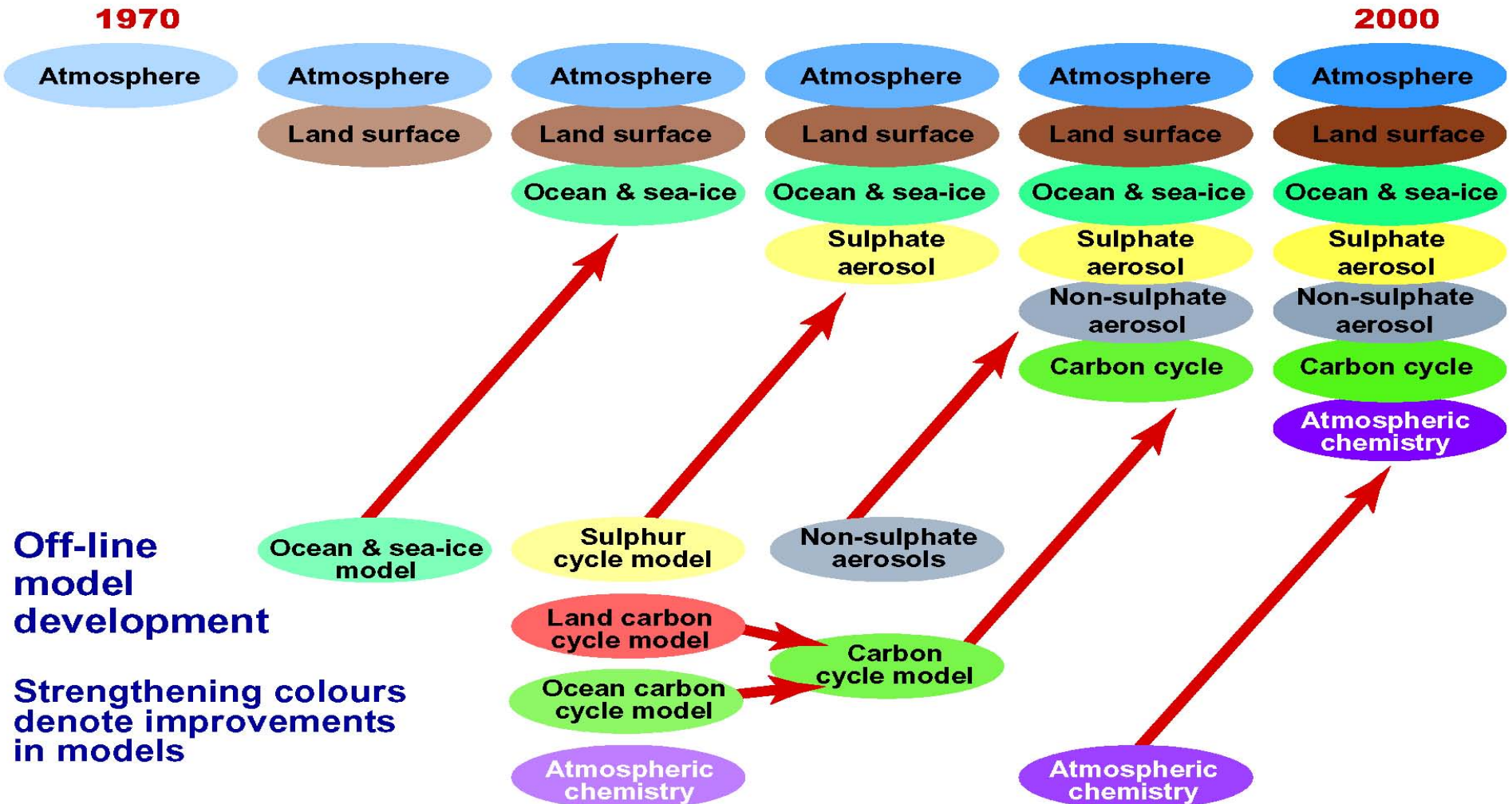
**Институт вычислительной математики РАН,
Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова**

E-mail: lykosov@inm.ras.ru

Климатическая система (IPCC, 2007)



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), OAFLUX (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

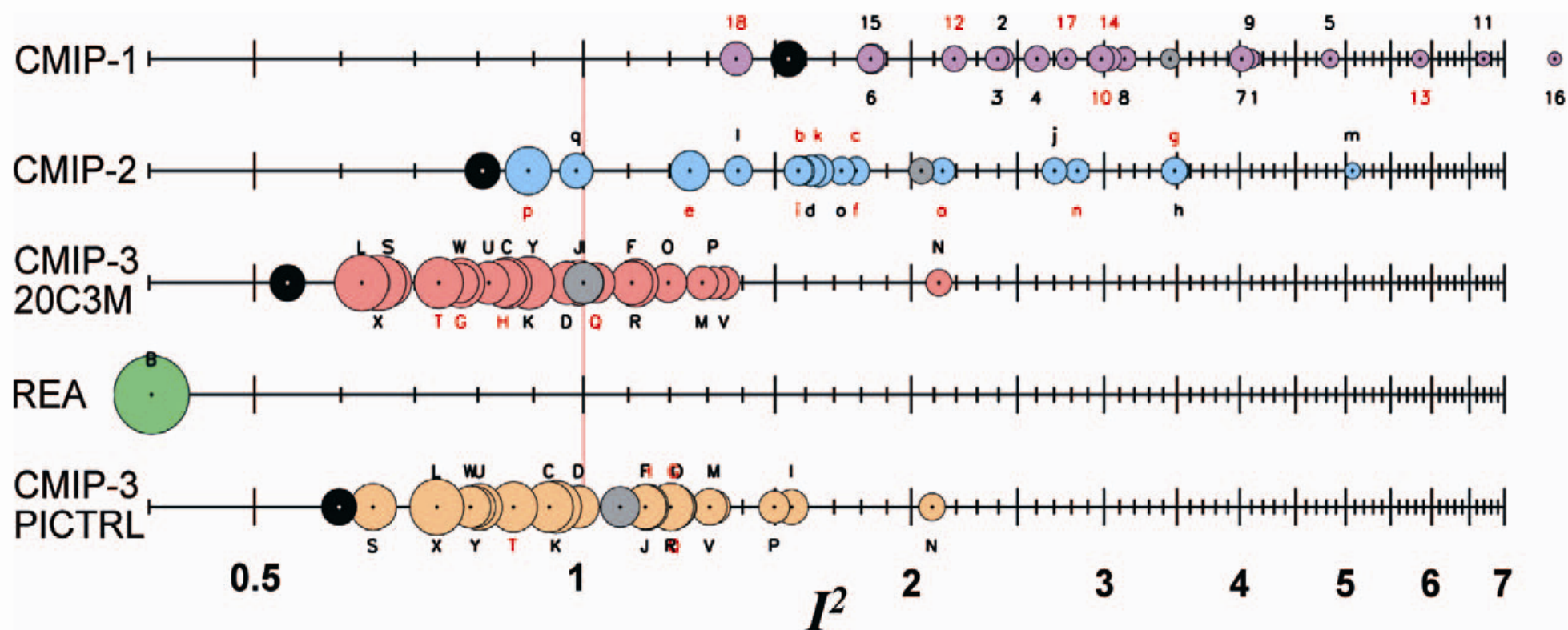
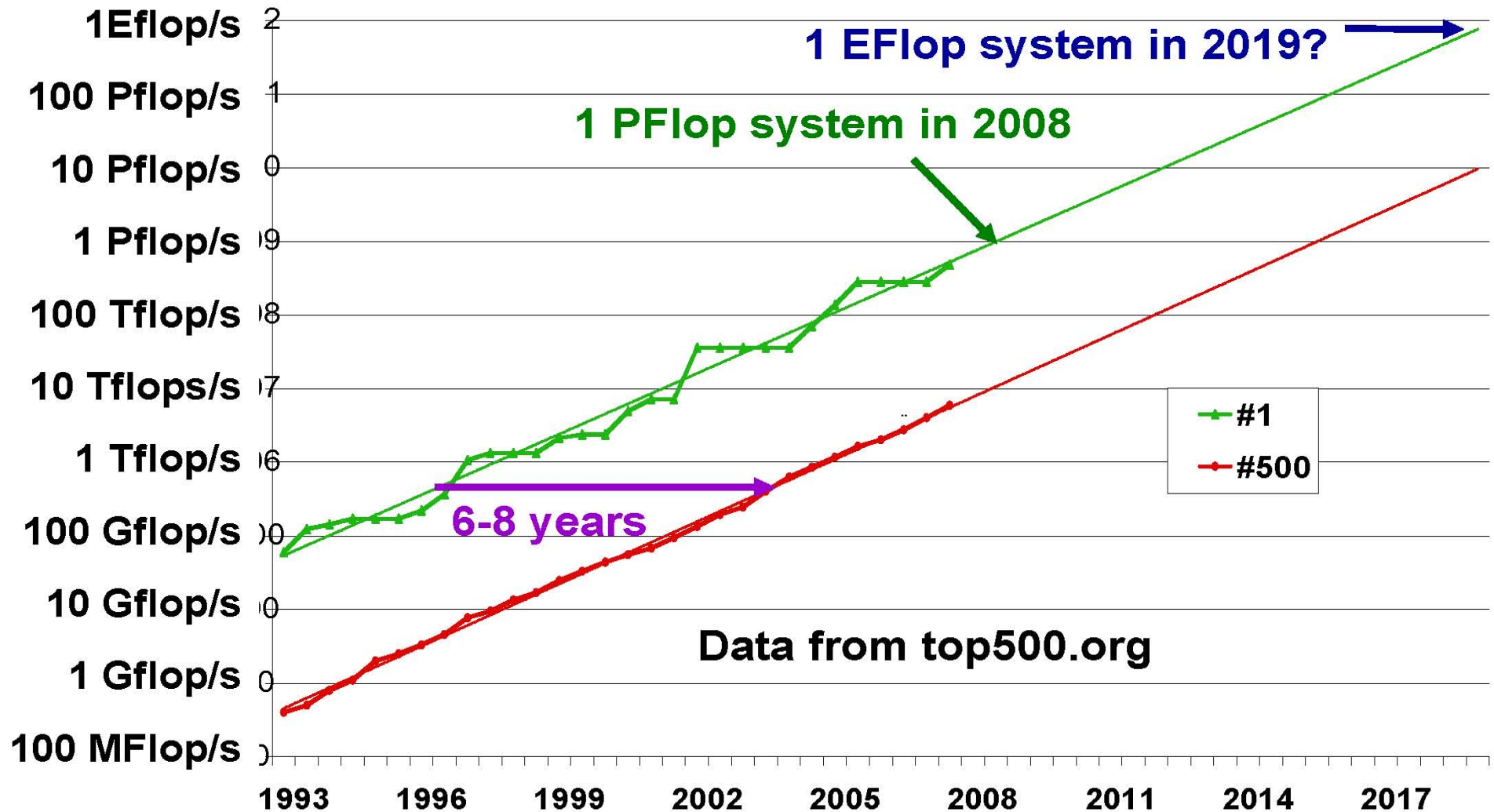


FIG. 1. Performance index I^2 for individual models (circles) and model generations (rows). Best performing models have low I^2 values and are located toward the left. Circle sizes indicate the length of the 95% confidence intervals. Letters and numbers identify individual models (see supplemental online 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.

Petaflop with ~1M Cores By 2008



Slide source Horst Simon, LBNL



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

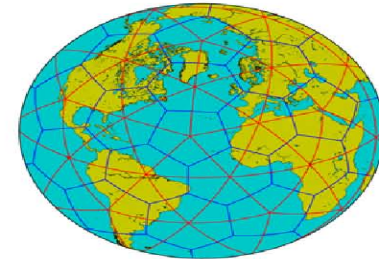
ESM Vision

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 & Space Systems Laboratory

4/11/08

Площадь поверхности Земли: 510 072 000 км²

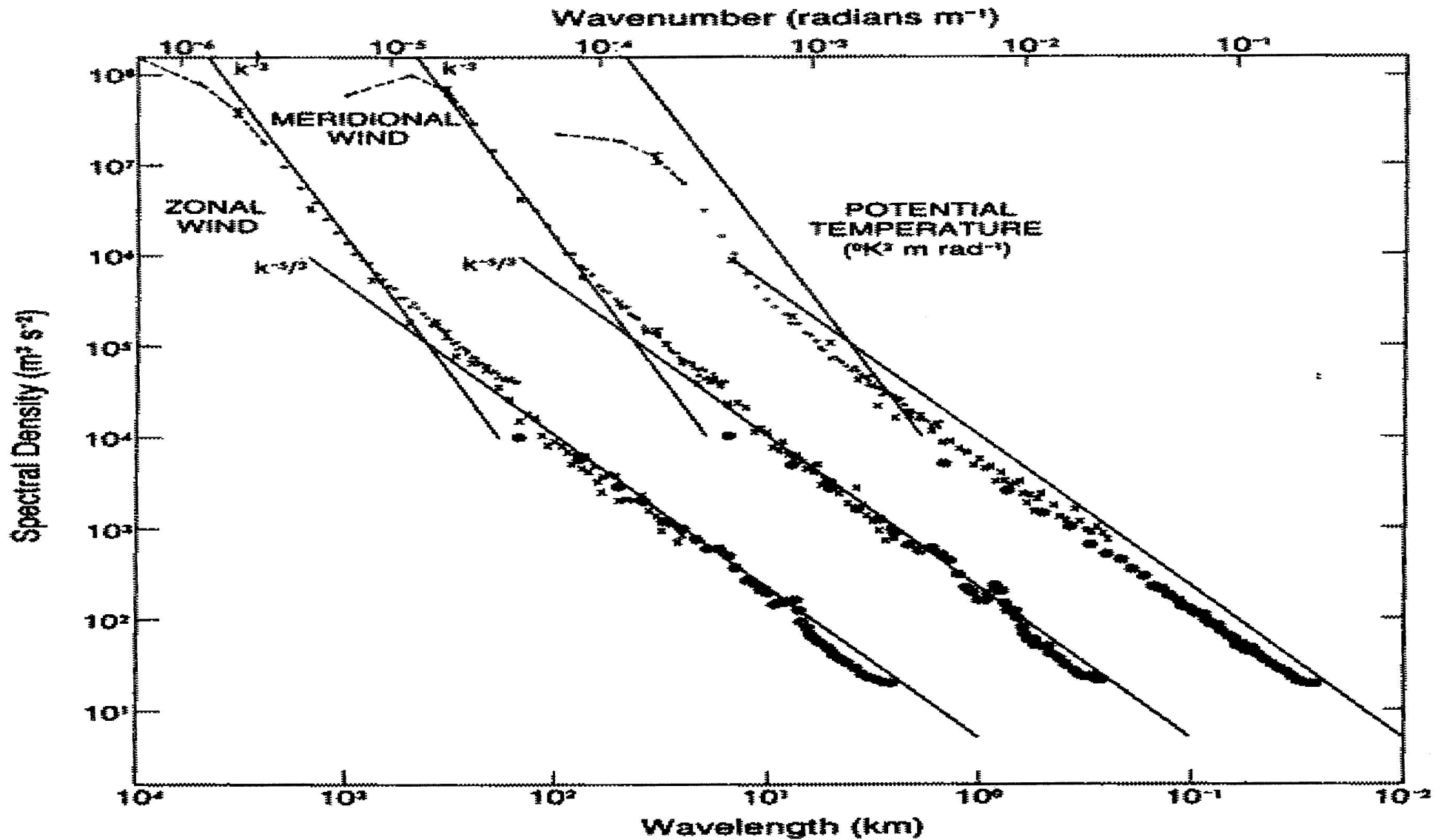


FIG. 1. Variance power spectra of wind and potential temperature near the tropopause from GASP aircraft data. The spectra for meridional wind and temperature are shifted one and two decades to the right, respectively; lines with slopes -3 and $-5/3$ are entered at the same relative coordinates for each 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: $\tau(k) : k^{-3/2} E^{-1/2}(k)$, $[k] = m^{-1}$, $[E] = m^3 / c^2$

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?

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

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

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

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 anticyclones, ...



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

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

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

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

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

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

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

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**



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

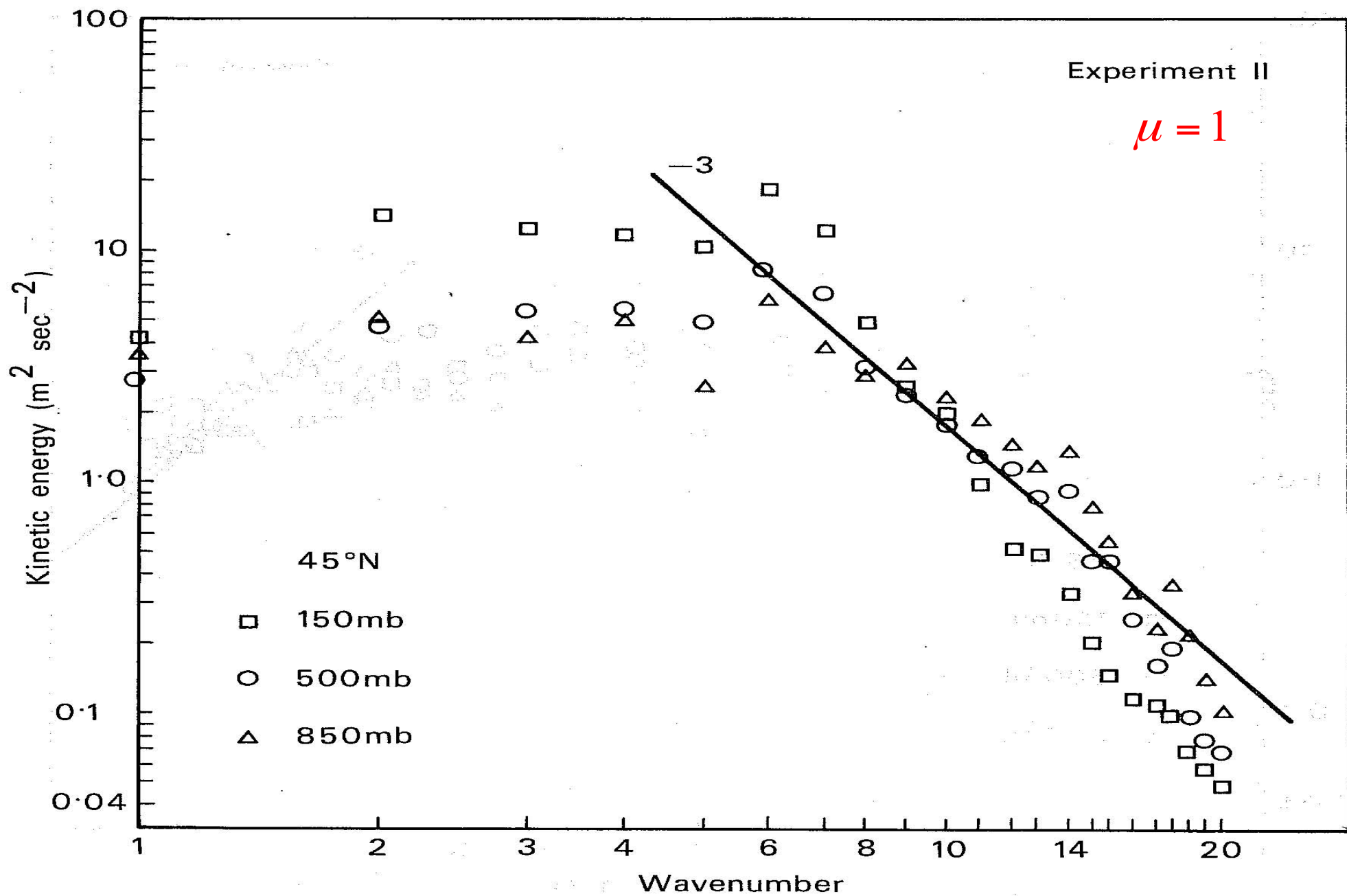


Fig. 3 Same as Fig. 2 but for Experiment II.

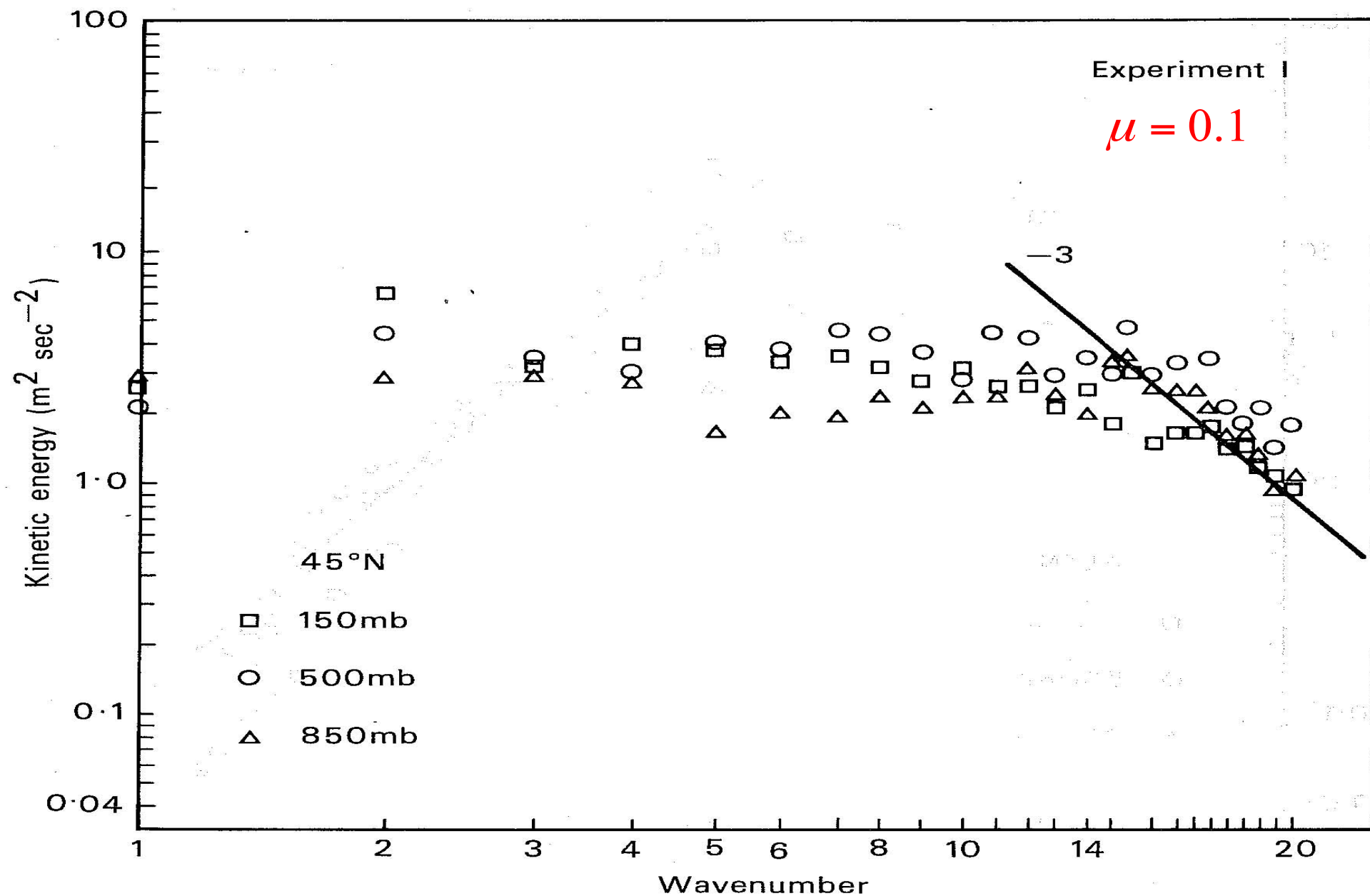


Fig. 2 Spectral distribution of eddy kinetic energy at 45°N (Experiment I).

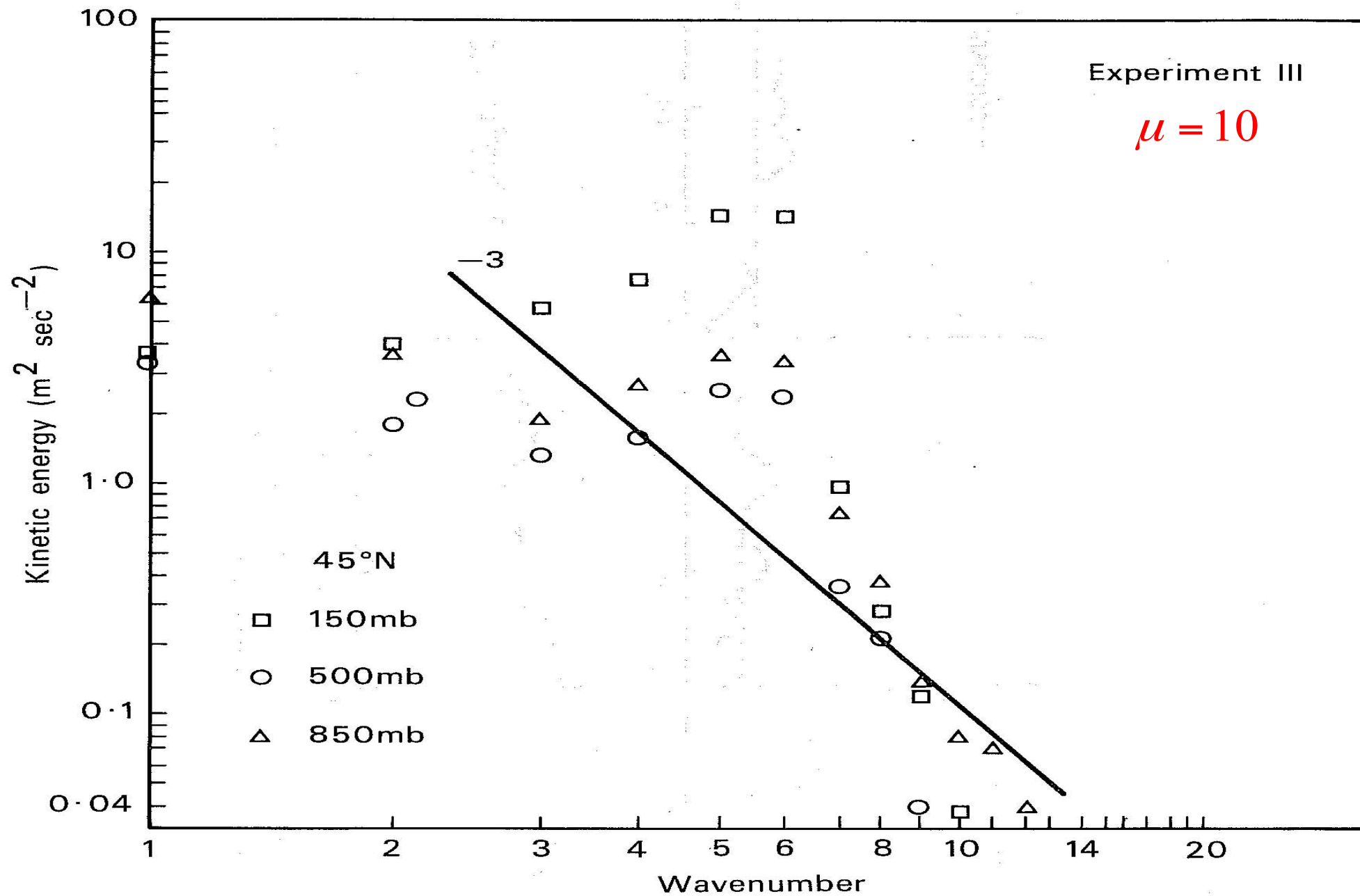


Fig. 4 Same as Fig. 2 but for Experiment III.

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 разрешением 2.5x2 градуса по долготе и широте и 80 уровней по вертикали до высоты 90 км (1 036 800 узлов сетки).

