

СЕМИНАР

**“Математическое моделирование геофизических процессов:
прямые и обратные задачи”
20 сентября 2007 г.**

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ

В.Н. Лыкосов

**Институт вычислительной математики
Российской академии наук,
Научно-исследовательский вычислительный центр
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова
E-mail: lykosov@inm.ras.ru**

A world map in shades of blue, serving as a background for the text. The map shows the continents of North America, South America, Africa, Europe, Asia, and Australia.

Climate Change 2007: The Physical Science Basis

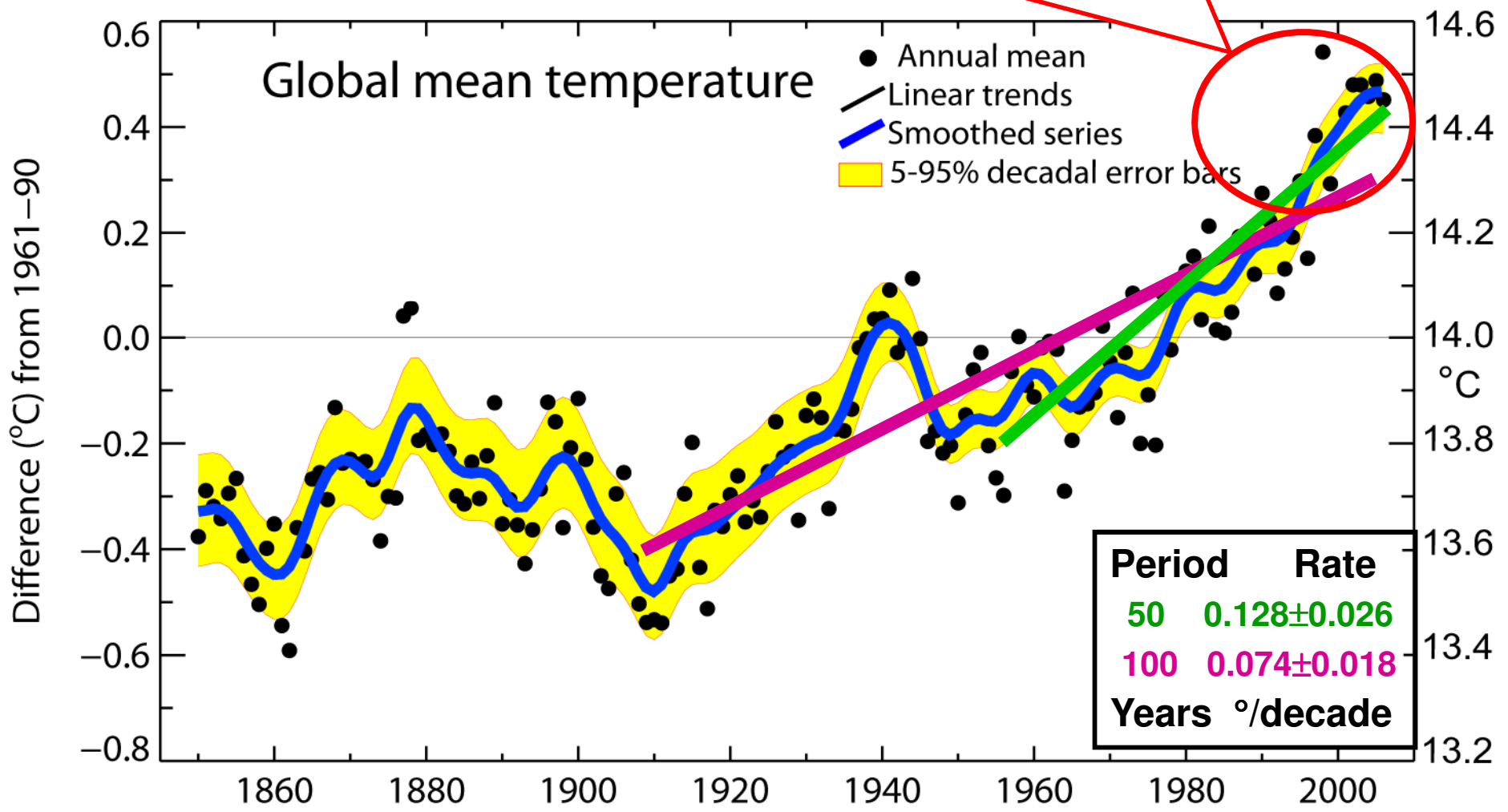
Working Group I Contribution to the
IPCC Fourth Assessment Report

Presented by
R.K. Pachauri, IPCC Chair
and
Bubu Jallow, WG 1 Vice Chair

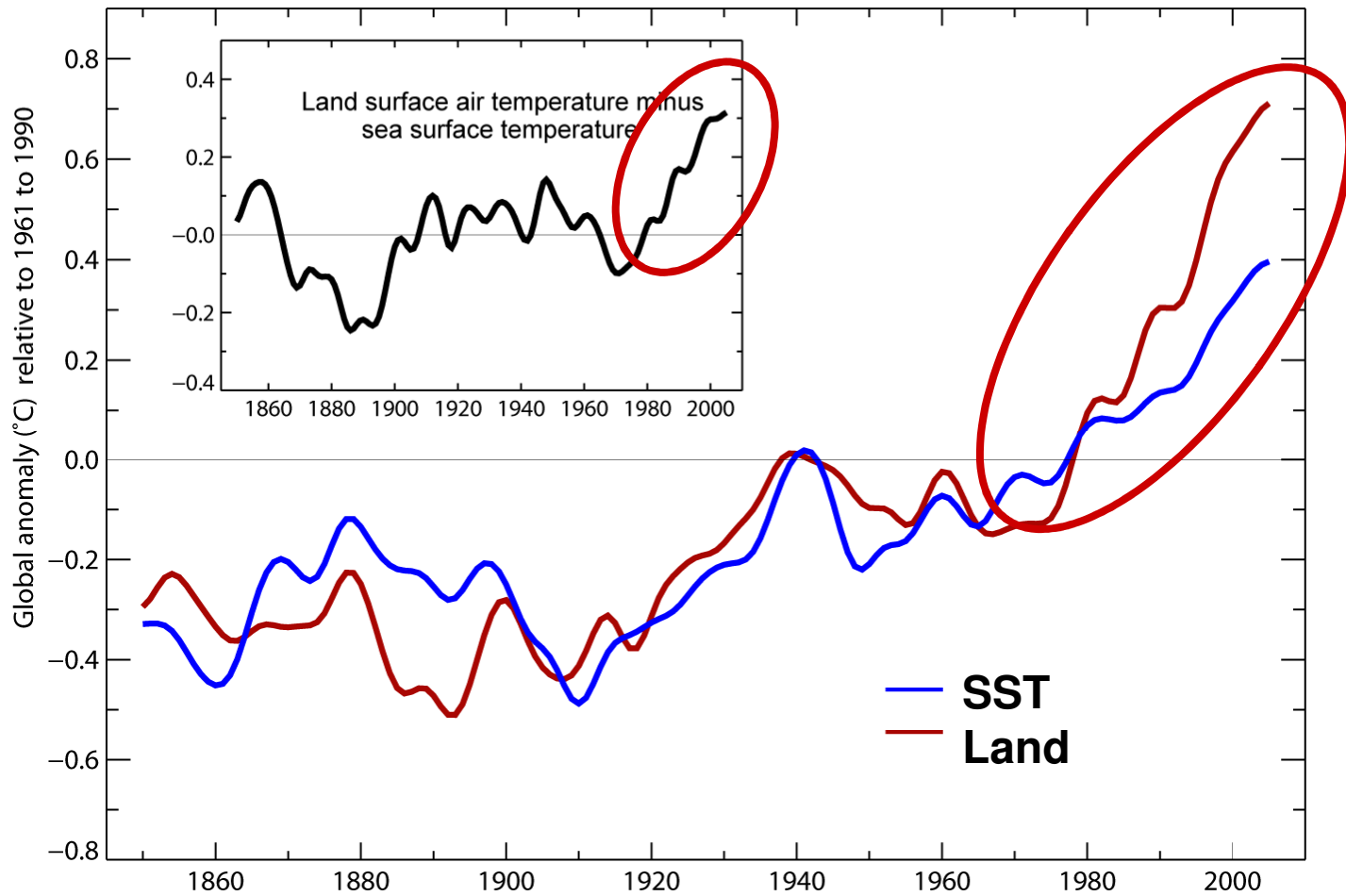
Nairobi, 6 February 2007
<http://ipcc-wg1.ucar.edu/>

Global mean temperatures are rising faster with time

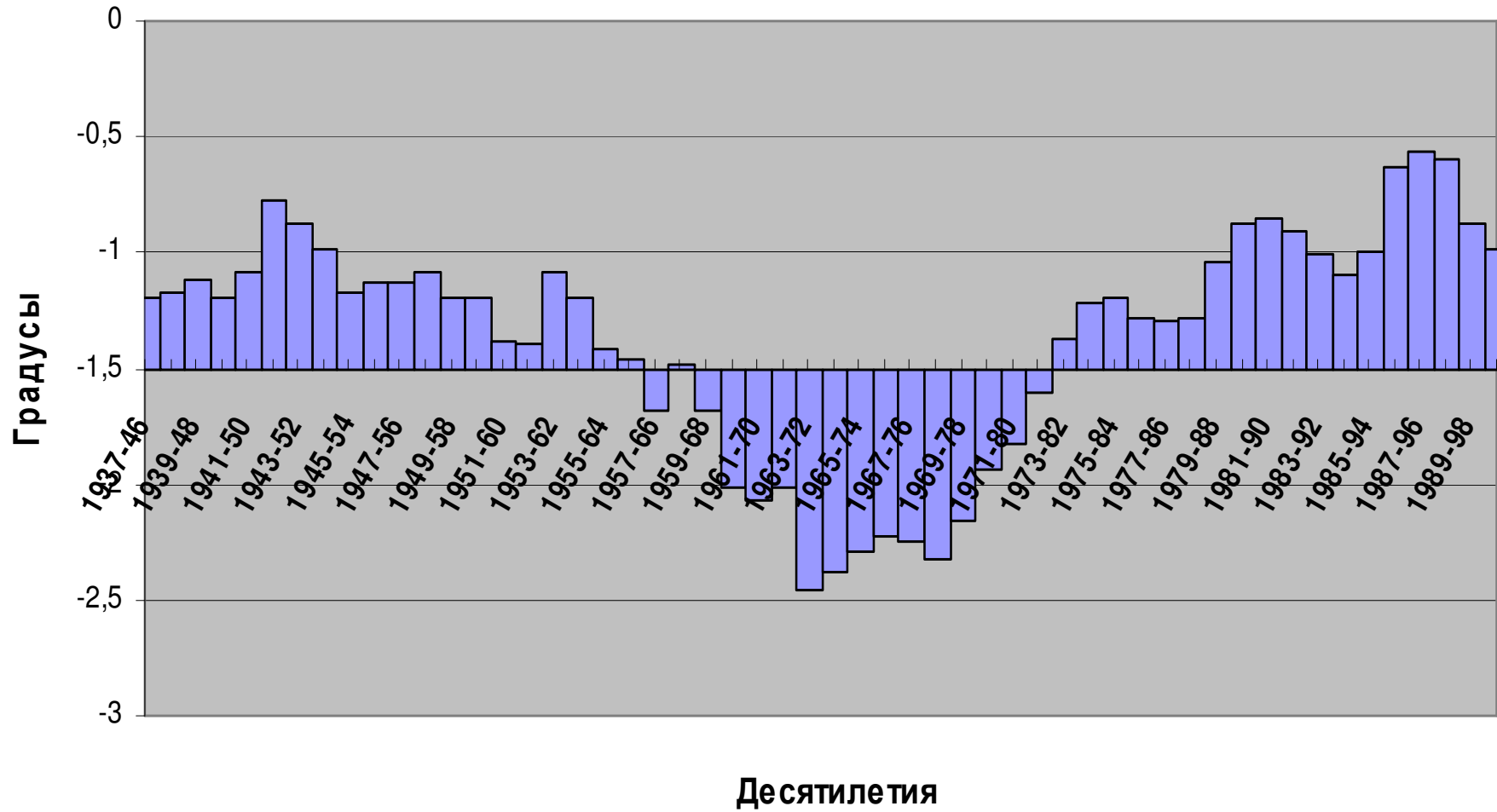
Warmest 12 years:
1998, 2005, 2003, 2002, 2004, 2006,
2001, 1997, 1995, 1999, 1990, 2000



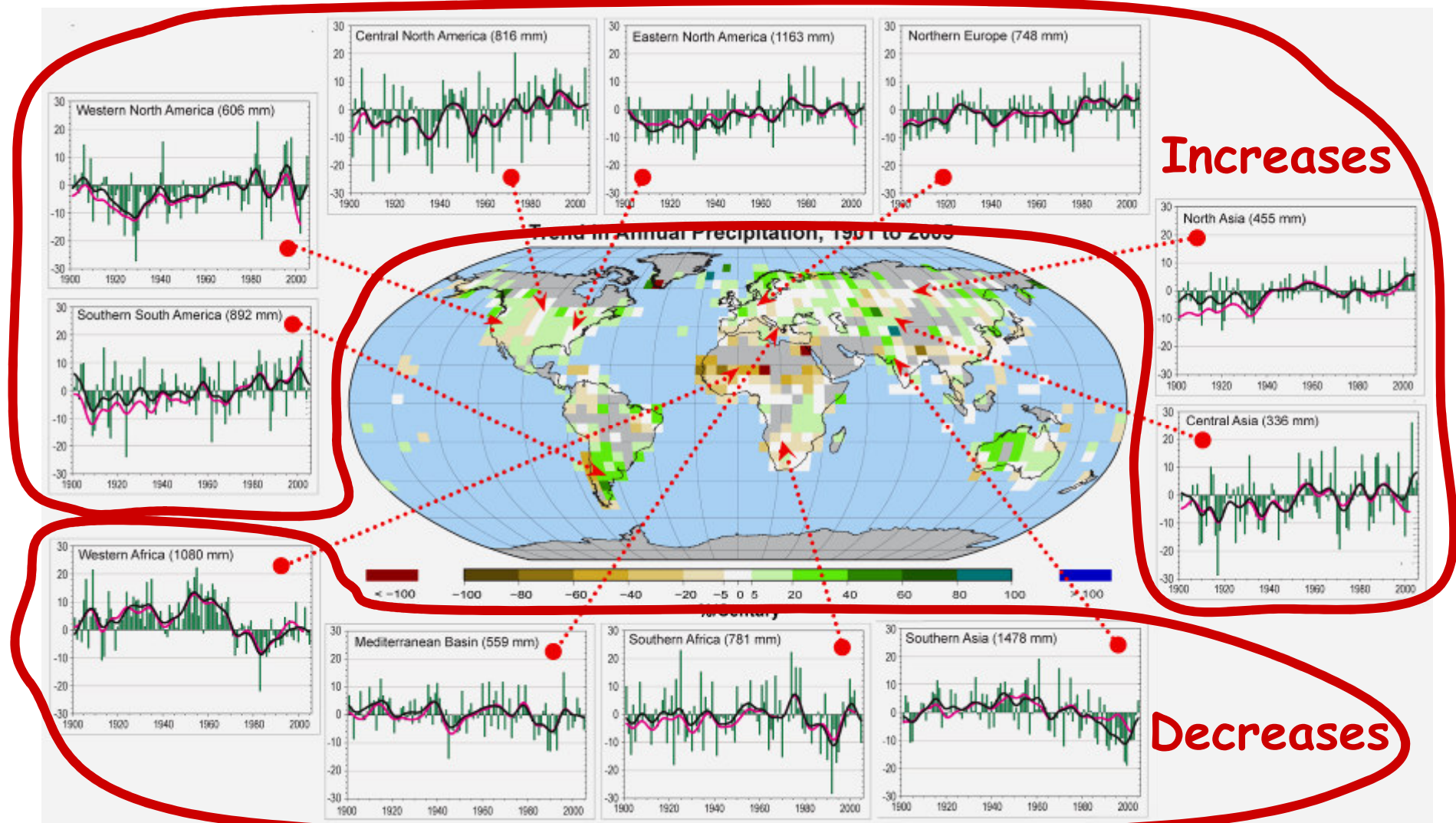
Land surface temperatures are rising faster than SSTs



Среднегодовая температура воздуха г.Ханты-Мансийска за период 1937-1999гг.

