
**Международная школа молодых ученых
«Вычислительно-информационные технологии для наук об
окружающей среде: CITES – 2005», Новосибирск, 13-18 марта 2005 г.**

**УСВОЕНИЕ ДАННЫХ О ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СУШИ:
ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ**

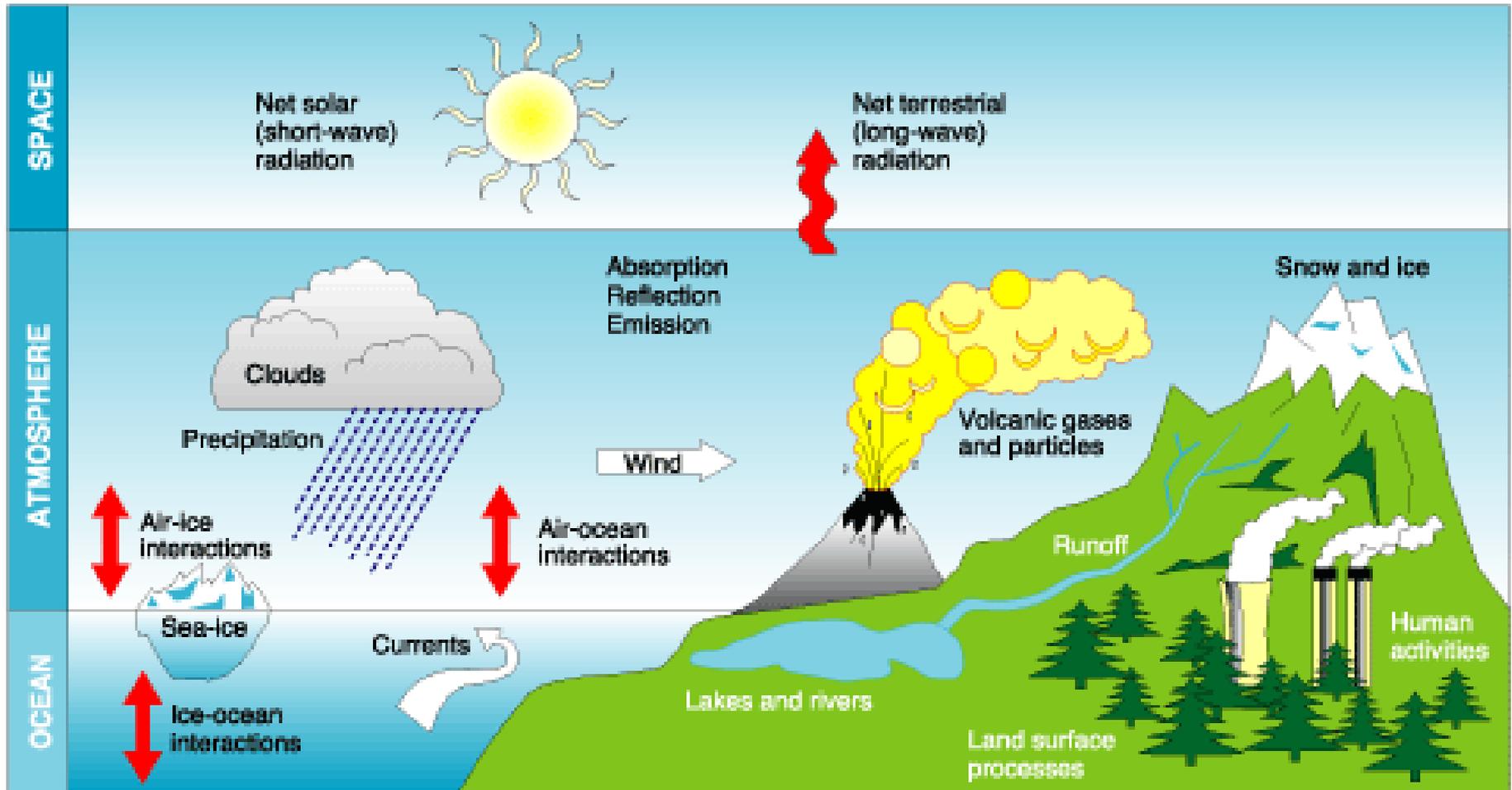
В.Н. ЛЫКОСОВ

**Институт вычислительной математики РАН,
119991, Москва, ГСП-1, ул. Губкина, 8
e-mail: lykossov@inm.ras.ru**

Составляющие климатической системы

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

Климатическая система (Т. Slingo, 2002)