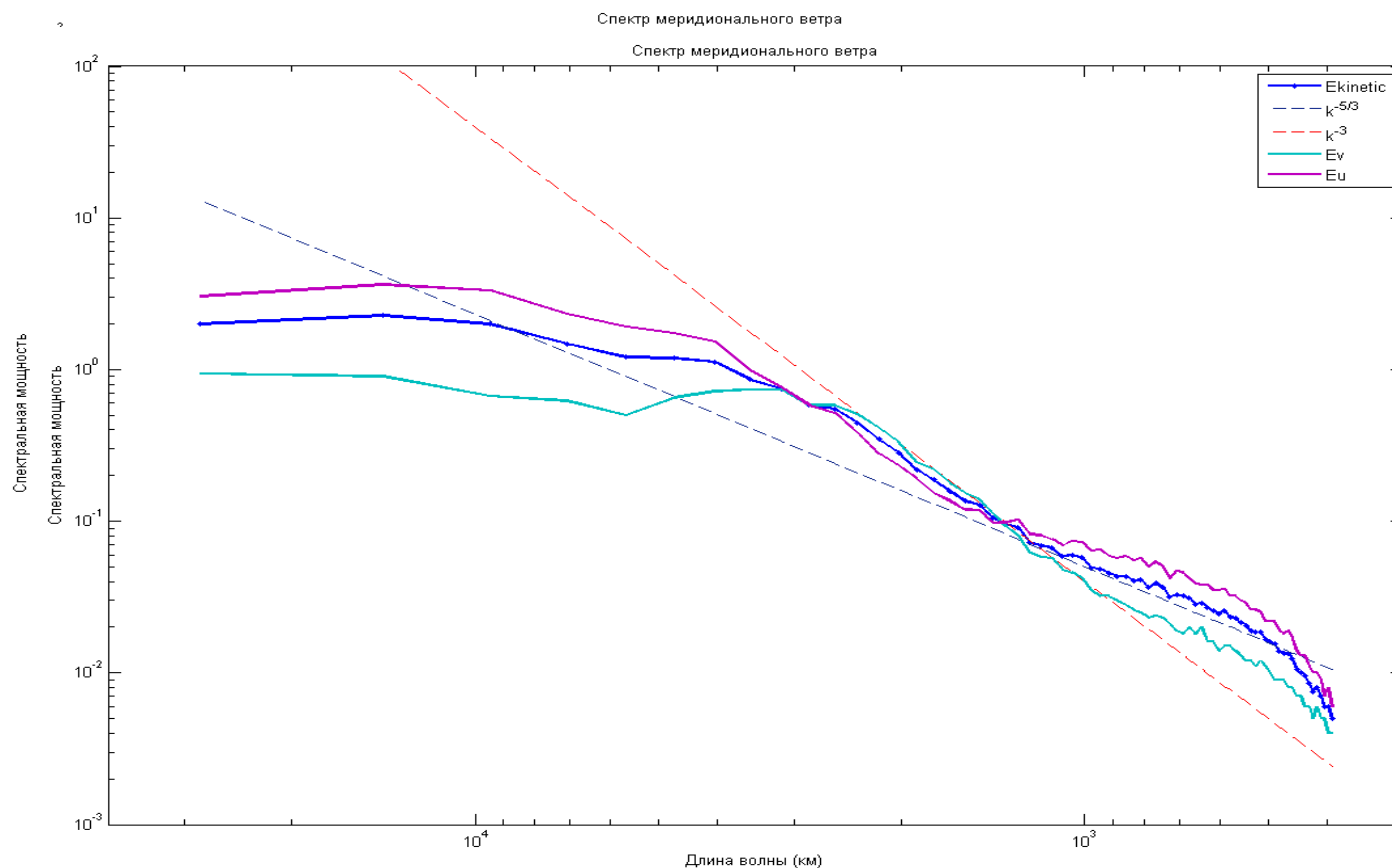
Суперкомпьютер МГУ “Ломоносов”



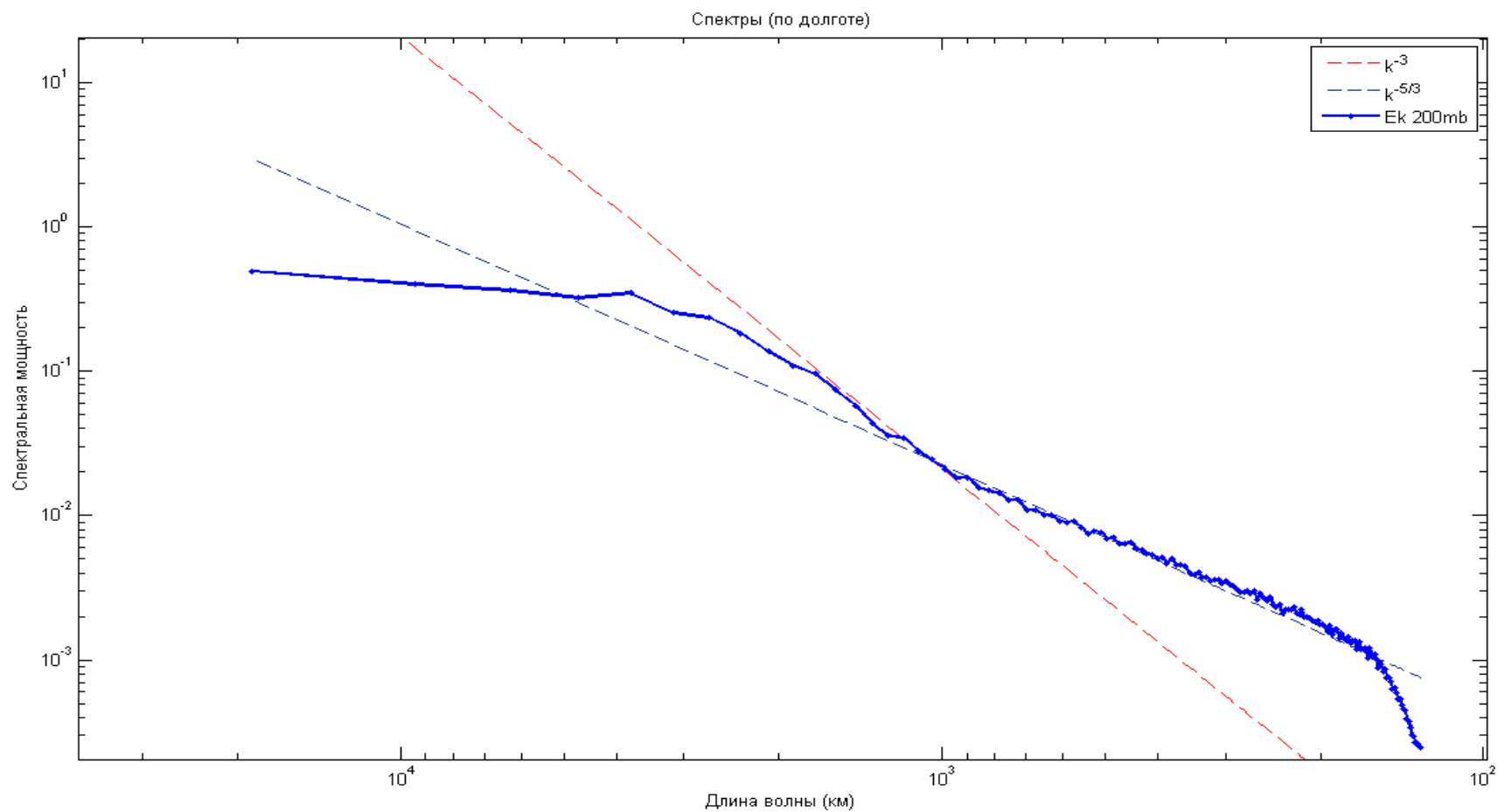
Общая характеристика суперкомпьютера «Ломоносов» (13 место в TOP-500, <http://parallel.ru/>)

Пиковая производительность	510 Tflops (1373)
Тест Linpack	397 Tflops (674)
Число вычислительных узлов	5 130
Число процессоров / ядер	10 260 / 44 000 (33072)
Основной тип вычислительных узлов	T-Blade2/1.1 (+ Nvidia 2070 GPU)
Процессор основного типа вычислительных узлов	Xeon X5570/X5670 2.93 GHz
Оперативная память	73 920 ГБ
Общий объем дисковой памяти вычислителя	166 400 ГБ
Объем системы хранения данных	до 1 350 ТБ
Операционная система	Clustrx T-Platforms Edition
Энергопотребление (вычислитель)	1,8 МВт
Площадь	252 кв. м
Производитель	Т-Платформы

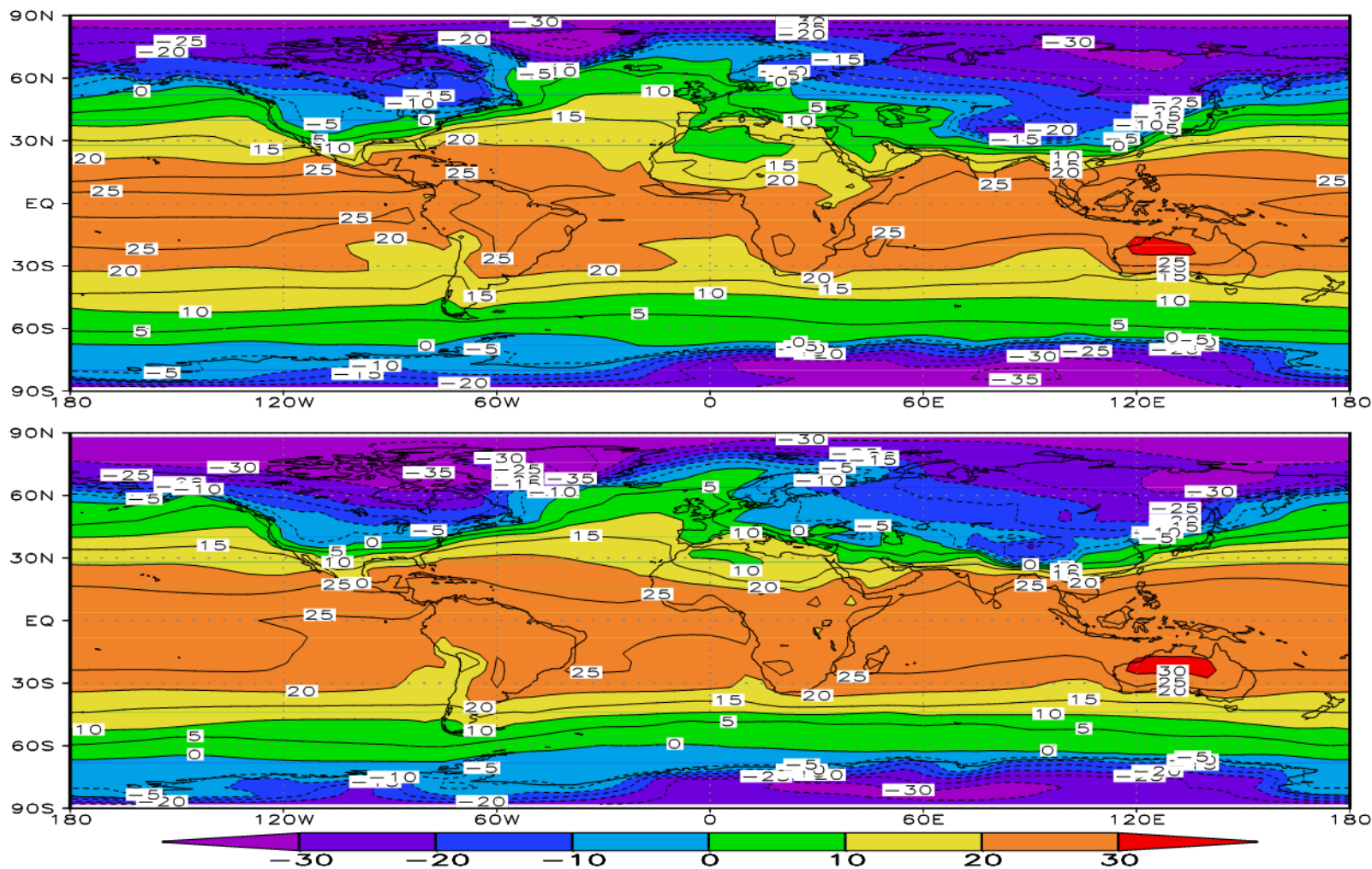
Средние спектральные распределения квадратов зональной и меридиональной горизонтальных составляющих скорости ветра, а также кинетической энергии по результатам расчетов с помощью модели ОЦА ИВМ РАН 2.5°x2°x80 для зимних месяцев на высоте 200 гПа, для 60° с.ш.



Модель ОЦА ИВМ РАН 1°x1.5°x128 (зимние месяцы, высота 200 гПа)



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



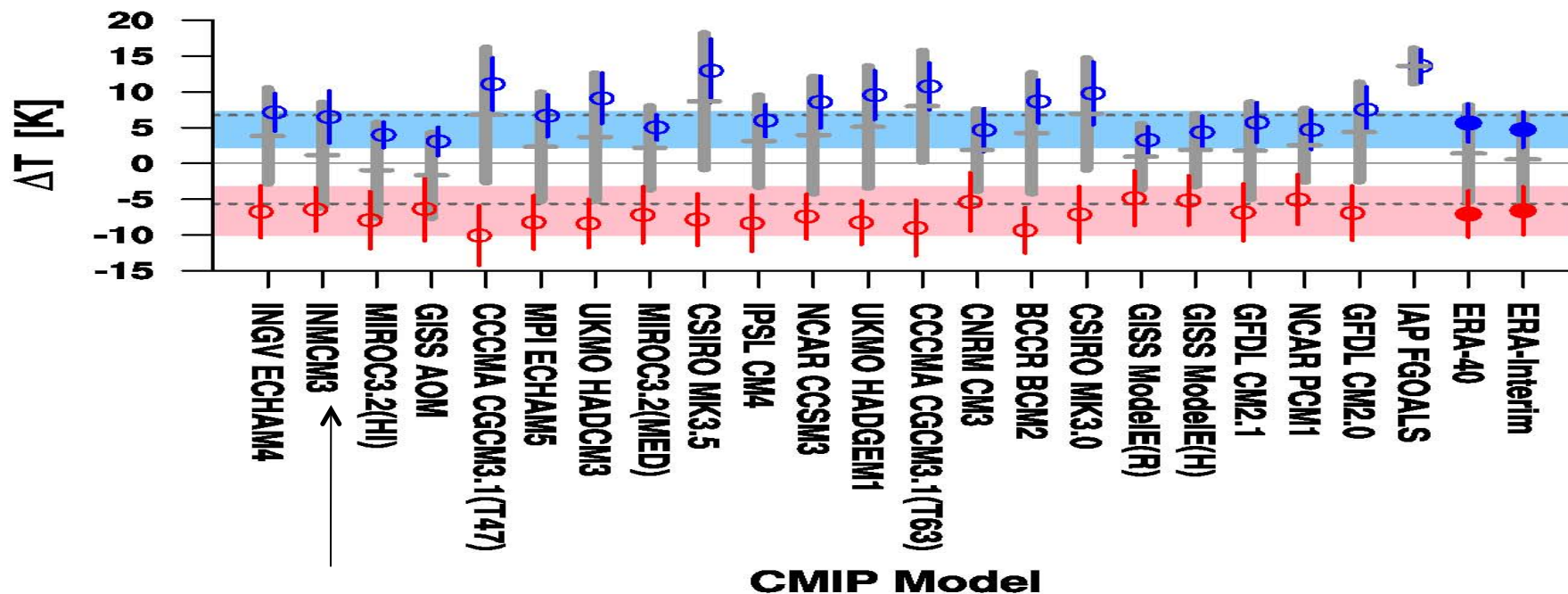
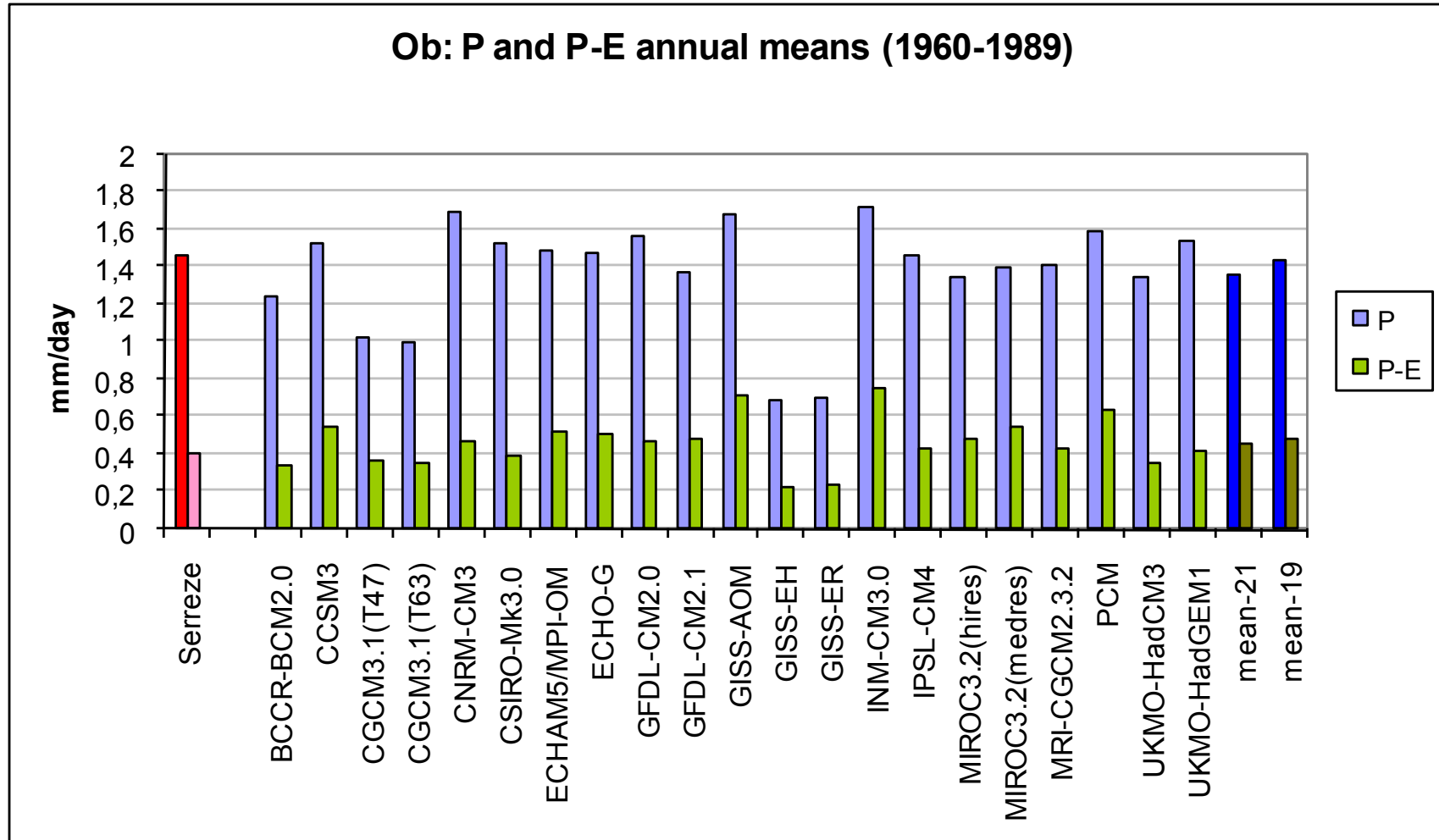


FIG. 3. Average inversion strength for the CMIP3 models, ERA-40, and ERA-Interim for the (gray) Arctic region (64°N – 90°N), (red) unstable, and (blue) stable portion of the ΔT distribution. Markers show the mean value and whiskers show ± 1 standard deviation. The stable and unstable conditions are divided at $\Delta T = 0$. The pink and blue shading show the ± 1 standard deviations of the ERA-Interim values for stable and unstable conditions, and horizontal dotted gray lines similarly show the Arctic region. Models are organized from left to right by increasing Arctic average sea-ice concentration in November–February; the exception is the GISS ModelE-H, for which sea-ice concentration was unavailable, so that model was placed next to the GISS ModelE-R arbitrarily. The regional average (gray markers) is the sum of the two regimes weighted by their relative areas, providing information about the sizes of the regimes in each data set.

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



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

Оценка стока средних и малых рек

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

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

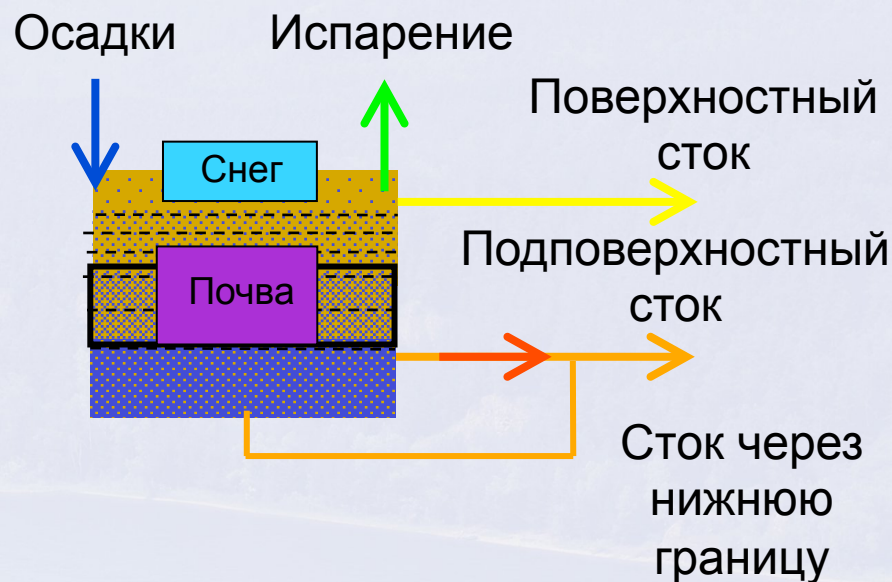
Климатическая модель ИВМ РАН

- горизонтальное разрешение: 2×1.5 градусов по долготе и широте в атмосфере, 1×0.5 градуса в океане
- 21 и 40 уровней по вертикали, соответственно, в атмосфере и океане

Физика суши:

- модель «**почва** — **растительность** — **снег** — **приземный слой атмосферы**»
- (23 уровня в почве, 4 уровня в снеге)

○ **Трехмерная динамика озер (Каспийское море, Ладожское и Онежское озера, Байкал, Великие Американские озера, Виктория)**



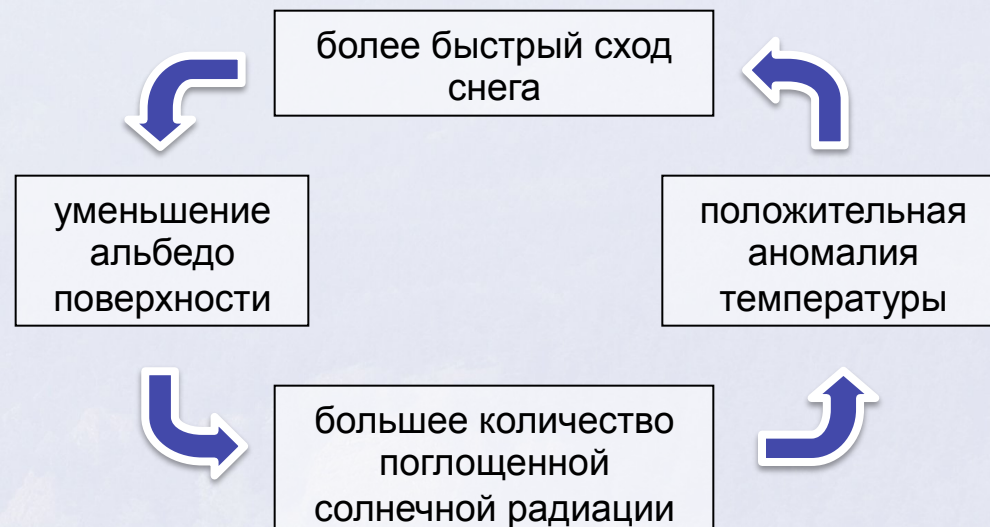
Взаимодействие атмосферы и криосферы

Снежный покров:

- Высокая отражательная способность (альбедо)
- Низкая теплопроводность
- Накопление воды в течение длительного периода

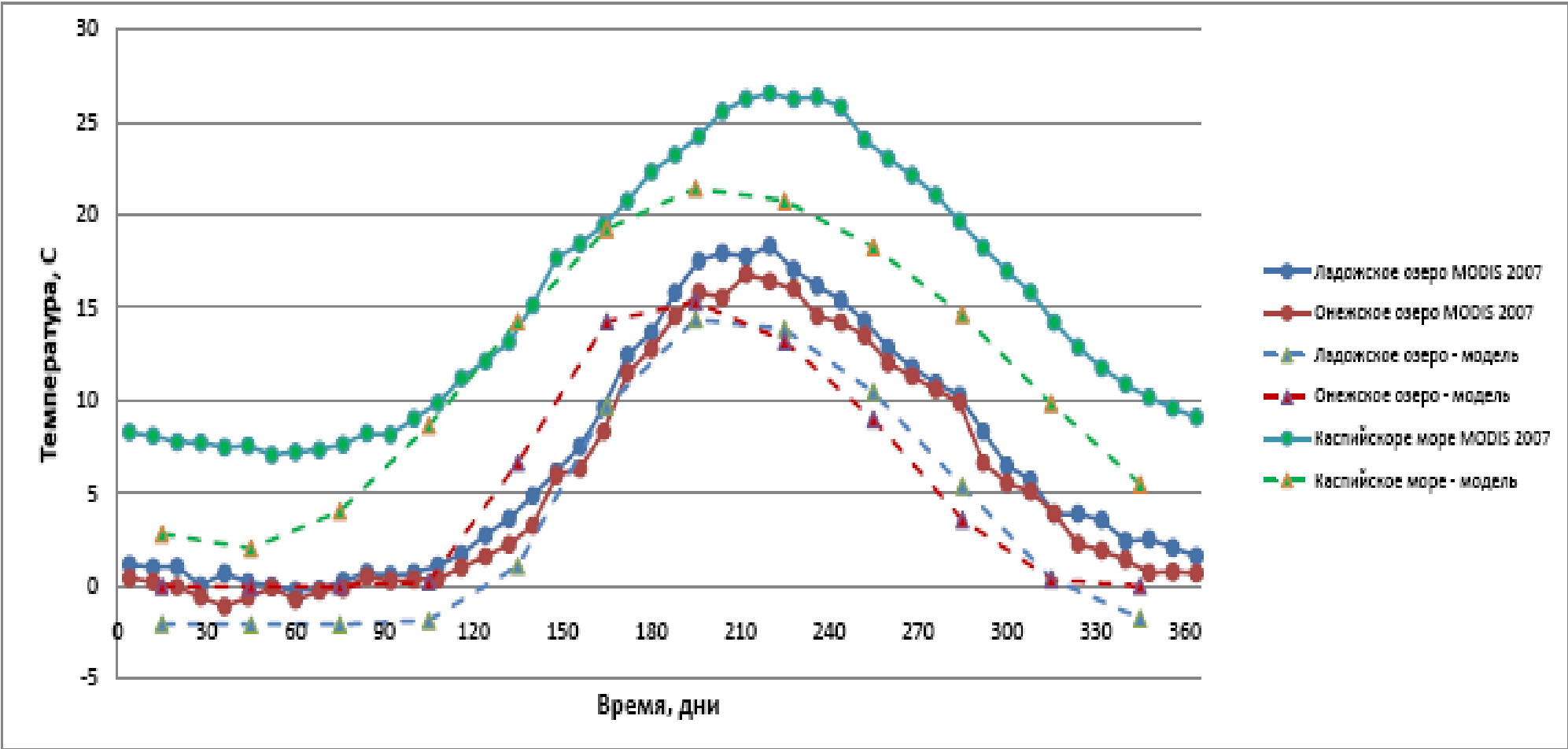
Многолетняя мерзлота:

- Территория, занимаемая многолетней мерзлотой, составляет четверть поверхности суши
- Северные экосистемы – наиболее уязвимы при глобальном изменении климата
- Площадь, занимаемая многолетней мерзлотой, будет сокращаться, а глубина активного слоя увеличиваться (IPCC, 2001)
- Экосистемы: от поглощения углерода – к его эмиссии (?)



В климатической модели ИВМ РАН реализована трехмерная модель озер с целью более точного описания процессов взаимодействия атмосферы с внутренними водоемами суши. Численная схема и параметризации "озерной" модели аналогичны тем, что использованы в океаническом блоке климатической модели. В рассмотрение были включены 6 озерных систем: Каспийское море, Ладожское и Онежское озера, Байкал, Великие Американские озера и Виктория. В целом, модель довольно удачно воспроизводит годовой ход температурного режима на поверхности этих озер, что свидетельствует о перспективности использованного подхода. Вместе с тем, достижение максимума температур в модели происходит с опережением по отношению к данным наблюдений приблизительно на 1 месяц. Необходимы дальнейшие усилия по совершенствованию технологии расчета гидротермодинамики внутренних водоемов в климатических моделях. С этой целью одномерная модель водоема, разрабатываемая в НИВЦ МГУ, дополнена блоком расчета генерации, переноса и стока метана (с учетом процессов в верхнем слое грунта, в том числе, в условиях вечной мерзлоты) и создан программный интерфейс для ее сопряжения с атмосферными моделями, в частности, с климатической моделью ИВМ РАН.

Климатический годовой ход температуры, осредненной по поверхности Каспийского моря, Ладожского и Онежского озер по данным «преиндустриального» контрольного эксперимента (треугольники). Кружками обозначены данные наблюдений годового хода средней по поверхности температуры для этих же озер за 2007 г.



С помощью климатической модели ИВМ РАН (версия INMCM4.0) проведены численные эксперименты по моделированию климата XX и XXI веков. Для территории Восточно-Европейской равнины проведено сравнение результатов модельных расчетов поверхностной температуры, осадков и речного стока (225 узлов модельной сетки) со среднемноголетними данными за период 1960-1990 гг. В целом, модель достаточно хорошо воспроизводит эти климатические характеристики, но завышает (на 15-30%) значения осадков на засушливых территориях Ростовской области и Краснодарского края, а также юга Украины, и, соответственно, завышает величину стока в этих регионах. Средние многолетние величины годового стока, рассчитанные как разность модельных осадков и испарения с поверхности бассейнов (эмпирическая функция суммы положительных температур), неплохо согласуются с данными наблюдений: коэффициент корреляции равен 0.92, а среднеквадратичное отклонение составляет 40.6 мм.