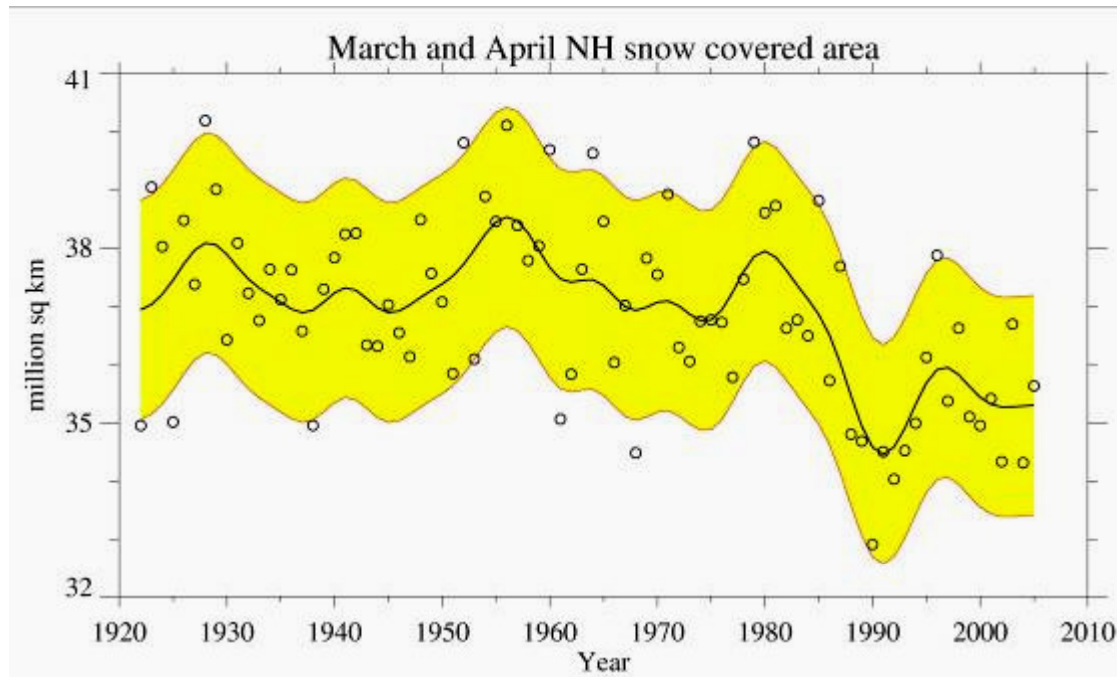


Land precipitation is changing significantly over broad areas

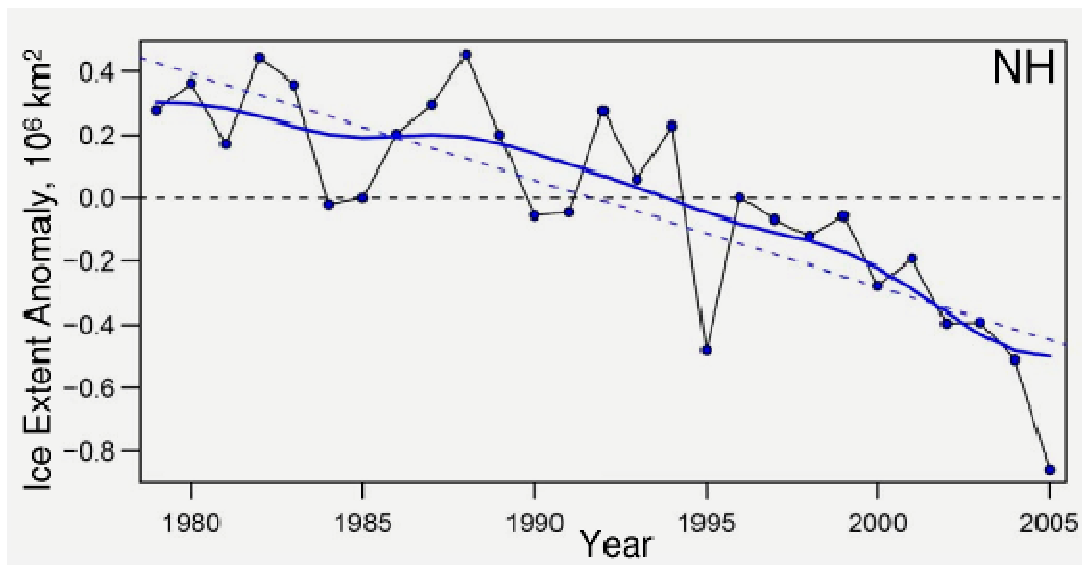


Smoothed annual anomalies for precipitation (%) over land from 1900 to 2005; other regions are dominated by variability.

Snow cover and Arctic sea ice are decreasing

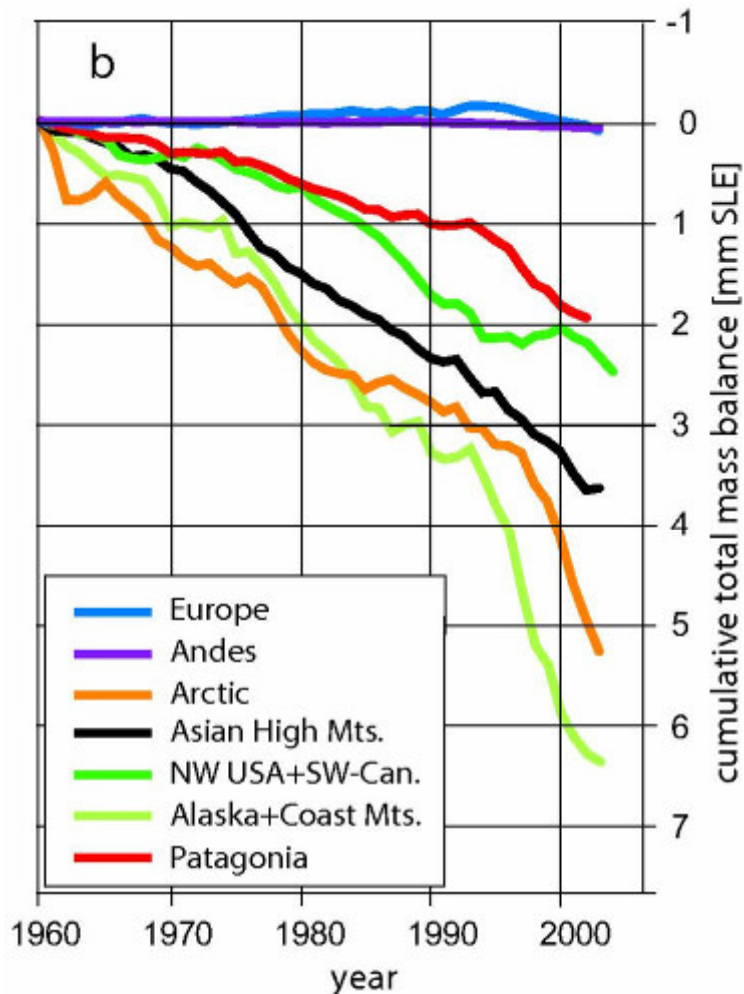


Spring snow cover shows 5% stepwise drop during 1980s

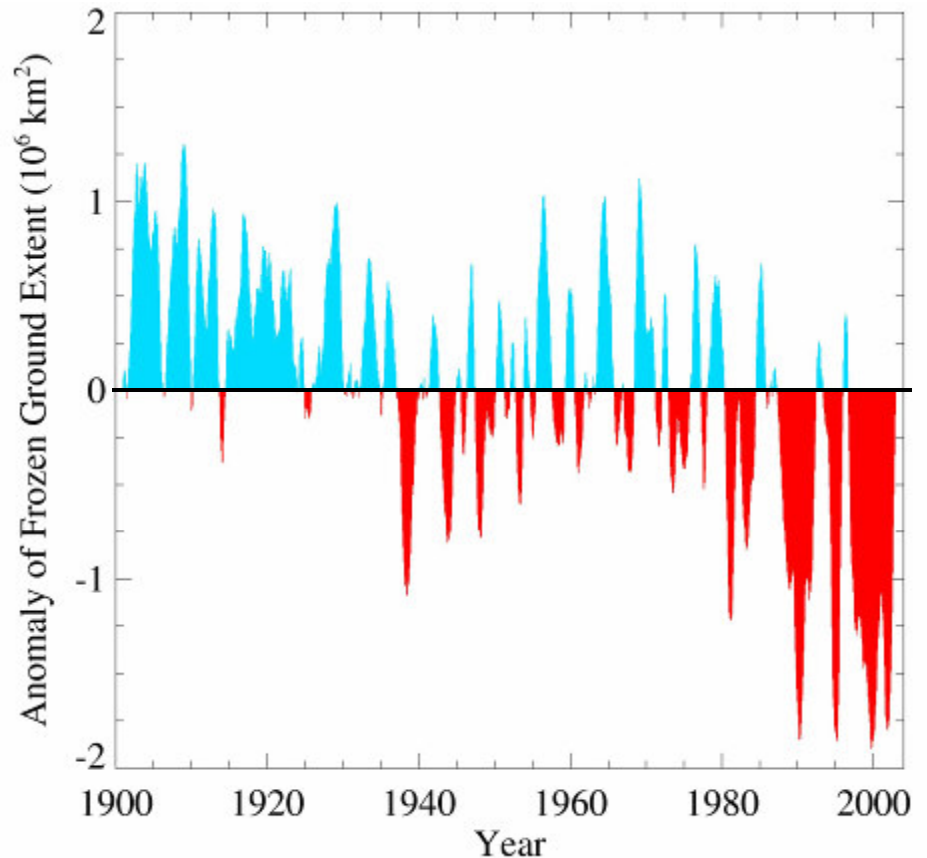


Arctic sea ice area decreased by 2.7% per decade (Summer: -7.4%/decade)

Glaciers and Frozen Ground



Increased Glacier retreat since the early 1990s



Area of seasonally frozen ground in NH has decreased by 7% from 1901 to 2002

Опасные региональные последствия изменений климата

- По данным МЧС России, за 10 лет (1990-99) было зарегистрировано 2877 событий, связанных с **опасными** природными явлениями, среди которых 28% пришлось на атмосферные процессы (ураганы, бури, шквалы, смерчи), 24% - на землетрясения и 19% - на наводнения.
- При этом, растет количество жертв, связанных с **наводнениями**, в то время как распределение по годам погибших от других видов катастроф не подчиняется каким-либо закономерностям.
- В то же время, в период с 1967 г. по 1991 г. в результате **засух** погибло более 1 миллиона людей. Жестокая засуха 1988 г. в США принесла ущерб в 40 млрд. долларов, что "лишь" в 2-3 раза меньше потерь от землетрясения 1989 г. в Сан-Франциско.
- При массовых **лесных пожарах** резко усиливаются конвективные процессы, большое количество локальных пожаров сливаются в один гигантский пожар ("огненный шторм") и происходит интенсивное образование и выброс в атмосферу высокодисперсных частиц - на 1 т сожженного материала - до 75 г частиц (Израэль, 1984).
- Деградация вечной мерзлоты

**Российско-британская конференция
«Гидрологические последствия изменений климата»
13-15 июня 2007 г., Новосибирск**

- Наблюдаются существенные отклонения в условиях формирования речного стока в последние 20-30 лет от предшествующего многолетнего периода: отмечаются значимые положительные тренды увеличения стока летне-осенней и зимней межени;
- возможно смещение сроков прохождения максимальных расходов весеннего половодья на более ранний период, а также возможно небольшое снижение суммарного годового стока (водосбор Ладожского озера, Сибирь и др.);
- имеются большие неопределенности в результатах климатического моделирования и оценки изменений в региональных гидрологических характеристиках (осадки, водосодержание почв, сток, экстремальные явления и т.п.).

A decorative border consisting of two horizontal, wavy, cream-colored scroll-like ribbons. The top ribbon is positioned near the top edge, and the bottom ribbon is near the bottom edge. Both ribbons have a slight 3D effect with shadows and highlights, suggesting they are curled or draped. The background is a solid, dark brown color.

*Физика
климатической системы*

Климатическая система

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

Основные задачи теории климата можно сформулировать следующим образом:

1. воспроизведение современного климата (понимание физических механизмов его формирования);
2. оценка возможных изменений климата под влиянием малых внешних воздействий (проблема чувствительности климатической системы);
3. прогноз изменений климата.

Предполагается при этом, что компоненты климатической системы есть сплошные среды, которые необходимо описывать с определенной точностью. Проблема предсказания состояния системы связана напрямую с оценкой степени ее **устойчивости** в том или ином смысле. Именно эта проблема является центральной в математической теории климата

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

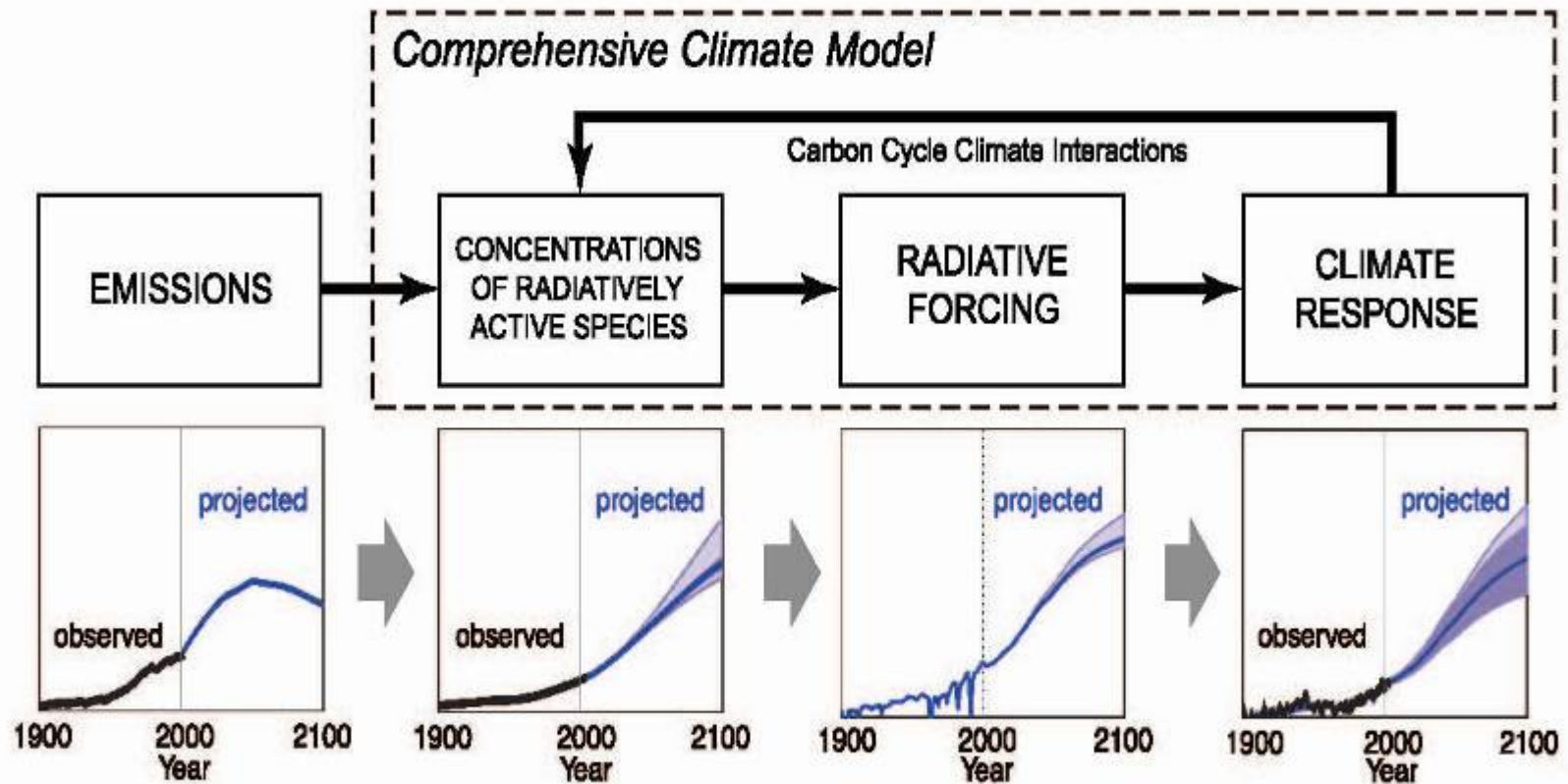
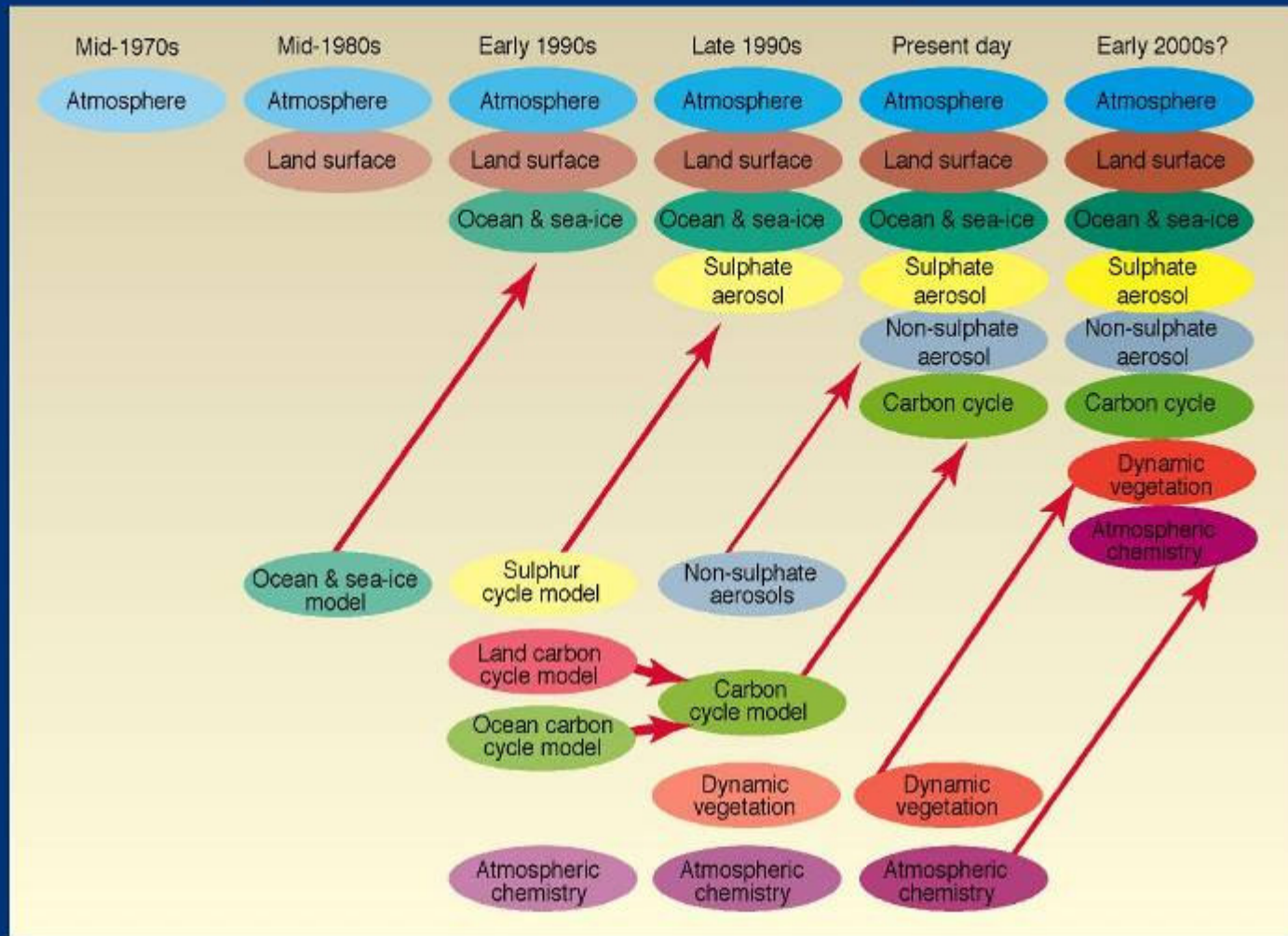
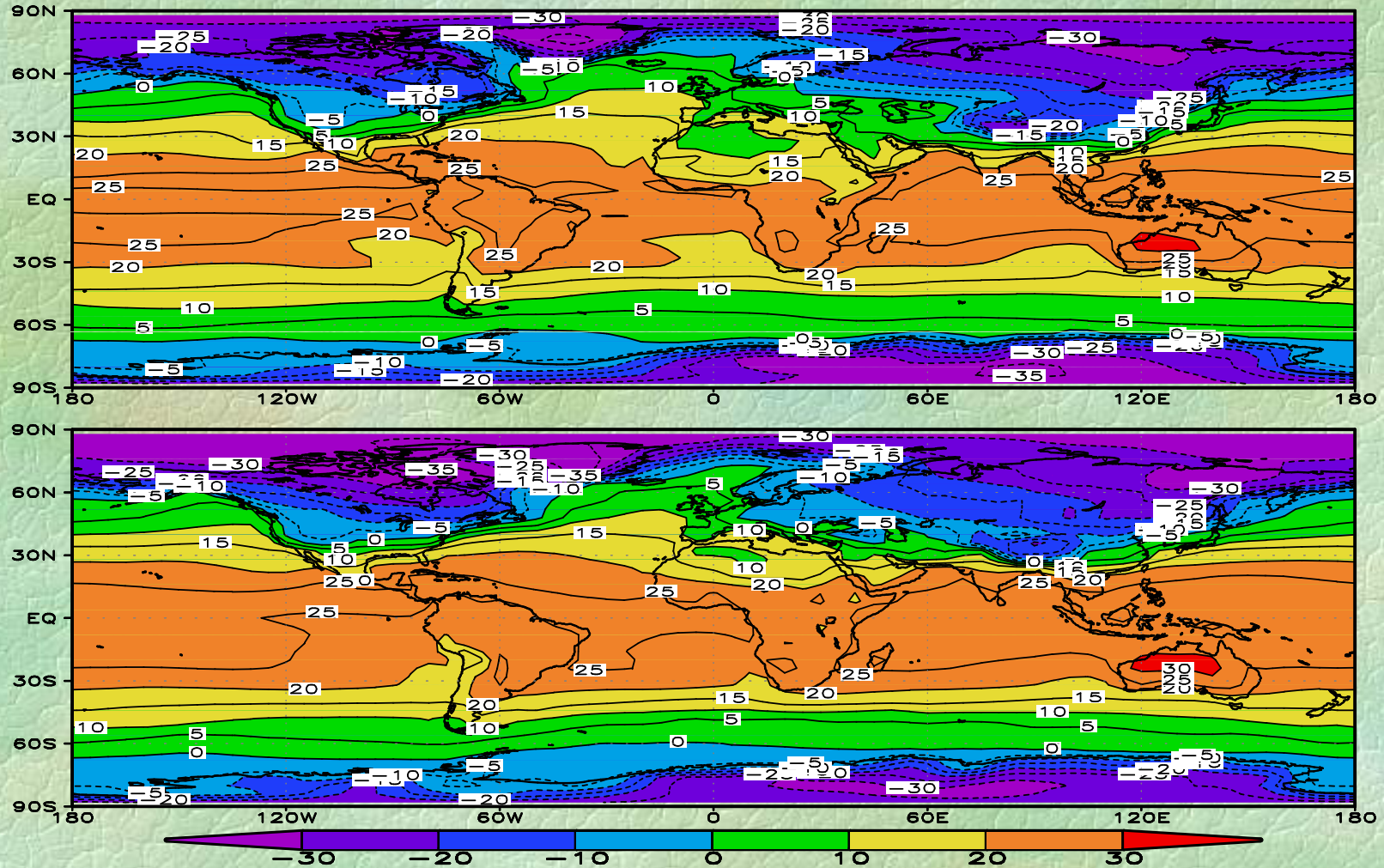