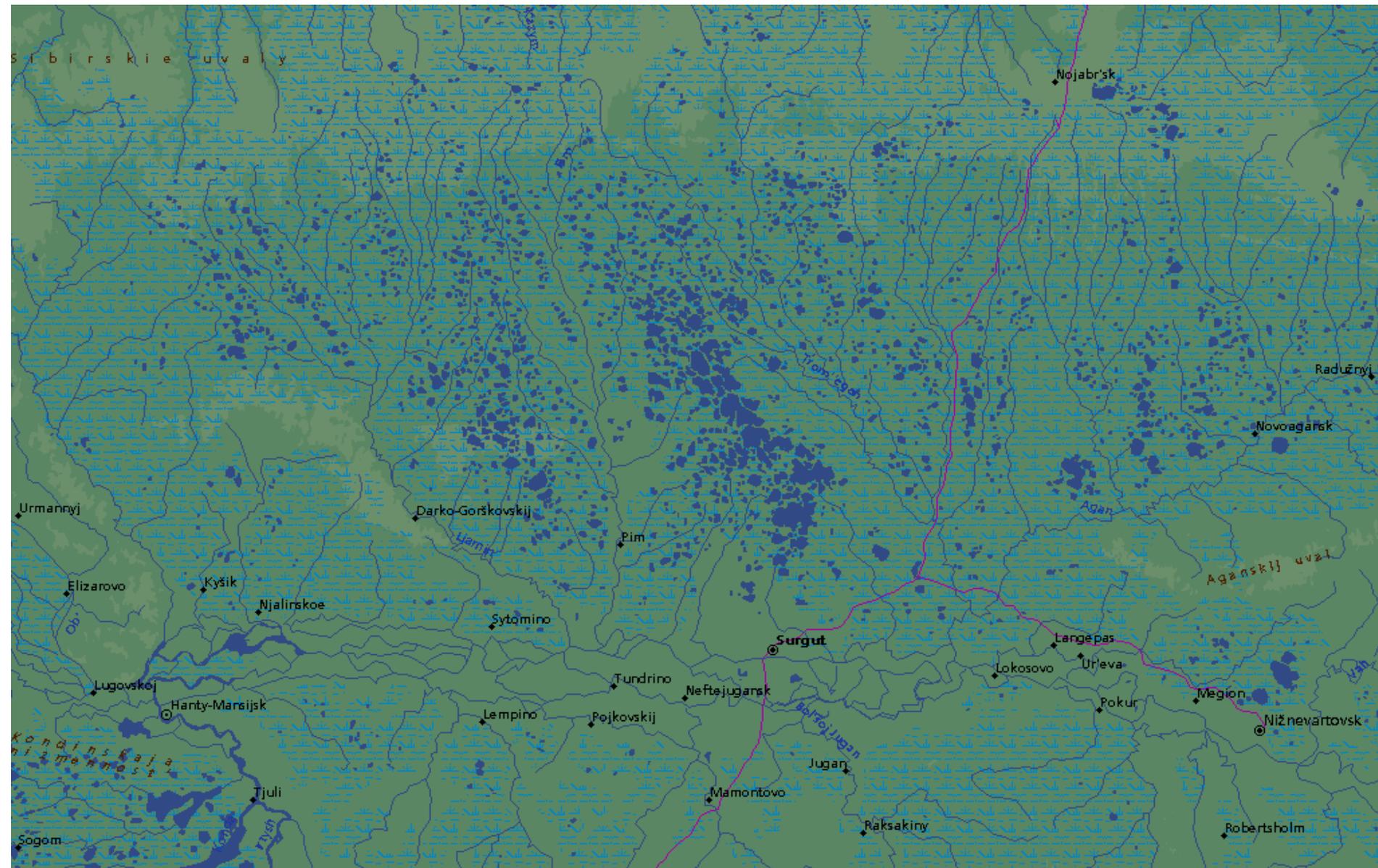
Процессы на поверхности суши и климат

- В средних и высоких широтах термодинамическое влияние почвы сравнимо с тем, что проявляет океан.
 - Океан аккумулирует солнечную энергию летом и отдает накопленное тепло атмосфере зимой.
 - Почва накапливает осадки зимой с тем, чтобы снабжать атмосферу влагой летом и охлаждать ее (Schär et al., 1999) - эффект долговременной памяти с масштабом в несколько месяцев.
 - Увеличение эвапотранспирации прямым или косвенным образом усиливает осадки (на масштабах в несколько сотен километров).
 - Сильный отклик в осадках на вариации в эвапотранспирации как на глобальном, так и на региональном масштабах (Shukla & Mintz, 1982).
 - Роль аномалий влажности почвы в формировании засух и наводнений (Giorgi et al., 1996): максимальный отклик достигался в летних конвективных условиях при слабой синоптической активности.
-
- Анализ данных наблюдений о межгодовой изменчивости влажности почвы и осадков показывает их региональную связь.

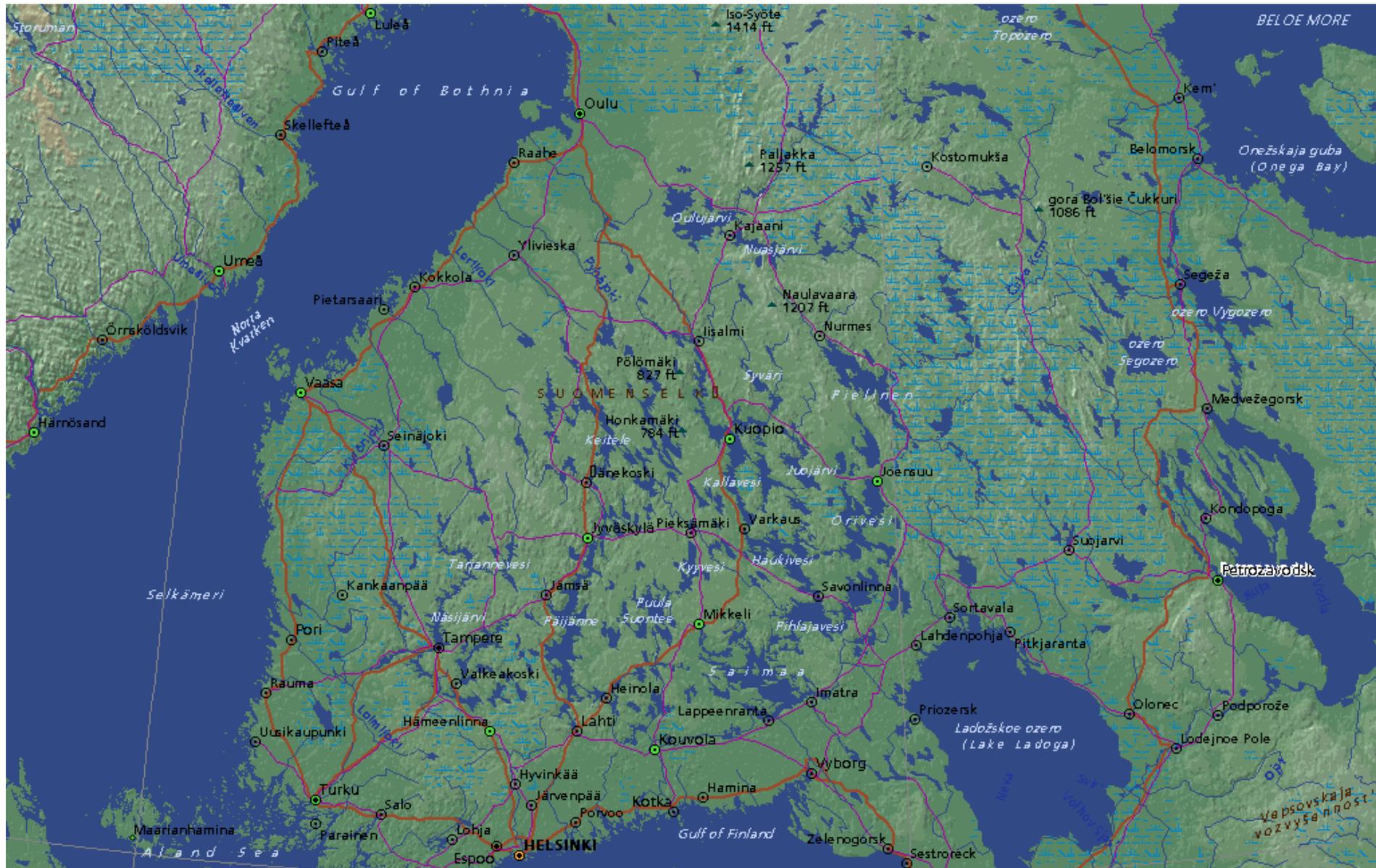
Специфика вечной мерзлоты

- Вечная мерзлота определяется как подповерхностный слой суши, температура которого остается ниже 0 С в течение двух последовательных лет и дольше.
- Она образуется в результате весьма тонких процессов, которые зависят от баланса тепла поверхности Земли, геотермального потока тепла, содержания воды в почве и термических свойств почвы.
- Наиболее важная связь между вечной мерзлотой и климатом состоит в том, что вечная мерзлота препятствует подпитыванию и движению подземных вод, сдерживает развитие растительности и увеличивает поверхностный сток.
- В районах вечной мерзлоты обмен массой между атмосферой и сушей в холодный период года пренебрежимо мал.
- Летом же потоки водяного пара и других газов (в основном, метана и углекислого газа) формируются за счет относительно неглубокого приповерхностного слоя сезонного оттаивания - активного слоя.