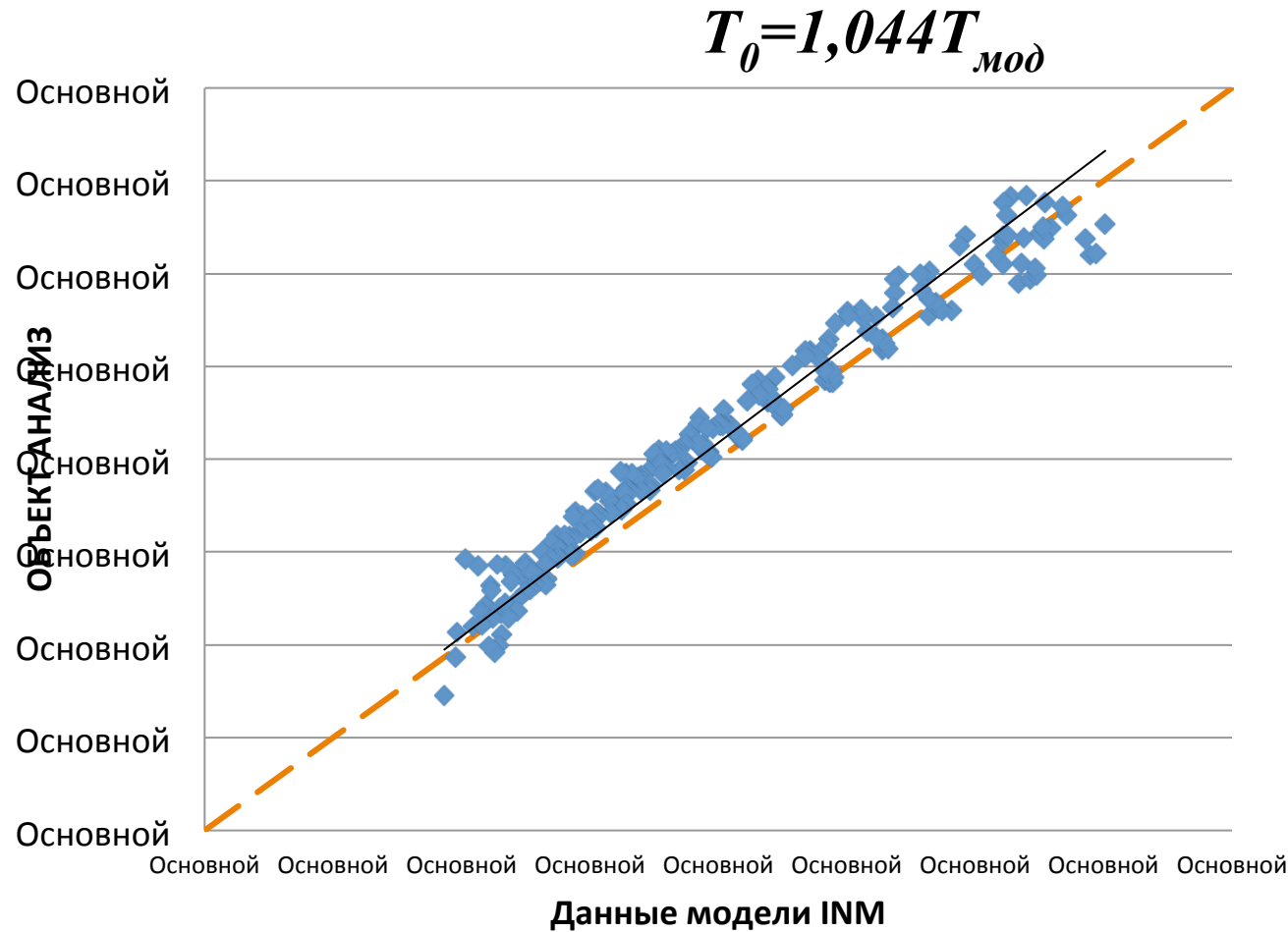
Территория Восточно-Европейской равнины

(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

корреляції

$$r = 0,975,$$

остаточное

среднеквадратическое

отклонение

$$(ocm.CKO) \pm 5,8^{\circ}$$

при среднем

по территории

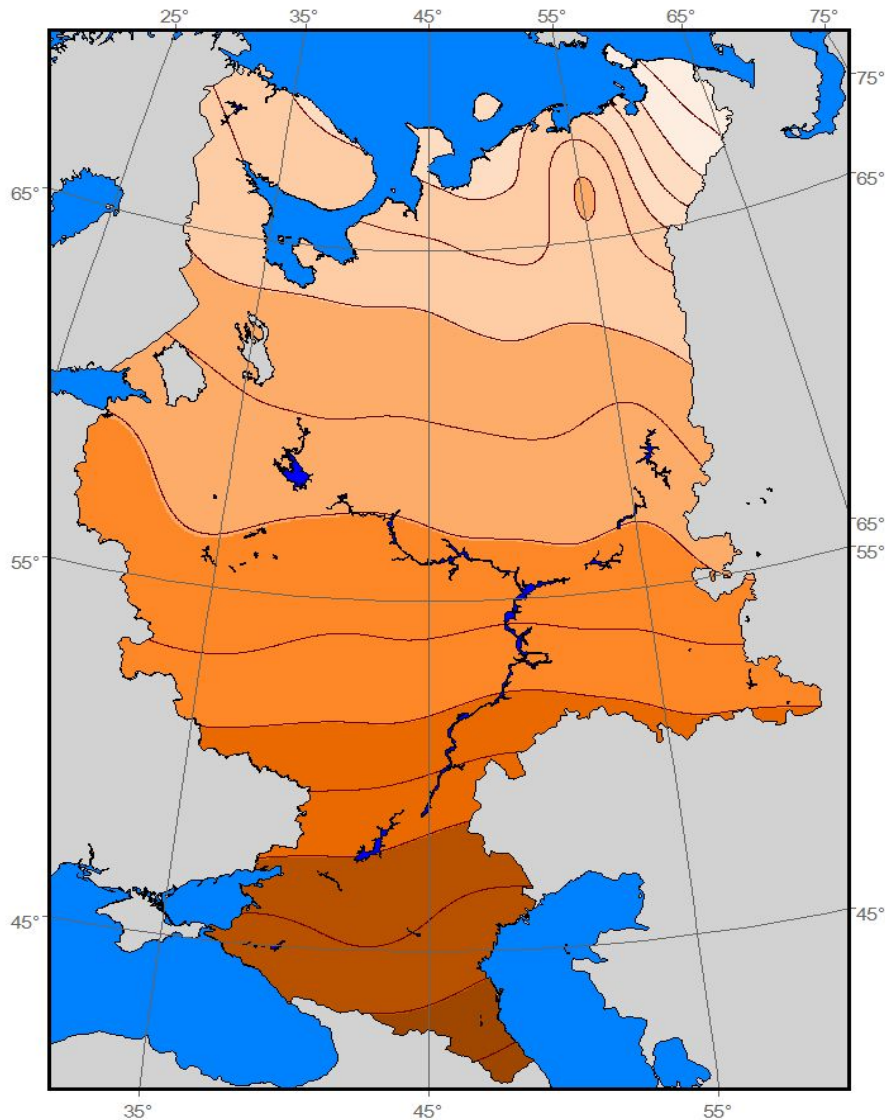
значении $84,3^\circ$

Черная линия – линия тренда соответствующая уравнению регрессии,

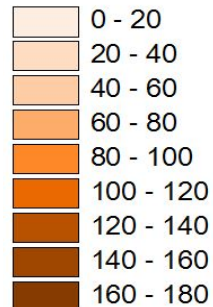
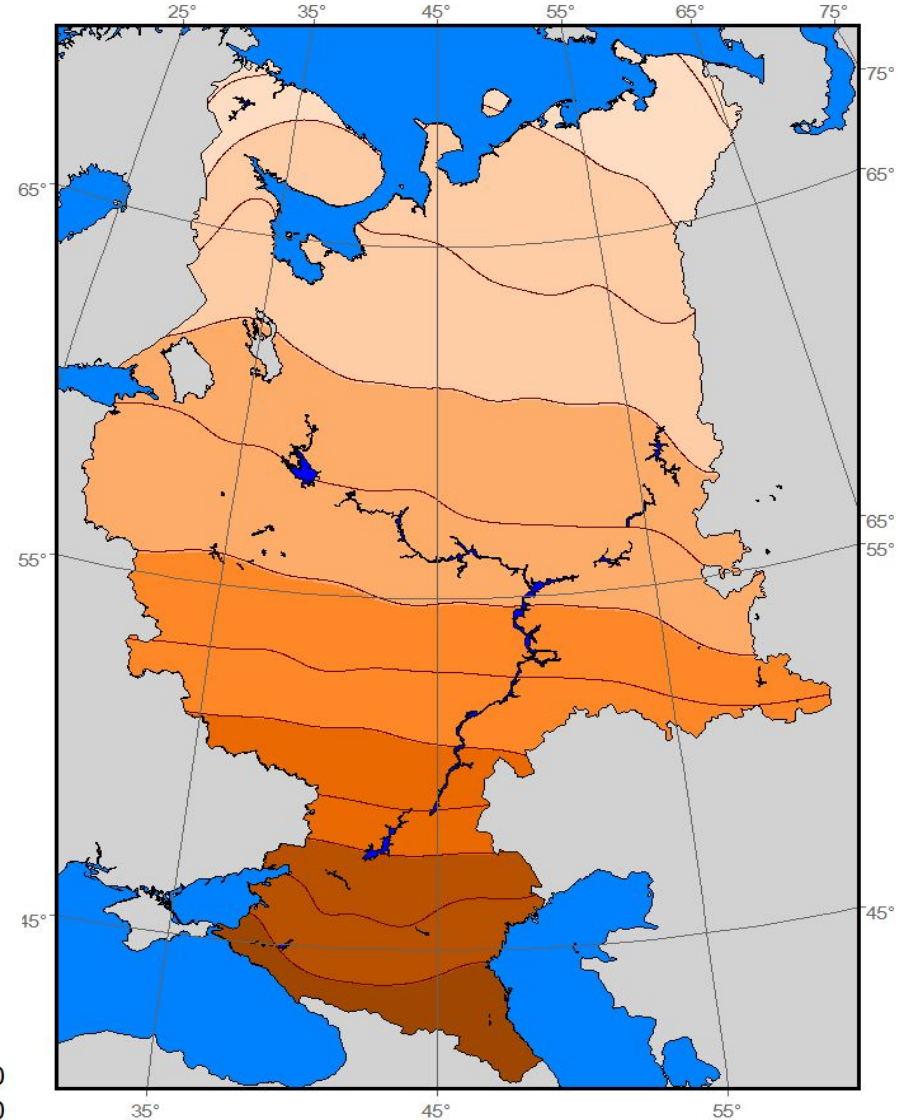
Оранжевый пунктир – линия $x = y$

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

Фактические данные

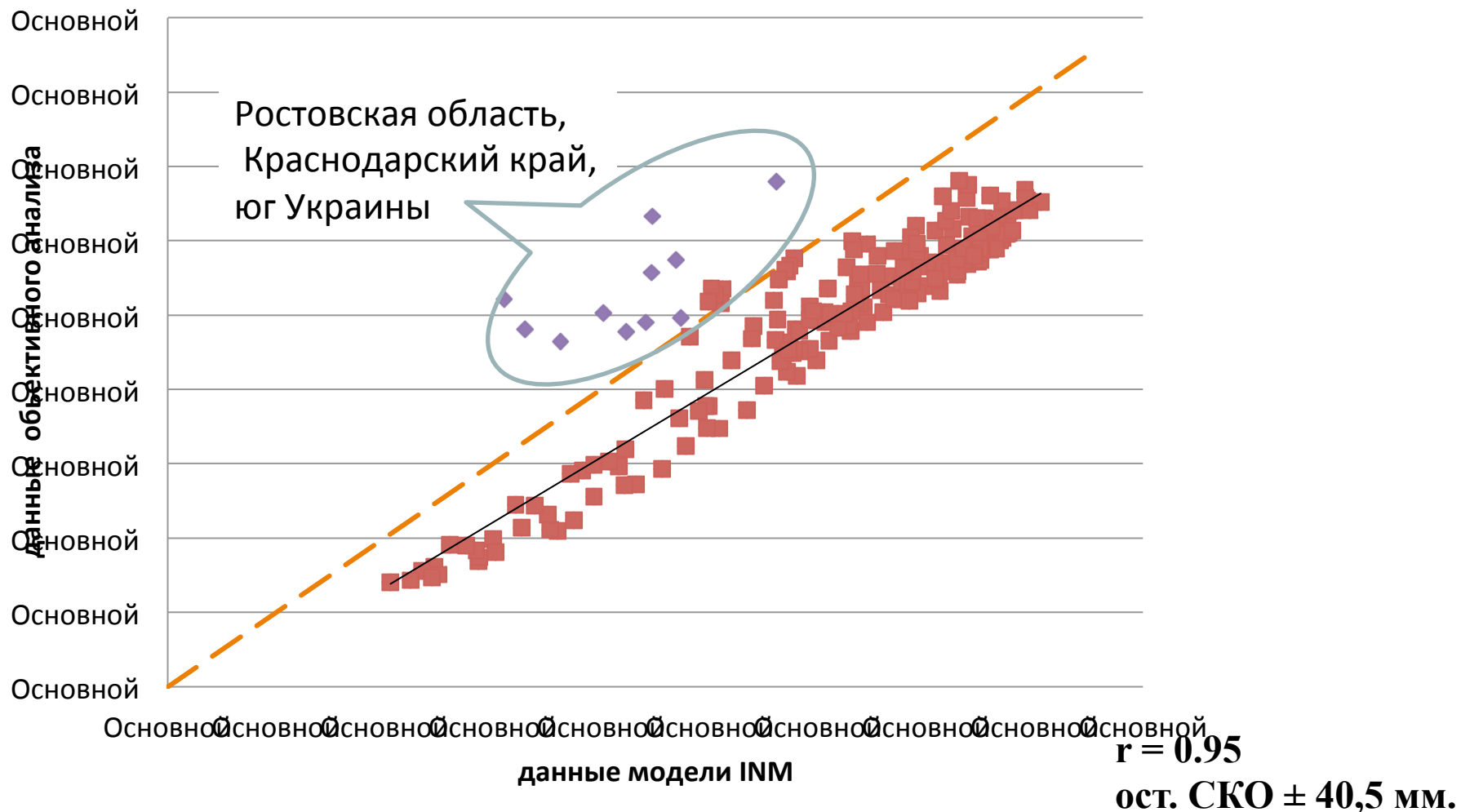


Данные моделирования ИВМ РАН



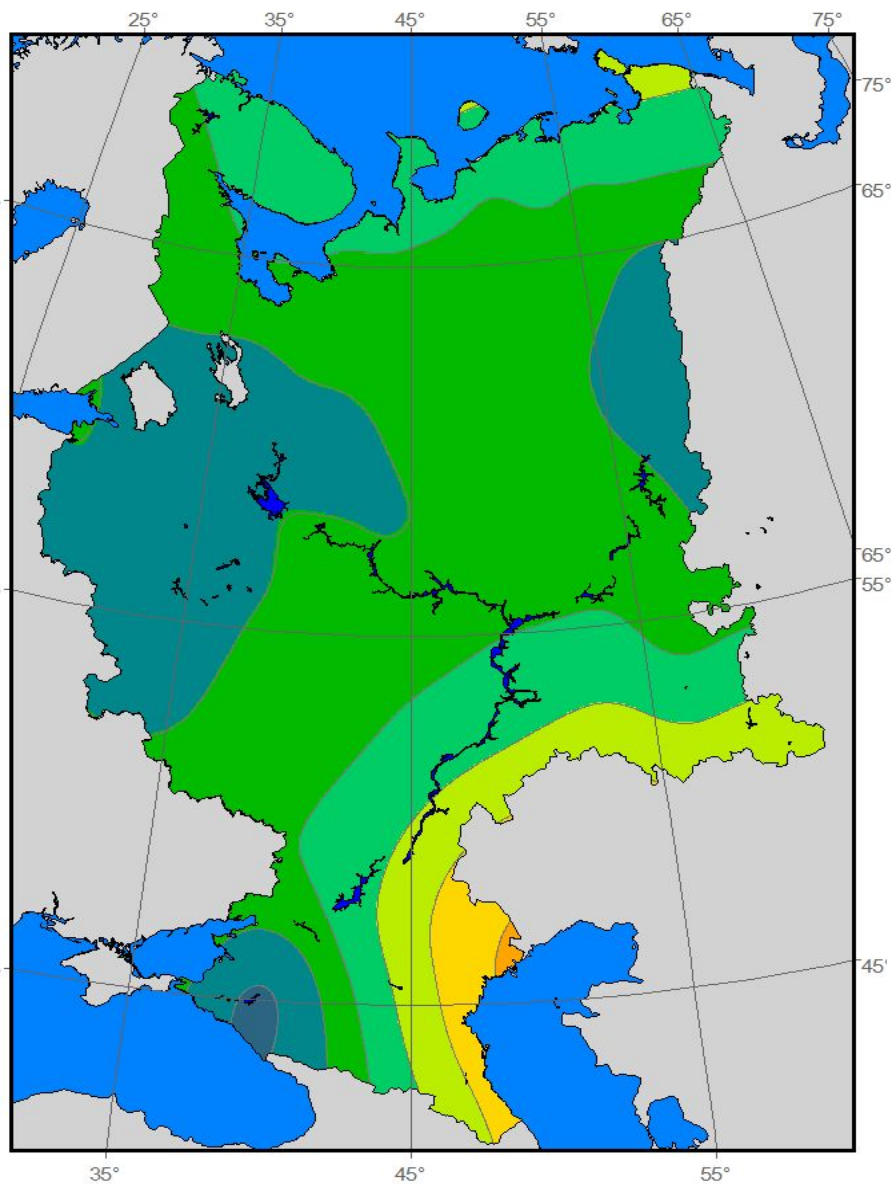
Воспроизводимость суммы осадков за год (P), мм климатической моделью ИВМ РАН для периода 1961-1989гг.

$$P = 0.88P_{\text{мод}} - 41,5$$

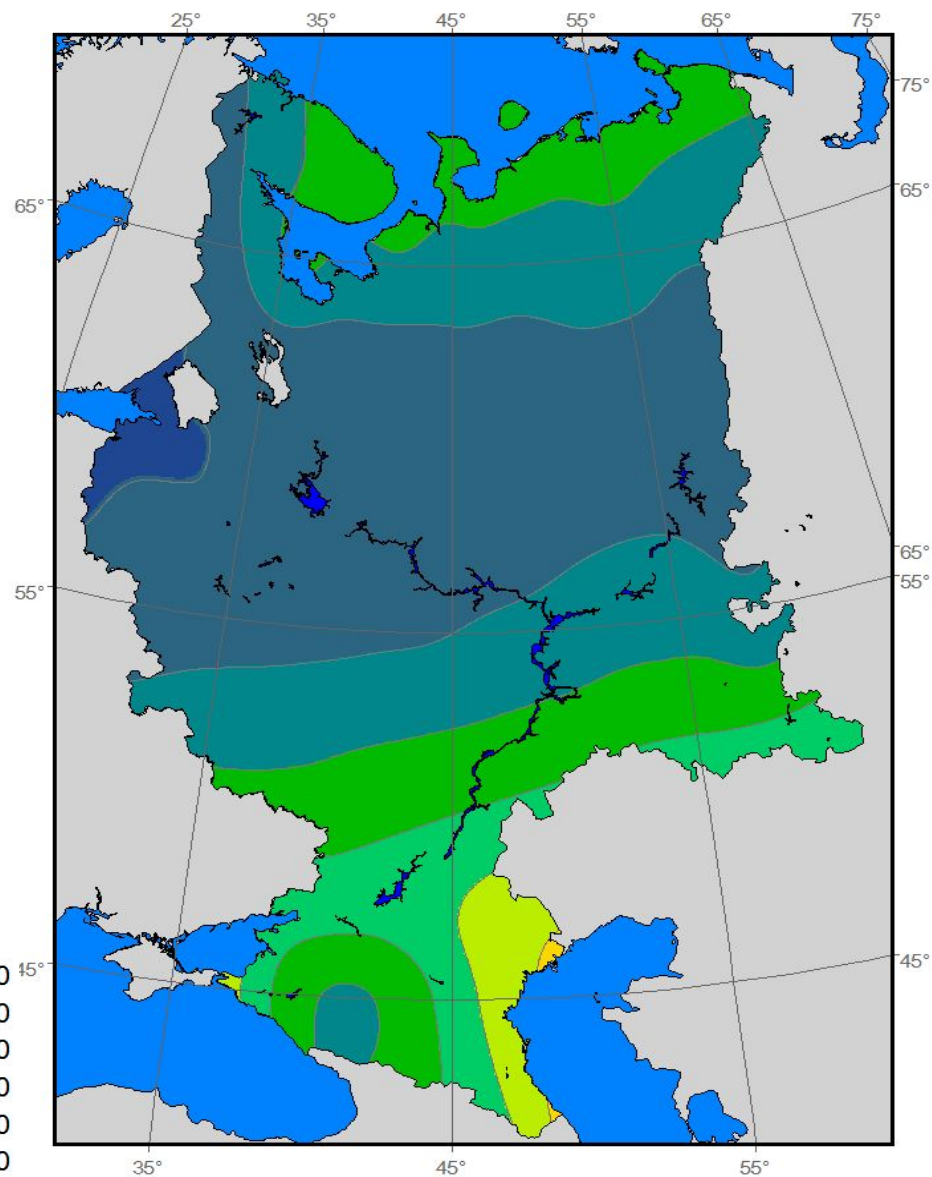
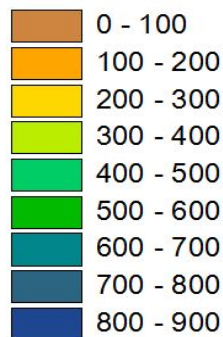


Черная линия – линия тренда соответствующая уравнению регрессии,
Оранжевый пунктир – линия $x = y$

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



Фактические данные



Данные моделирования ИВМ РАН

Поскольку большая часть фактических данных по стоку, имеющихся в открытом доступе, относятся к периоду до 1980 гг., когда значительная часть гидрологических постов была закрыта, то прямая статистическая детализация речного стока возможна на данном этапе исследования только для отдельных небольших регионов. Использование балансовой методики дает возможность оценить сток по детализированным метеорологическим полям. С этой целью статистическая модель была настроена для ряда равнинных рек (рассмотрены 64 бассейна рек различного размера, относящихся к бассейнам Волги и Северной Двины). Расчеты показали, что при таком подходе значения стока оказываются заниженными (среднее значение ошибки составляет 37%). Более точные результаты получены для крупных речных бассейнов, по мере уменьшения площади водосбора ошибка растет.

Алгоритм расчета годового стока по Р и Т

В качестве основы для расчета средних многолетних величин годового стока принят метод водного баланса в виде:

$$\bar{Y} = \bar{P} - \bar{E}$$

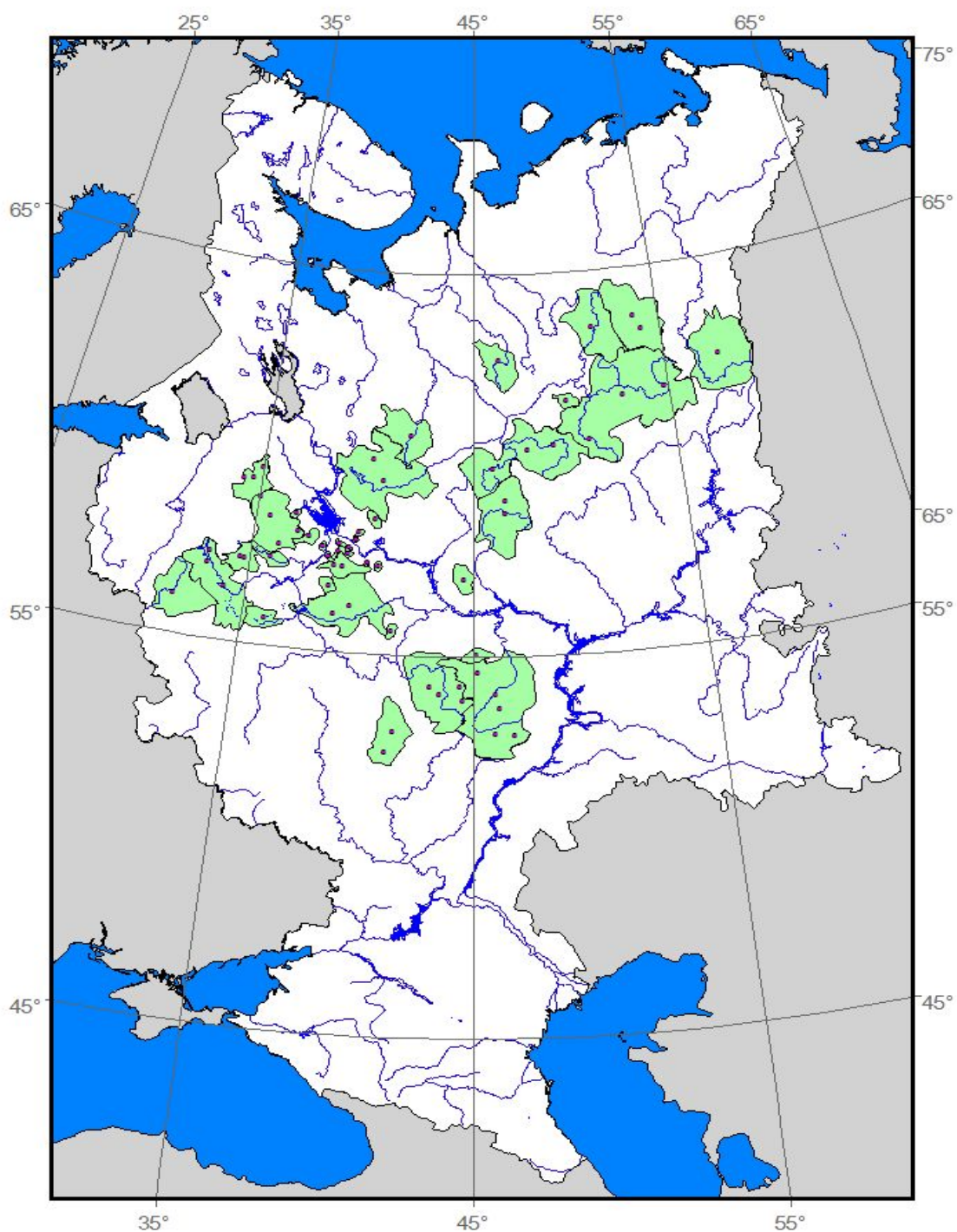
где $\bar{Y}$, $\bar{P}$ и $\bar{E}$, – средние многолетние величины (мм) стока, осадков и испарения.

Расчет испарения $\bar{E}$ сведен к оценкам по уравнению связи $\mathbf{\bar{E} = E(P, E_0)}$ с использованием функции Мезенцева в виде:

$$\frac{E}{E_0} = \left(1 + \frac{E_0^n}{P} \right)^{-1/n}$$

где E_0 - испаряемость. Испаряемость, в свою очередь, определяется по эмпирической зависимости от суммы положительных температур воздуха T_0 по уравнению:

$$\bar{E}_0 = f(T_0)$$



Исследуемые бассейны:

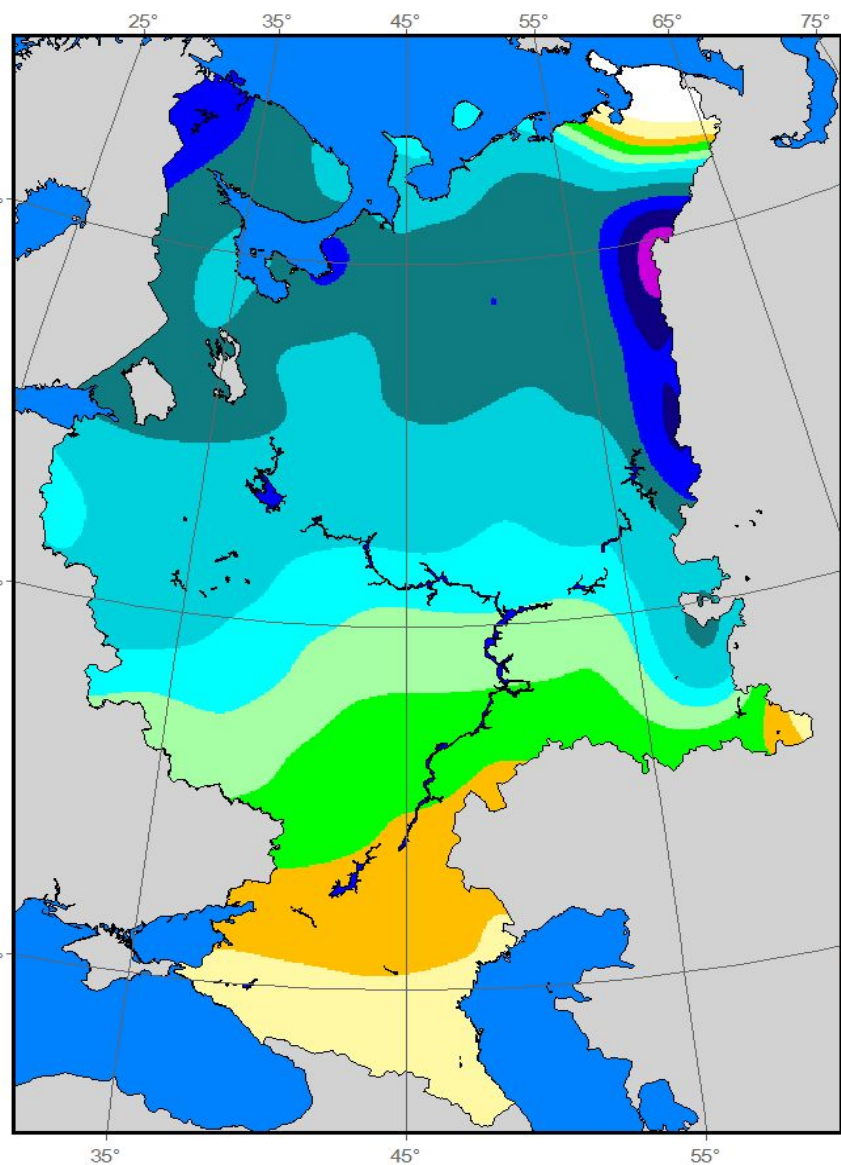
64 бассейна рек различного размера, относящихся к бассейнам Волги, Северной Двины и других рек.

Водосборы отбирались по критерию наибольшей длины ряда и наименьшей хозяйственной измененности стока (не подверженные регулированию)

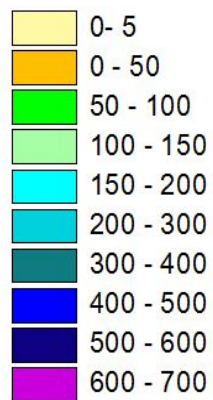
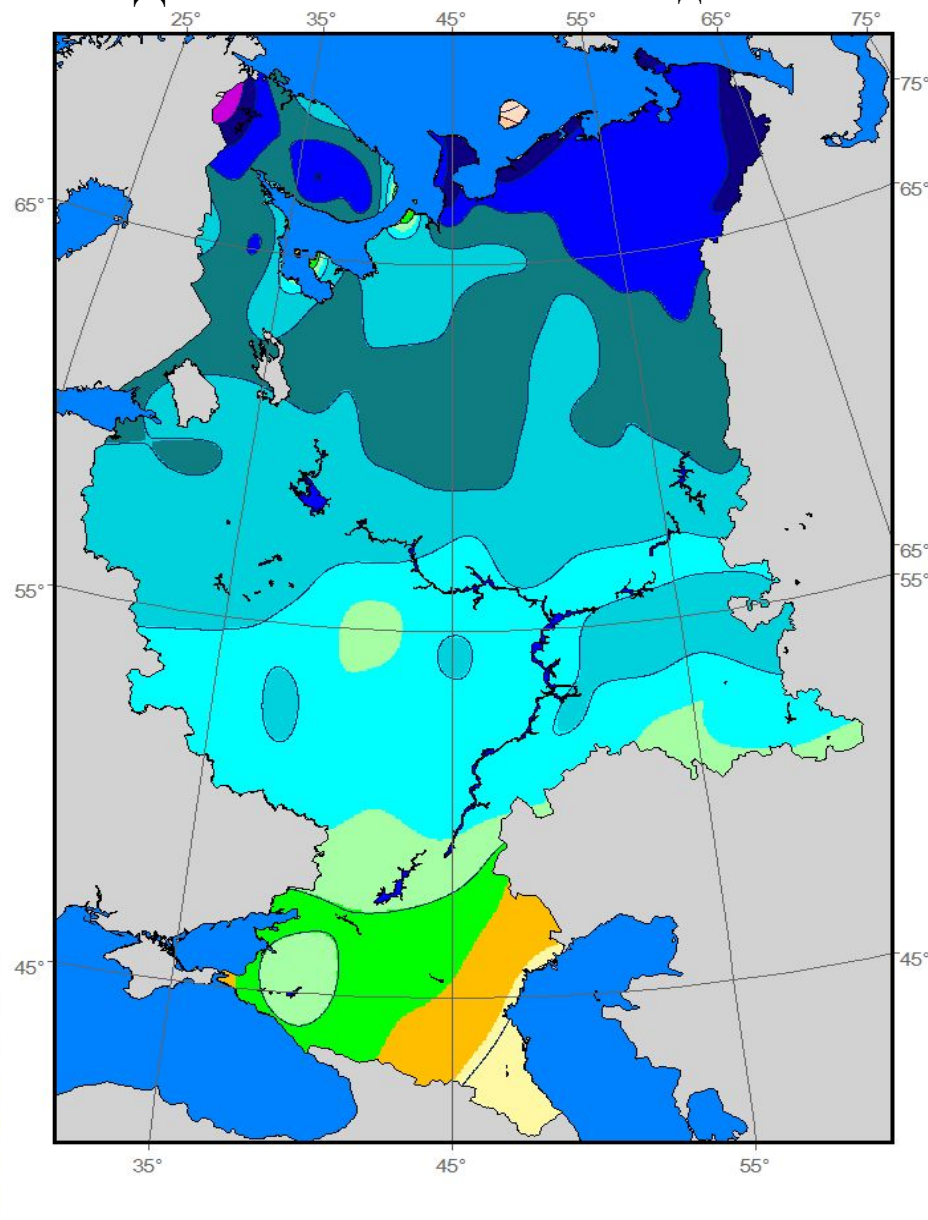
Точками обозначены геометрические центры тяжести водосборов, для которых осредняла информация.