Figure 10.1. Several steps from emissions to climate response contribute to the overall uncertainty of a climate model projection. These uncertainties can be quantified through a combined effort of observation, process understanding, a hierarchy of climate models, and ensemble simulations. In a comprehensive climate model, physical and chemical representations of processes permit a consistent quantification of uncertainty. Note that the uncertainty associated with the future emission path is of an entirely different nature and not addressed in Chapter 10. Bottom row adapted from Figure 10.26, A1B scenario, for illustration only.

The development of climate models, past, present and future

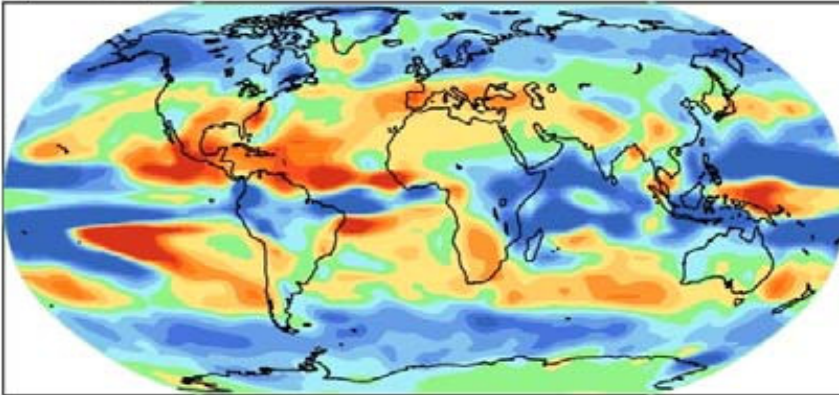


Приповерхностная температура воздуха зимой: модель ИВМ (верх) и наблюдения (низ)

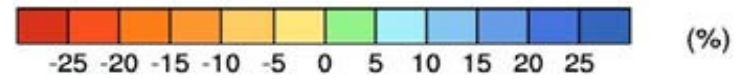
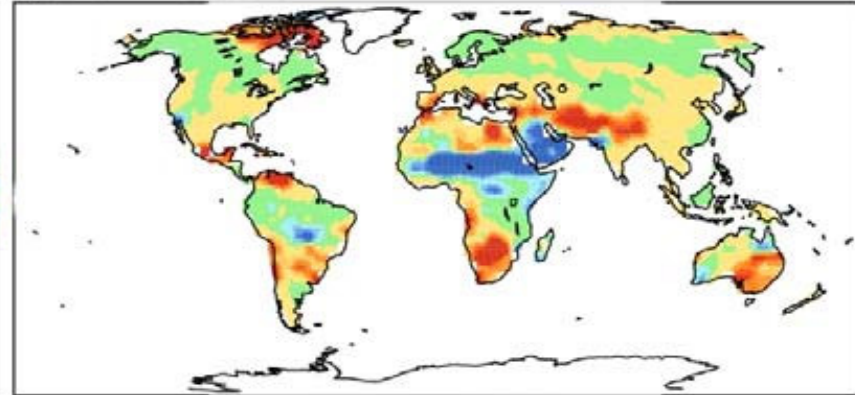


INM-CM3.0

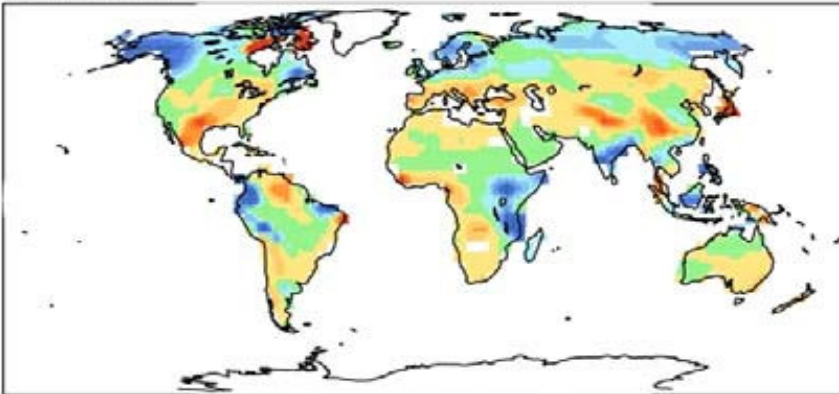
a) Precipitation



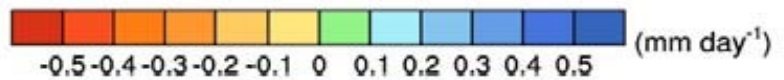
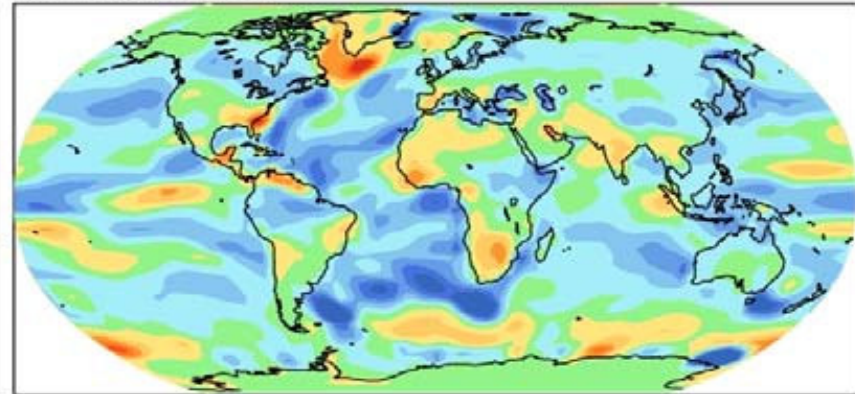
b) Soil moisture