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



Примеры «гидрологической неоднородности» Финляндия, Карелия

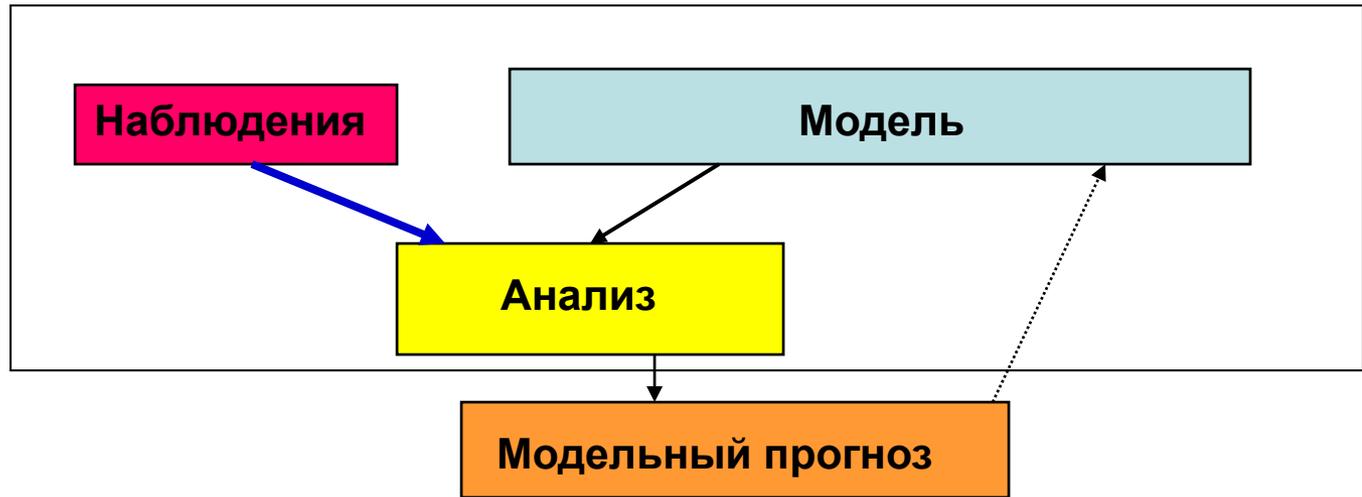


Примеры «гидрологической неоднородности» Канада



Общая схема прогноза погоды

Блок усвоения
данных



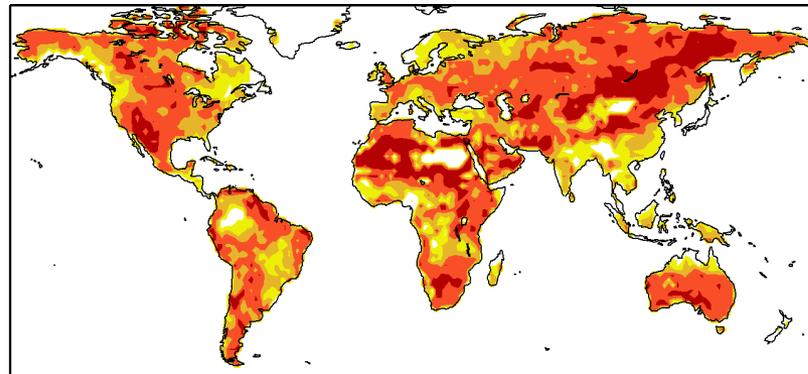
Усвоение данных о деятельном слое суши:
зачем это надо?

- Параметры, описывающие состояние деятельного слоя суши и снежного покрова, являются интегрированным представлением “памяти” процессов переноса тепла и влаги в этих средах и тем самым определяют чувствительность нижней тропосферы к этим процессам.
- Ошибки в описании этих процессов в численных схемах прогноза погоды и в климатических моделях могут накапливаться со временем и приводить к неправильному воспроизведению механизмов взаимодействия атмосферы и суши.
- Необходимы специальные (вычислительно-информационные технологии) для инициализации (построения начальных условий) и усвоения данных наблюдений в моделях деятельного слоя суши.
- Хотя (глобальные и региональные) системы усвоения данных о деятельном слое суши в настоящее время интенсивно разрабатываются (см. Rodell et al., 2004, BAMS, v. 85, p. 381-394), все еще с недостаточной точностью описываются процессы взаимодействия атмосферы и суши, в частности, при наличии **промерзающих грунтов** (см., например, <http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/list/17998>).

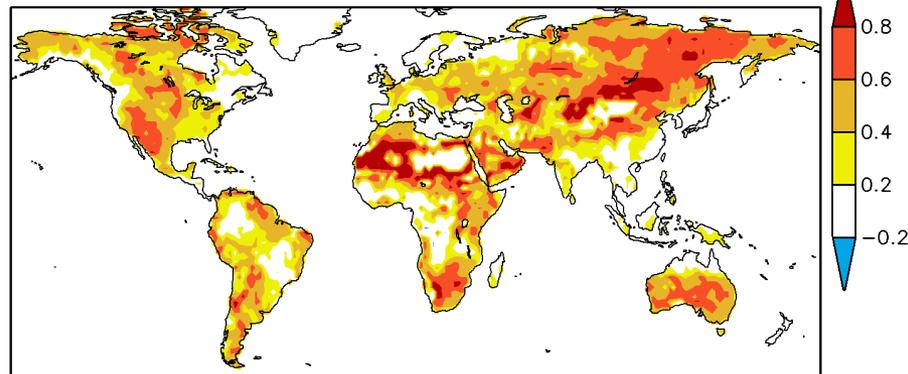
Временные масштабы автокорреляции влажности почвы (P. Dirmeyer, 2004)

«Память» о процессах в
деятельном слое суши
проявляется на
внутрисезонных (до 3
месяцев) временных
масштабах.

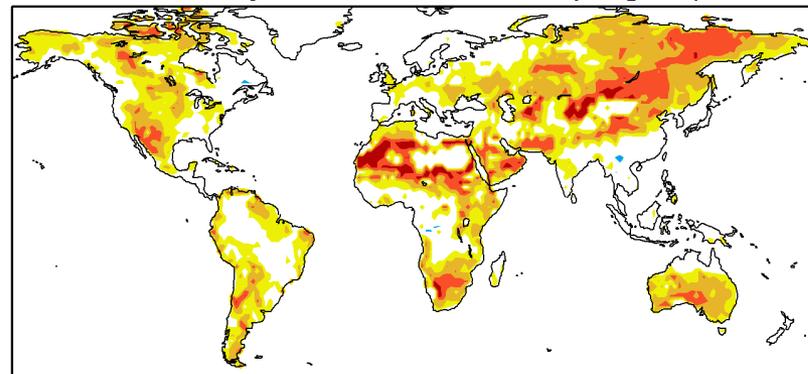
Root Soil Wetness (1979–1999)
Monthly Autocorrelation (Lag=1)



Monthly Autocorrelation (Lag=2)



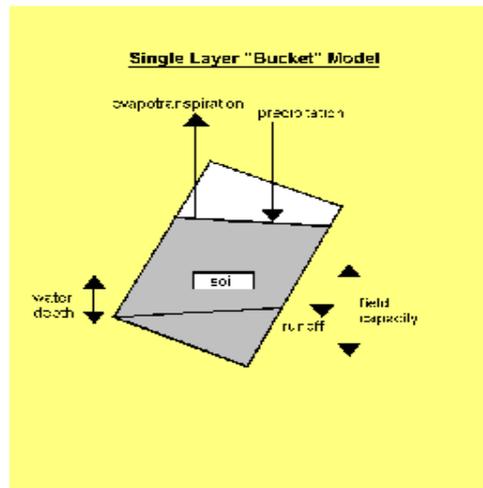
Monthly Autocorrelation (Lag=3)



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

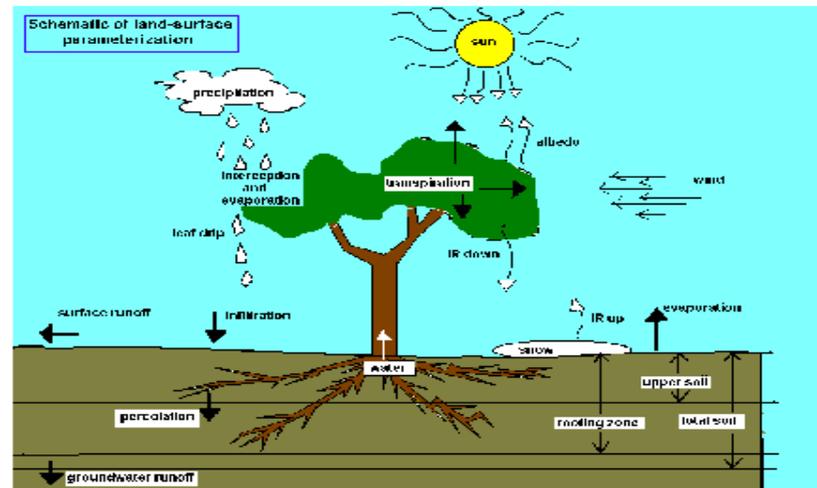
The Overarching Question:

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

ПРОБЛЕМЫ

- Механические и теплофизические свойства снежного покрова и грунтов
- Растительность, в т.ч. ее корневая система, как регулятор процессов испарения
- Замыкание уравнений
- Коэффициенты
- Начальные условия (инициализация)
- Усвоение доступных данных измерений

GEWEX Global Land-Atmosphere System Study

- Global gridded model analyses
- Large-scale comparison



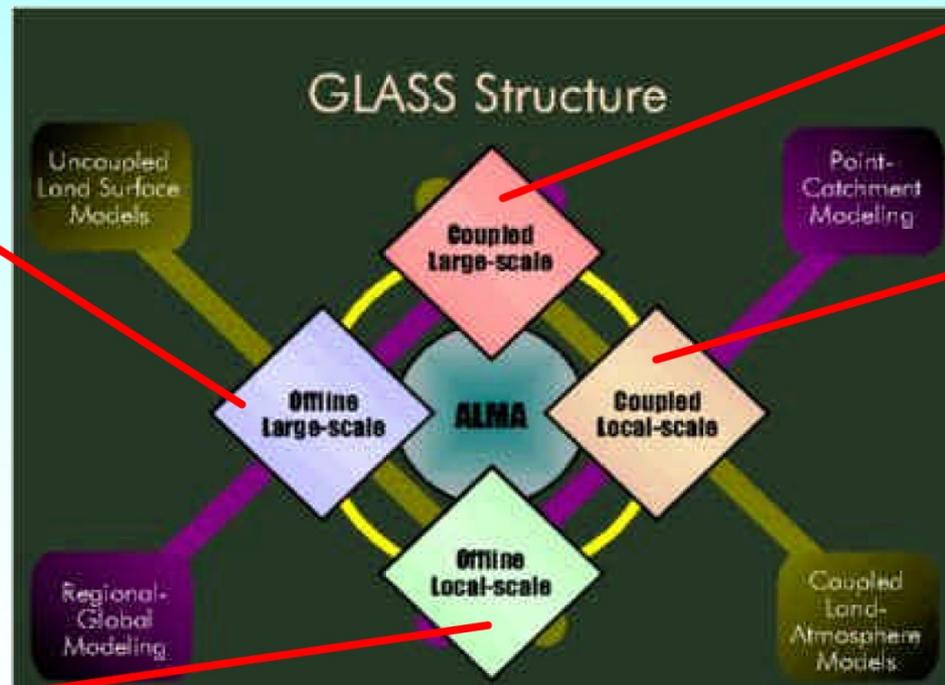
- Land-surface model intercomparisons (*in situ*)
- Point validation



- GCM inter-comparisons
- Land's role in climate



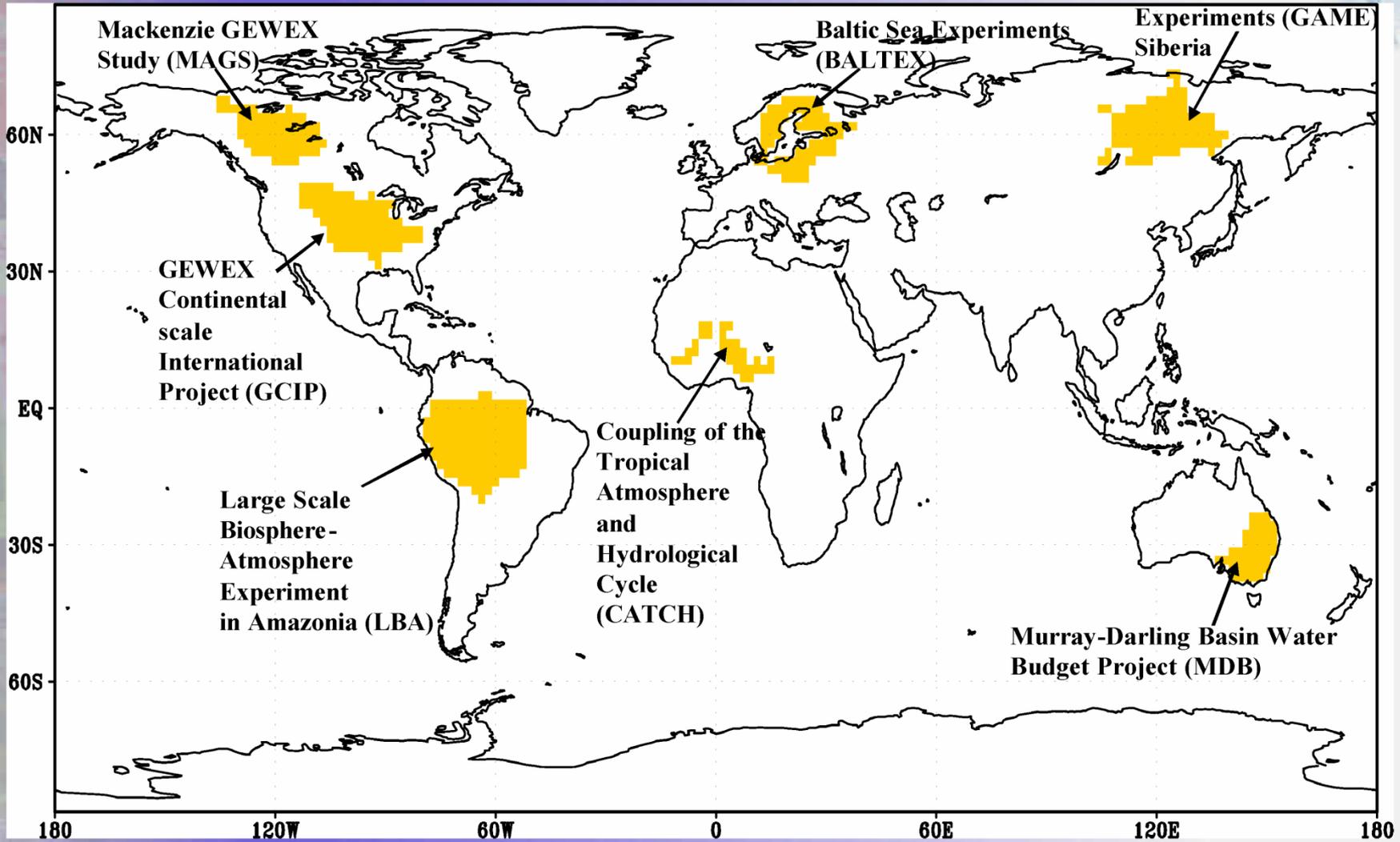
- Single column model analyses
- Coupled data assimilation



GEWEX Coordinated Enhanced Observational Period (CEOP) Regions



GEWEX Asian Monsoon



GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment):

<http://www.gewex.org>

- MAGS: <http://http://www.usask.ca/geography/MAGS>
- GCIP: <http://www.ogp.noaa.gov/mpe/gapp/gcip>
- LBA: <http://www.gewex.org/lambada.html>
- BALTEX: <http://w3.gkss.de/baltex/>
- CATCH:
http://www.lthe.hmg.inpg.fr/WEB_Catch/Accueil_CATCH_en.html
- GAME: <http://www.hyarc.nagoya-u.ac.jp/game>
- MDB: <http://www.gewex.org/mdb.html>
- PILPS: <http://www.cic.mq.edu.au/pilps-rice>

Основные типы систем усвоения данных о деятельном слое суши (Land Data Assimilation System – LDAS)

Цель: Требуется получить начальные данные для характеристик почвы и снежного покрова (вертикальные профили температуры, жидкой влаги и льда), а также растительности

- 1) Совместное суша-атмосфера 4-х-мерное усвоение
 - Осадки на поверхности суши из атмосферной модели
 - Характеристики радиационного баланса на поверхности суши также из атмосферной модели
 - Большие ошибки в осадках и радиации => большие ошибки во влажности почвы
- 2) Автономное усвоение (используется лишь модель суши)
 - В качестве внешнего воздействия используются наблюдаемые значения осадков и радиации
- 3) Гибридное 4-х-мерное усвоение
 - Так же, как 1), но вместо модельных осадков – наблюдаемые.