**Воспроизводимость годового слоя стока (Y), мм
по результатам климатической модели ИВМ РАН для периода 1961-1989гг.**

Фактические данные

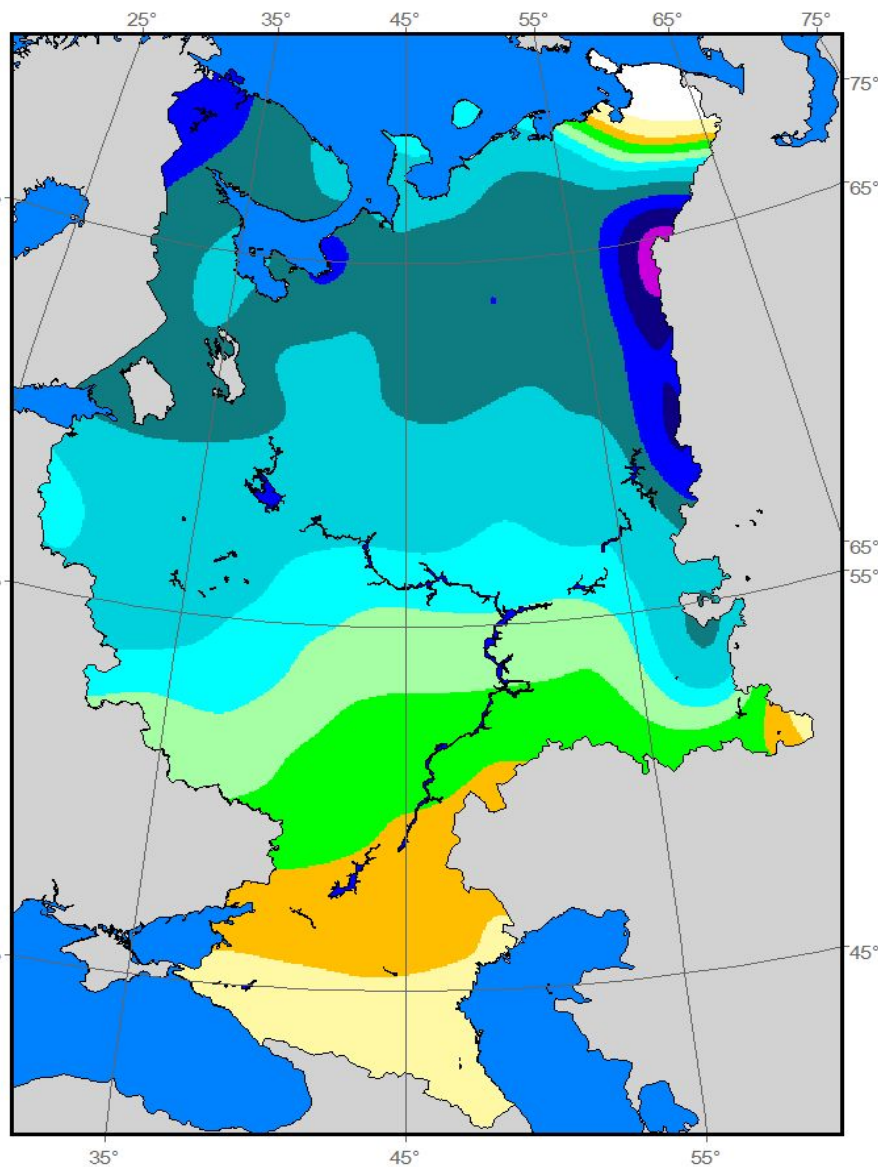


Данные климатической модели

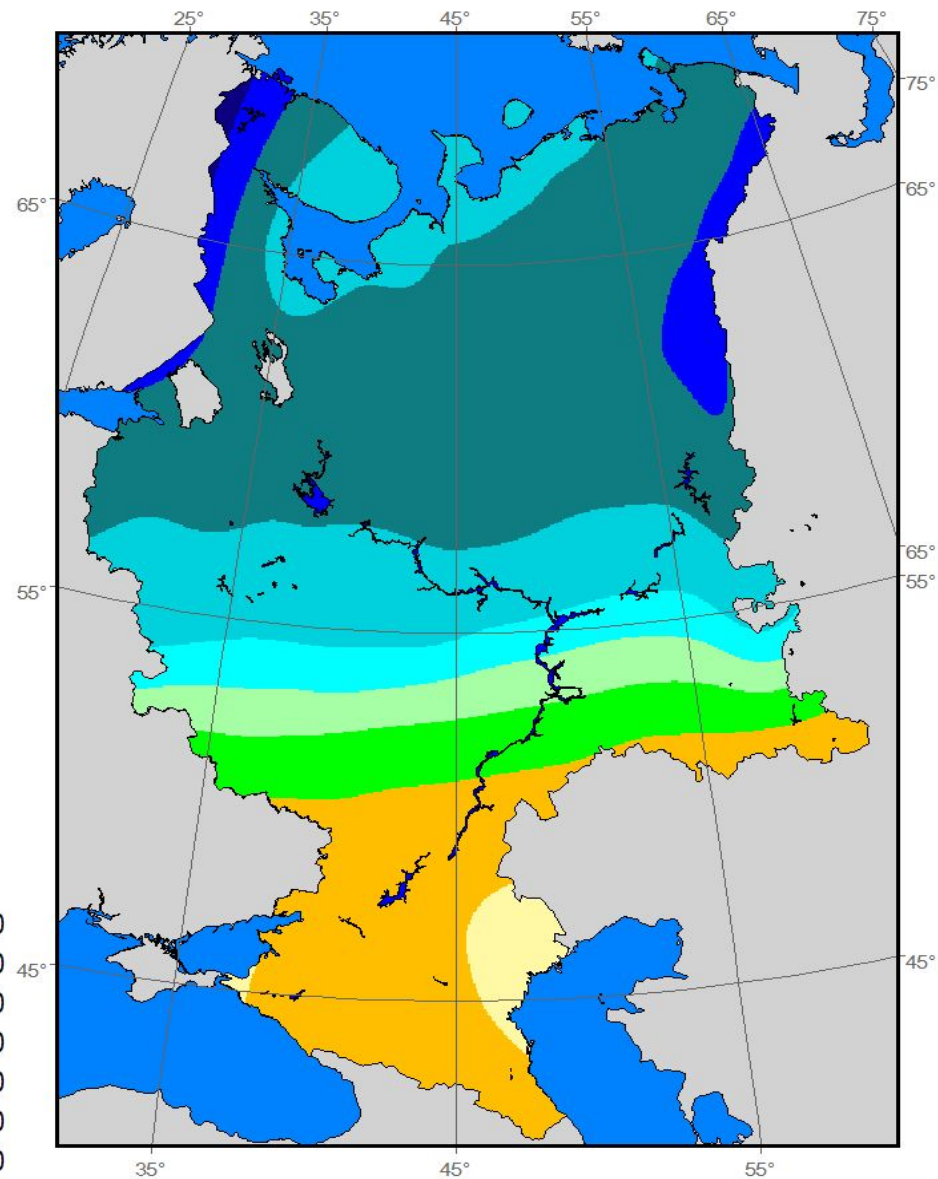


**Воспроизводимость годового слоя стока (Y), мм
с помощью эмпирического соотношения для периода 1961-1989гг..**

Фактические данные



Расчет по данным климатической модели



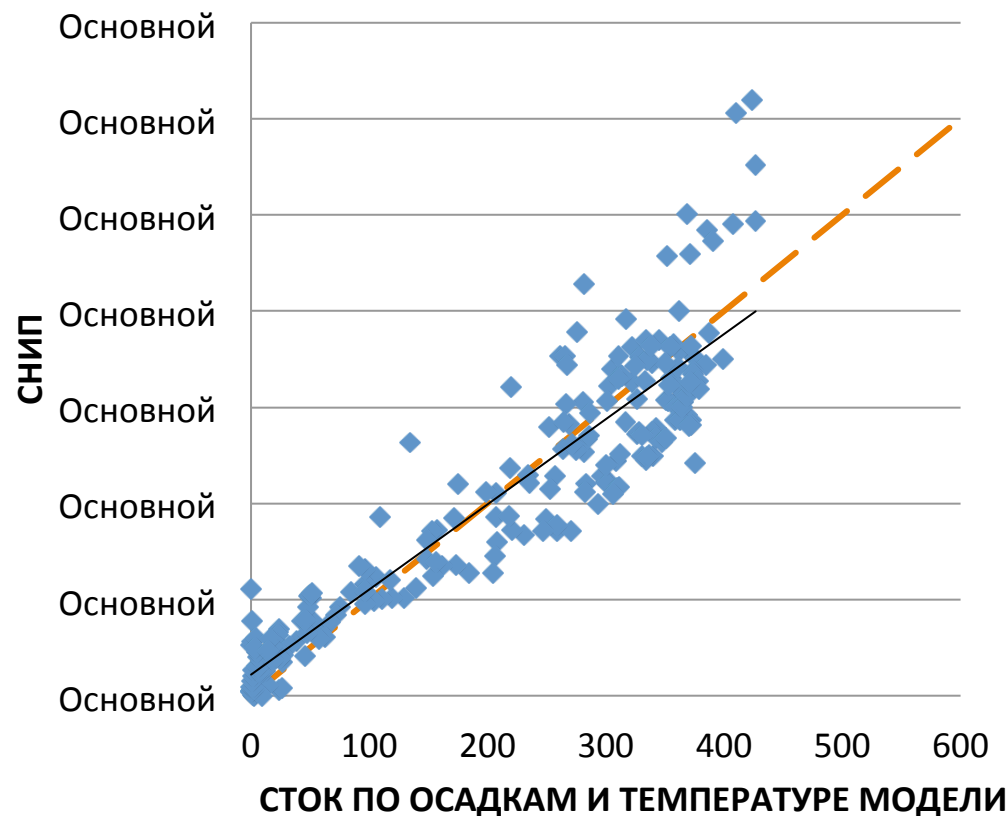
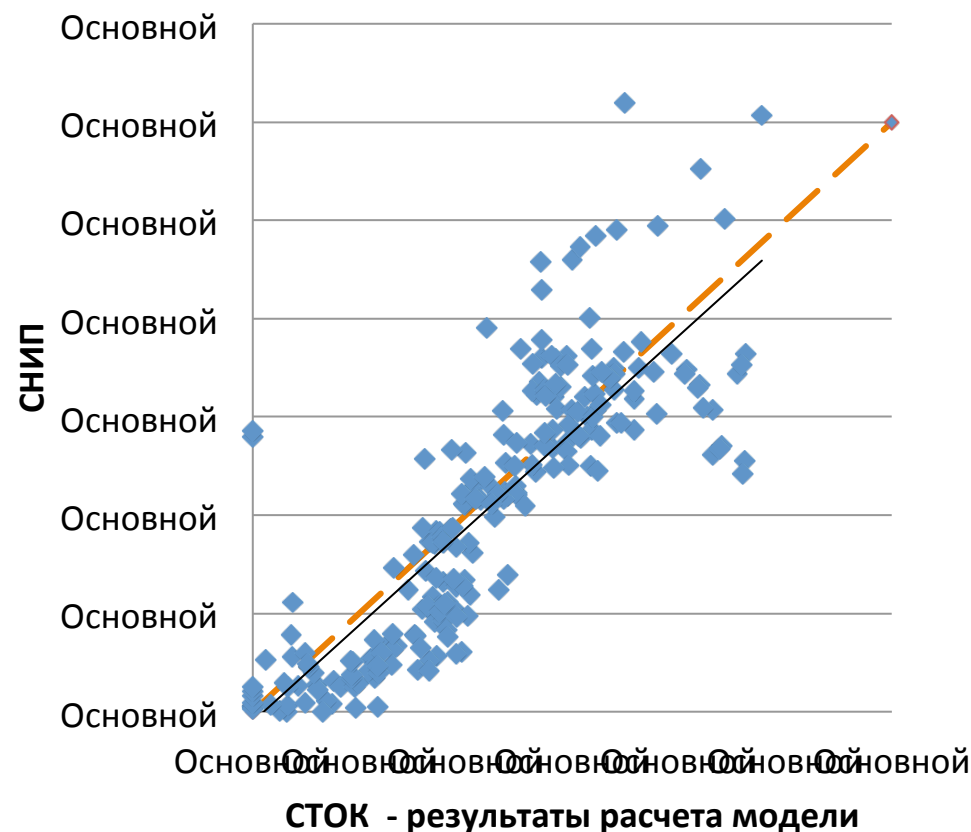
Воспроизводимость годового слоя стока (Y), мм

непосредственно климатической моделью и по эмпирическому соотношению, связывающего величину стока с модельными данными об осадках и температуре для периода 1961-1989гг..

$$Y = 0.957Y_{\text{мод}}$$

$$r = 0.92$$

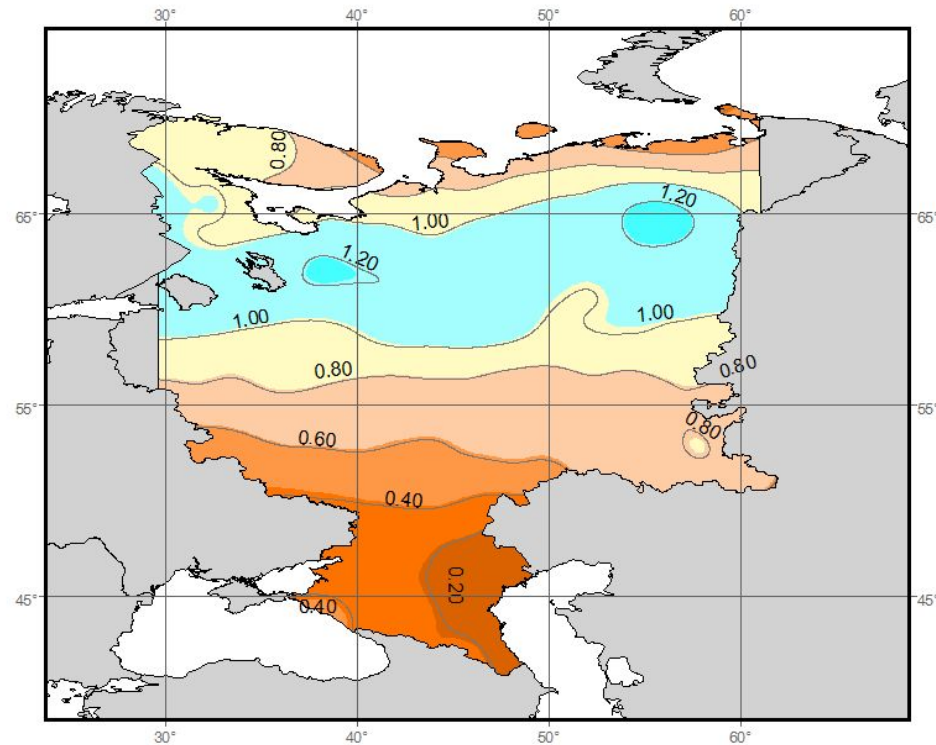
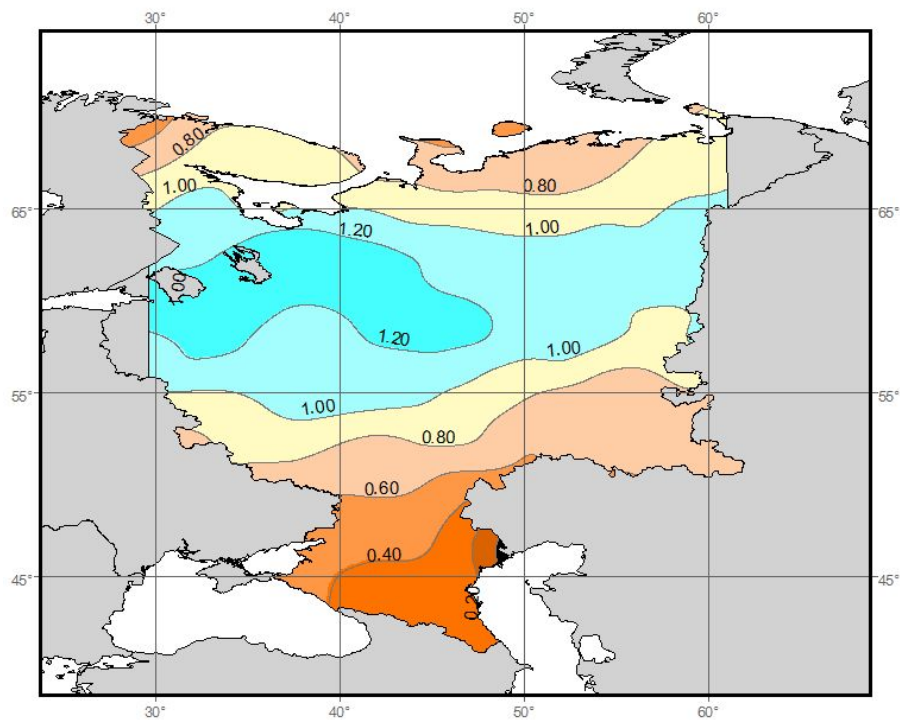
$$\text{усл. СКО} - 40,6 \text{ мм}$$



Черная линия – линия тренда соответствующая уравнению регрессии,

Оранжевый пунктир – линия $x = y$

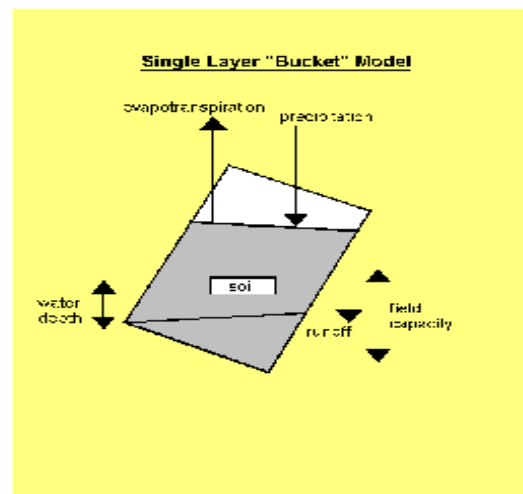
Оценка изменений стока рек Восточно-Европейской равнины на середину (слева) и конец (справа) XXI века в долях от современных величин по данным модели ИВМ РАН (Сидорова, 2010)



T.J. Philips et al. (2002). Large-Scale Validation of AMIP II Land-Surface Simulations

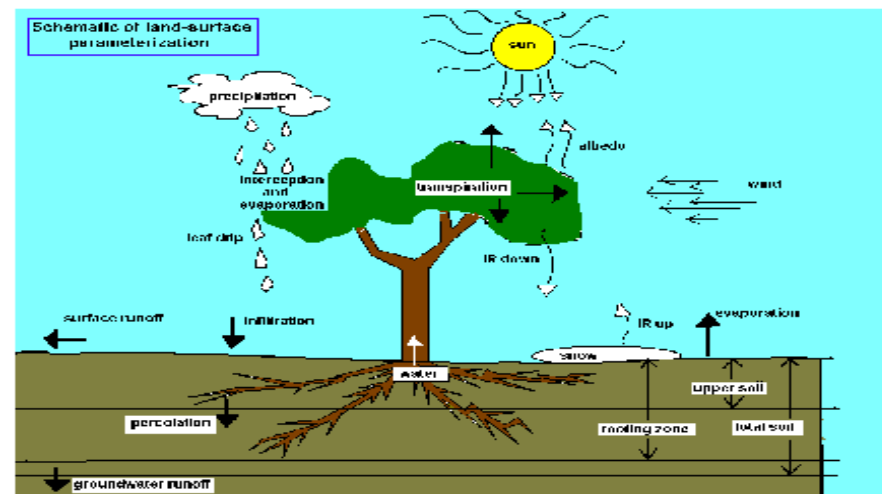
The Overarching Question:

What degree of LSS complexity is *essential* for climate simulation?



“Bucket” Scheme

- No explicit vegetation
- Little soil physics
- Overflow runoff
- Few free parameters
- Computationally cheap



Complex Biophysical Scheme

- Vegetation canopy(interception, resistance)
- Soil moisture percolation/diffusion
- Surface and gravitational runoff
- Many free parameters
- Computationally expensive

Table 2. Model codes and features of the sixteen AMIP2 models analysed in Zhang et al. (2002)

Resolution	Land-surface components		No. of layers in soil temp. calculations	No. of layers in soil moist. calculations	Model Country
	Soil model complexity	Canopy representation			
T42L18	bucket	const. canopy resistance	3	1	CCSR, Japan
T63L45	force-restore	intercept. + transpiration	2	2	CNRM, France
4x5 L21	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	24	24	INM, Russia
T159L50	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	4	4	ECMWF, UK
T63L30	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	4	3	JMA, Japan
T42L18	multi-layer diffusion	intercept.+transpiration+CO ₂	6	6	NCAR, USA
T62L18	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	3	2	NCEP, USA
T42L18	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	2	3	PNNL, USA
3.75x2.5 L58	multi-layer diffusion	intercept.+transpiration+CO ₂	4	4	UGAMP, UK
3.75x2.5 L19	multi-layer diffusion	intercept.+transpiration+CO ₂	4	4	UKMO, UK
T47L32	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	3	3	CCCMA, Can
4x5 L20	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	2	3	GLA, USA
T42L30	multi-layer diffusion	intercept. + transpiration	3	3	MRI, Japan
T42L18	multi-layer diffusion	intercept.+transpiration+CO ₂	6	6	SUNYA, USA
4x5 L24	bucket	no	1	1	UIUC, USA
4x5 L15	bucket	no	1	1	YONU, Korea

Модель деятельного слоя суши

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + L_i F_i - L_v F_v,$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_W \left(\frac{\partial W}{\partial z} + \delta \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_i - F_v - R_f - R_r,$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_V \frac{\partial V}{\partial z} + F_v,$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = F_i.$$

$$C = C_g + C_w W + C_i I,$$

$$\lambda_T = \max(\exp(-P_f - 2.7), 0.00041).$$

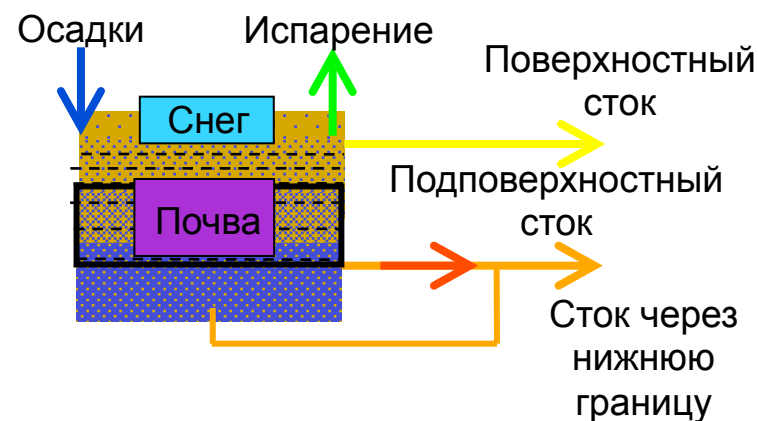
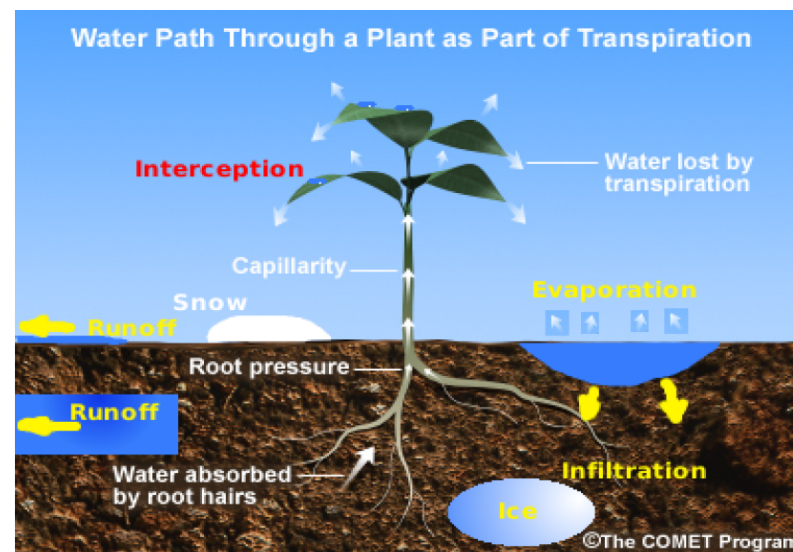
$$P_f = \log_{10}(-\psi)$$

$$\psi = \psi_{max} \left(\frac{W_{max}}{W} \right)^b,$$

$$\lambda_W = \lambda_{max} \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^{b+2},$$

$$\gamma = \gamma_{max} \left(\frac{W}{W_{max}} \right)^{2b+1}$$

$$W_{nf} = W_m + (W_0 - W_m) \exp(T/T_0)$$



Модели снежного покрова

(ctrl)

(new snow)

Описываемые процессы

- Теплопроводность

$$\rho_{sn} C_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z}$$

- Таяние снега наступает, если температура его поверхности $> 0^{\circ}\text{C}$

- Теплопроводность

$$\rho_{sn} C_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z} + \mathcal{L}_i(R(z) - M(z))$$

- Вода в жидком состоянии:
просачивание, повторное замерзание

$$\rho_{sn} \frac{\partial w_{sn}}{\partial t}(z) = \rho_w(M(z) - R(z) - q(z))$$

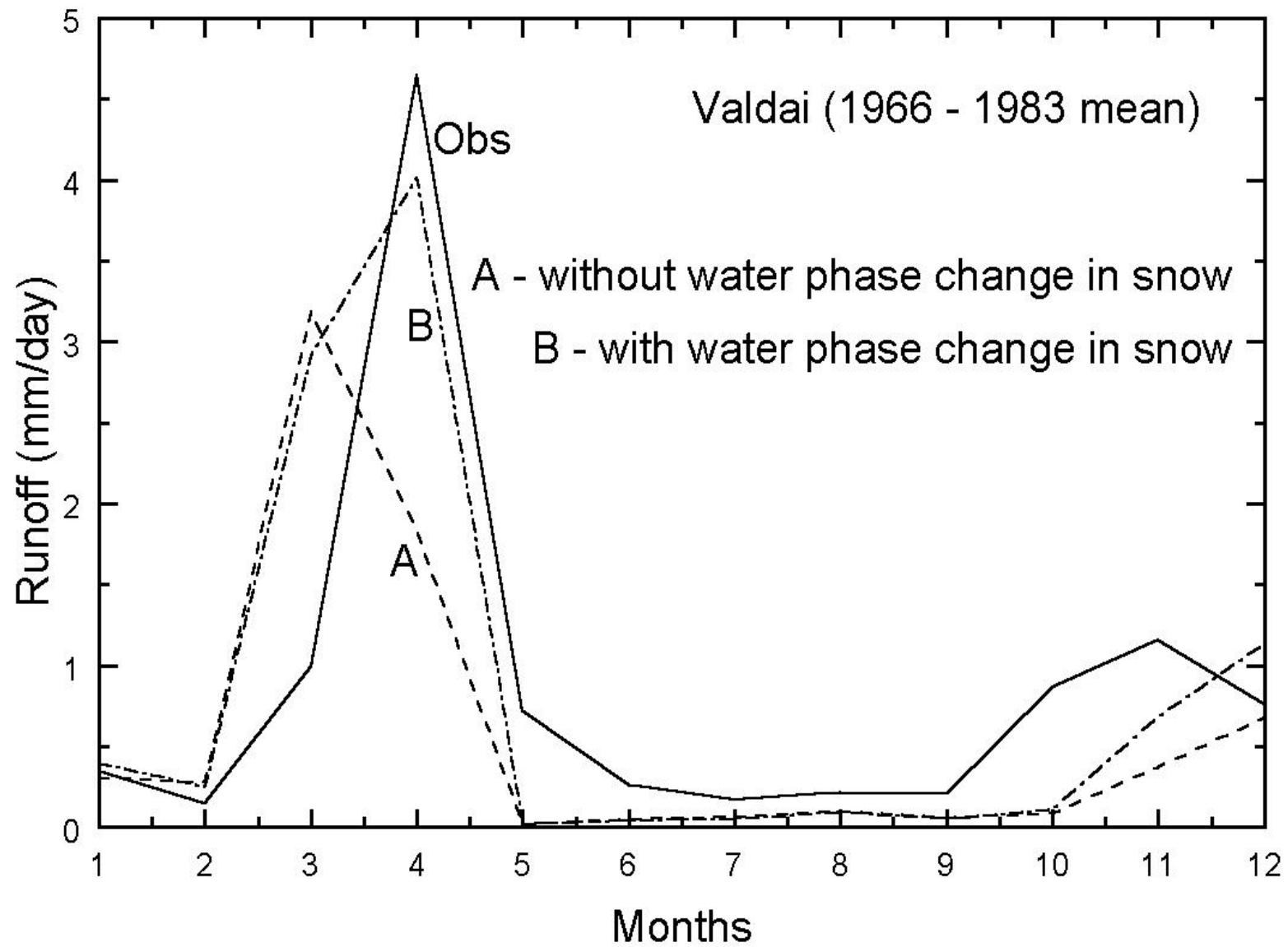
- Уплотнение под действием силы тяжести и метаморфизма

$$\frac{1}{\rho_{sn}(t)} \frac{d\rho_{sn}}{dt} = \frac{1}{\eta(t)} \left[\sigma_m(t) + \int \rho_{sn}(t) g dz \right]$$