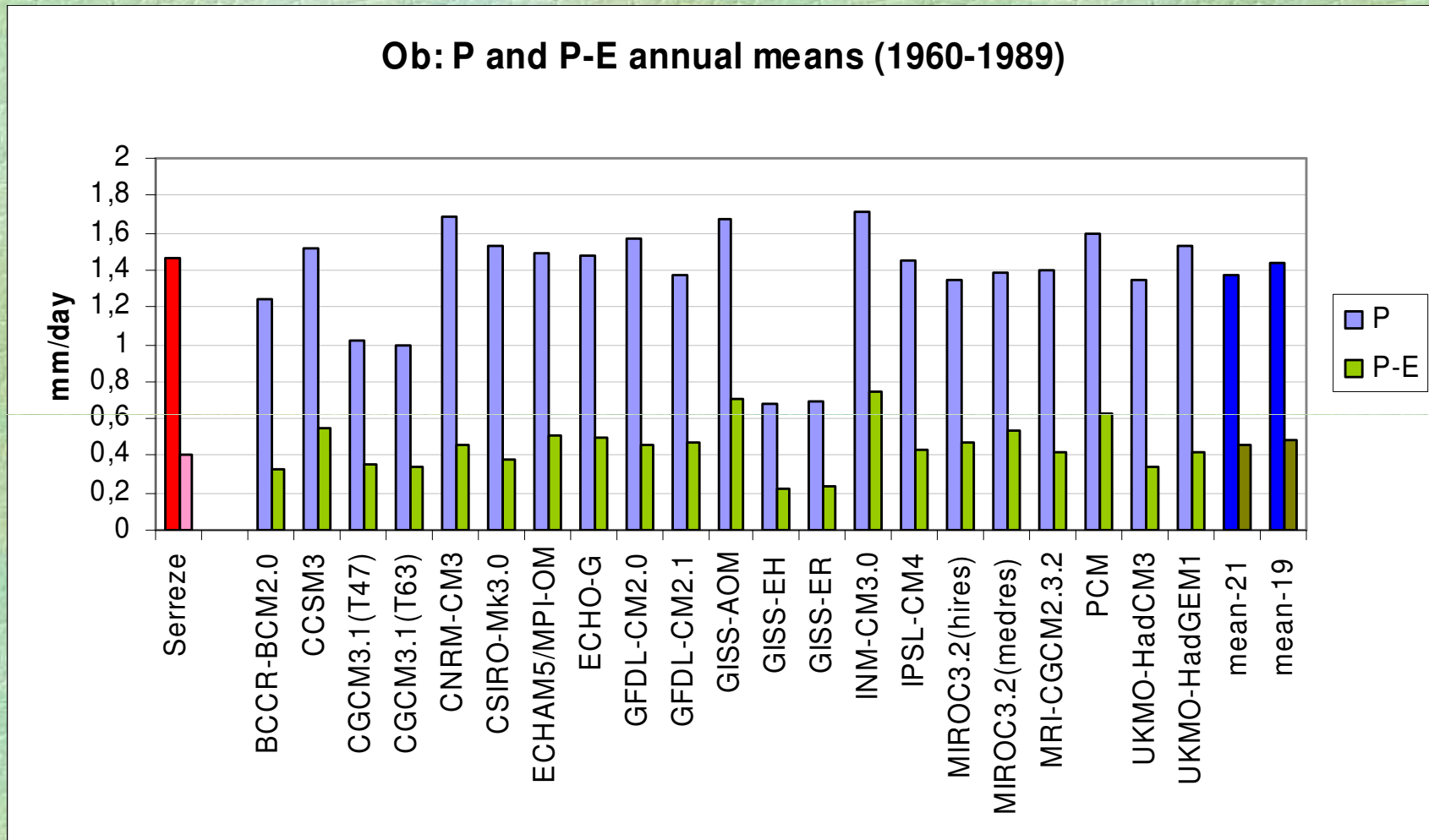
c) Runoff

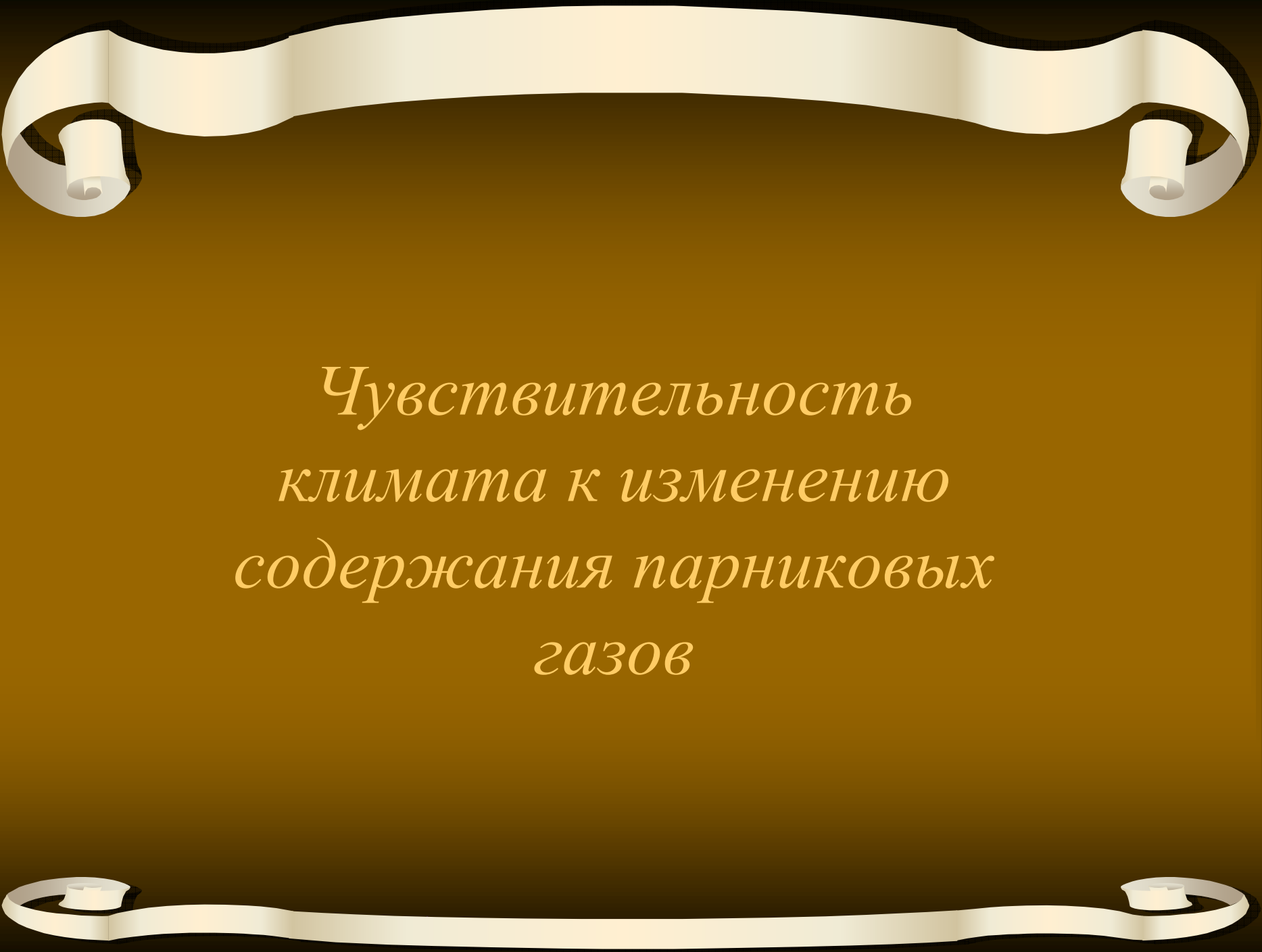


d) Evaporation



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.*





*Чувствительность
климата к изменению
содержания парниковых
газов*

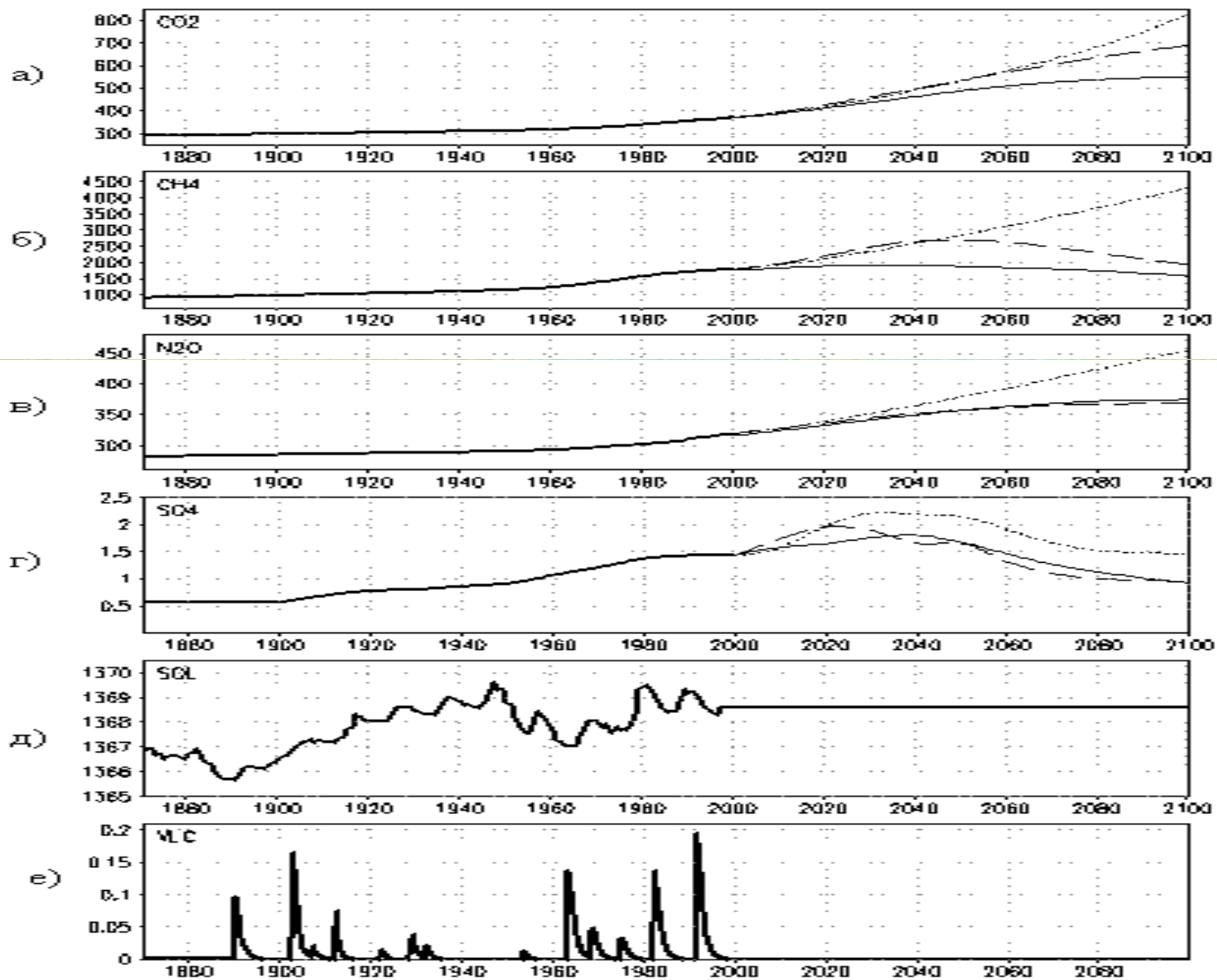
IPCC Scenarios

- **A1:** a world of very rapid economic growth, low population growth, and rapid introduction of new and more efficient technologies.
- **A2:** a heterogeneous world; population growth is high and economic growth and technological change are slower than in other scenarios.
- **B1:** a world with low population growth, rapid change to an information and service economy, corresponding to cleaner technology and less reliance on natural resources.
- **B2:** a world reliant on local solutions to global problems; population growth is moderate, intermediate levels of economic development exist and there is more diverse technological change than in the A1 or B1 scenarios.

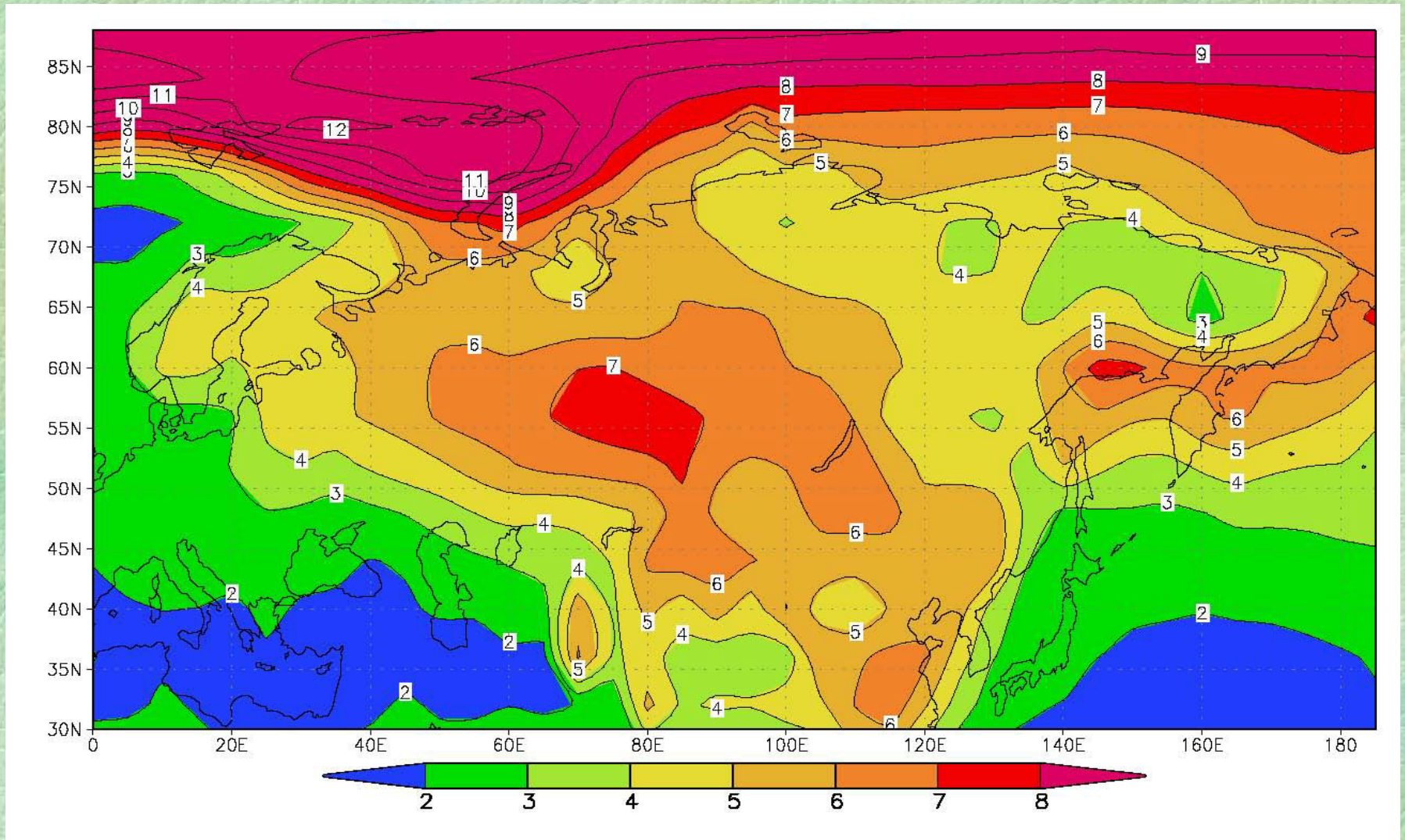
Dividing A1 into four subcategories results in a total of seven scenarios that are utilized in the modeling process. In particular,

- **A1B:** a moderate resource user with a balanced use of technologies.

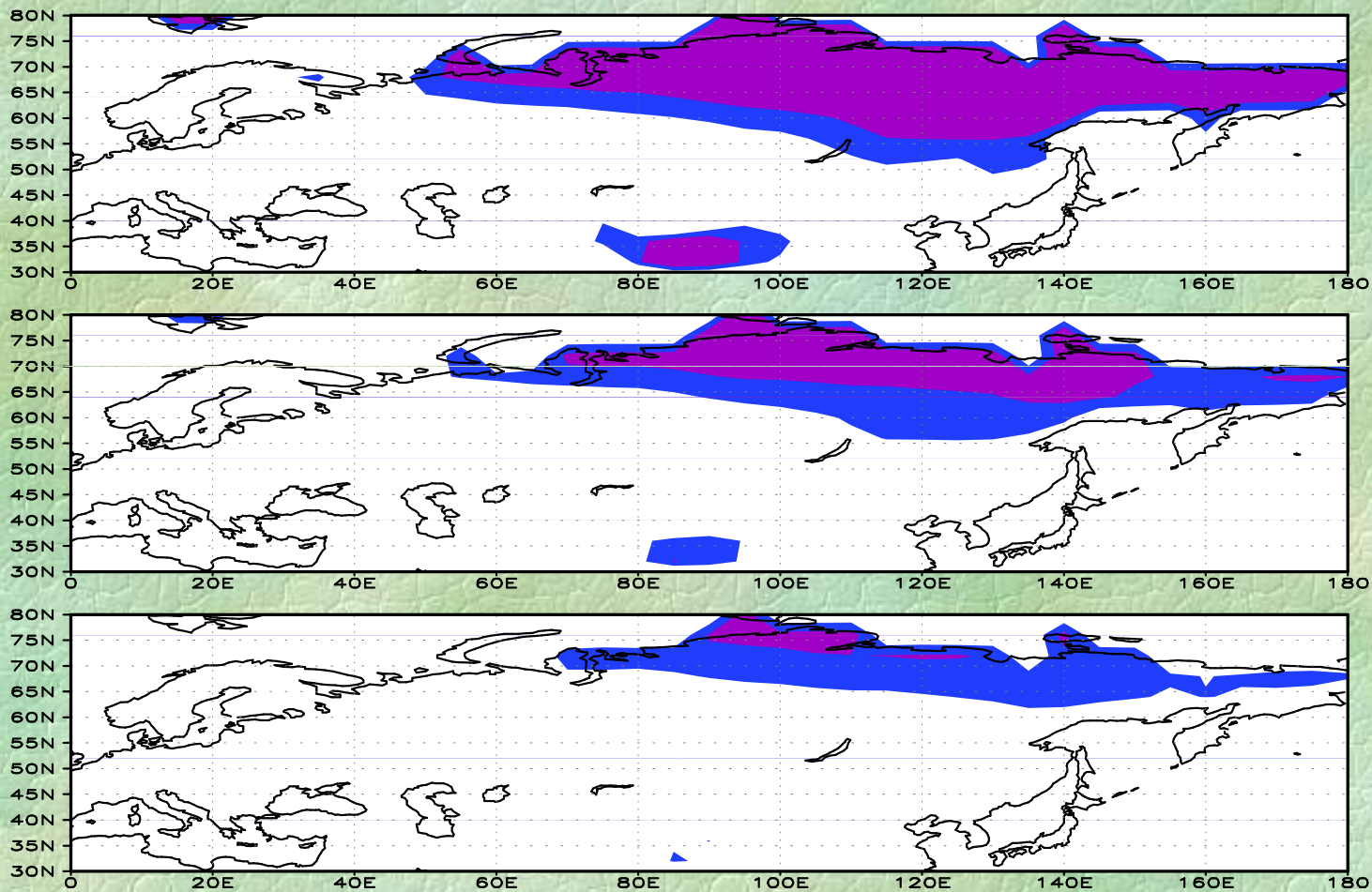
Изменение содержания (а) углекислого газа (частей на миллион), (б) метана (частей на миллиард), (в) закиси азота (частей на миллиард), (г) интегрального сульфатного аэрозоля (мг/м), (д) солнечной постоянной (Вт/м) и (е) интегральной оптической толщины вулканического аэрозоля (безразм.) в экспериментах XX (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: в 1981-2000 гг. (верх), 2081-2100 гг. при сценарии В1 (середина) и в 2081-2100 гг. при сценарии А2 (низ)





Регионализи́ация

Региональные аспекты

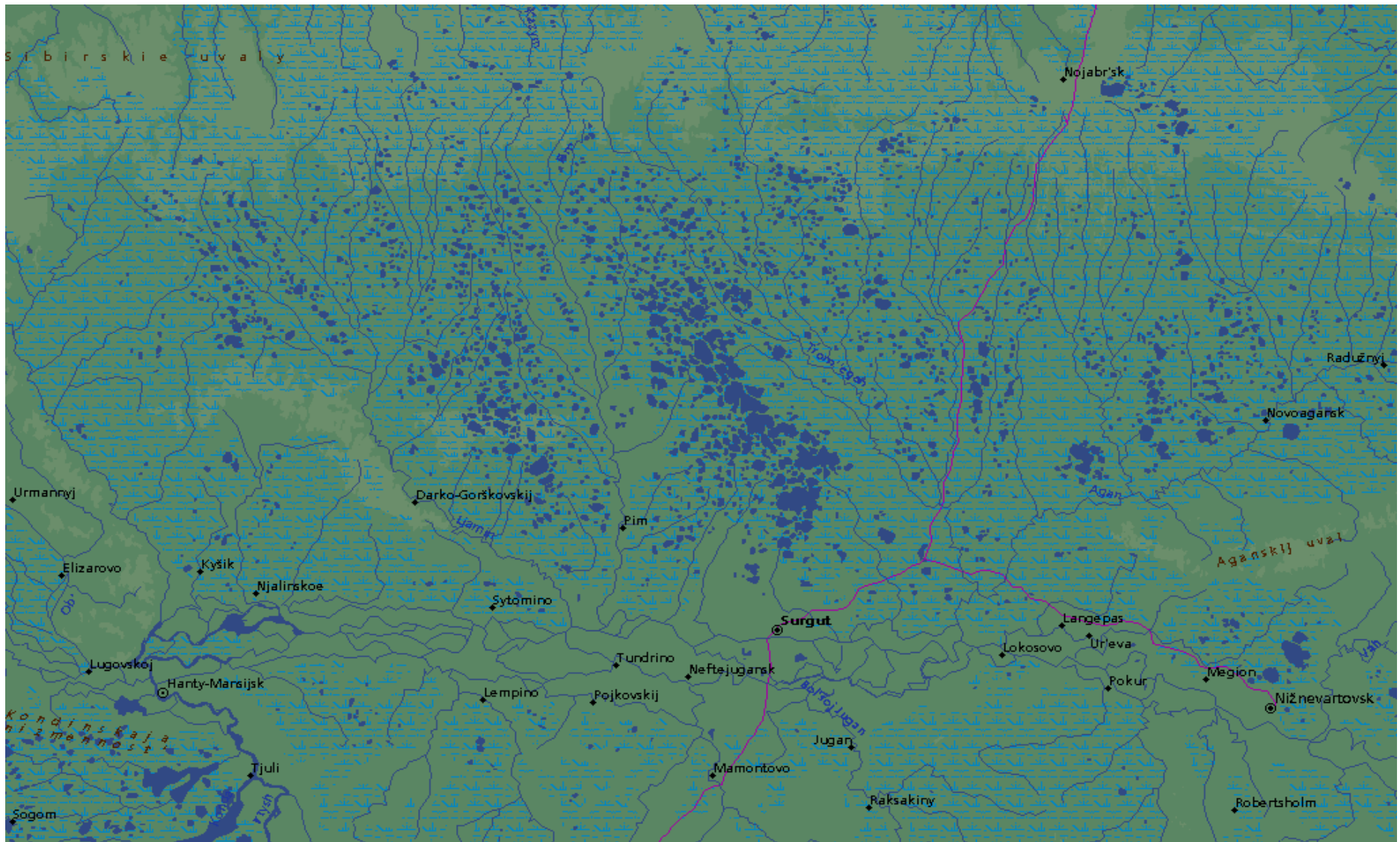
- **Атмосферные** модели, в том числе глобальные климатические с улучшенным пространственным разрешением в изучаемом регионе и негидростатические мезомасштабные модели (параметризация мезомасштабной изменчивости)
- Модели **водосборов**, включая разработку моделей русловых потоков (параметризация гидрологического 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)

Неопределенности

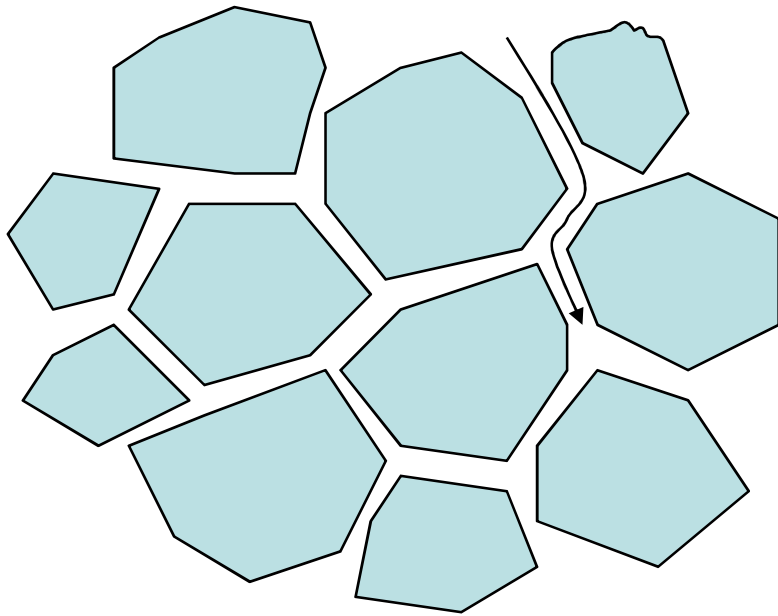
Точная *величина* “климатического” сигнала в отклике поверхности суши неизвестна (и не может быть установлена?)