Основные особенности системы усвоения данных о суше

(Hartzell et al., 2003)

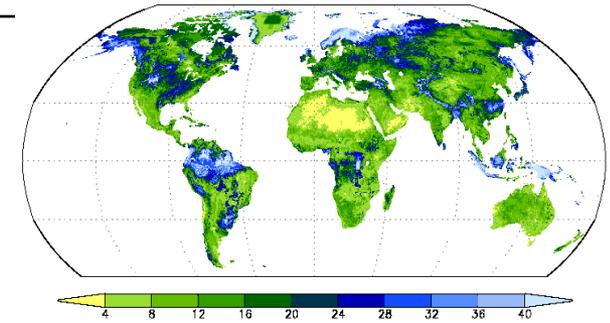
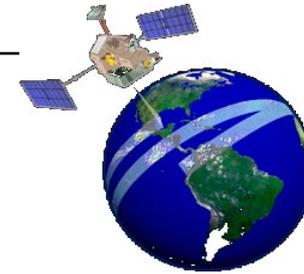
Методология: параметризация;
использование наземной и
спутниковой информации;
адекватные модели процессов на
поверхности и в деятельном слое
суши.

Входные данные

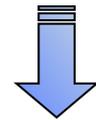
- Осадки
- Температура
- Радиация
- Ветер и др.

ПАРАМЕТРЫ

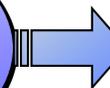
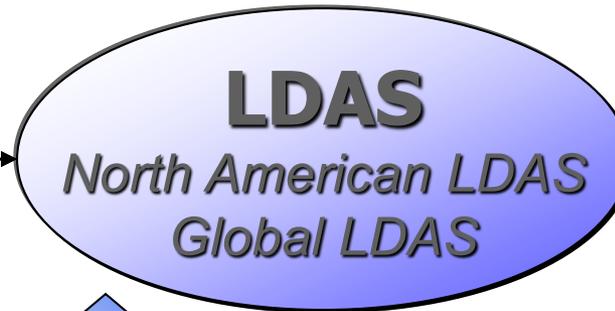
- Типы растений
- Классы почв
- Топография
- Другие данные



Влажность корневой зоны [%]

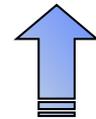


УСВОЕНИЕ

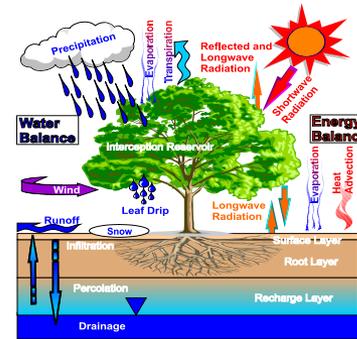


Выходные данные

- Влажность почвы
- Эватранспирация
- Поток энергии
- Гидрологический сток
- Снежный покров



Модели суши



Глобальная система усвоения данных о суши (GLDAS)

- США: National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Space Flight Center (GSFC); National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
- Используются данные наземных и спутниковых наблюдательных систем
- В моделях суши: в качестве внешнего воздействия - метеорологические данные и с помощью процедуры усвоения - доступные наблюдения о параметрах состояния суши
- В целом, GLDAS – глобальная моделирующая система высокого пространственного разрешения, не связанная с моделью атмосферы (режим off-line) и использующая спутниковые и наземные данные для создания в режиме реального времени поля характеристик состояния суши и приземных потоков.

Основные составляющие GLDAS

- 3 модели суши: Mosaic (Koster and Suarez, 1996) - параметризованы эффекты подсеточной изменчивости растительности; CLM (Dai et al., 2003) – обобщение моделей NCAR (Bonan, 1998), BATS (Dickinson et al., 1986) и Института физики атмосферы Академии наук КНР (Dai and Zeng, 1997); Noah (Ek et al., 2003) – оперативно используется в мезомасштабных моделях NCEP.
- Процедуры усвоения данных (температура поверхности и снежный покров): фильтрация Калмана (Walker and Houser, 2001), оптимальная интерполяция, их комбинации
- Инициализация (по выбору пользователя системы): 1) глобально однородные поля; 2) файл «контрольной точки», содержащий результаты предыдущего эксперимента; 3) использование внешних (атмосферных) параметров в режиме “spin-up”.

Параметры системы

- Растительный покров: глобальный архив с 1-км разрешением, созданный в университете Мэриленда (UMD) с использованием спутниковых (NOAA-15) данных (Hansen et al., 2000) и содержащий информацию о типах растительности и листовом индексе
- Почвы: глобальный архив данных с 5-мин разрешением (Reynolds et al., 2000) – тип, пористость, содержание глины, песка и органики в ячейке сетки, цвет
- Топография: карта высот с 30-сек разрешением (GTOPO30, Verdin and Greenlee, 1996) и рассчитанное поле углов наклона рельефа
- Сетка: в разных версиях системы 0.25x0.25, 0.5x0.5, 1x1 и 2x2.5 град.