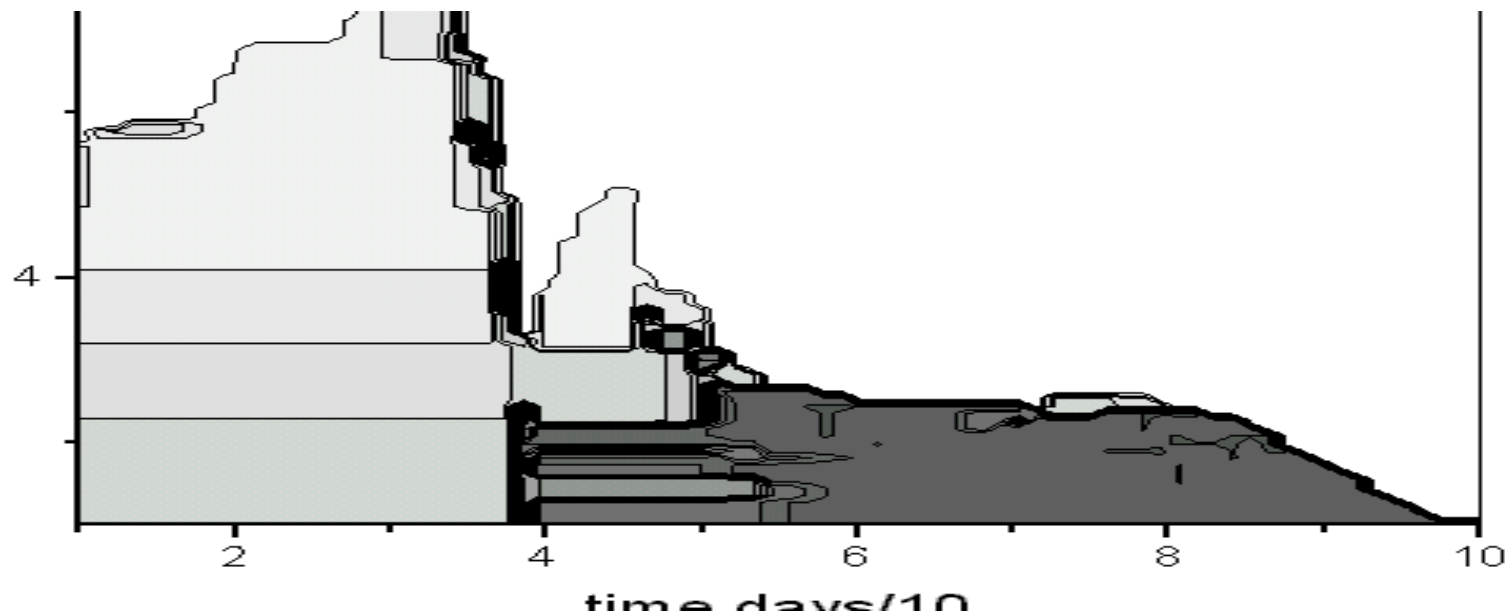
- Проникновение солнечной радиации

$$S(z) = S_0 e^{-\beta z}$$

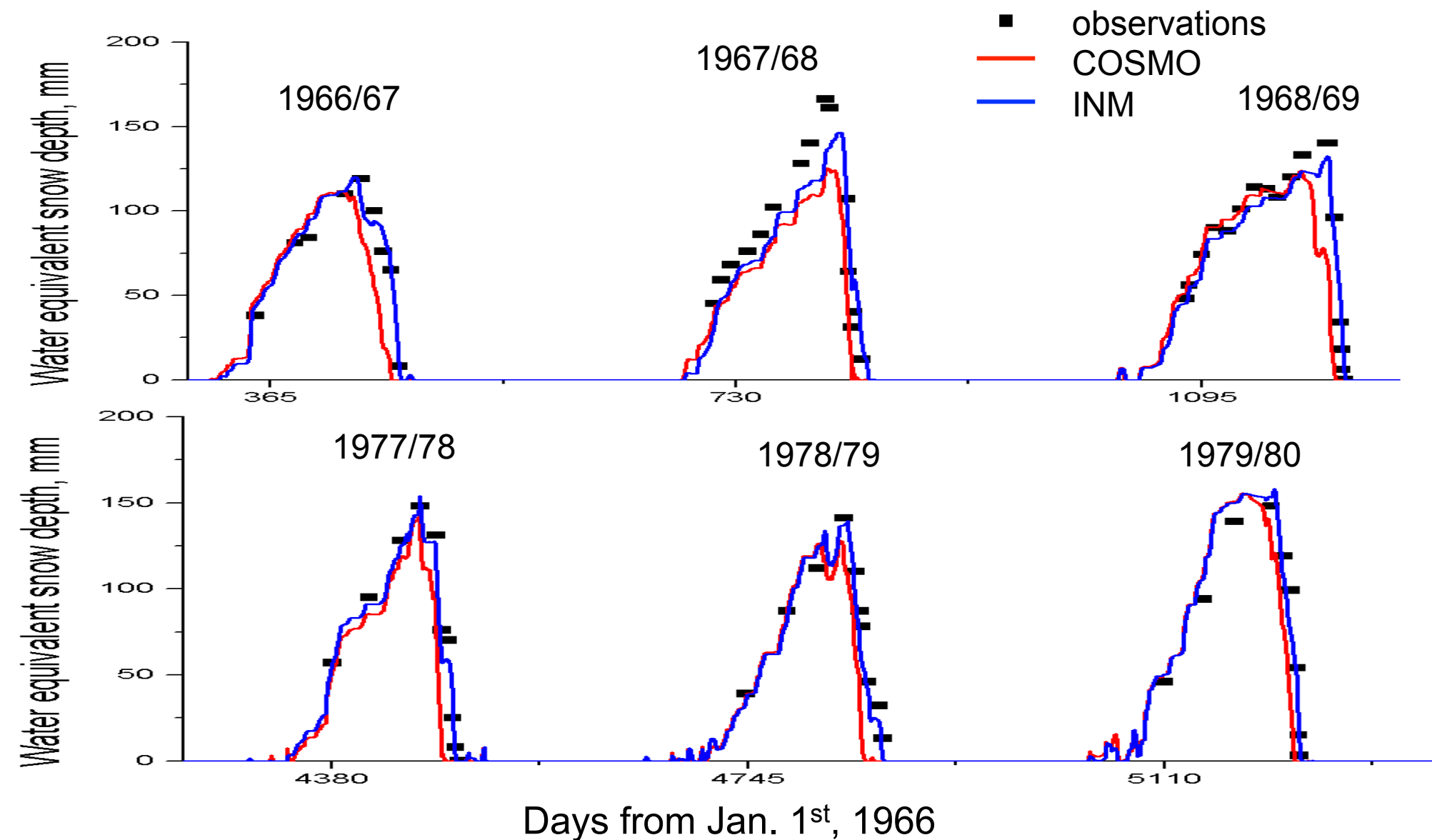
Volodina, Bengtsson and Lykosov (2000)



Толщина снежного покрова по данным моделирования с учетом фазовых переходов влаги для ст. Валдай (февраль-апрель 1977 г.).
Изолинии: плотность снега



Анализ результатов экспериментов по автономному интегрированию модели TERRA системы «почва-растительность-снежный покров» (блока мезомасштабной негидростатической модели международного консорциума COSMO) на различные временные периоды (от 1 года до 50 лет) с использованием данных различных метеостанций (Валдай, Якутск, Линденберг) показал, что упрощенная схема параметризации снега, которая используется в этой модели, не может воспроизвести различные характеристики снежного покрова (в первую очередь, срок полного схода снега) с такой же точностью, как это делает физически более полная модель снега, разработанная в ИВМ РАН. Использование более совершенной «снежной» модели значительно улучшает воспроизведение эволюции снежного покрова, особенно в весенние месяцы, и заметно сказывается на качестве воспроизведения температуры поверхности в период интенсивного снеготаяния (Е.Е. Мачульская).



Results

	Correlation coefficient between time series of observed and simulated SWE (N = 221, $p < 0.0001$)	Mean error ($\pm$ standard deviation) in the time of the snow complete ablation (days)
COSMO	0.81	-14 (± 2)
INM	0.90	-1 (± 1)

Диаграмма Гейлора структуры модельных полей изменчивости (1979-1988 г.г.) monthly averaged evaporation on the surface of the land by the results of AMIP-I in comparison with the reanalysis data ("Reference") NCEP (Phillips et al., 2000).

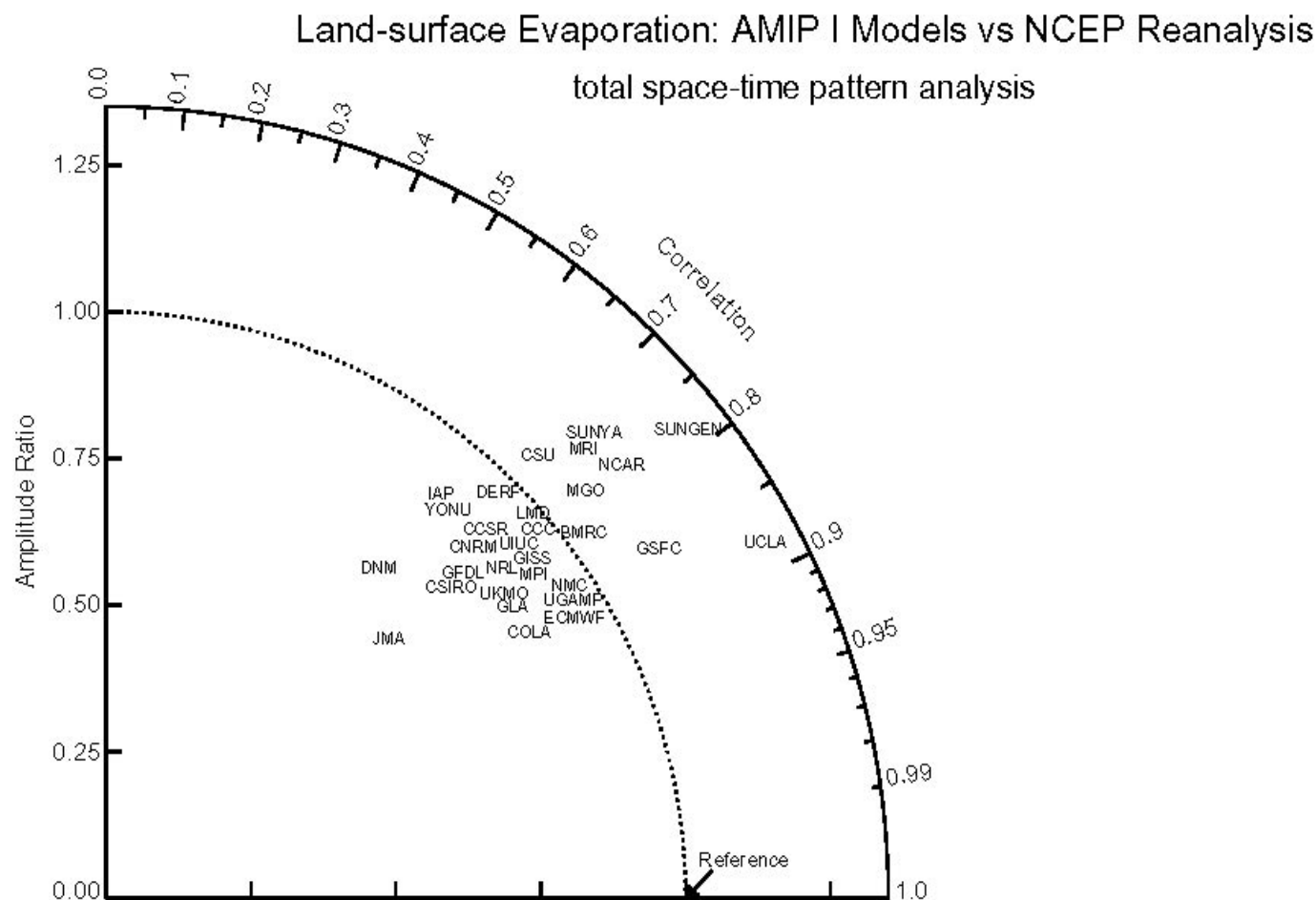
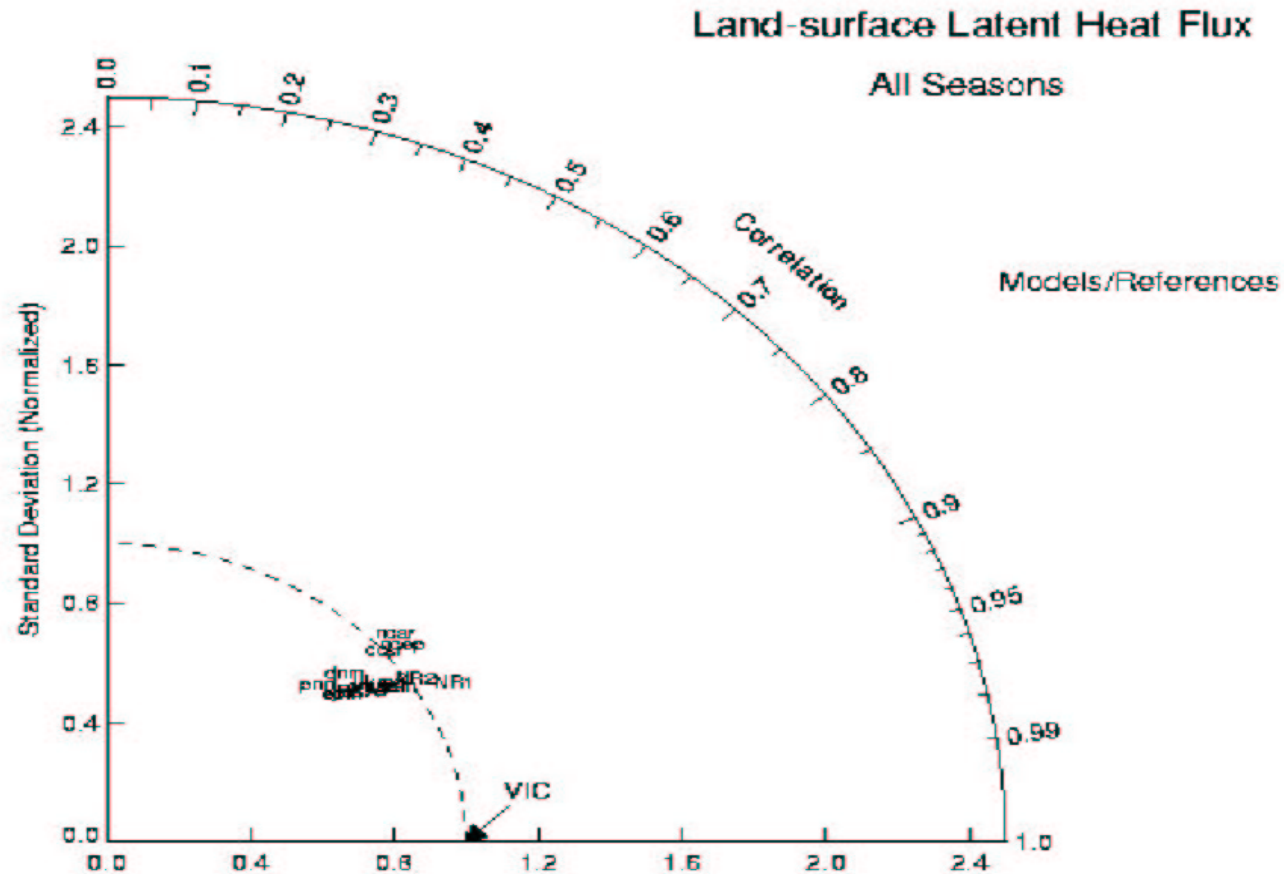


Диаграмма Тейлора для изменчивости потока скрытого тепла на поверхности суши по данным эксперимента AMIP-II (Irannejad et al., 2002).



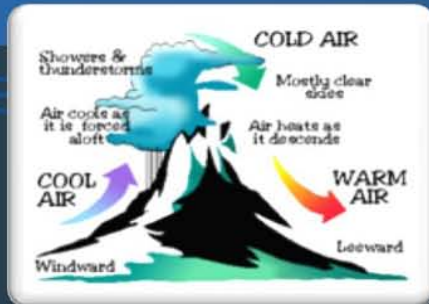
The hierarchy of atmospheric models



GLOBAL MODELS □ resolution 10-100 km

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

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



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 мезомасштабной гидротермодинамики атмосферы

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

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

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

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

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

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

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

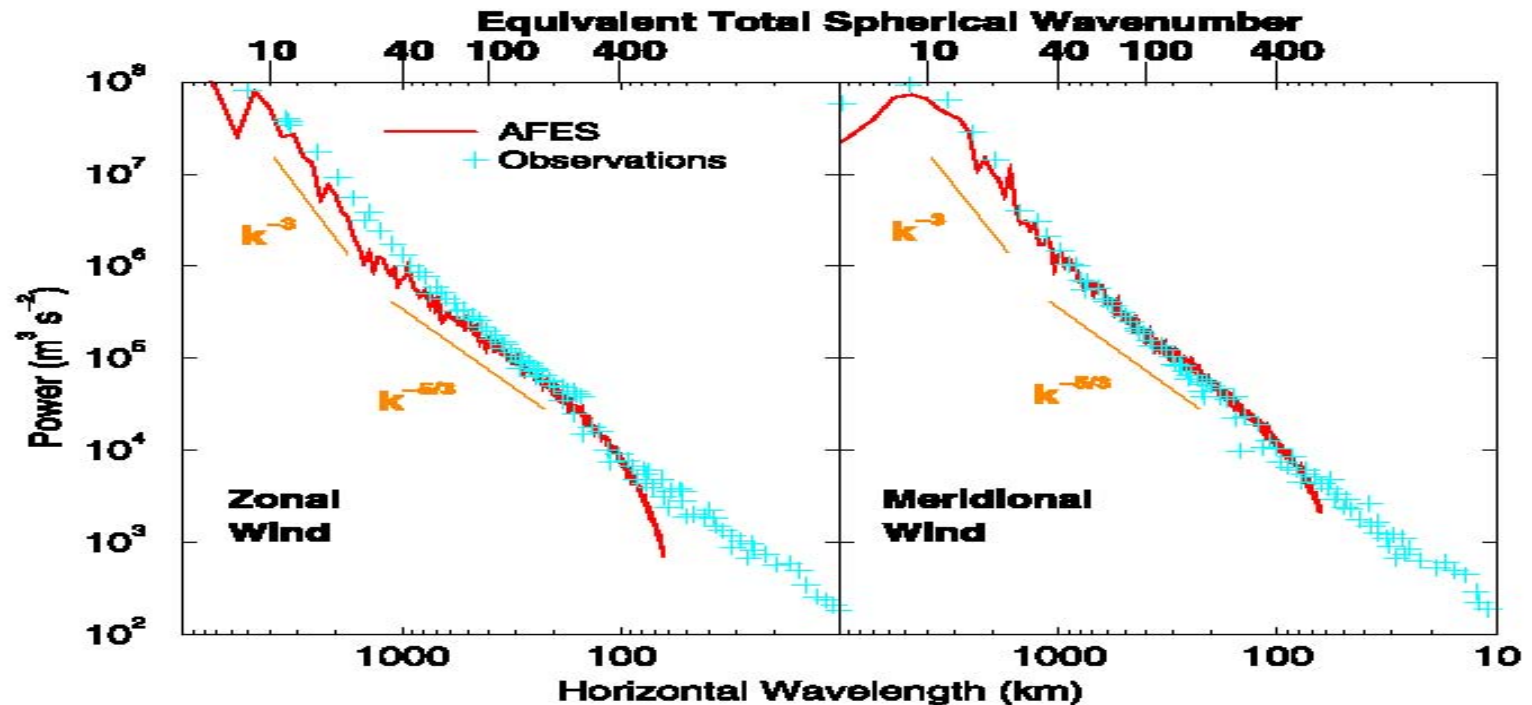
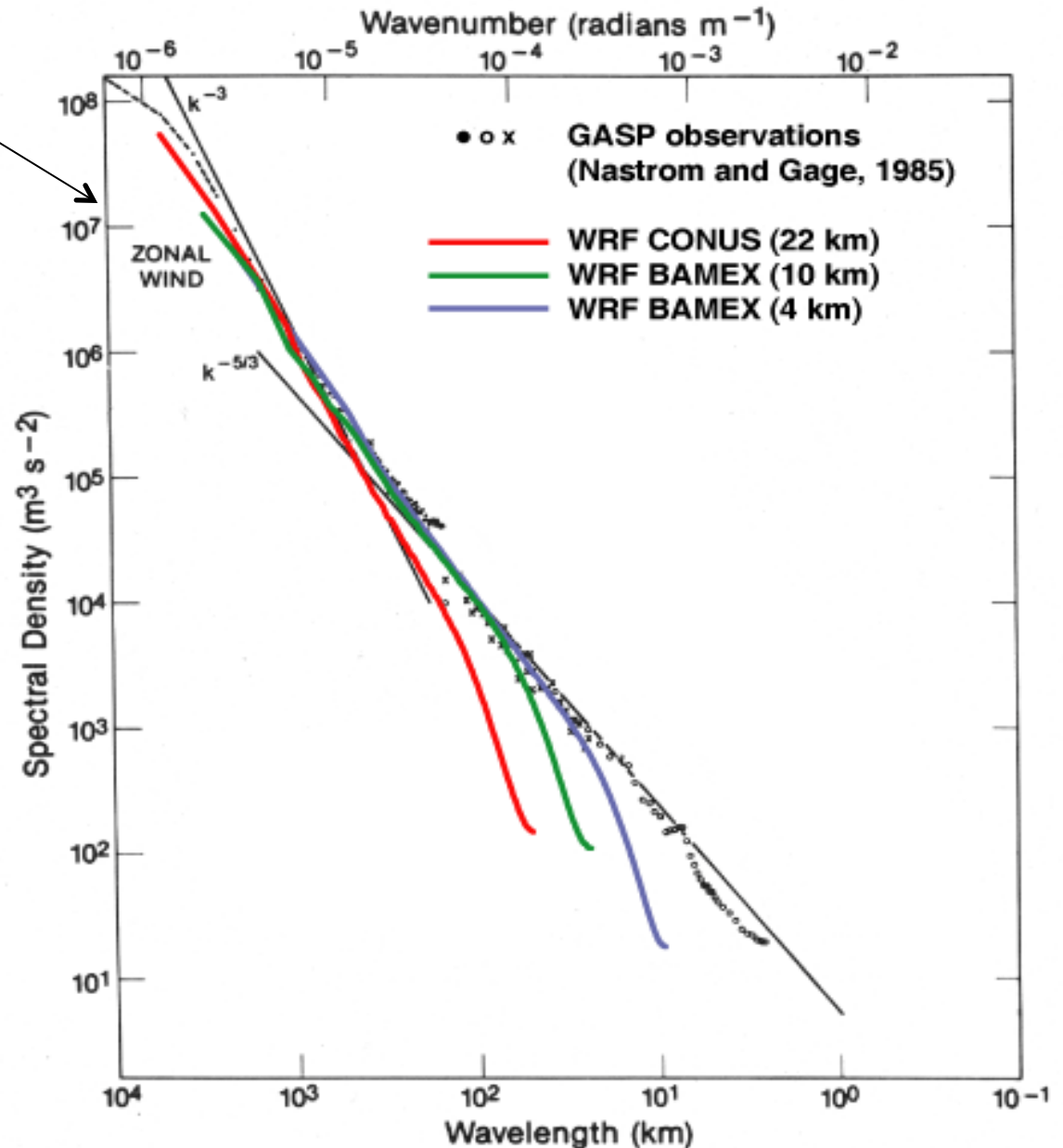


Figure 1. The one-dimensional horizontal power spectra of (left) zonal wind and (right) meridional wind variations near the tropopause. The red curves are computed from wind values taken along the 45N latitude circle at 200 hPa in the T639L24 AFES. The crosses are from *Nastrom and Gage* [1985] and are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

**W.C. Skamarock. Evaluating
Mesoscale NWP Models Using
Kinetic Energy Spectra. –
Mon. Wea. Rev., 2004, v. 132,
p. 3019 – 3032.**

Проблемы

- 1. Динамика спектрального переноса энергии через мезомасштабный интервал.**
- 2. Турбулентное замыкание.**
- 3. Вычислительные технологии.**

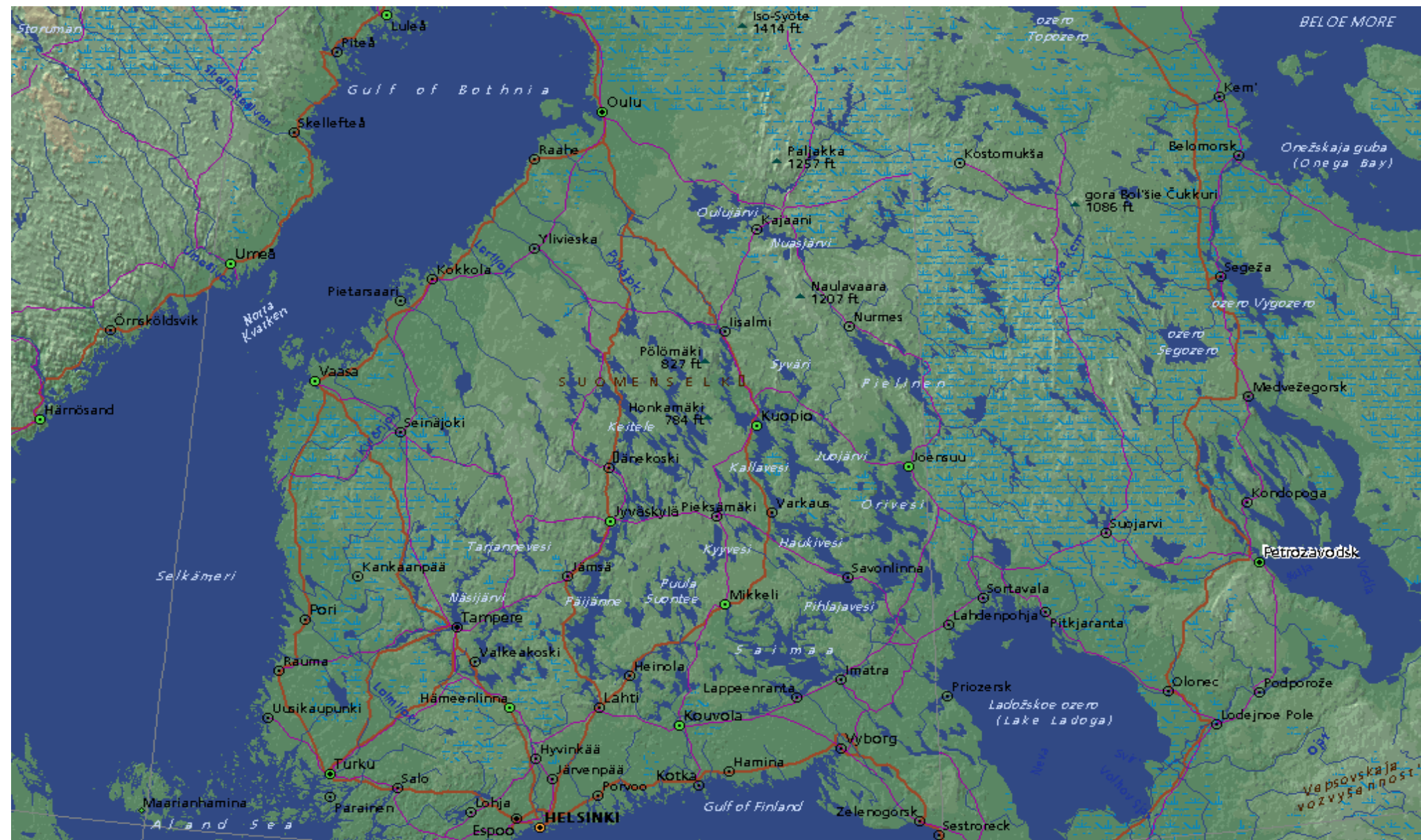


Региональные аспекты

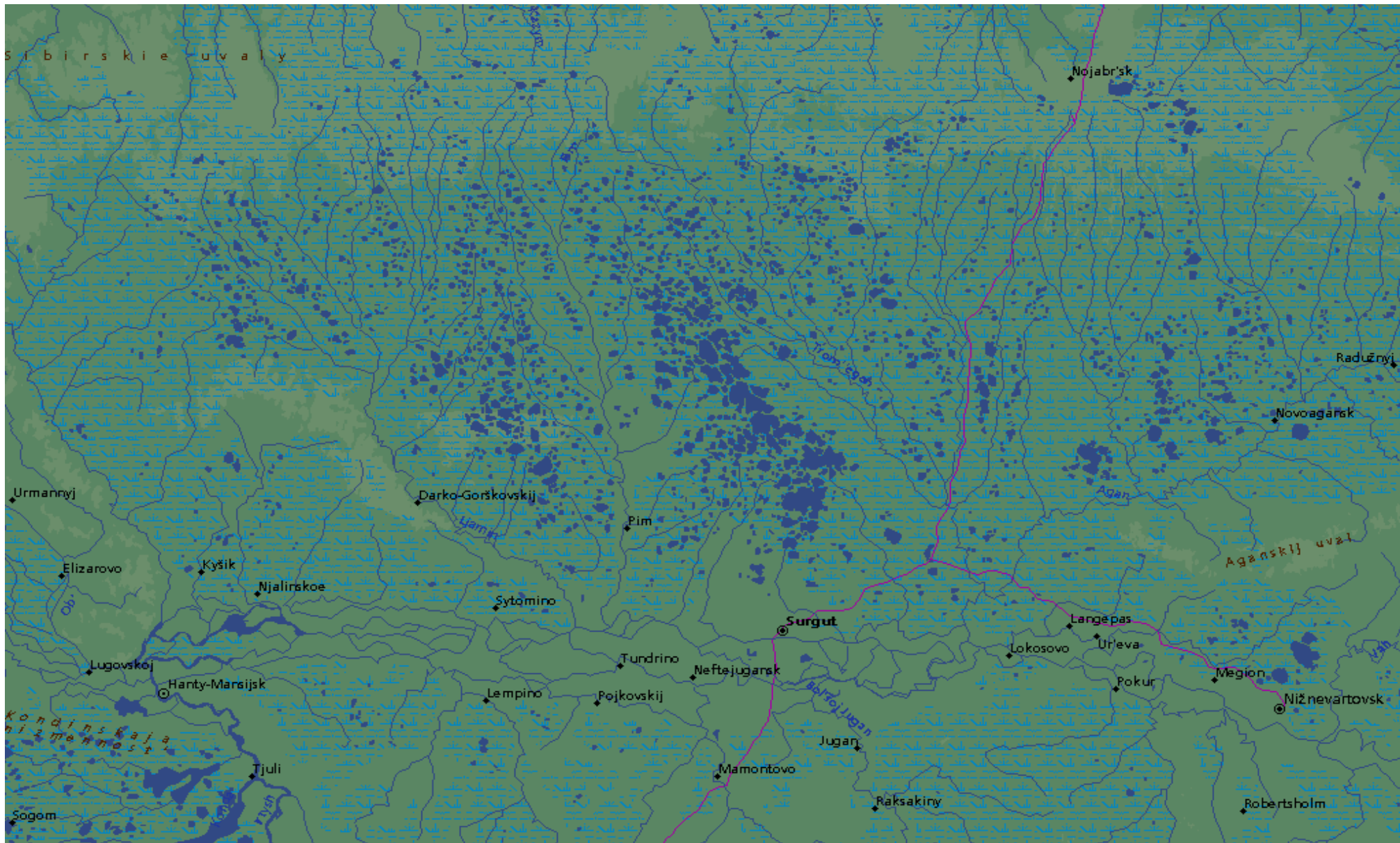
- ❑ **Атмосферные** модели, в том числе глобальные климатические с улучшенным пространственным разрешением в изучаемом регионе и негидростатические мезомасштабные модели (параметризация мезомасштабной изменчивости)
- ❑ Модели **водосборов**, включая разработку моделей русловых потоков (параметризация гидрологического цикла)
- ❑ Модели **растительности**, в том числе ее динамики (параметризация биогеохимического и гидрологического циклов)
- ❑ Моделирование процессов в **грунте** (в том числе, при наличии **вечной мерзлоты**), включая модели механики снежного покрова и мерзлого грунта (параметризация гидрологического и биогеохимического циклов)
- ❑ **Объединенные (атмосфера+почва+водоемы+...) региональные модели**
- ❑ **Моделирование качества воды и воздуха**
- ❑ Статистическая и динамическая **регионализация** (включая региональные проекции глобальных климатических изменений)

Примеры «гидрологической неоднородности»

Финляндия, Карелия



Примеры «гидрологической» неоднородности: среднее течение Оби, Ханты-Мансийский АО



Эмиссия метана термокарстовыми озёрами

Термокарстовые озера занимают в Северной части Сибири 22-48% площади суши, наблюдается тенденция роста их площади



**Гидрологическая неоднородность -
один из важнейших элементов неоднородности суши**



Проблемы:

- 1) Необходимость детального учета специфики теплообмена с водными объектами в атмосферных моделях;**
- 2) Оценка изменений в гидрологических системах при глобальном потеплении климата и обратного влияния этих систем на климат**



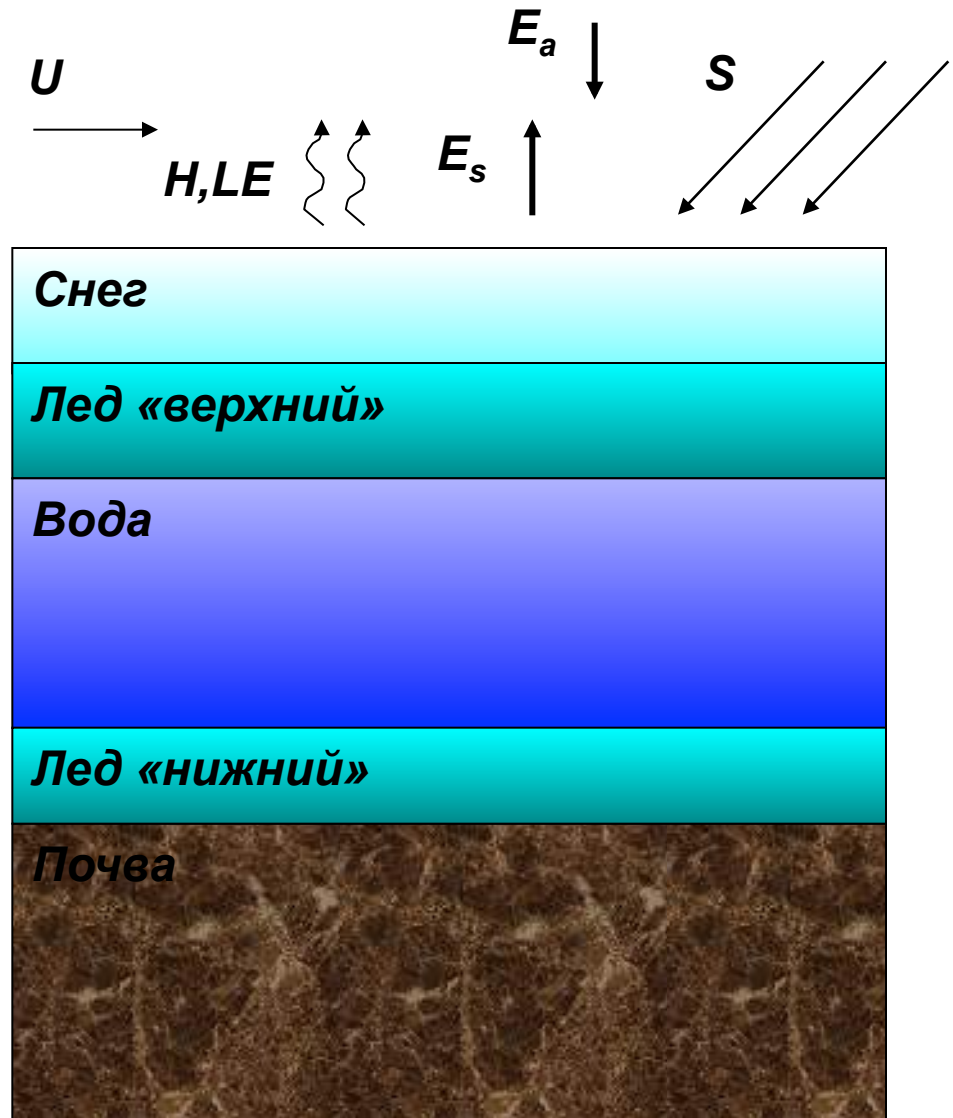
**Создание и внедрение в атмосферную модель
блока гидрологических процессов на суше;**

**Одна из важнейших составляющих
гидрологического блока – модель водоема**

Модель мелкого водоема (Степаненко и Лыкосов, 2005)

- 1) Одномерное приближение.
- 2) На **верхней границе** водоема рассчитываются потоки импульса, явного и скрытого тепла, солнечной и длинноволновой радиации.
Нижняя граница: потоки тепла и влаги отсутствуют.
- 3) В слоях воды и льда описываются **процессы теплопроводности**.
В снежном покрове и почве: процессы тепло- и влагопроводности.