- Климатическая неопределенность (сценарии, чувствительность, региональный отклик и т.д.)
- Погрешности моделей деятельного слоя суши
- Неполнота описания физических процессов
-

Пример гидрологической неоднородности в Ханты-Мансийском автономном округе - Югре

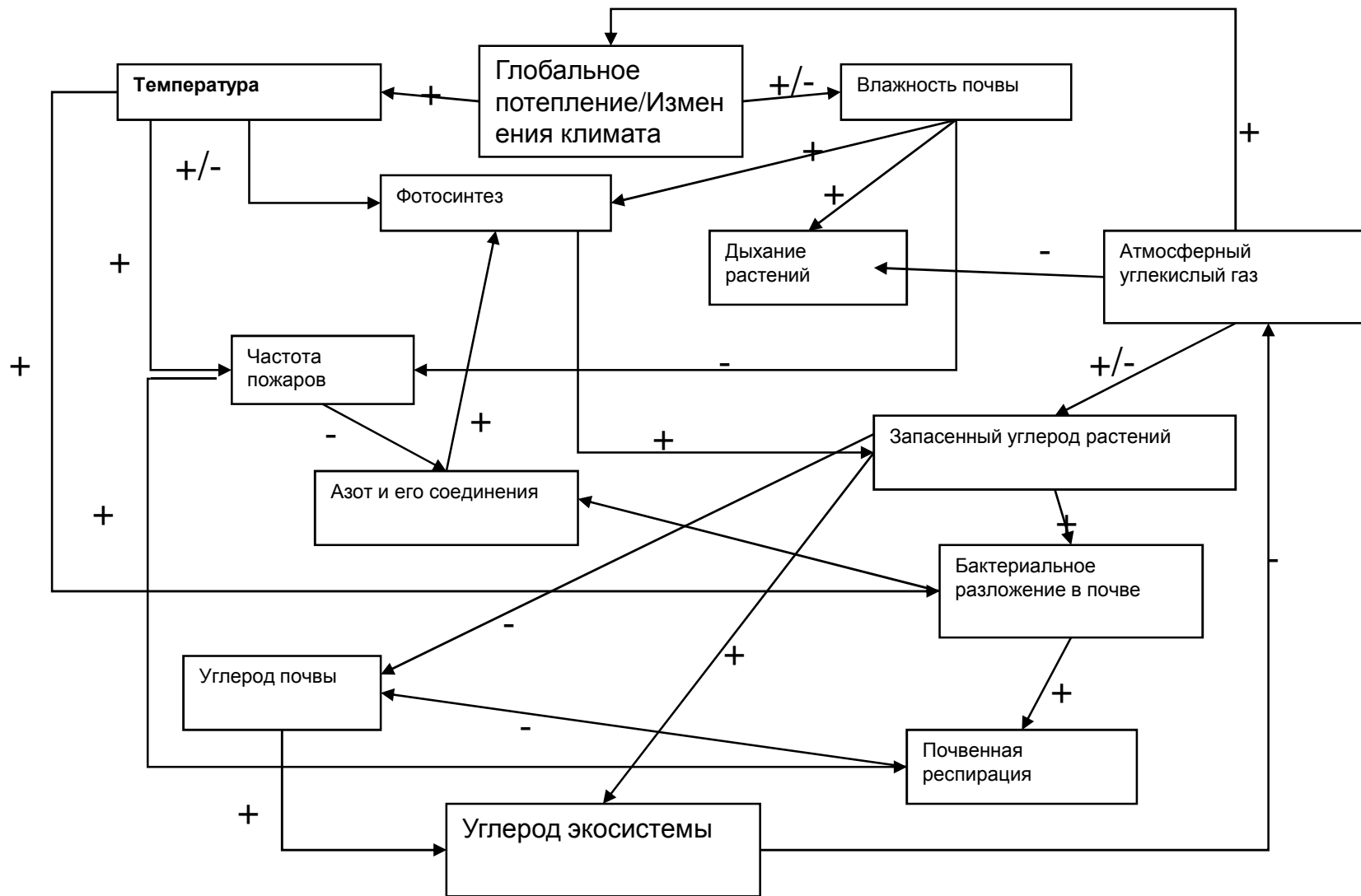


Soil Moisture Processes (E. Blyth, 2007)

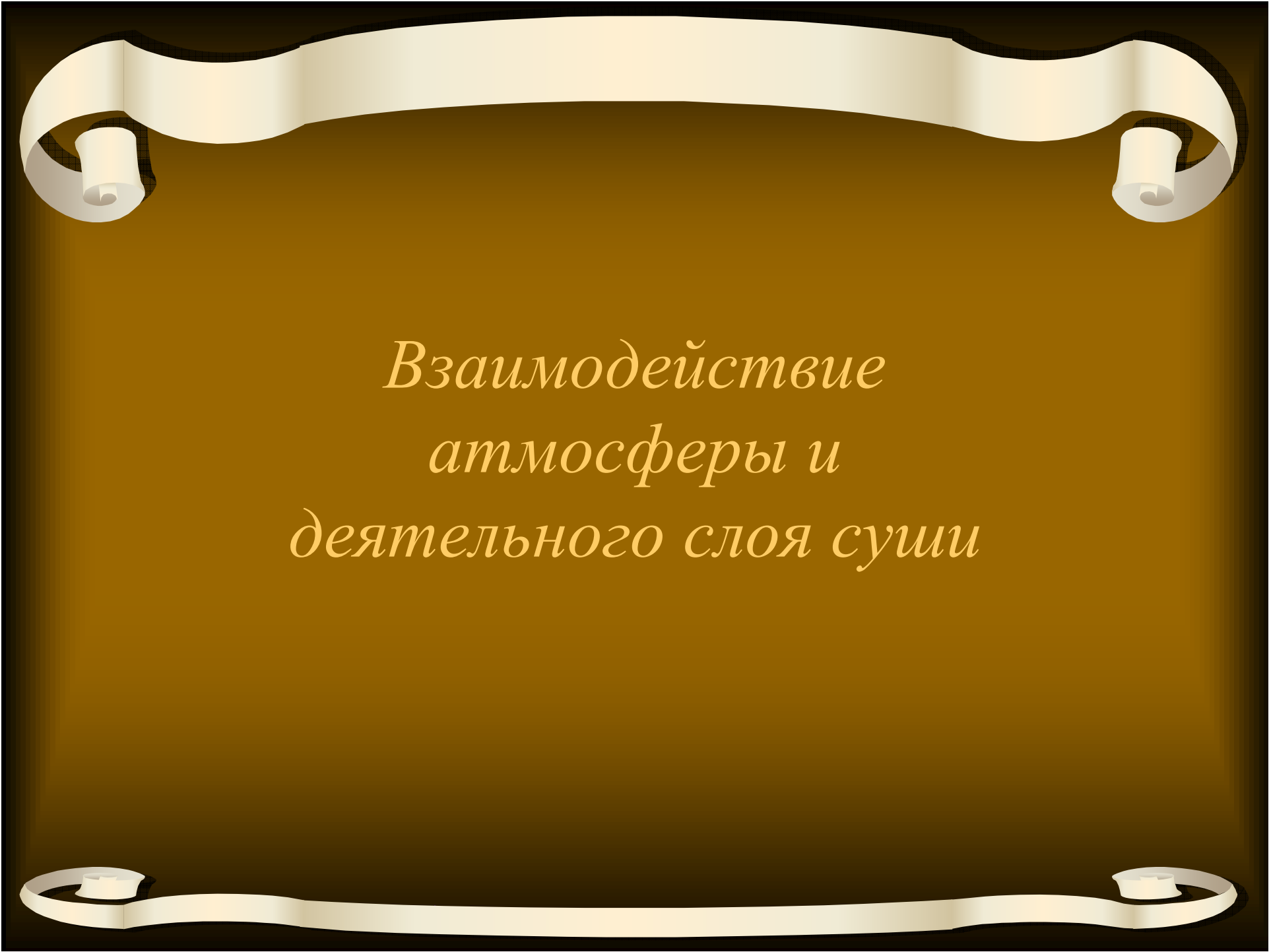


- Gravity
- Surface tension
- Drainage
- Upward flow
- Groundwater
- Evaporation
- Soil Freezing
- Vapour Flow
- Soil swelling/cracking
- Macropores
- Organic soils
- Chalk Soils





Углеродный цикл в экосистемах суши (Lashof et al., 1997)

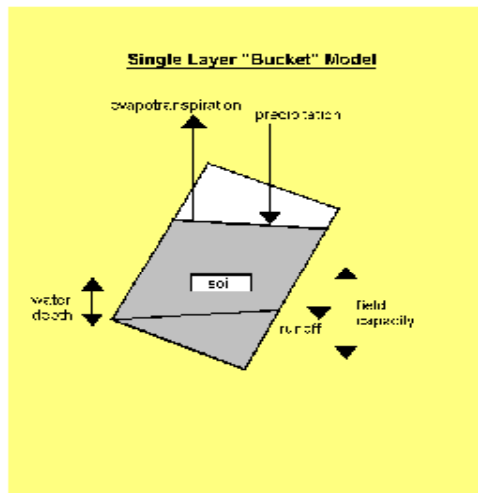


*Взаимодействие
атмосферы и
деятельного слоя суши*

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

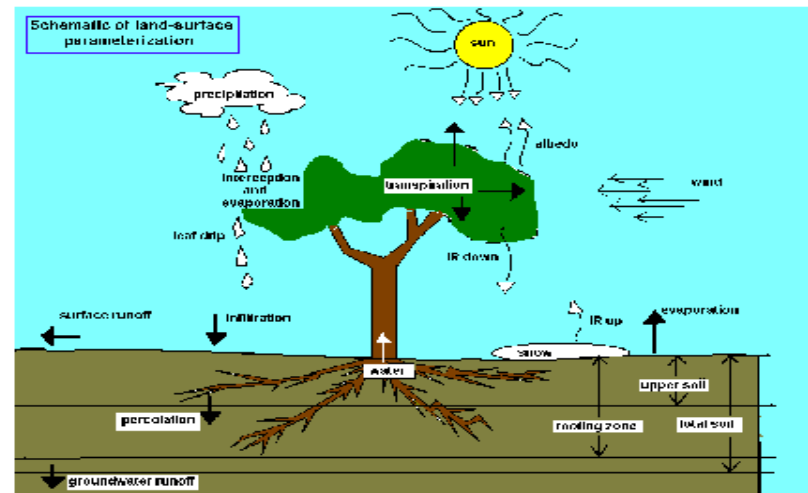
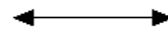
The Overarching Question:

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

Тепловлагоперенос в почве

Уравнения тепловлагопереноса в почве с учетом корневой системы растительности могут быть записаны следующим образом:

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

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_w \left(\frac{\partial W}{\partial z} + \delta \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_i - F_v - \dot{R}_f - \dot{R}_r,$$

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

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

Здесь γ - скорость инфильтрации воды под действием силы тяжести; F_i - скорость изменения количества жидкой влаги и льда за счет процессов замерзания/таяния; F_v - скорость изменения содержания водяного пара и воды за счет процессов испарения/конденсации; \dot{R}_f - скорость изменения влагосодержания за счет горизонтального стока воды; \dot{R}_r - скорость всасывания воды корневой системой растительности.

Если поверхность почвы покрыта снегом толщиной h , то для описания процессов тепло- и влагопереноса в слое $(-h, 0)$ привлекаются следующие уравнения

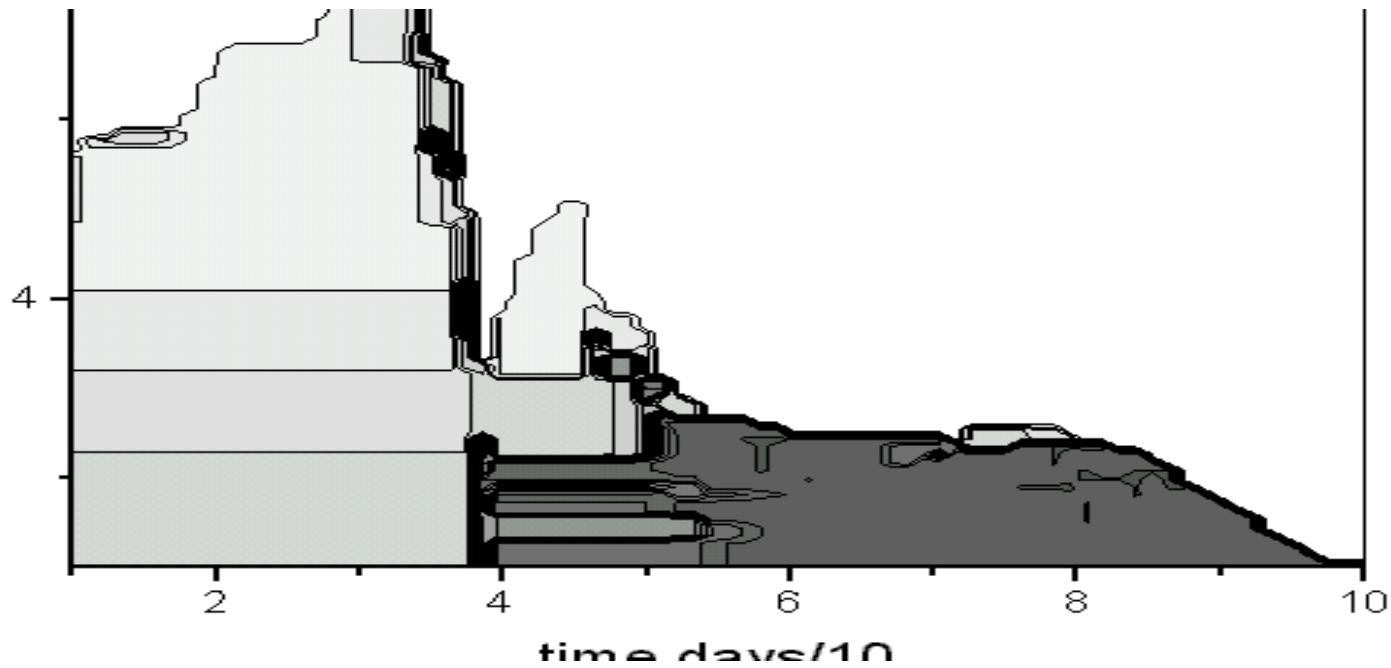
$$\rho_{sn} C_{sn} \frac{\partial T_{sn}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{T_{sn}} \frac{\partial T_{sn}}{\partial z} + \rho_{sn} L_i F_{sn} ,$$

$$\frac{\partial W_{sn}}{\partial t} = \frac{\partial \gamma_{sn}}{\partial z} - F_{sn} ,$$

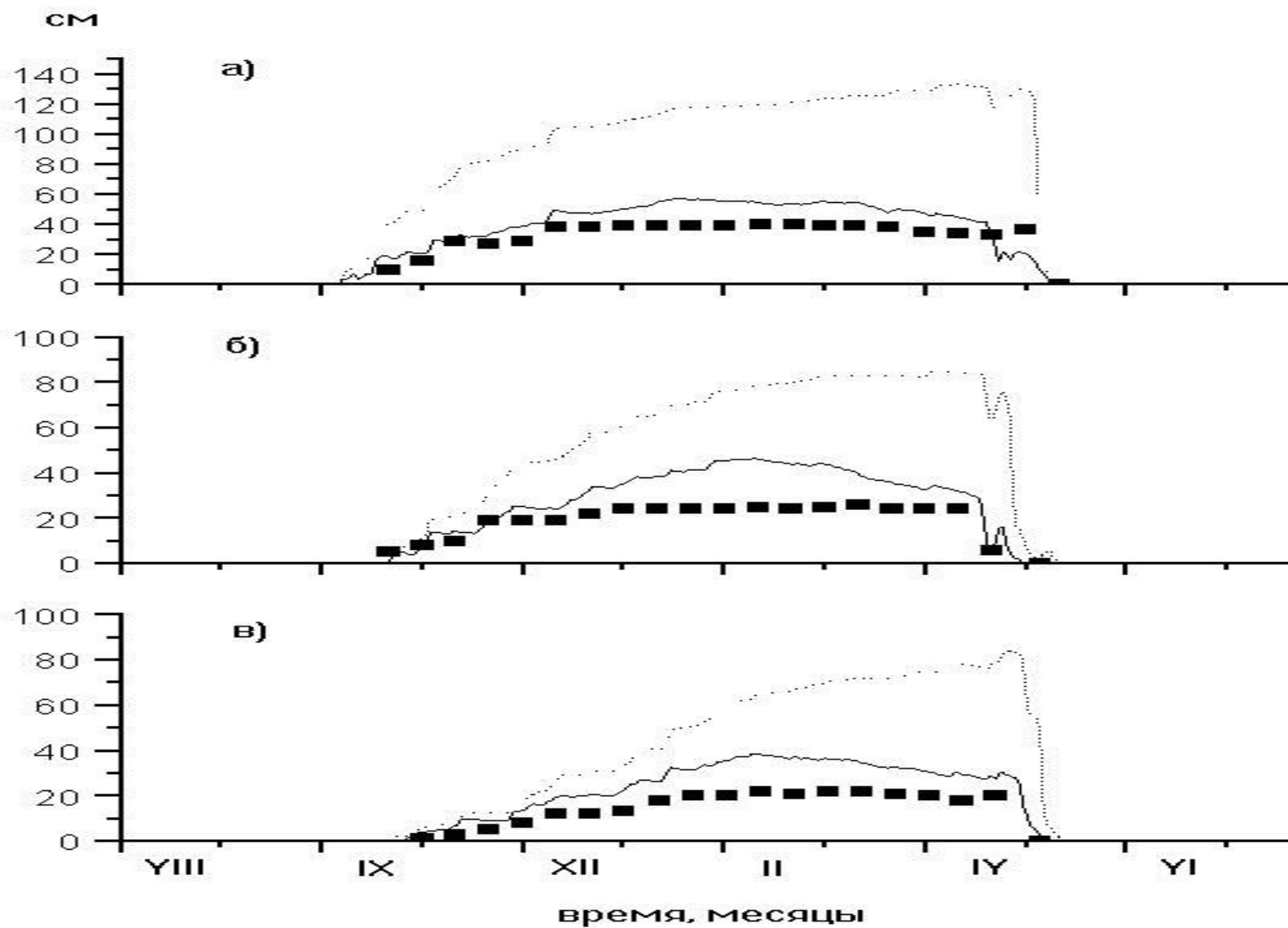
в которых T_{sn} - температура снега, W_{sn} - его суммарное (вода и лед) влагосодержание, а ρ_{sn} , C_{sn} , λ_{sn} и γ_{sn} представляют собой плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и гидравлическую проводимость, соответственно. Слагаемое F_{sn} аналогично по своему физическому смыслу слагаемому F_i в уравнениях для почвы.

Высота снежного покрова связана с его водноэквивалентной толщиной, которая, в свою очередь, определяется осадками, испарением и таянием снега. При этом учитывается, что в течение всего периода существования снежного покрова плотность снега может значительно изменяться со временем вследствие процессов **метаморфизма и гравитационного оседания**. Кроме того, при расчете потока влаги за счет испарения приняты во внимание эффекты растительности.