GLDAS (Rodell et al., 2004): Типы растительности

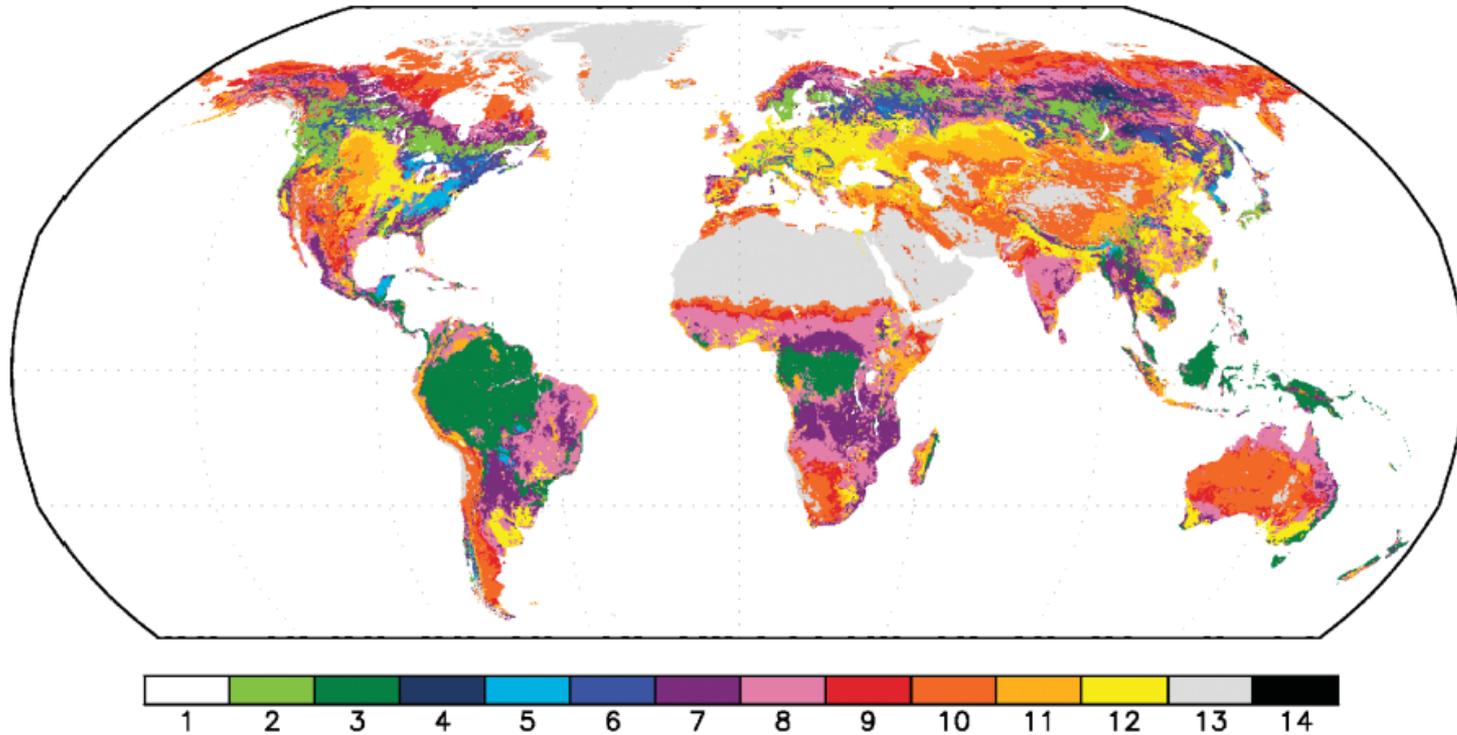


FIG. 1. Predominant UMD vegetation type in each 0.25° grid cell. Key: 1 = water, 2 = evergreen needleleaf forest, 3 = evergreen broadleaf forest, 4 = deciduous needleleaf forest, 5 = deciduous broadleaf forest, 6 = mixed cover, 7 = woodland, 8 = wooded grassland, 9 = closed shrubland, 10 = open shrubland, 11 = grassland, 12 = cropland, 13 = bare ground, 14 = urban and build-up.

GLDAS (Rodell et al., 2004): Типы почв

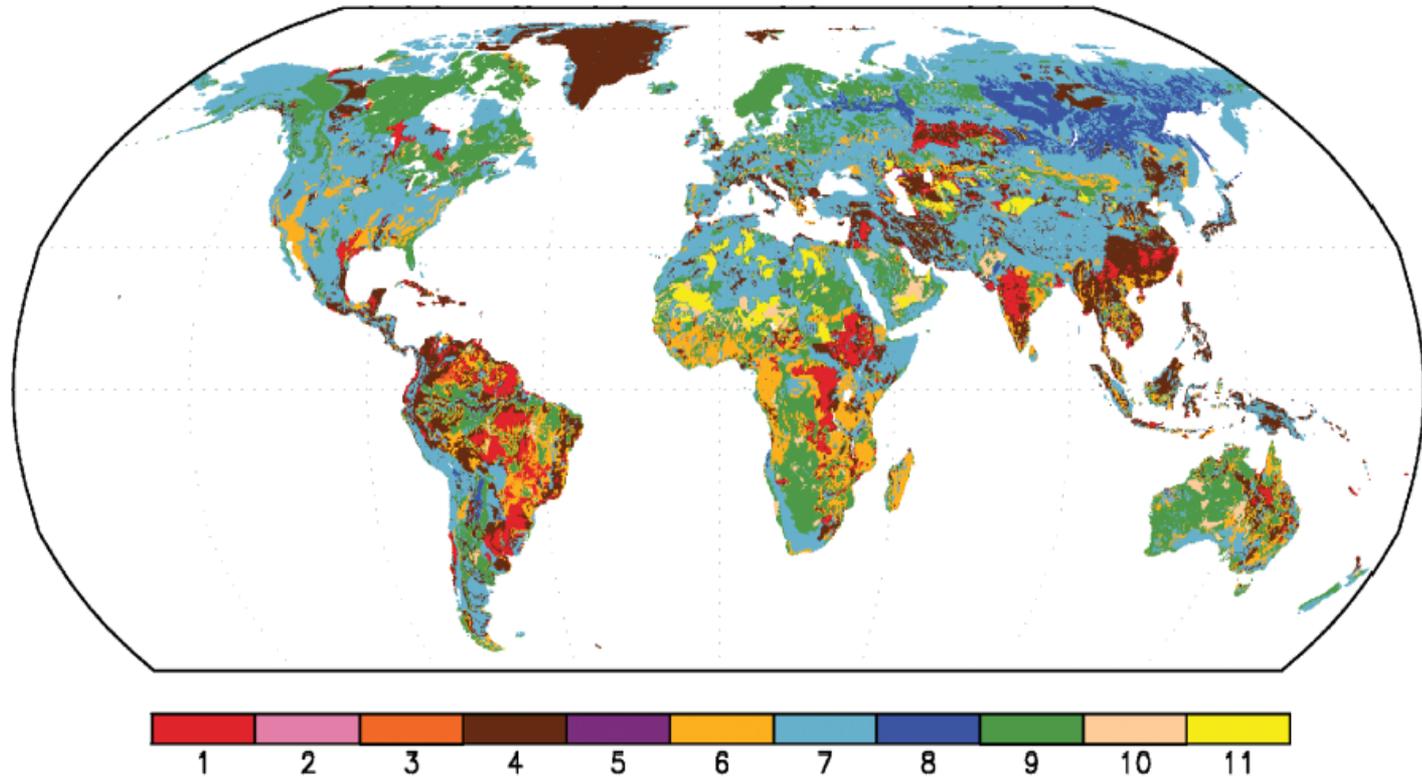


FIG. 2. USDA soil texture class in each 0.25° grid cell, derived from Reynolds et al. (1999). Key: 1 = clay, 2 = silty clay, 3 = sandy clay, 4 = clay loam, 5 = silty clay loam, 6 = sandy clay loam, 7 = loam, 8 = silty loam, 9 = sandy loam, 10 = loamy sand, 11 = sand.

Входные и выходные параметры системы

- Осадки
- Поток приходящей коротковолновой радиации
- Поток приходящей длинноволновой радиации
- Приземная температура воздуха
- Приземная удельная влажность
- Компоненты скорости приземного ветра
- Давление на подстилающей поверхности
- Профиль влажности почвы
- Геометрическая и водноэквивалентная толщина снежного покрова, его доля в ячейке сетки
- Влагосодержание растительного покрова
- Профиль температуры почвы
- Средняя температура поверхности
- Поверхностный и подповерхностный сток
- Испарение с оголенной почвы, поверхности снега и растительности
- Скрытый, явный и почвенный потоки тепла
- Фазовый поток тепла с поверхности снега
- Скорость выпадения жидких осадков и снега, таяния снега
- Альbedo поверхности
- Суммарные потоки коротковолновой и длинноволновой радиации на поверхности суши
- Аэродинамическое сопротивление