U – скорость ветра,
 H – поток явного тепла,
 LE – поток скрытого тепла,
 S – коротковолновая радиация,
 E_a – излучение атмосферы,
 E_s – собственное излучение земли.



Основные уравнения модели водоема

Уравнение переноса тепла

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + c\rho \frac{dh}{dt} \frac{\xi}{h} \frac{\partial T}{\partial \xi} - c\rho \frac{1}{h} B_w \frac{\partial T}{\partial \xi} - \frac{1}{h} \frac{\partial S}{\partial \xi} + M$$

Турбулентная диффузия:

1. Уравнение Колмогорова

$$\lambda = c\rho C_{et} k \quad \boxed{k = E^2 / \varepsilon}$$

2. «К-ε» параметризация

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\alpha_E}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial E}{\partial \xi} + P - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\alpha_\varepsilon}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + C_1 \frac{\varepsilon}{E} (P - \varepsilon),$$

$$P = C_e \frac{k}{h^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} \right)^2 \right] - C_{et} \frac{g}{\rho} \frac{k}{h} \frac{\partial \rho}{\partial \xi},$$

Вертикальная координата

$$\xi = \frac{z}{h}$$

Солнечная радиация

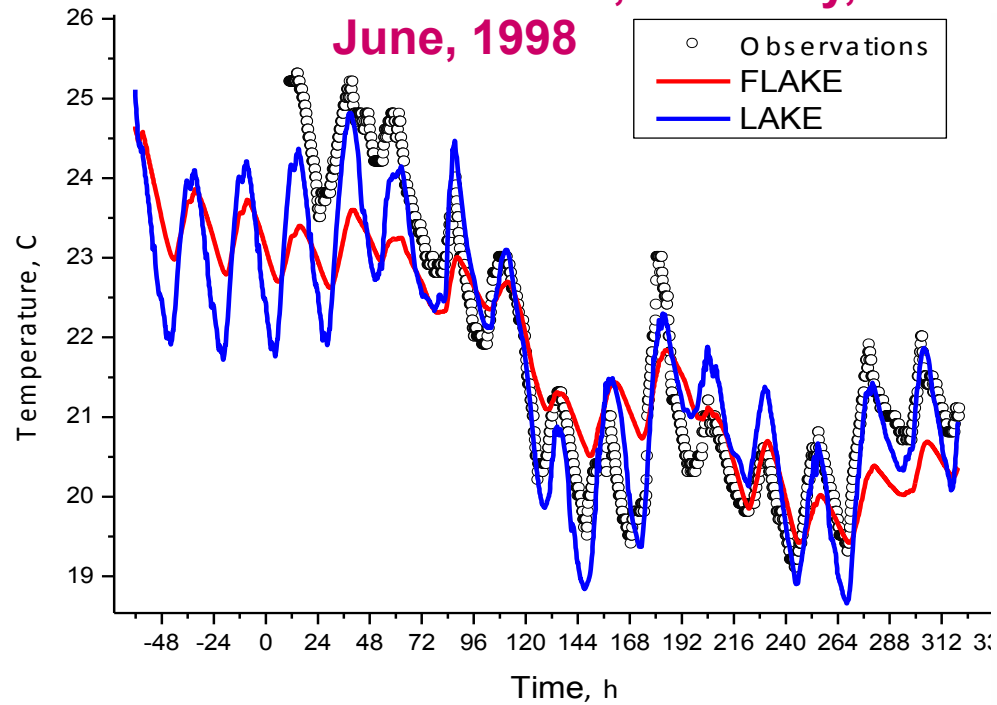
$$S(\xi) = (1 - \beta_e) S(0) \exp(-\alpha_e h \xi)$$

Скорость течения

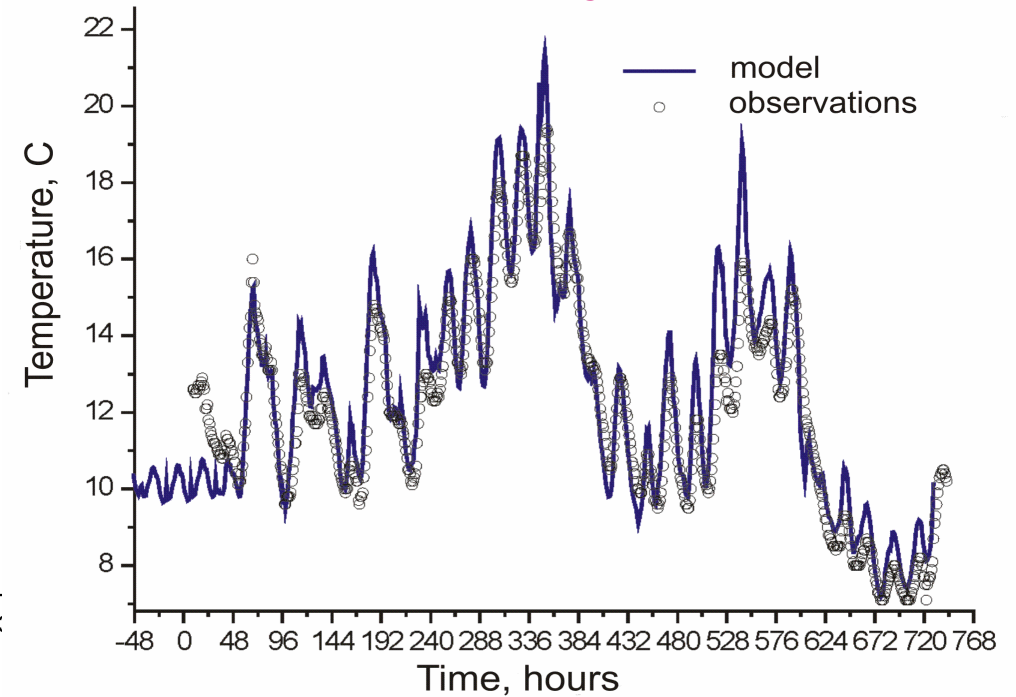
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{C_e}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial u}{\partial \xi} - fv,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{C_e}{h^2} \frac{\partial}{\partial \xi} k \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\xi}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\partial v}{\partial \xi} + fu,$$

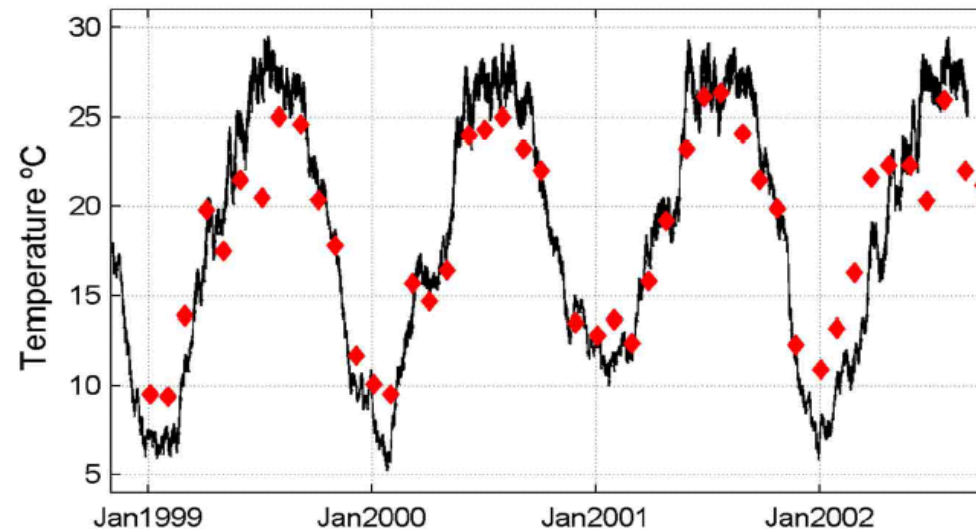
**Lake Kossenblatter, Germany,
June, 1998**



Tiksi, July, 2002

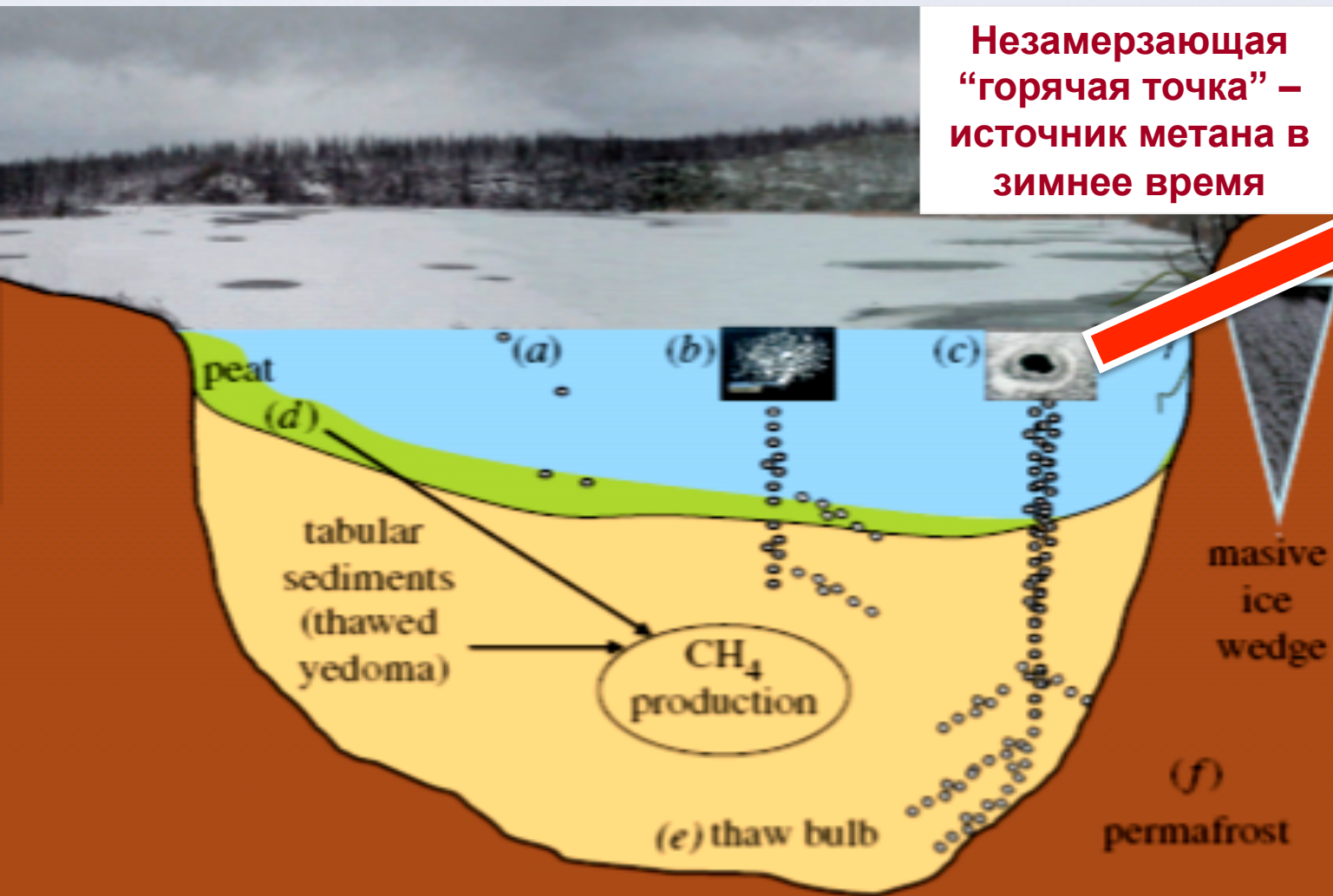


**Monte-Novo lake,
Portugal,
1999 - 2002**

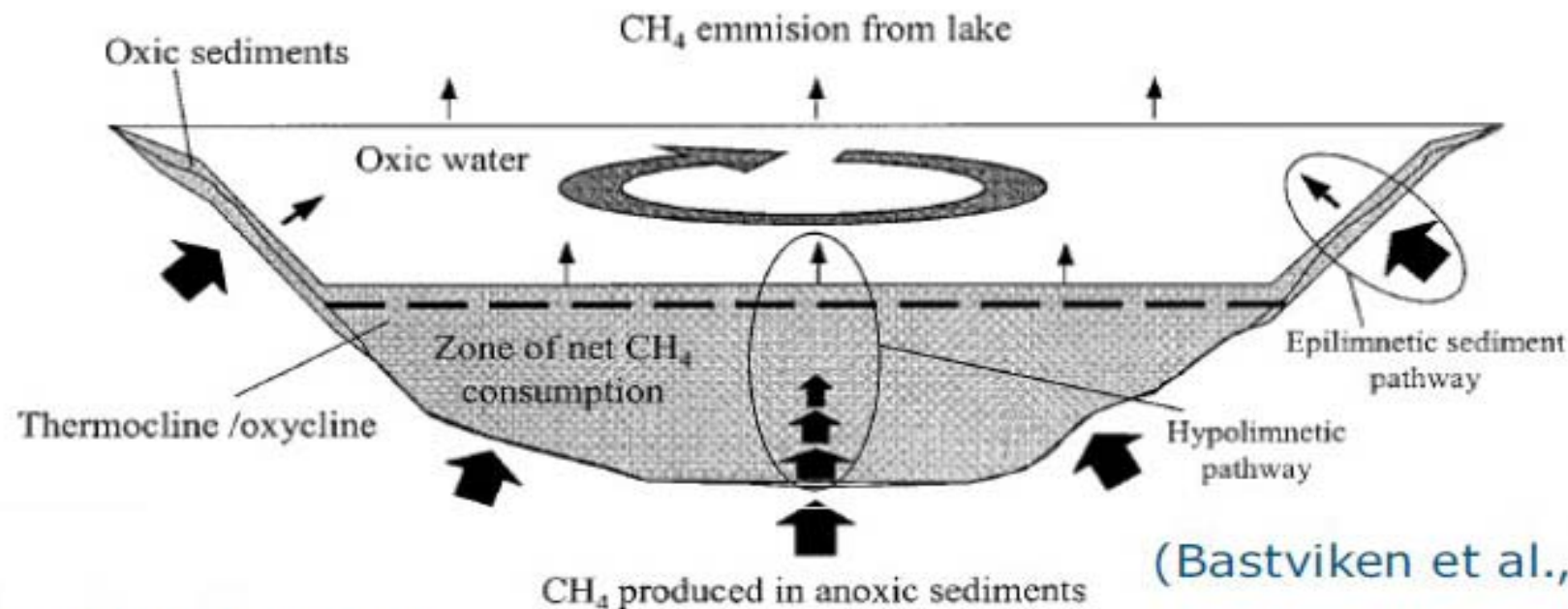


Эмиссия метана термокарстовыми озёрами

8 - 50% антропогенной эмиссии метана до 2100 в зависимости от сценария IPCC
(K. Walter et al., 2006, Nature)



Methane transfer in the water body



• dissolved gases:

- methane
- oxygen
- carbon dioxide

• processes:

- turbulent diffusion
- methane oxidation



$$\frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{CH}_4} \frac{\partial [\text{CH}_4]}{\partial z} - V_{\text{oxid}},$$

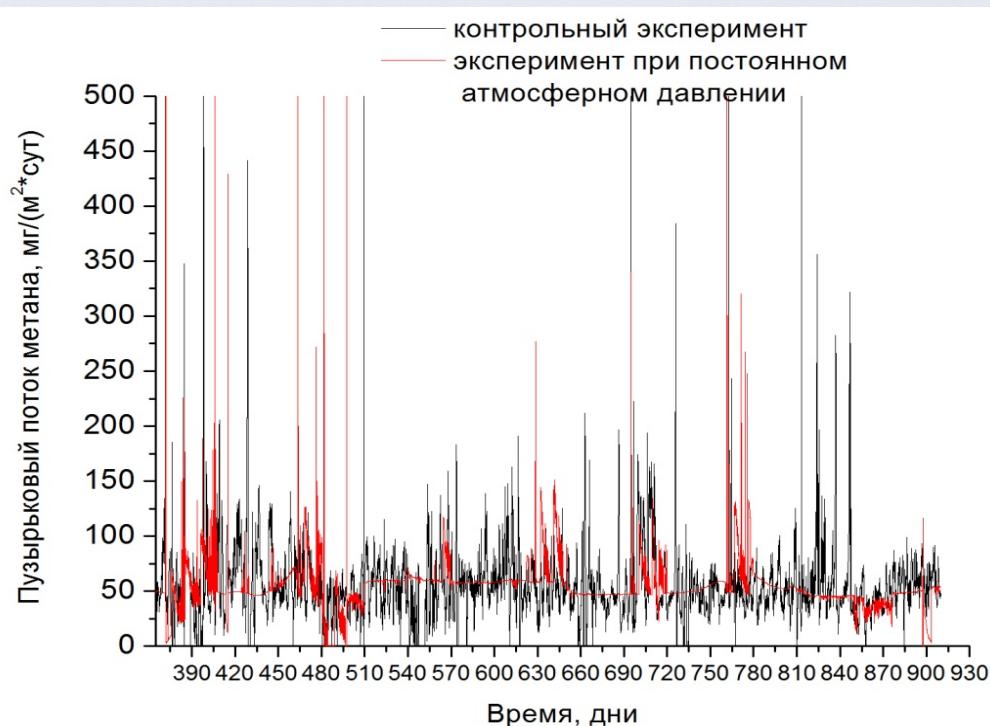
$$\frac{\partial [\text{O}_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{O}_2} \frac{\partial [\text{O}_2]}{\partial z} - 2V_{\text{oxid}},$$

$$\frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_{\text{CO}_2} \frac{\partial [\text{CO}_2]}{\partial z} + 2V_{\text{oxid}}$$

Поток метана на оз. Щучье

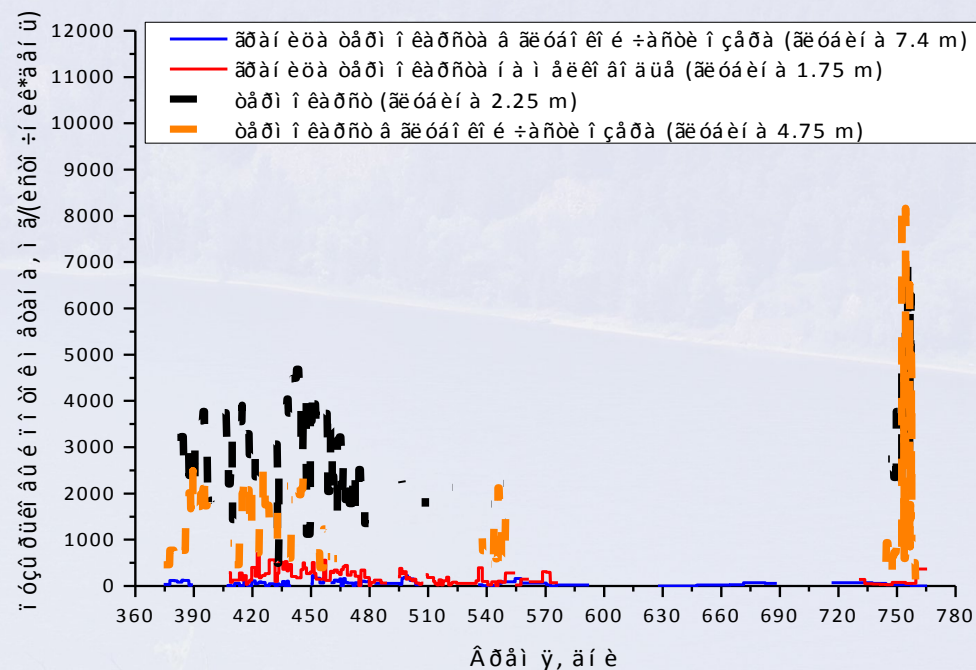
Результаты расчетов (Степаненко и др., 2011)

- атмосферный форсинг – реанализ ERA-Interim (2002 -2004), разрешение 3 ч;



Наблюдения (K. Walter et al., 2006):

- озеро Щучье, 2003-2004, разрешение 1 ч;
- потоки в различных частях озера



Model validation

Observations: Lake Shuchi (K. Walter et al., 2006)
hourly observations of ebullition and diffusion methane
fluxes in different lake sections for 2003 – 2004

	Annual methane emission, mg/ (m ² *yr)	A part of open- water period emission, %	A part of ice- covered period emission, %
Observations	22658	54	46
Model	22588	54	46

	Open water period	Ice-covered period
A part of young methane in emissions (observations), %	47	6
A part of young methane in net generation (model), %	61	32



Параметризация рек в климатических моделях: мотивация

- Оценка средних и экстремальных значений годового стока, уровня рек
- Влияние крупных рек на термохалинную циркуляцию океана
- Вынос реками растворенного органического углерода — биохимия океана (образование CH_4 и т.д.)

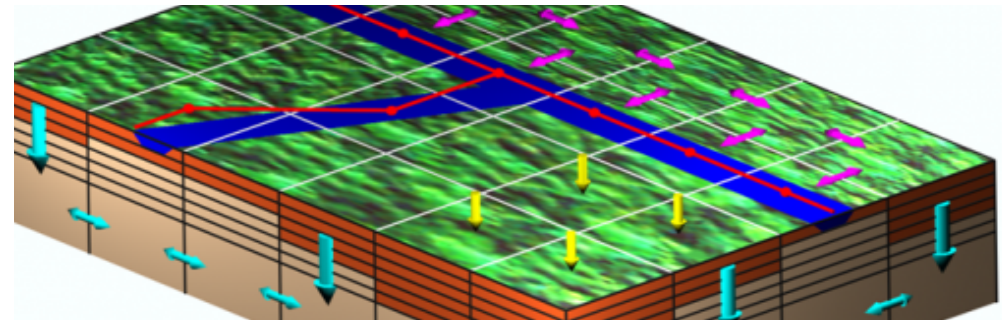
В современных моделях диагностические соотношения типа формулы Маннинга:

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} \left(\frac{\partial h_b}{\partial x} \right)^{1/2}$$

Новая модель — уравнения Сен-Венана

$$\frac{\partial SU}{\partial t} + \frac{\partial SU^2}{\partial x} = -gS \frac{\partial (h + h_b)}{\partial x} + S \frac{\partial}{\partial x} \nu \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{gS |U| U}{RC_s^2},$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial SU}{\partial x} = E_{tr}.$$



CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.1

User Manual

by Thomas M. Cole
Environmental Laboratory
U.S. Army Corps of Engineers
Waterways Experiment Station
Vicksburg, MS 39180-6199

and

Scott A. Wells
Department of Civil and Environmental Engineering
Portland State University
Portland, OR 97207-0751

Draft Report
Not approved for public release
(Supersedes Instruction Report E-95-1)

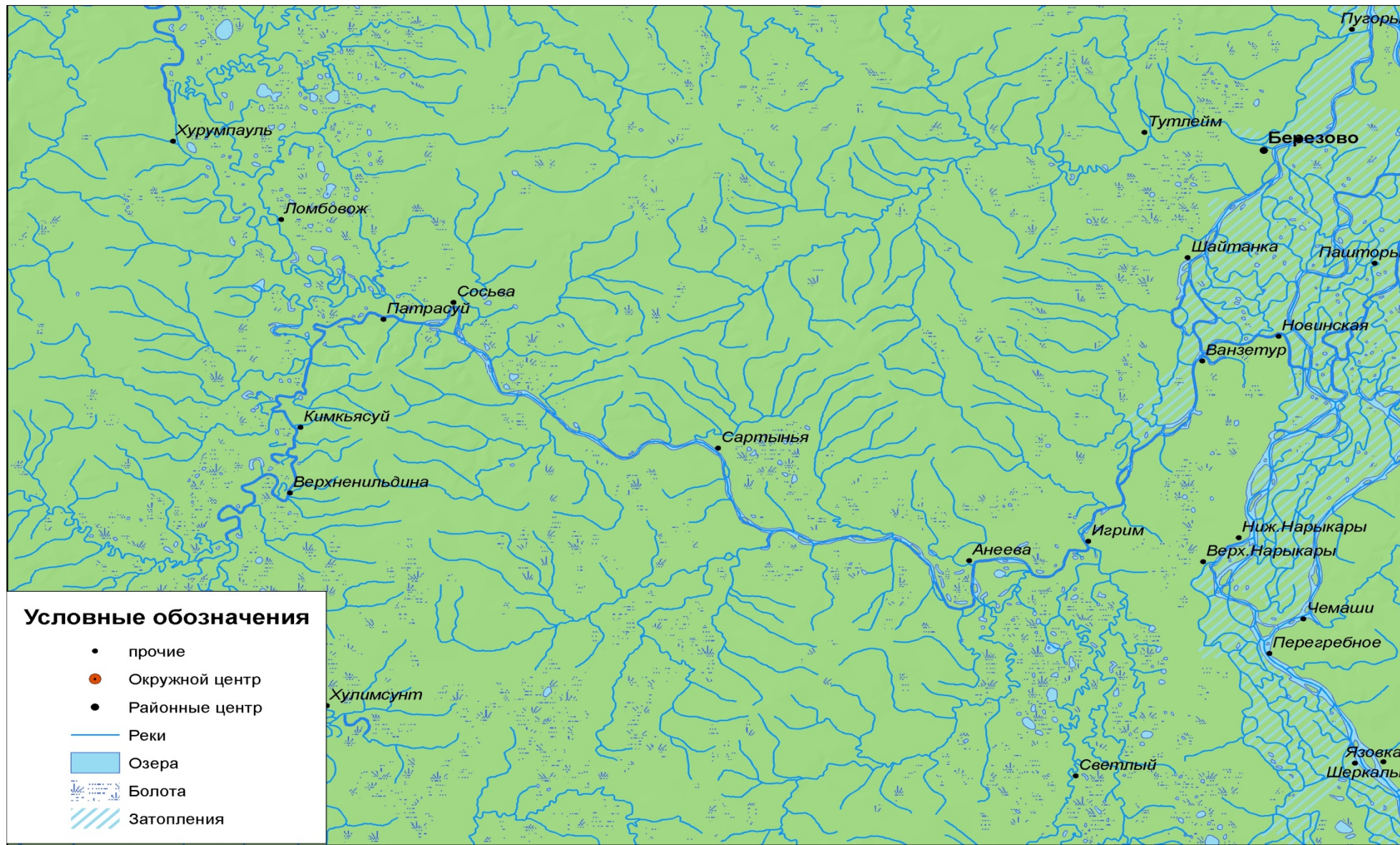
DRAFT

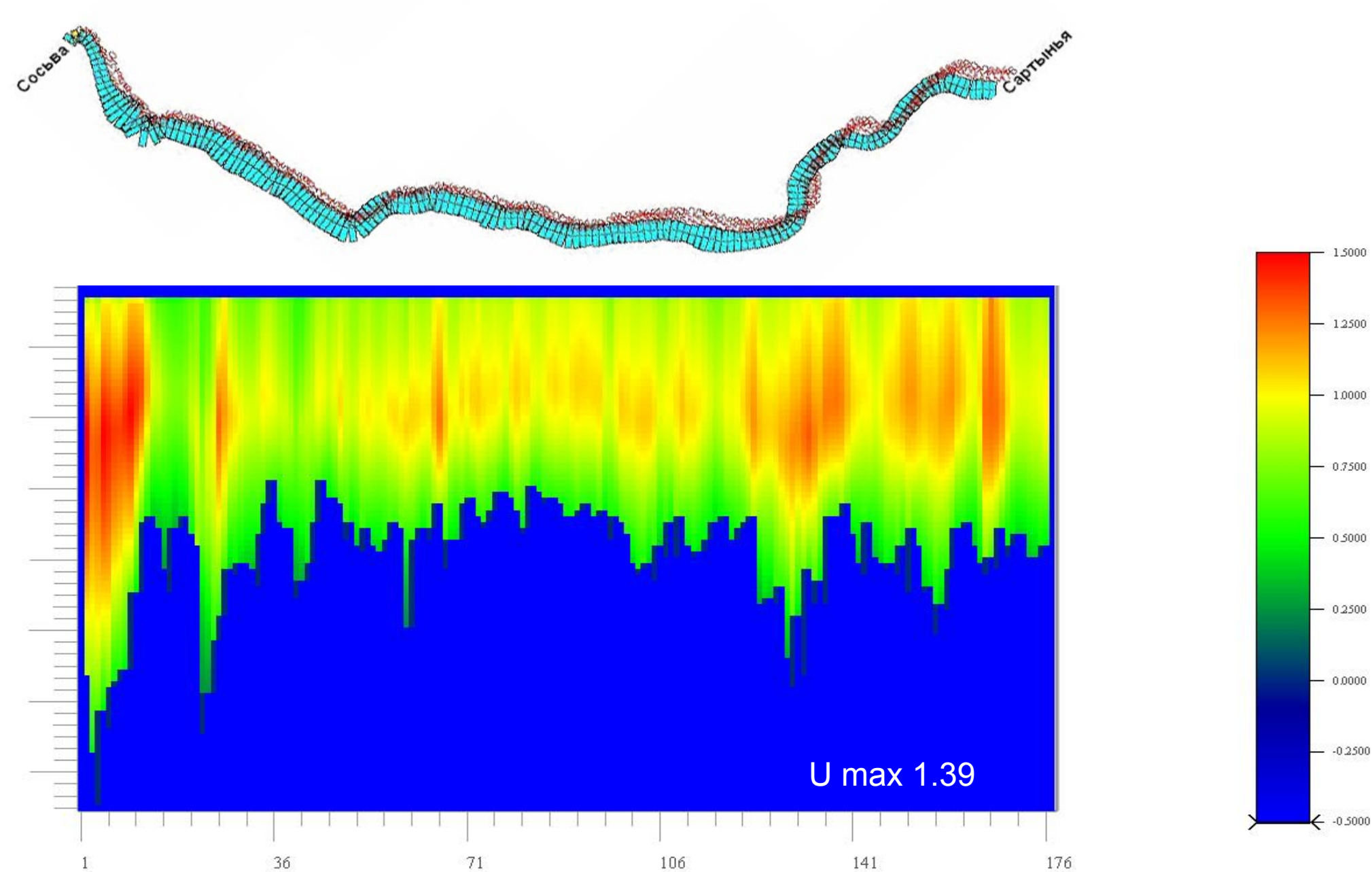
Prepared for U.S. Army Corps of Engineers
Washington, DC 20314-1000