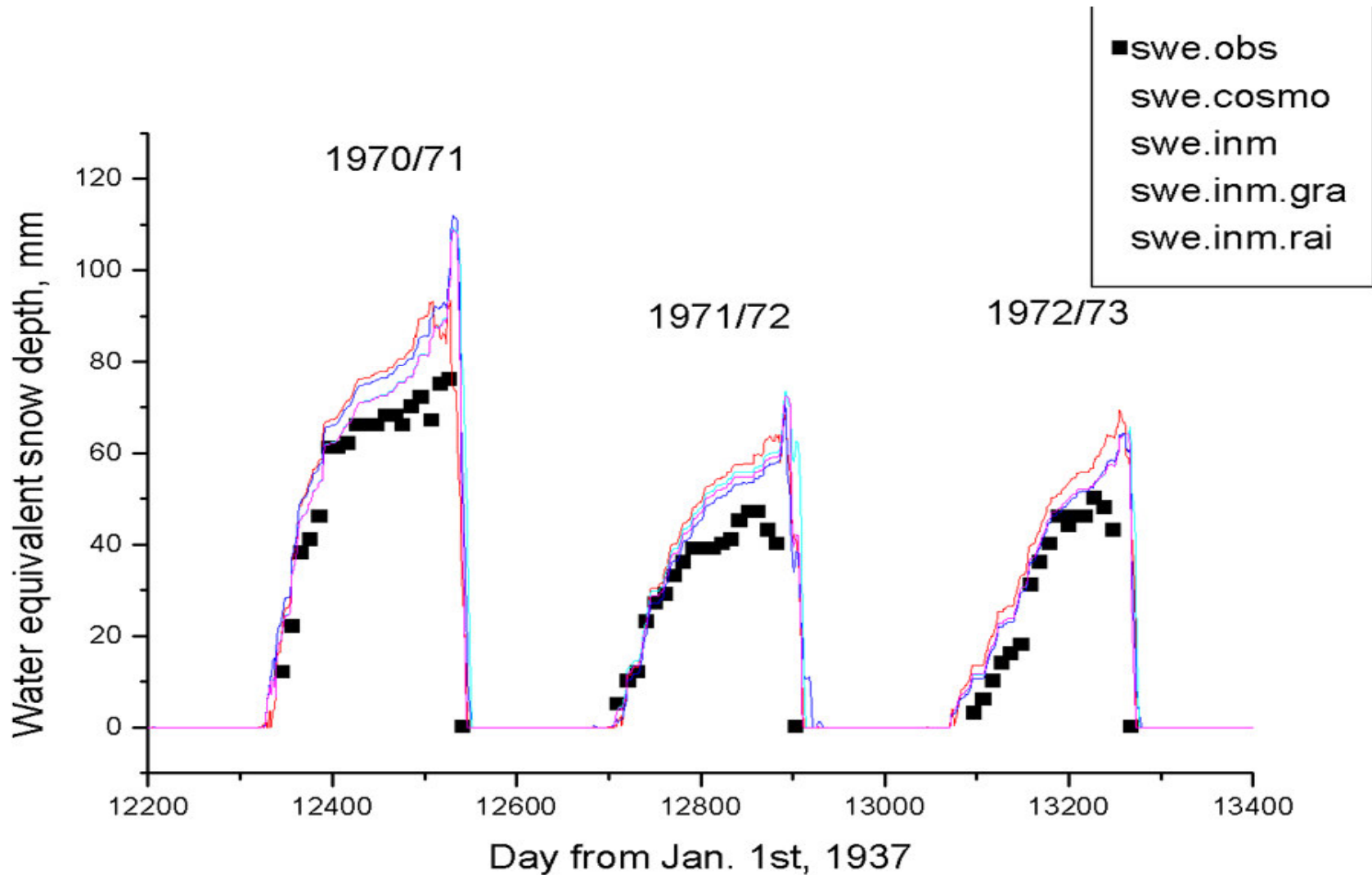
**Толщина снежного покрова по данным моделирования
для ст. Валдай (февраль-апрель 1977 г.).
Изолинии: плотность снега**



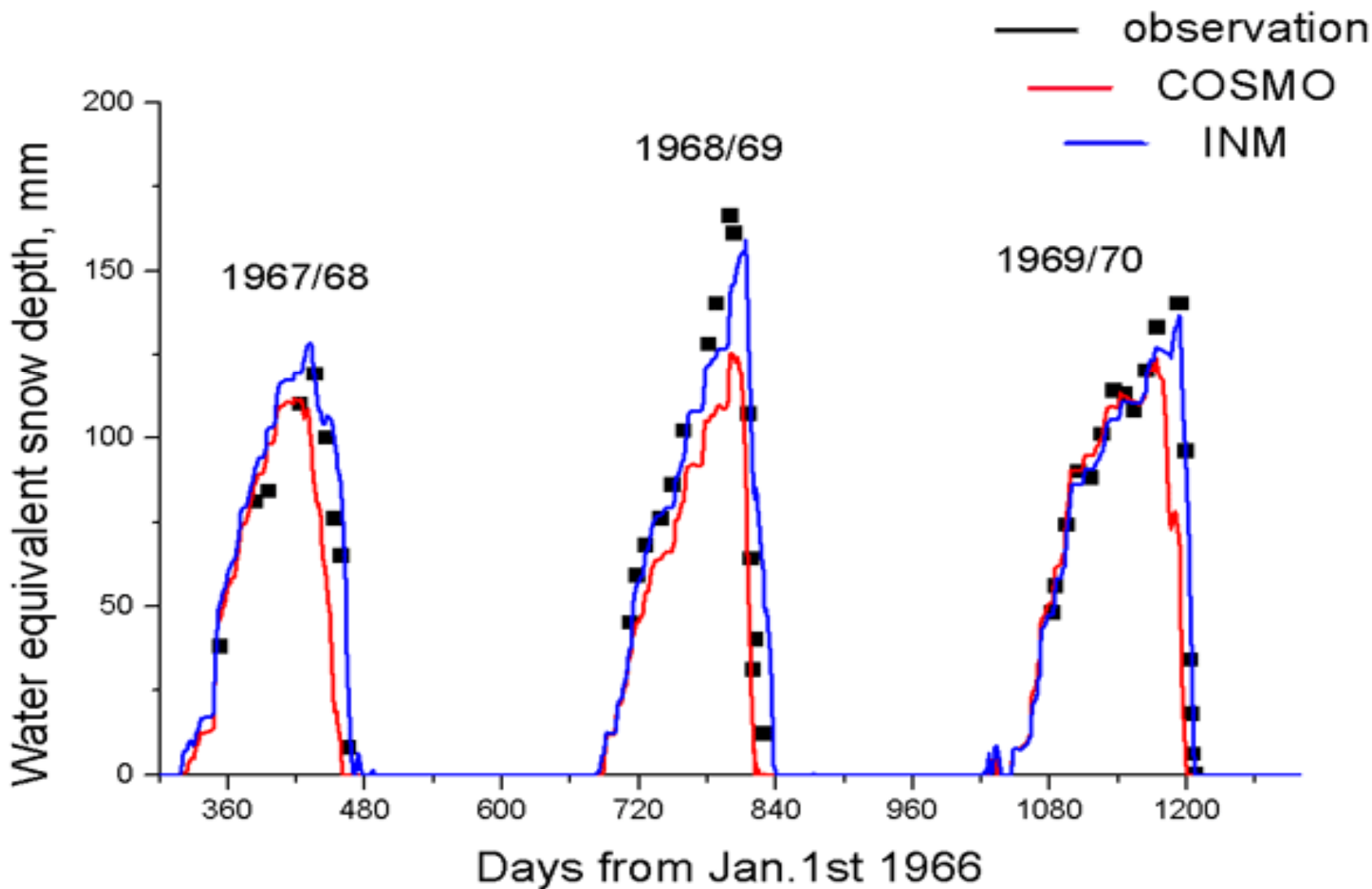
**Высота снежного покрова в Якутске: 1970/71 (а), 1971/72 (б), 1972/73 (в).
(Мачульская и Лыкосов, 2002)**



Временной ход наблюдаемой (черная кривая) и модельной водно-эквивалентной толщины снежного покрова в Якутске (красная кривая: модель COSMO - Consortium for Small-scale Modeling, остальные кривые: модель ИВМ РАН)



Временной ход наблюдаемой (черная кривая) и модельной водно-эквивалентной толщины снежного покрова на Валдае (красная кривая: модель COSMO, синяя кривая: модель ИВМ РАН)



Volodina, Bengtsson and Lykosov (2000)

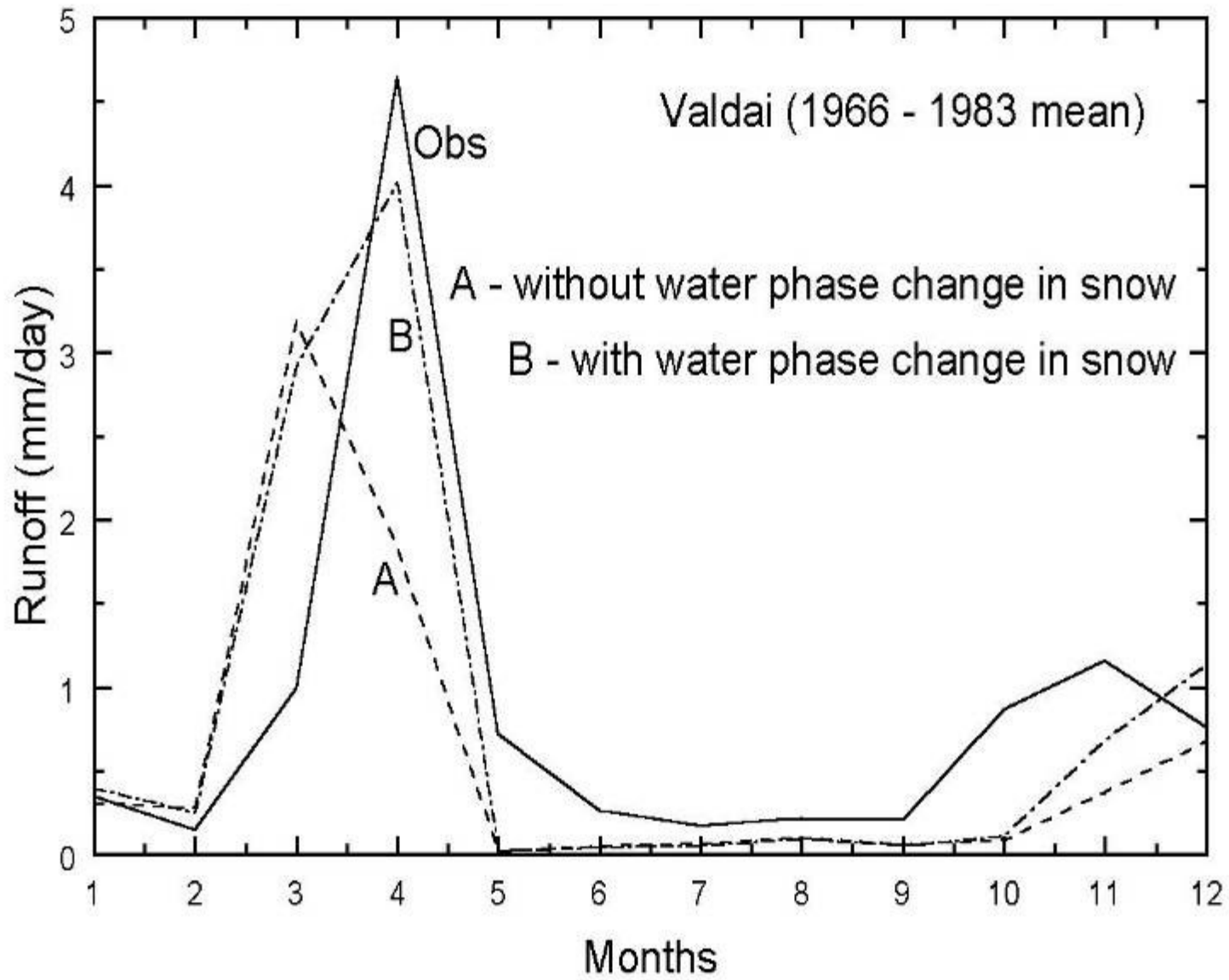
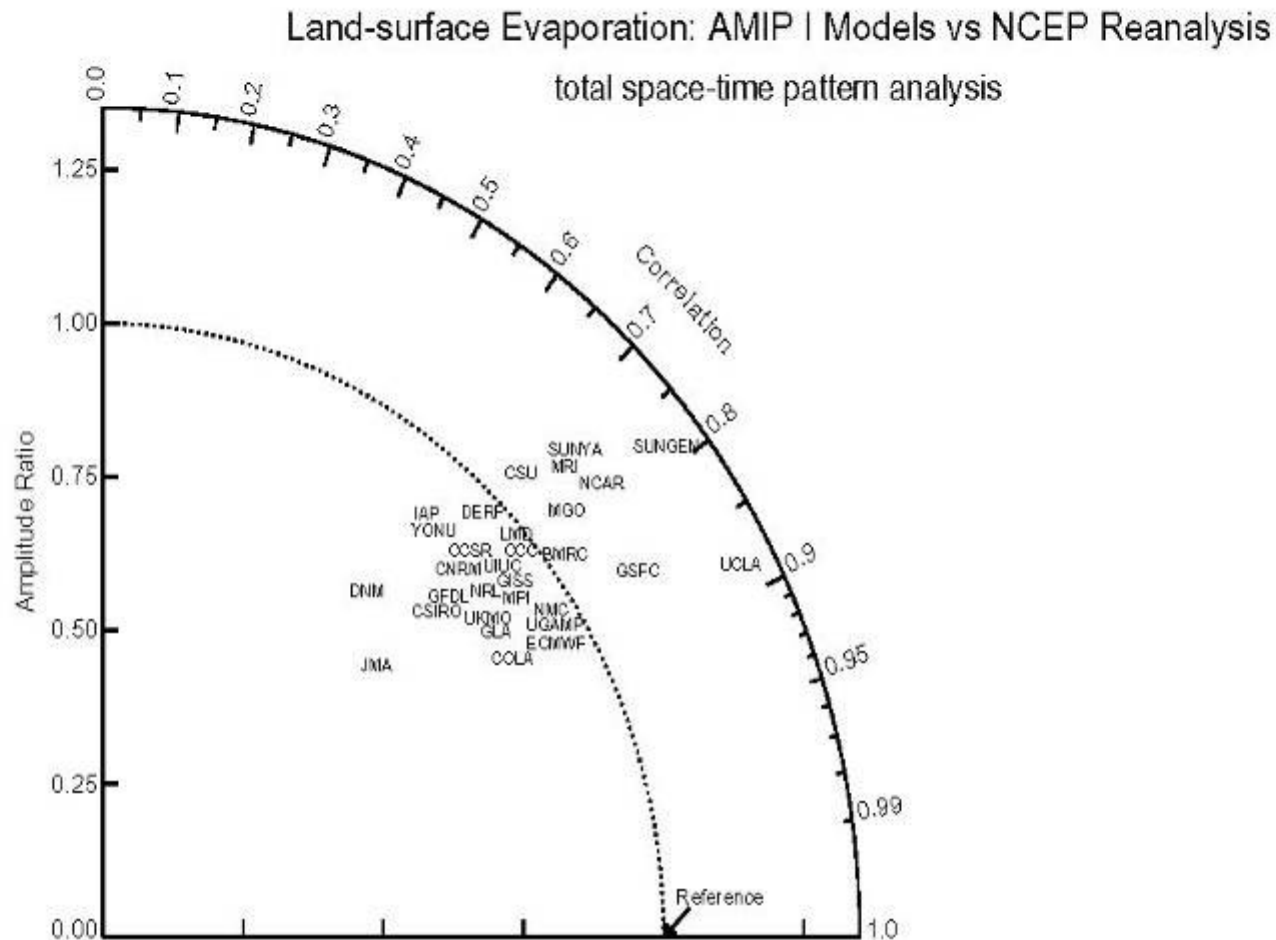




Диаграмма Тейлора структуры модельных полей изменчивости (1979-1988 г.г.) monthly averaged evaporation on the surface of land by results of AMIP-I in comparison with reanalysis data (“Reference”) NCEP (Phillips et al., 2000).