GLDAS (Rodell et al., 2004): Влажность корневой зоны почвы

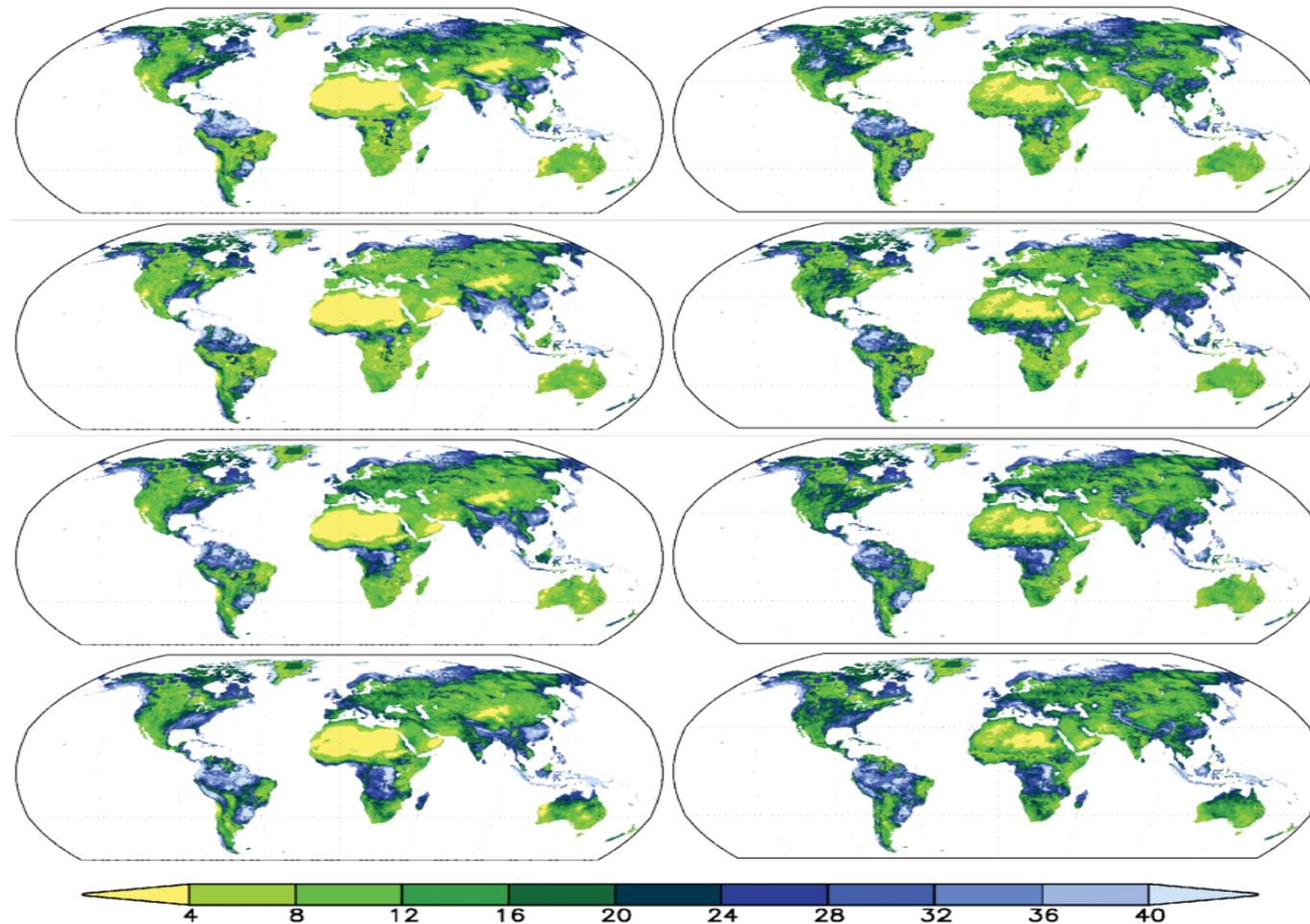
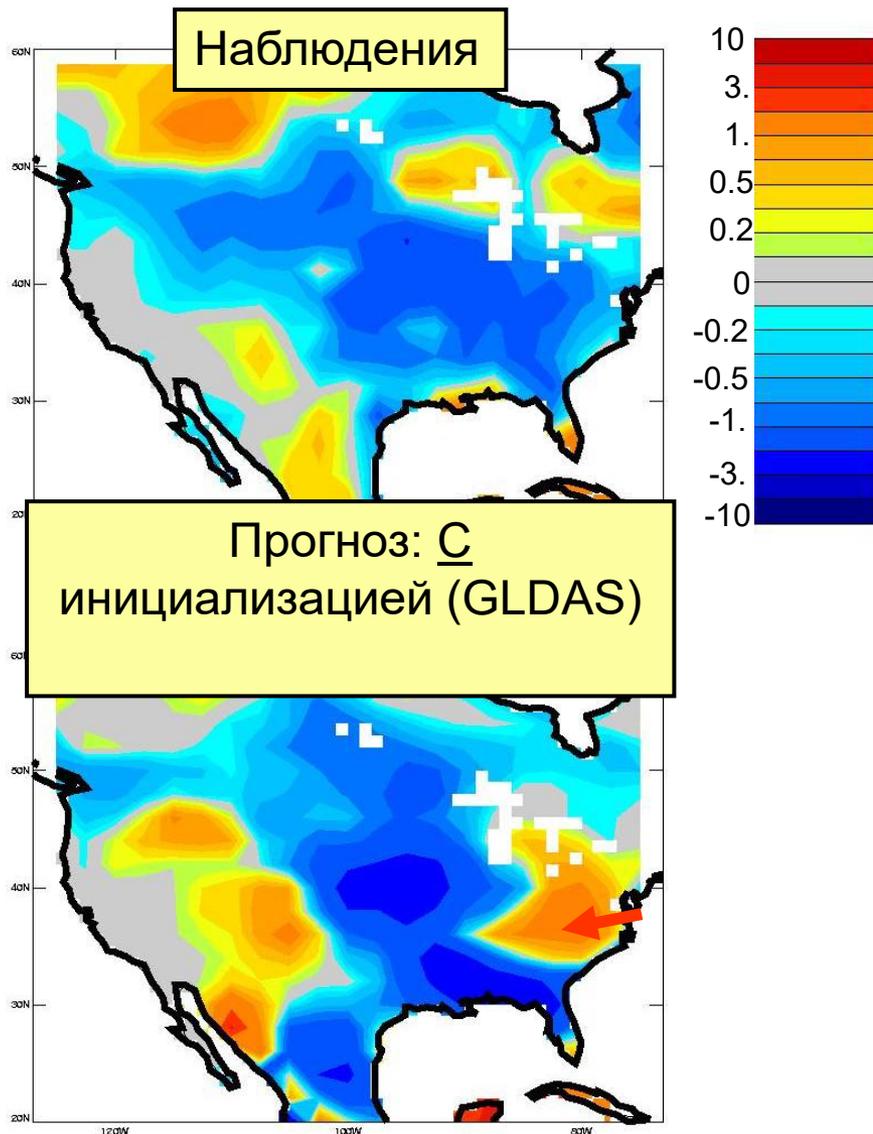
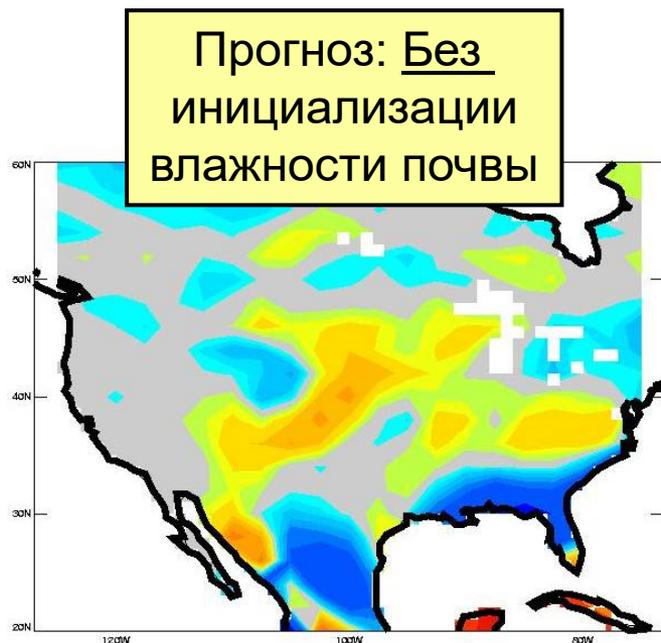


FIG. 4. Daily mean volumetric soil water content (%) in the root zone from two operational GLDAS simulations: (left) control run; (right) derived forcing run; (from top to bottom) 31 May 2002, 31 Aug 2002, 30 Nov 2002, 28 Feb 2003.