Основные уравнения модели: гидродинамика

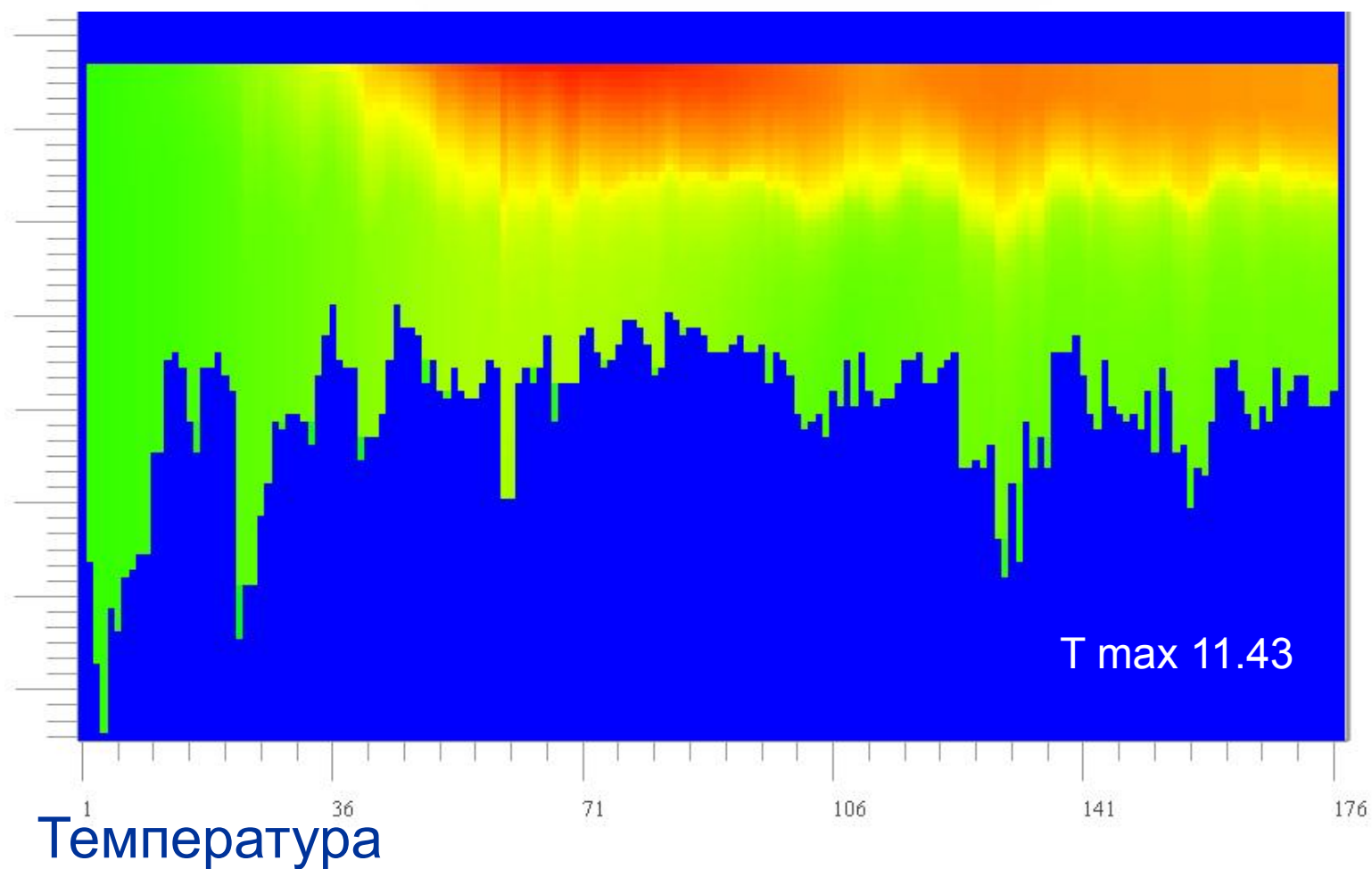
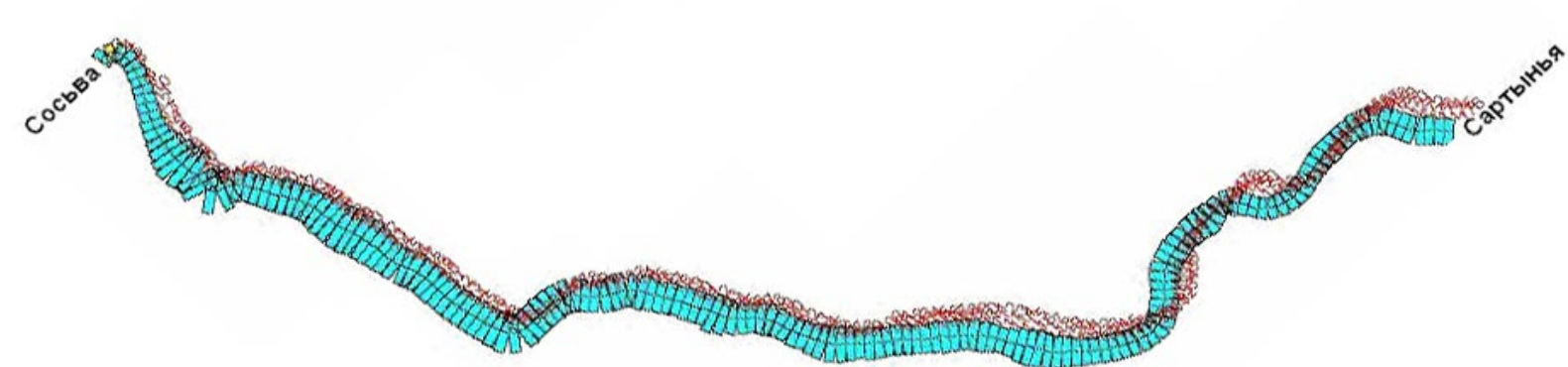
Equation	Version 3 governing equations
x- momentum	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x$
z-momentum	$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
free surface equation	$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$
continuity	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
equation of state	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ss})$
Conservation of mass/heat	$\frac{\partial B \Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB \Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \left(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q_{\Phi} B + S_{\Phi} B$
where B is the width, U is the longitudinal velocity, W is the vertical velocity, q is the inflow per unit width, α is the channel angle, Φ is the concentration or temperature, η is the water surface elevation, P is the pressure, h is the depth, T_w is the water temperature, Φ_{TDS} is the concentration of TDS, Φ_{ss} is the concentration of suspended solids, ρ is the density	

*Пушистов П.Ю., Чемляков Н.В., Вторушин М.Н., Ермаков И.С., Данилин А.Н.
« Результаты моделирования гидродинамики и переноса загрязняющих веществ на
участке реки Северная Сосьва», 2006*





Продольная скорость течения



Математическое моделирование трехмерных русловых потоков

- ✚ Разнообразные задачи, связанные с дальнейшим развитием климатических моделей и охраной окружающей среды
- ✚ Реальные очертания берегов и рельефа дна
- ✚ Сложная структура речной сети (основное русло и притоки)
- ✚ Использование современных вычислительных технологий (конечно-элементных методы, адаптируемые сетки и др.)

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



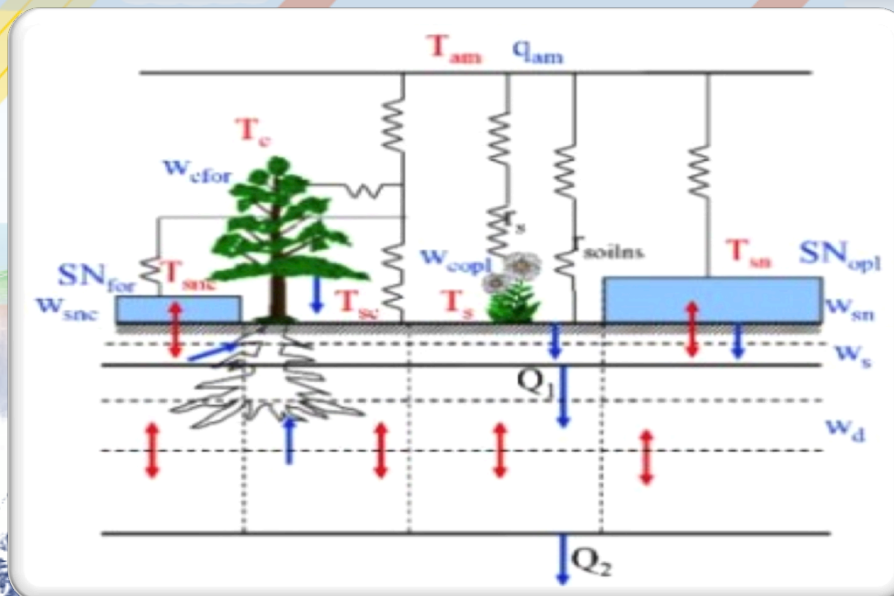
Модель переноса
солнечного и
теплового излучения

Модель переноса атмосферных аэрозолей

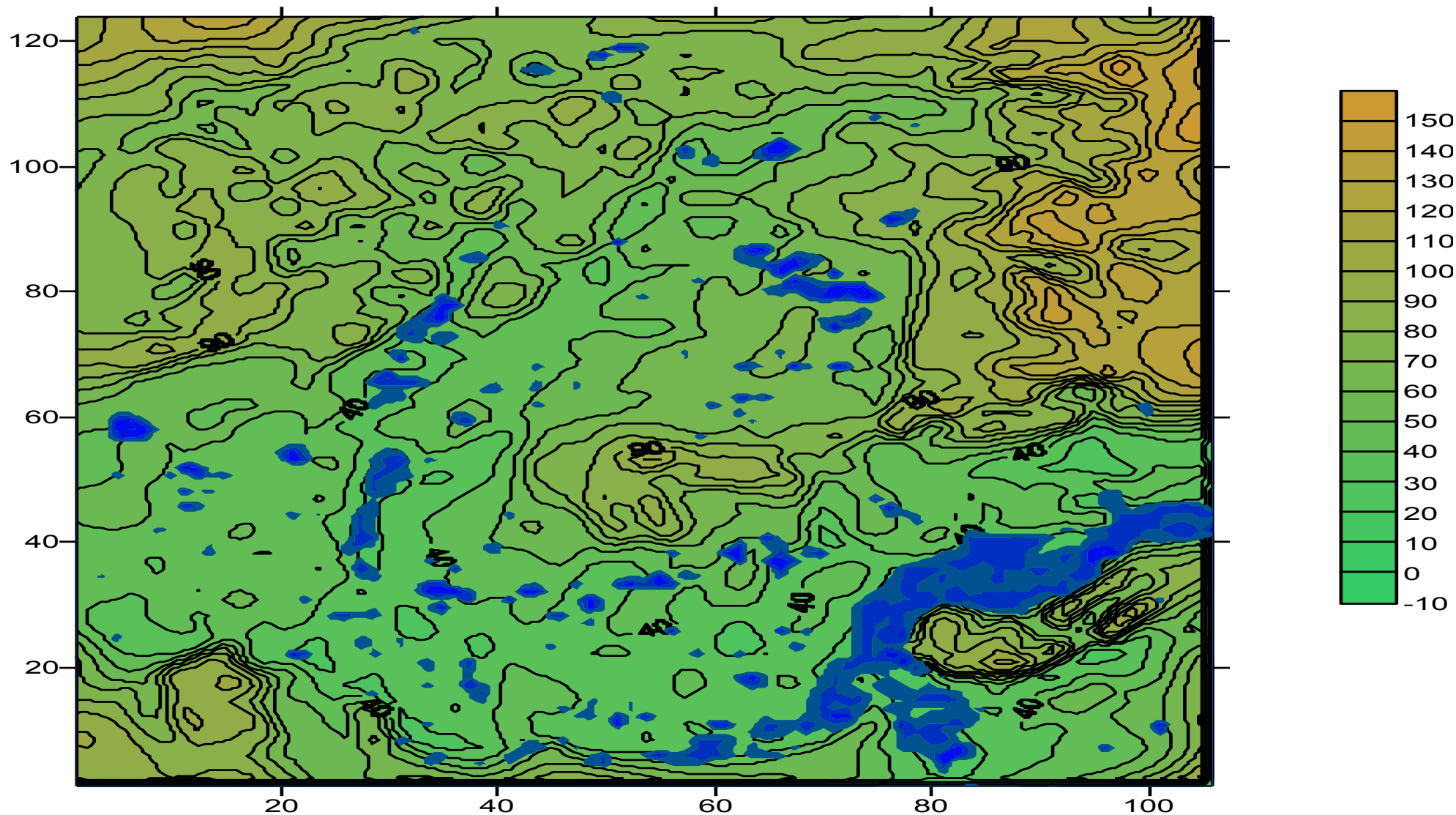
Модель снежного покрова и
деятельного слоя суши

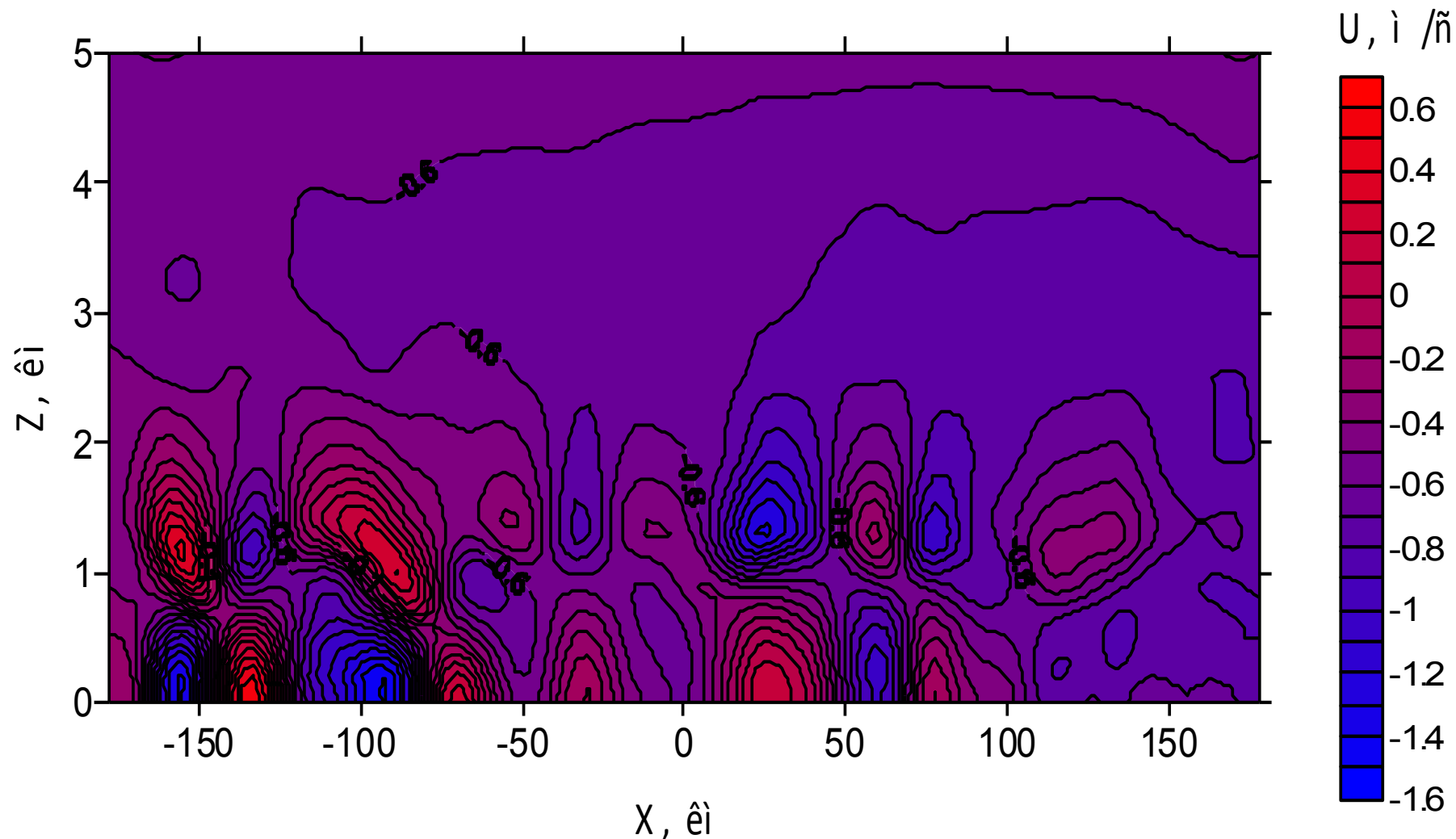


Модель водоема



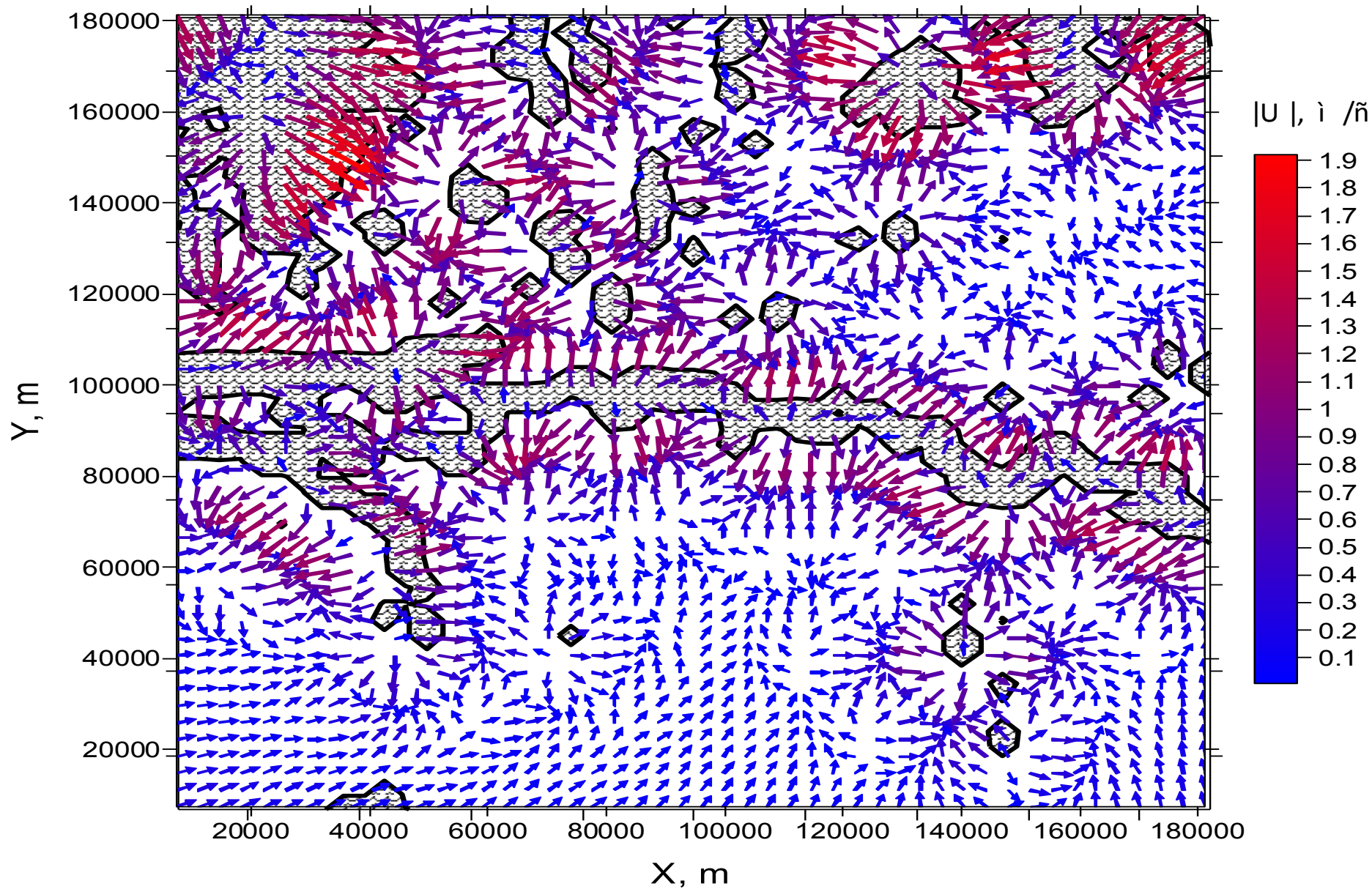
Западная Сибирь (ХМАО - Югра): 54.5-58.6° с.ш., 63.1-66.6 ° в.д.
рельеф и гидрология с разрешением 3.7 км





Поле зональной составляющей скорости ветра в вертикальном (широтном) сечении $y=0$ области интегрирования в 15:00 местного времени. Гидрологически неоднородный участок Западной Сибири

Скорость ветра (территория ХМАО, 60 – 62 ° с.ш., 73 – 77 ° в.д., включает Сургут и Нижневартовск)



Агрегирование турбулентных потоков

Ячейка модели ОЦА = Мезомасштабная область

$\bar{x}$ - осредненная по области величина

Процедура агрегирования
(Avisar and Pielke, 1989)

1. Потоки над водоемами:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_w &= -\rho c_p \bar{C}_{Tw} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sw}) \\ \tilde{E}_w &= -\rho \bar{C}_{Ew} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sw})\end{aligned}$$

2. Потоки над сушей:

$$\begin{aligned}\tilde{H}_{so} &= -\rho c_p \bar{C}_{Tso} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sso}) \\ \tilde{E}_{so} &= -\rho \bar{C}_{Eso} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sso})\end{aligned}$$

3. Агрегированные потоки

$$\begin{aligned}\tilde{H} &= (1 - \alpha_w) \tilde{H}_{so} + \alpha_w \tilde{H}_w, \\ \tilde{E} &= (1 - \alpha_w) \tilde{E}_{so} + \alpha_w \tilde{E}_w\end{aligned}$$

Задача:

$$\begin{aligned}\bar{H} &\Leftrightarrow \tilde{H}, \\ \bar{E} &\Leftrightarrow \tilde{E}\end{aligned}$$

Осреднение по области
мезомасштабной модели

1. Потоки в каждой точке

$$\begin{aligned}H &= -\rho c_p C_T u (\theta_a - \theta_s) \\ E &= -\rho C_E u (q_a - q_s)\end{aligned}$$

2. Осреднение по модельной
области: «истинные» потоки

$$\begin{aligned}\bar{H} &= S^{-1} \iint_S H ds', \\ \bar{E} &= S^{-1} \iint_S E ds'\end{aligned}$$

Пространственно-осредненные турбулентные потоки в приземном слое

Контрольный эксперимент:
Влажная почва, 50% покрыто растительностью

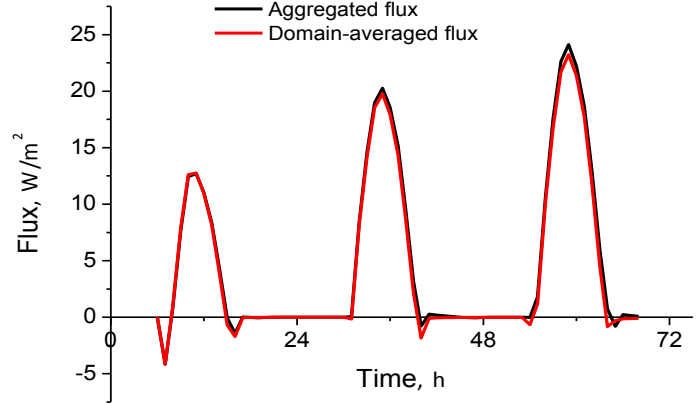
$|u|_{\max} = 1.4 \text{ м/сек}$

Сухая оголенная почва
Максимальная интенсивность бриза

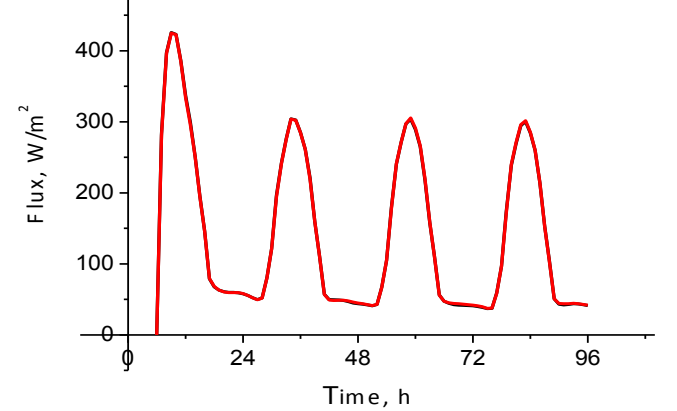
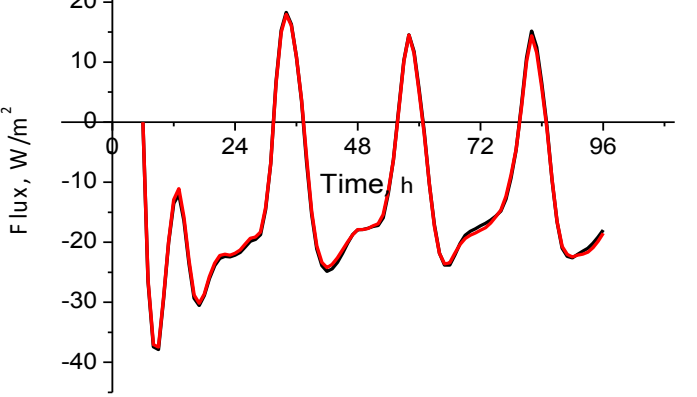
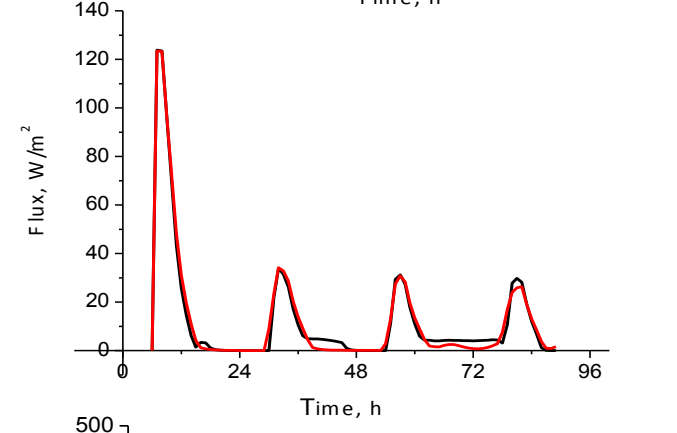
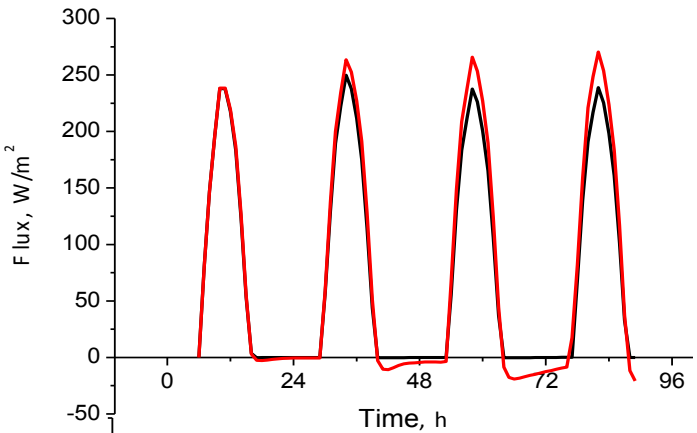
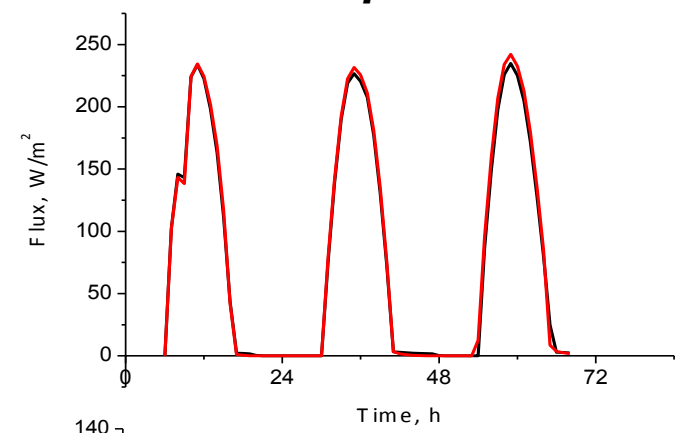
$|u|_{\max} = 7 \text{ м/сек}$

Скорость геострофического ветра = 10 м/сек:
Ослабленная мезомасштабная циркуляция