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



- 1) Необходимость 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**
- 

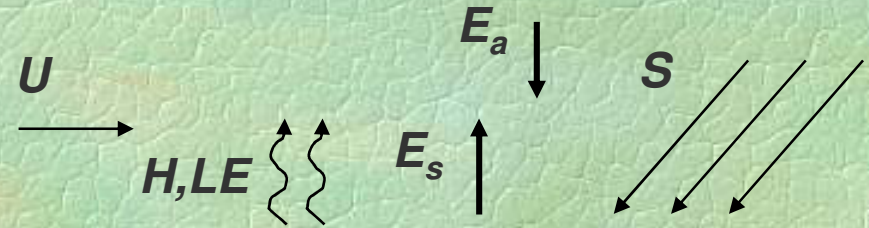
Создание и внедрение в атмосферную модель блока гидрологических процессов на суше;

Одна из важнейших составляющих гидрологического блока – модель водоема

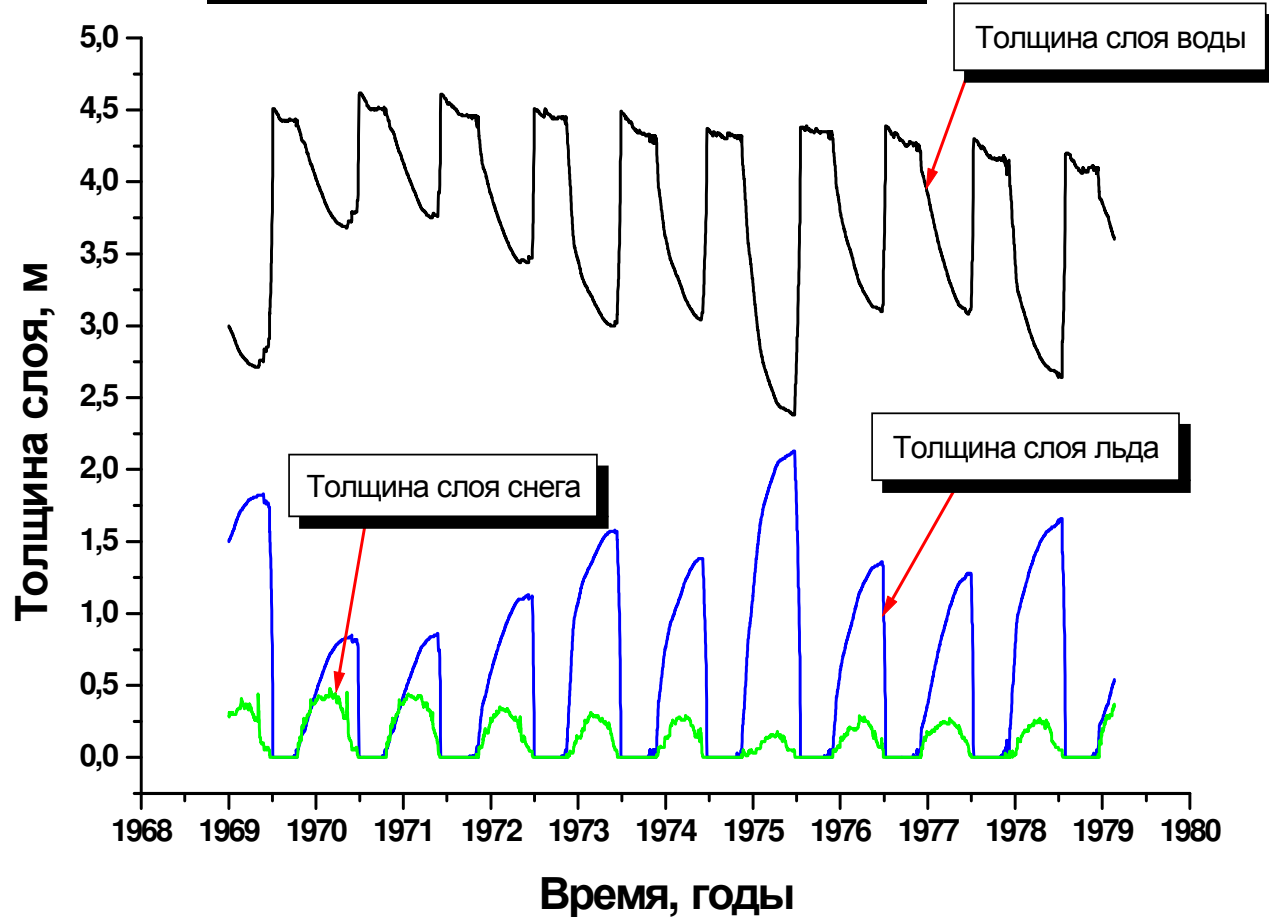
Модель мелкого водоема (Степаненко и Лыкосов, 2005)

- 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.



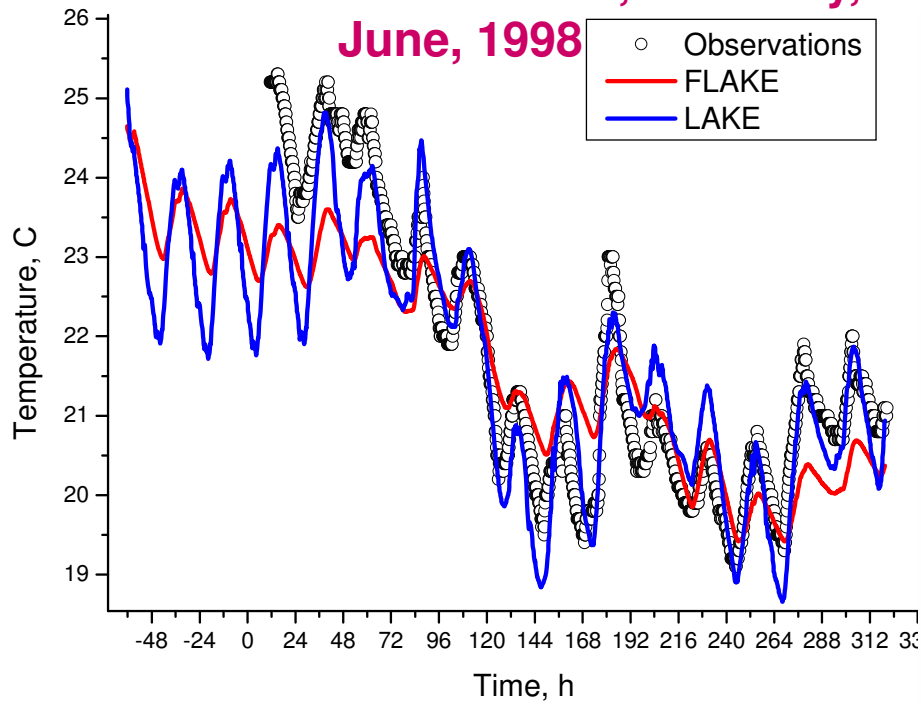
Многолетний ход промерзания/таяния в оз. Сырдах (1970-е гг.)
по данным моделирования (2003 г.)



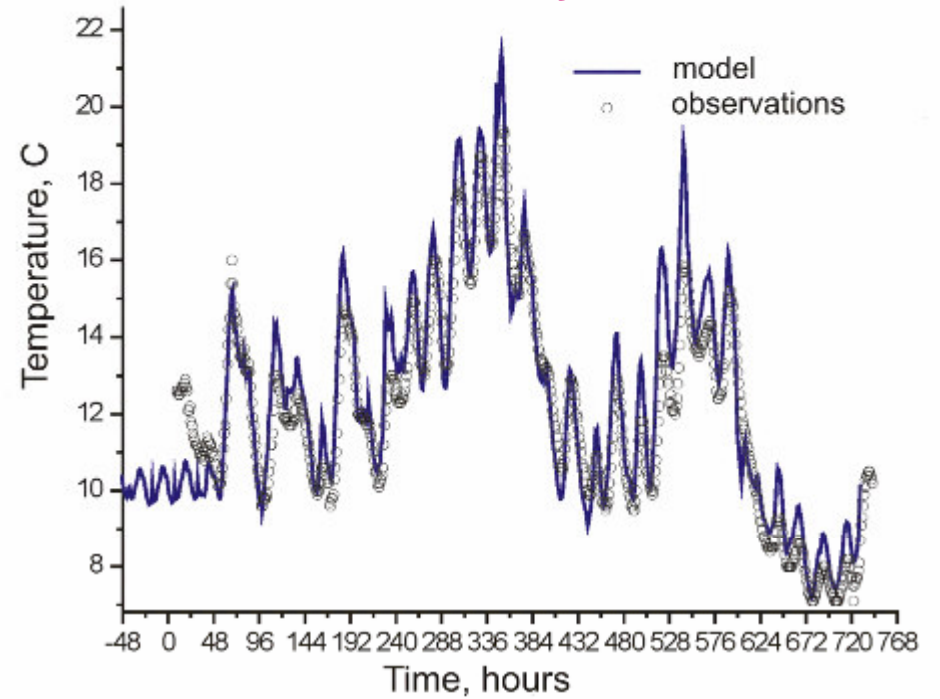
При интегрировании модели в качестве **Внешнего воздействия** использованы данные измерений на метеорологической станции г. Якутск

На рис. видно, что **максимальное промерзание** модельного водоема происходит в малоснежные зимы, и наоборот. Это соответствует реально наблюдаемой закономерности.

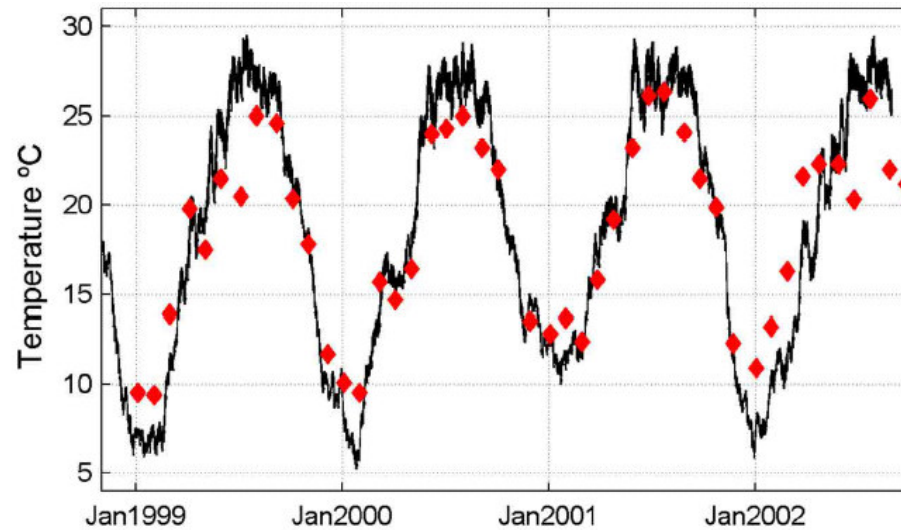
**Lake Kossenblatter, Germany,
June, 1998**



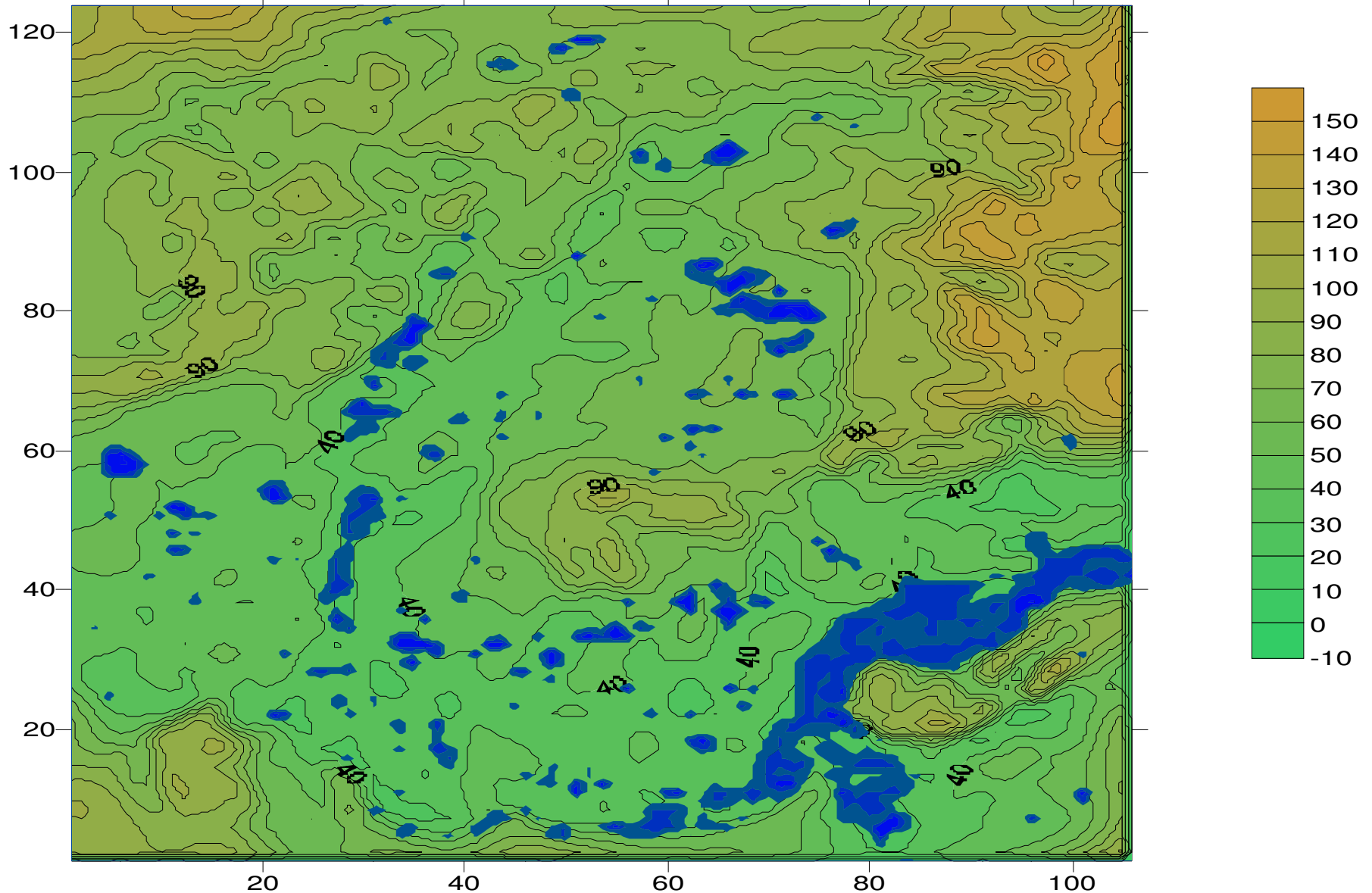
Tiksi, July, 2002



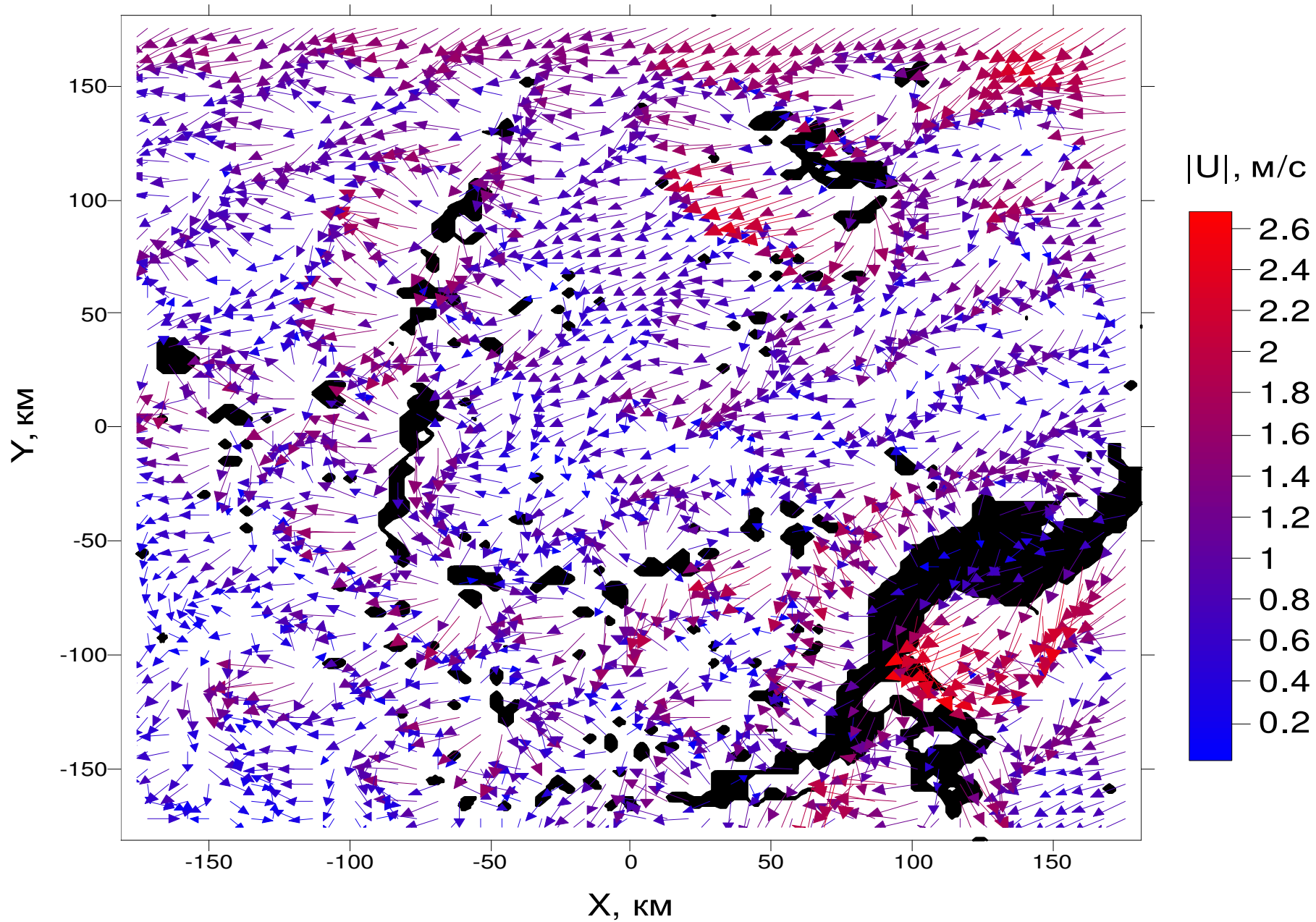
**Monte-Novo lake,
Portugal,
1999 - 2002**