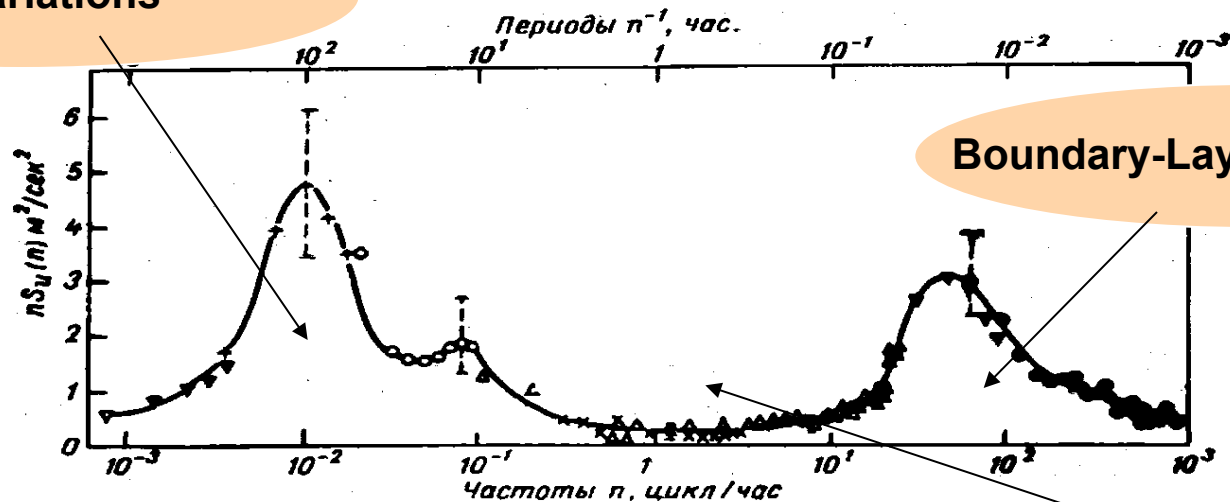
Поток явного тепла



Поток скрытого тепла



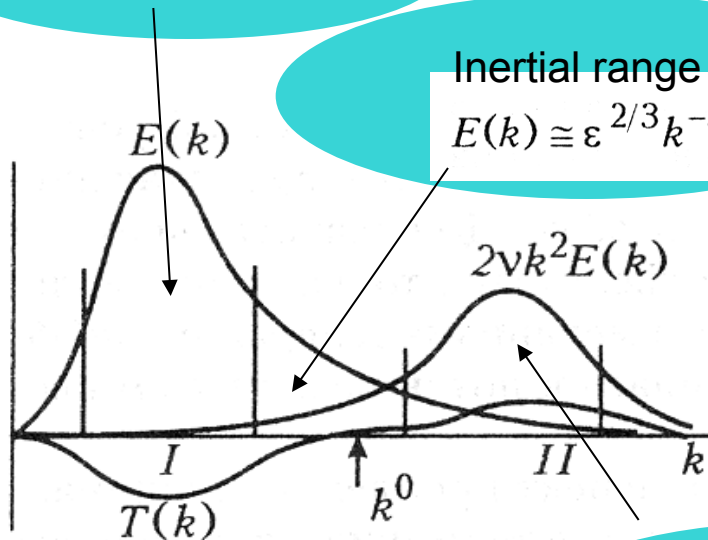
Synoptic variations



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

Boundary-Layer turbulence

Energy range



Inertial range

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

Dissipation range

Mesoscale processes

$$a(x_i, t) = \tilde{a}(x_i, t) + a'(x_i, t) + a''(x_i, t)$$

$$\bar{a}(x_i, t) = \int G(x_i - x'_i) a(x'_i, t) dx'_i$$

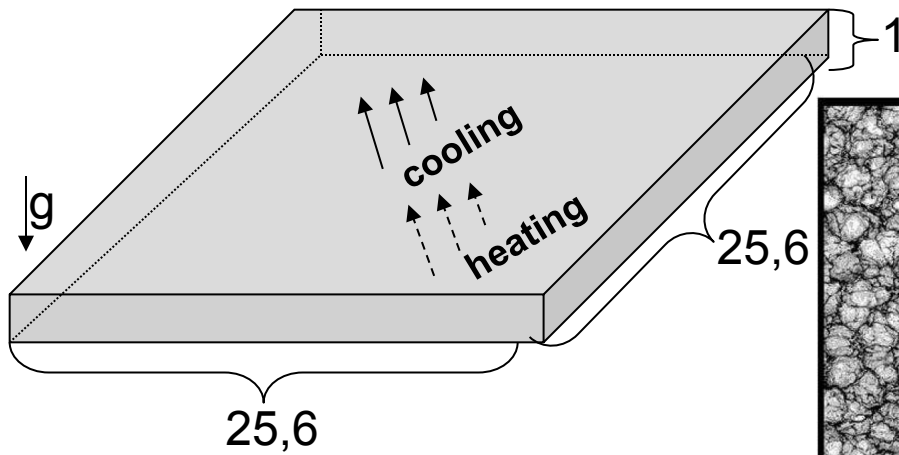
$$\bar{a}(x_i, t) = \tilde{a}(x_i, t) + a'(x_i, t)$$

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 **свыше 40 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.



equidistant grid 1024x1024x40

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

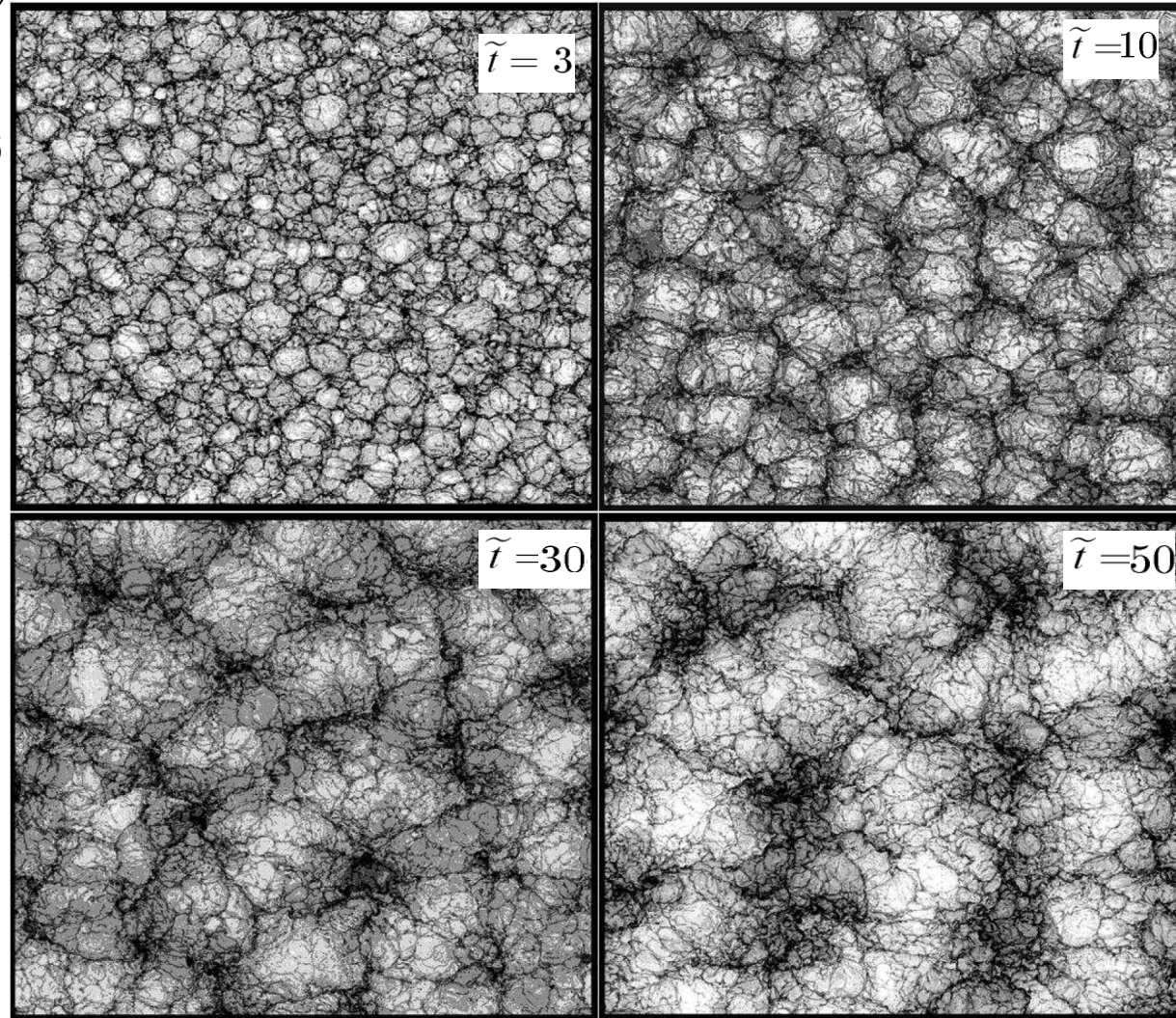
$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\Theta} \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} K_{\Theta} \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_i}$$

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

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

Rayleigh-Bernard convection

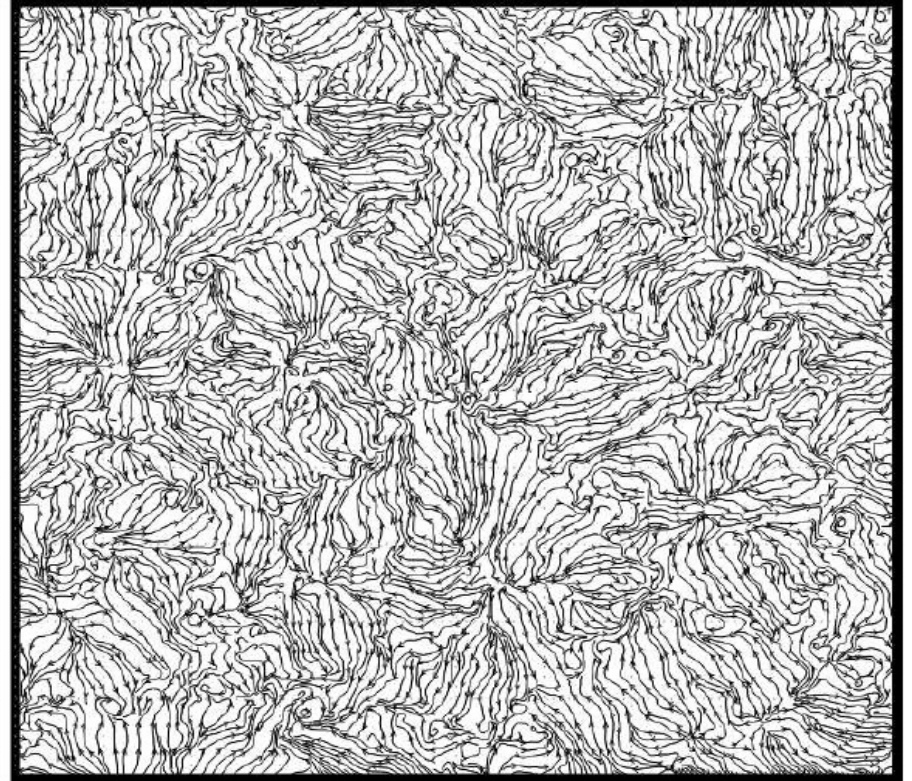
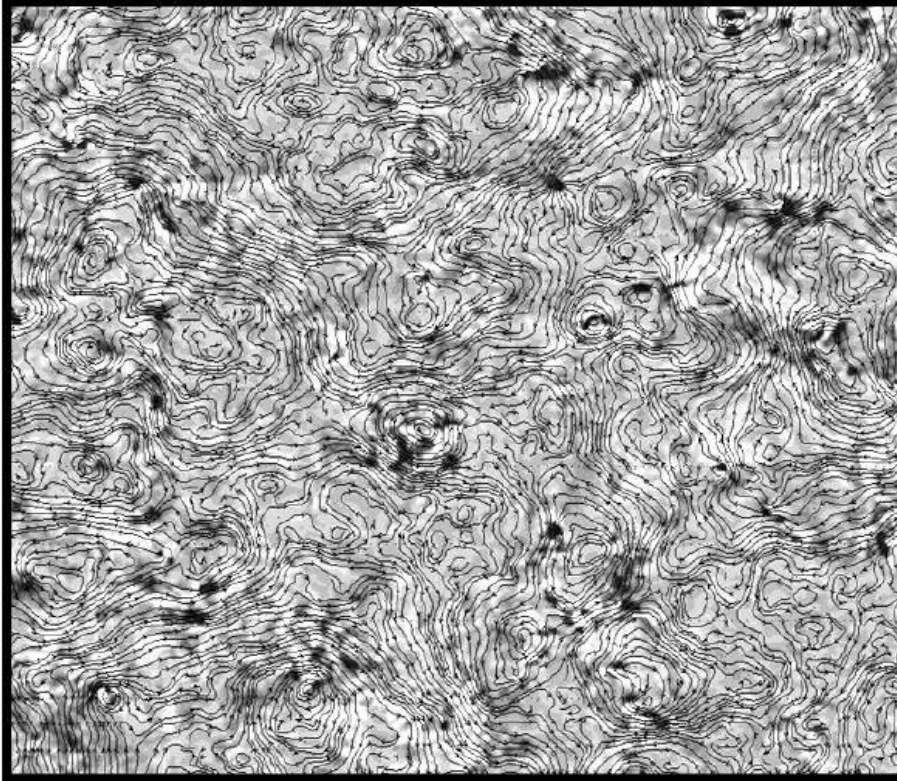


Potential temperature at level $L_3/8$

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

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



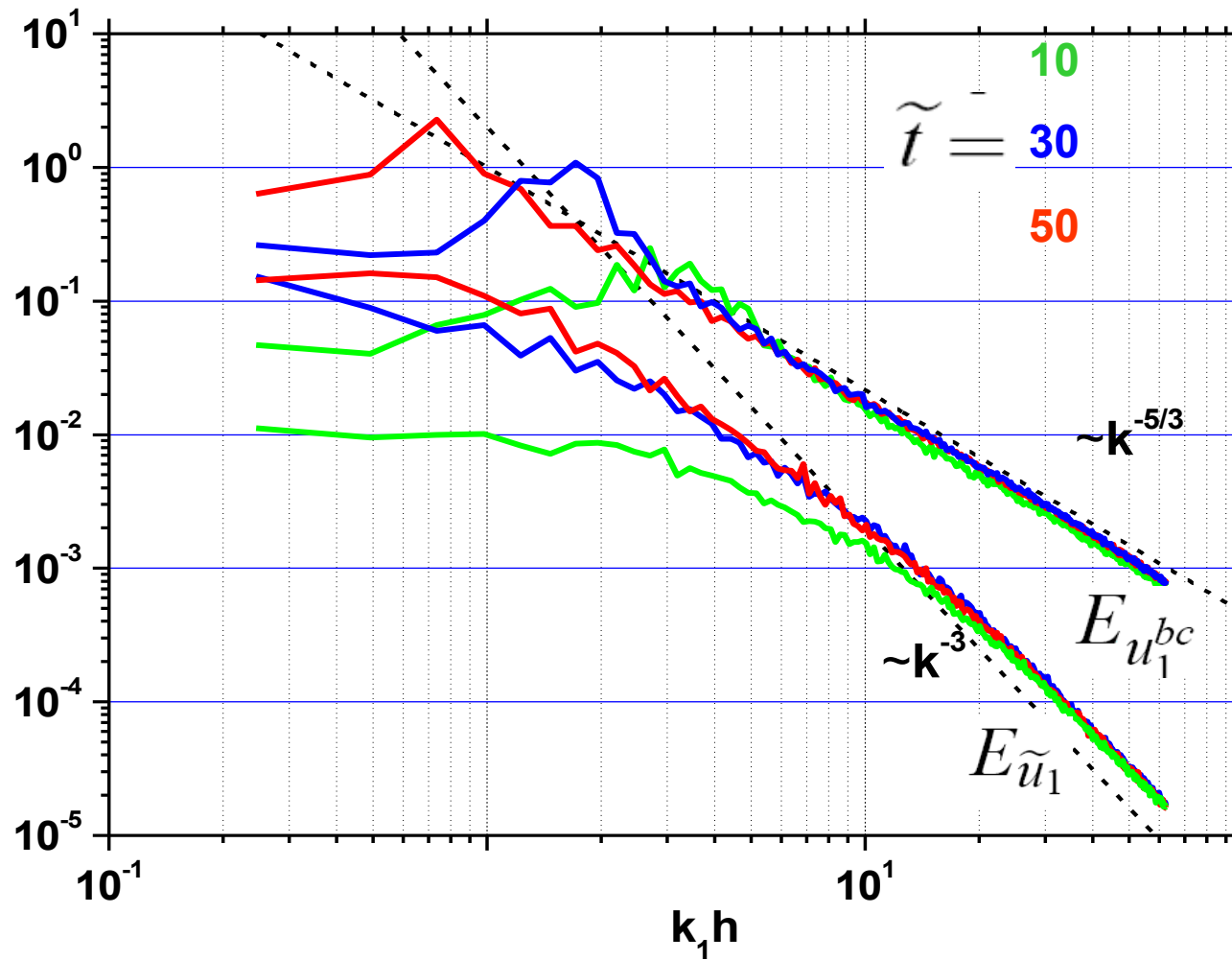
$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} &= -\frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial R_{ij}^{bc}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \widetilde{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{i3}(x_1, x_2, L_3) - \tau_{i3}(x_1, x_2, 0)}{L_3}, \\ \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} &= 0, \quad (i, j = 1, 2).\end{aligned}$$

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

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



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

Evaluation and Improvement of Spray-Modified Air-Sea Enthalpy and Momentum Flux Parameterizations for Operational Hurricane Prediction

Jian-Wen Bao

Christopher W. Fairall

Sara A. Michelson

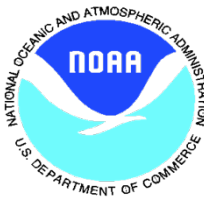
Laura Bianco

NOAA/ESRL/physical Sciences Division

(in collaboration with Naomi Surgi and Young Kwon of NCEP/EMC)

Presented at:

The 62nd Interdepartmental Hurricane Conference
Charleston, SC: March 5, 2008



Parameterization of the Sea-Spray Modification of Momentum Flux (e.g., Barenblatt 1996 and Lykossov 2001)

$$\langle u' w' \rangle \frac{\partial u}{\partial z} + \varepsilon + \sigma w_f S g = 0, \quad \langle S' w' \rangle = -K_s \frac{\partial S}{\partial z} = w_f S$$

where S is the spray concentration profile.

$$u_* = \frac{uk}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \psi_s}$$

$$\psi_s = \begin{cases} \omega^{-1} \ln\left(1 + \frac{\alpha \omega^2}{1 - \omega} \left[\left(\frac{z}{z_h}\right)^{1-\omega} - 1\right]\right) & \text{for } \omega \neq 1 \\ \ln\left[1 + \alpha \ln\left(\frac{z}{z_h}\right)\right] & \text{for } \omega = 1 \end{cases}$$

Where $\omega = \frac{w_f}{ku_*}$, $\alpha = \frac{\beta g k^2 z_h \sigma S_r}{u_*^2}$,

w_f : the mean fall speed of droplets

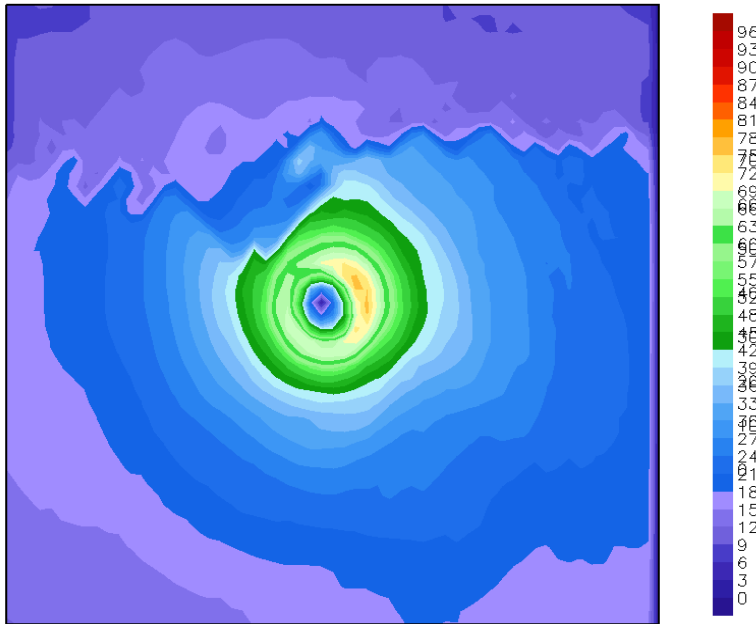
β : empirical parameter

z_h : spray generation height

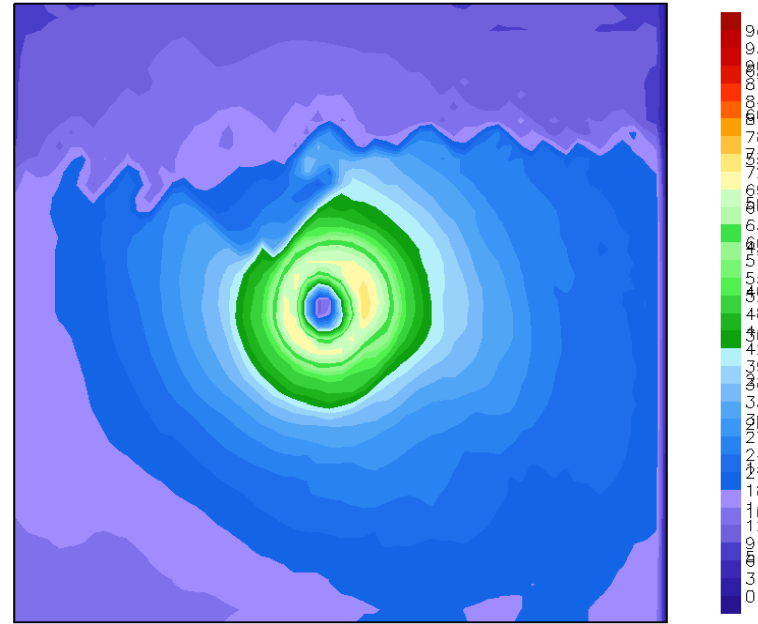
$$\sigma = \frac{(\rho_w - \rho_a)}{\rho_a} \approx 10^3$$

Test with Katrina (2005)

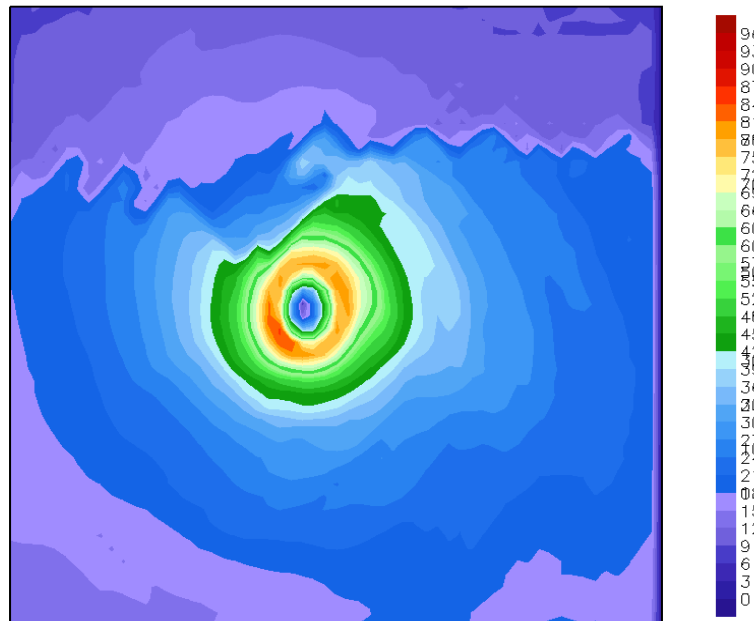
control



thermal



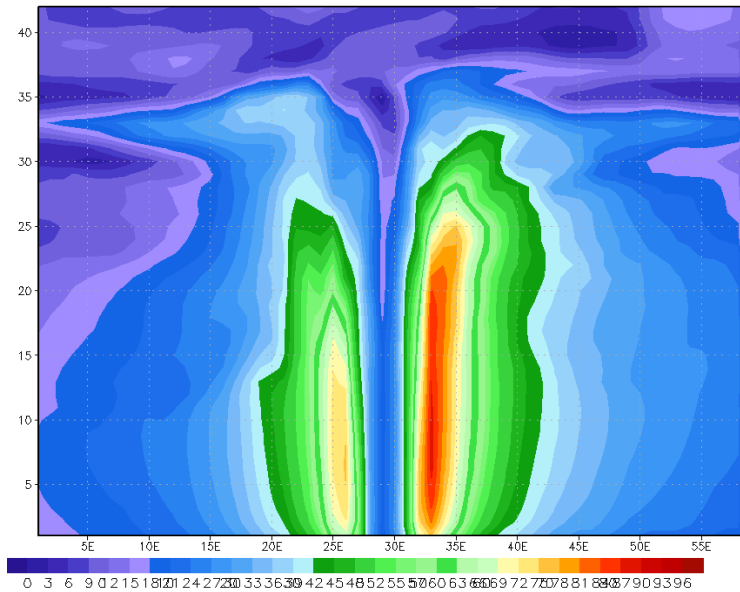
thermal + momentum



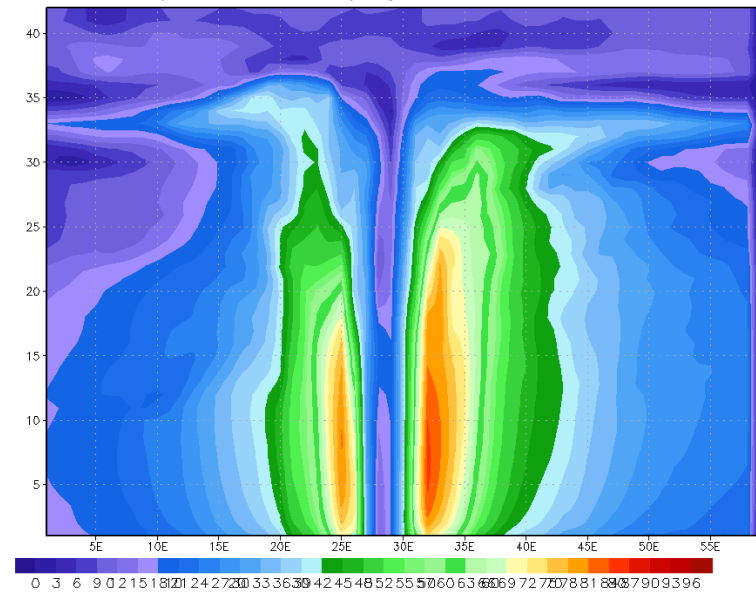
**Valid at 0060 UTC
29 Aug 2005**

Test with Katrina (2005)

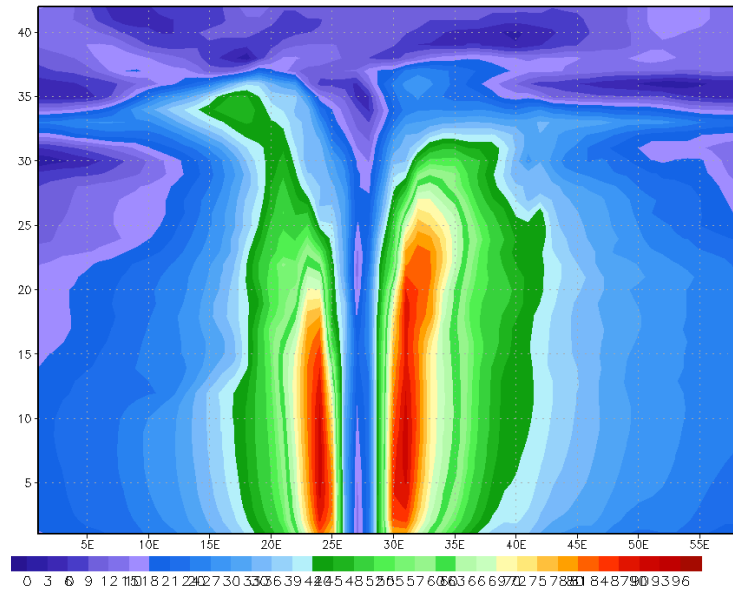
control



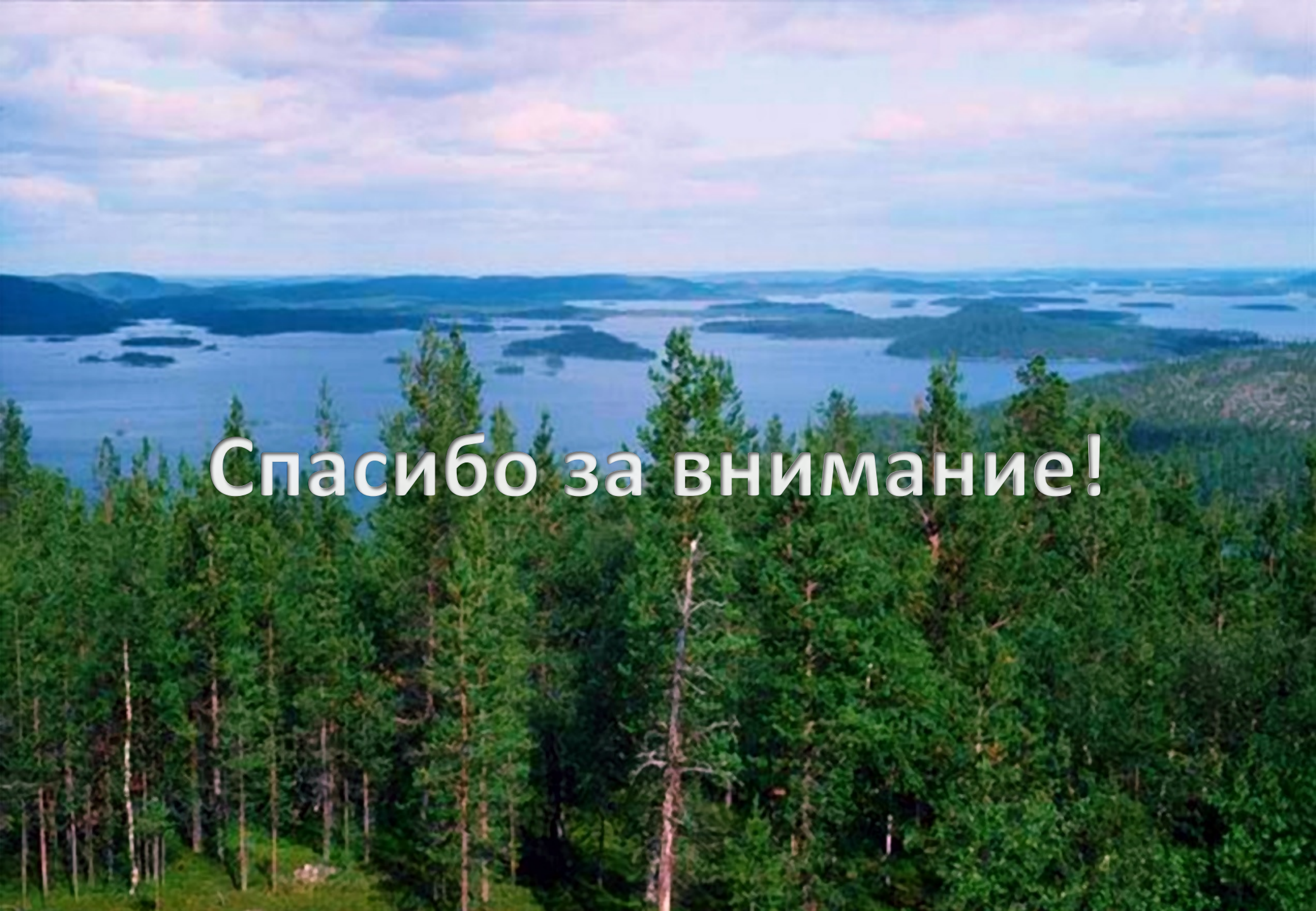
thermal



thermal + momentum



**Valid at 0060 UTC
29 Aug 2005**



Спасибо за внимание!