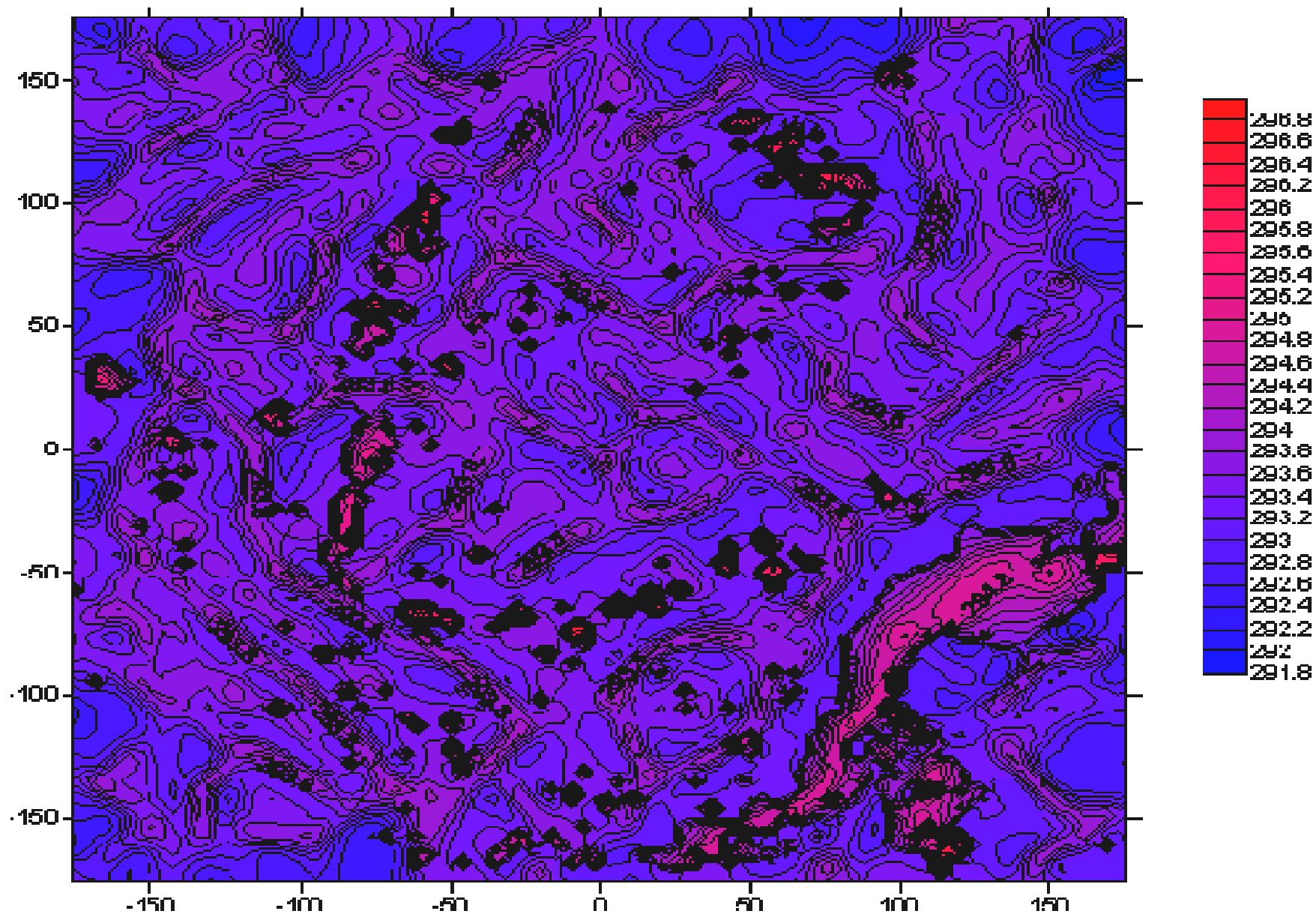
Ханты-Мансийский АО, 54.5-58.6° с.ш., 63.1-66.6° в.д.,
рельеф и внутренние водоемы, разрешение сетки 3.7 км



Скорость ветра



Температура поверхности (в градусах Кельвина)



Instruction Report EL-02-1
August 2002

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

where B_s is the width at the surface.

Equation of State

The density must be known for solution of the momentum equations. The equation of state is an equation that relates density to temperature and concentration of dissolved substances. This equation is given by:

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS}) \quad (\text{A-50})$$

where $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$ is a density function dependent upon temperature, total dissolved solids or salinity, and inorganic suspended solids.

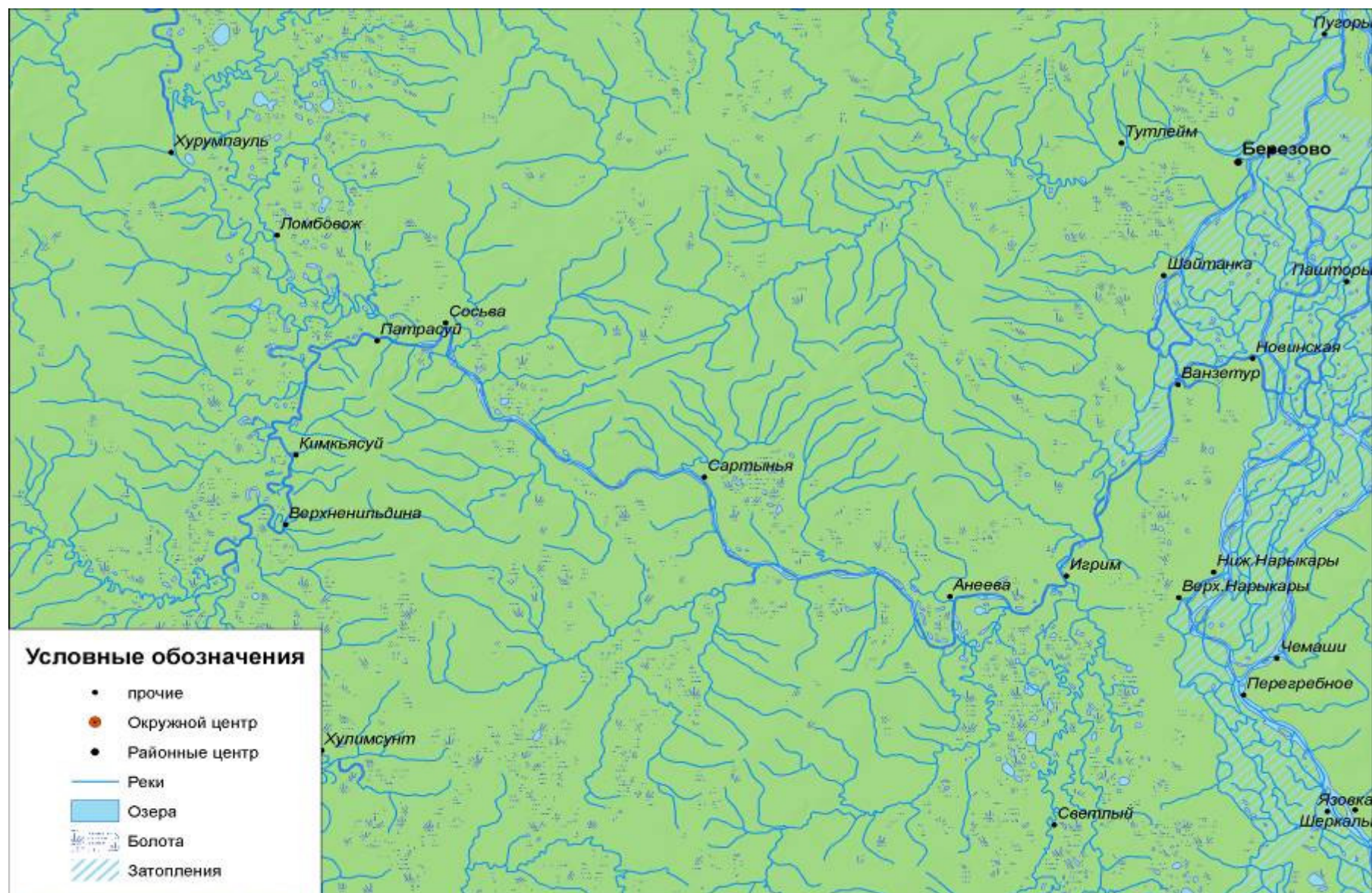
Summary of Governing Equations

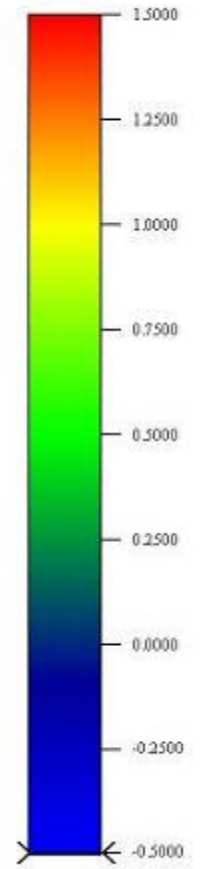
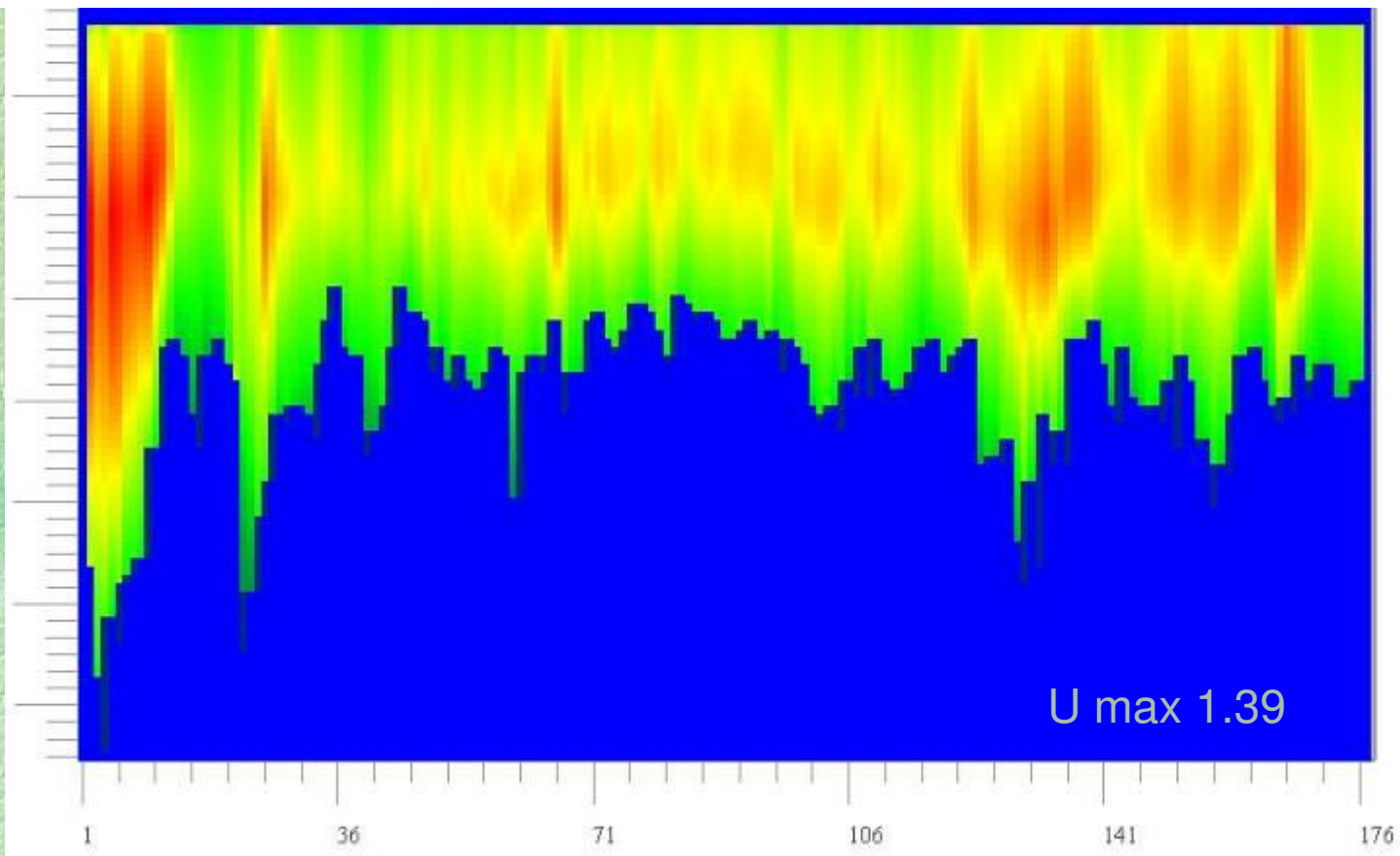
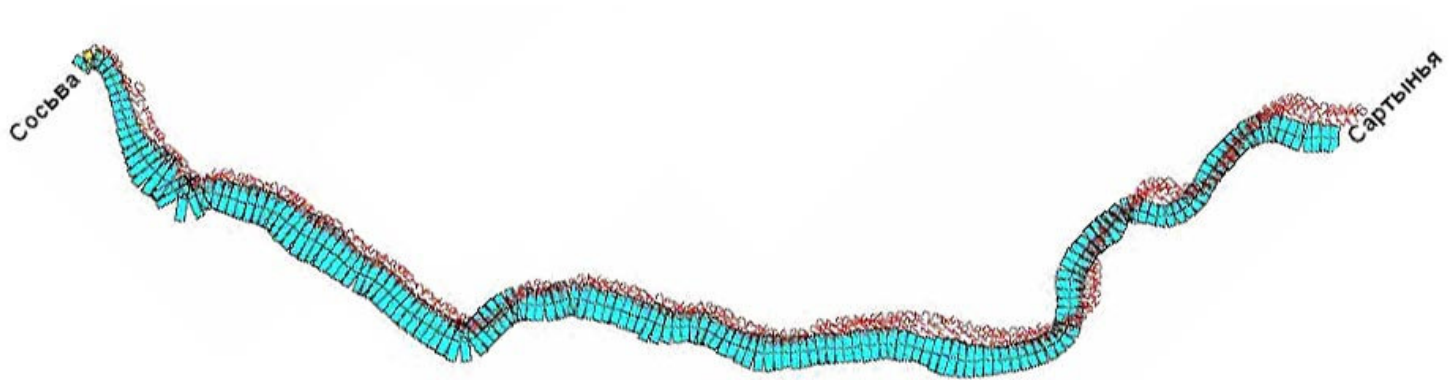
Table A-1 shows the governing equations after lateral averaging for a channel slope of zero (original model formulation) and for an arbitrary channel slope. Parameters used in [Table A-1](#) are illustrated in [Figure A-12](#).

Table A-1. Governing equations with and without channel slope.

Equation	Governing equation assuming no channel slope	Governing equation assuming an arbitrary channel slope and conservation of momentum at branch intersections
x-momentum	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} =$ $gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} \right] dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z}$	$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha$ $+ g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + gBU_x$
z-momentum	$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$	$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$
continuity	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$	$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$
state	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$	$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$
free surface	$B_s \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^{\eta} UB dz - \int_{\eta}^{\eta} qB dz$	$B_s \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^{\eta} UB dz - \int_{\eta}^{\eta} qB dz$

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



Вместо заключения ...

Растительность и испарение с поверхности суши

Предполагается, что какая-либо приписанная к суше ячейка конечно-разностной сетки в модели общей циркуляции атмосферы может включать участки: 1) оголенной почвы, 2) покрытые снегом, 3) занятые **внутренними водами**, 4) содержащие сухую и увлажненную растительность различных типов. Расчет потока влаги E за счет испарения рассчитывается по формуле

$$E = \rho_a \sum_i \mu_i (q_i - q_a) / R_i .$$

Здесь μ_i - доля площади ячейки, занятая i -ым видом поверхности, q_i - эффективная влажность на поверхности, R_i - сопротивление. Величина $R_i = 1/(C_H U)$, где U - модуль скорости ветра на ближайшем к поверхности расчетном уровне в модели атмосферы, а C_H - коэффициент тепловлагообмена.

Верификация мозаичного метода агрегирования

Область мезомасштабной модели = Ячейка МОЦА

Прямое осреднение турбулентных потоков по мезомасштабной области («истина»):

1. Потоки вычисляются в каждой точке области

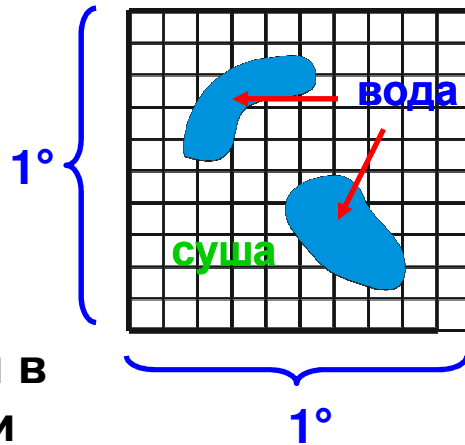
$$H = -\rho c_p C_T u (\theta_a - \theta_s)$$

$$E = -\rho C_E u (q_a - q_s)$$

2. Осреднение потоков по мезомасштабной области

$$\bar{H} = S^{-1} \iint_S H ds'$$

$$\bar{E} = S^{-1} \iint_S E ds'$$



Агрегирование в ячейке МОЦА: мозаичный метод (Avisar and Pielke, 1989)

1. Потоки над типом «водоем»:

$$\tilde{H}_w = -\rho c_p \bar{C}_{Tw} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sw})$$

$$\tilde{E}_w = -\rho \bar{C}_{Ew} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sw})$$

2. Потоки над типом «суша»:

$$\tilde{H}_{so} = -\rho c_p \bar{C}_{Tso} \bar{u} (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_{sso})$$

$$\tilde{E}_{so} = -\rho \bar{C}_{Eso} \bar{u} (\bar{q}_a - \bar{q}_{sso})$$

3. Агрегирование потоков

$$\tilde{H} = (1 - \alpha_w) \tilde{H}_{so} + \alpha_w \tilde{H}_w,$$

$$\tilde{E} = (1 - \alpha_w) \tilde{E}_{so} + \alpha_w \tilde{E}_w$$

Задача:

$$\bar{H} \Leftrightarrow \tilde{H},$$

$$\bar{E} \Leftrightarrow \tilde{E}$$

- Важной характеристикой (региональных, в частности) природно-социальных систем является **понятие их уязвимости** по отношению к изменениям климата.
- Уязвимость – это степень, до которой та или иная природная или социальная система способна противостоять разрушительному воздействию изменений климата.
- Уязвимость является функцией чувствительности системы к изменениям в климате, т.е. зависит от того, насколько сильно реагирует та или иная система на климатические изменения, включая как благоприятные, так и неблагоприятные воздействия.
- **Сильно уязвимой системой** будет система, которая высоко чувствительна к небольшим изменениям в климате и чувствительность которой означает возможность значительных неблагоприятных последствий в условиях низкой способности к адаптации.

- **В связи с этим, необходима разработка такой региональной социально-экономической политики, которая позволила бы региону снизить риск неблагоприятных (в том числе, чрезвычайно опасных) последствий изменений климата в сегодняшних условиях и выработать меры адаптации к будущим изменениям в климате.**
- Проводимые в различных странах, в том числе, и в Институте вычислительной математики РАН (г. Москва), исследования с помощью математических моделей климата позволяют строить прогностические оценки его изменений на длительный срок (вплоть до конца текущего века) при различных сценариях природных и антропогенных воздействий на климатическую систему.



БЛАГОДАРЮ

за ВНИМАНИЕ