Засуха 1988 г. в США (Huang, 2003)



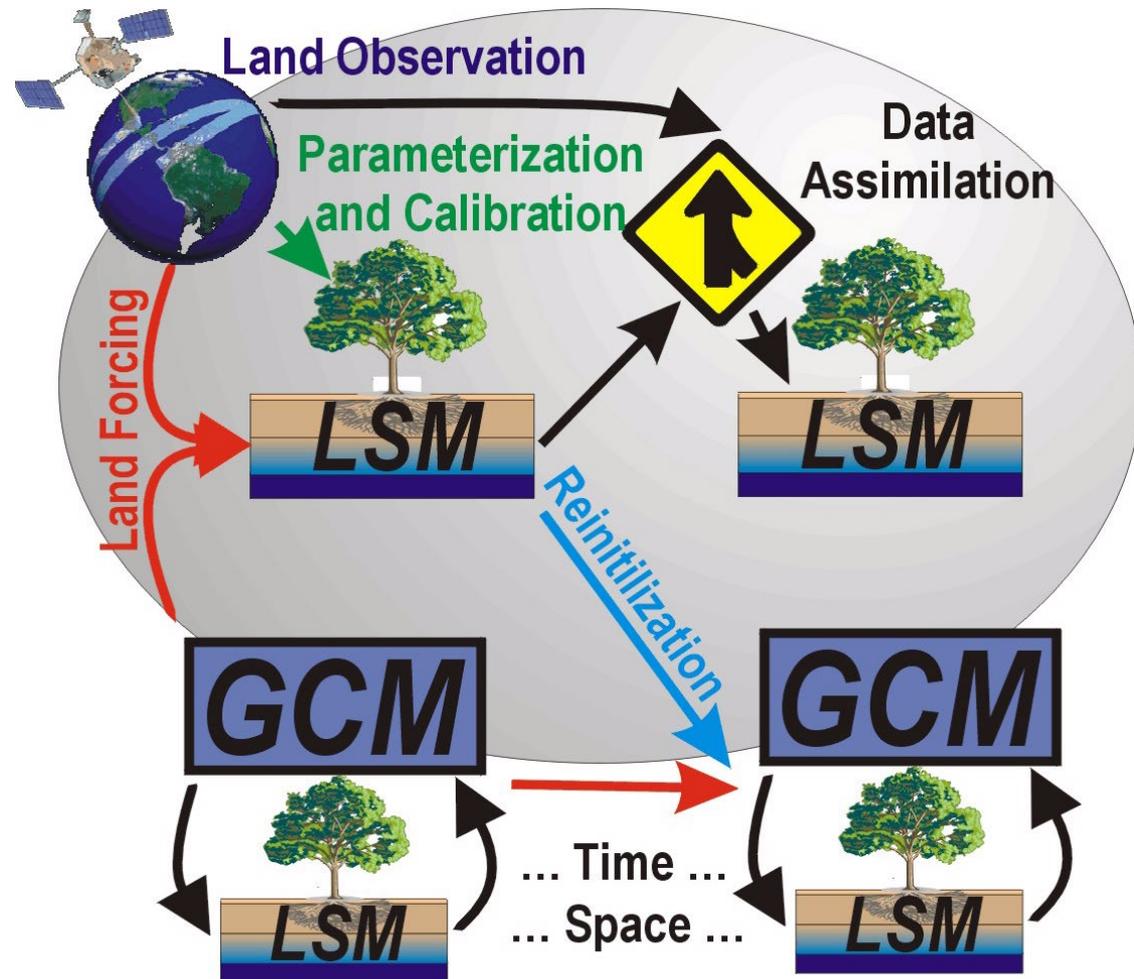
Аномалии летних (июнь-июль-август) осадков (мм/сут, R. Koster)

Initialization of Land-Surface Schemes for Subseasonal Predictions (P. Dirmeyer, 2004)

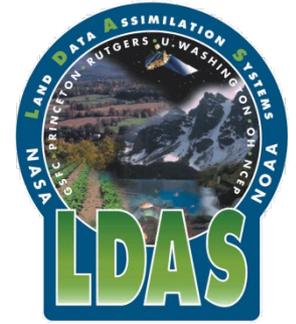
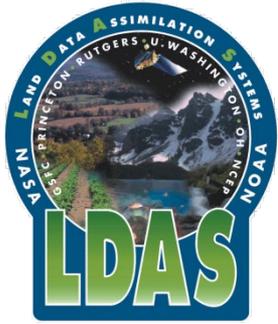
США

(североамериканская)
система усвоения – N-
LDAS (Land Data
Assimilation System)

- Усвоение данных наблюдений по температуре и влажности почвы
- Система работает в автономном режиме
- Используется несколько моделей деятельного слоя суши



N-LDAS Collaborators



NCEP/EMC 
Ken Mitchell
Dag Lohmann

NASA/GSFC 
Paul Houser
Brian Cosgrove

NWS/OHD 
John Schaake
Qingyun Duan

Rutgers Univ. 
Alan Robock
Lifeng Luo

Princeton Univ. 
Eric Wood
Justin Sheffield

NESDIS/ORA 
Dan Tarpley
Andy Bailey

Univ. Oklahoma 
Ken Crawford
Jeff Basara

Univ. Washington 
Dennis Lettenmaier

NCEP/CPC 
Wayne Higgins
Huug Van den Dool

NOAA/ARL 
Tilden Meyers
John Augustine

Univ. Maryland 
Rachel Pinker

NOAA

NASA

Universities

<http://ldas.gsfc.nasa.gov>

1. В качестве внешнего воздействия используются данные 4-х-мерного усвоения метеорологических данных (на основе мезомасштабной модели Eta), но наблюденные значения осадки и приходящей солнечной радиации
2. Использованы 4 различные модели деятельного слоя суши:
 - **MOSAIC** (NASA/GSFC)
 - **NOAH** (NOAA/NWS/NCEP)
 - **VIC** (Princeton University/University of Washington)
 - **Sacramento** (NOAA/OHD)
3. Результаты расчетов сравниваются со всеми доступными наблюдениями (влажность и температура почвы, потоки на поверхности, снежный покров и гидрологический сток).

Модели деятельного слоя суши:

Горизонтальное разрешение 1/8-градуса, дискретность вывода информации – каждый час.

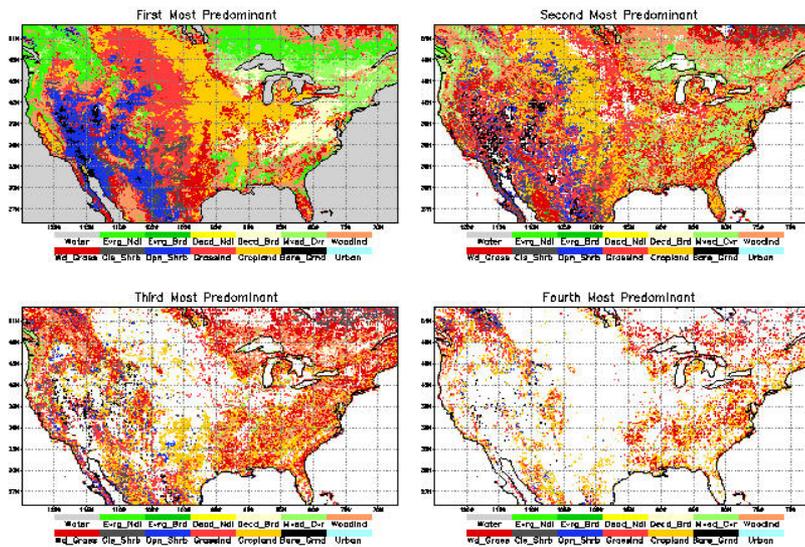
Характеристики поверхности:

Растительность: UMD, EROS, IGBP, EOS

Почвы: STATSGO, IGBP; Орография: с горизонтальным разрешением 1 км (<http://gcmd.gsfc.nasa.gov>)

Растительность в N-LDAS из EROS-данных с 1-км разрешением

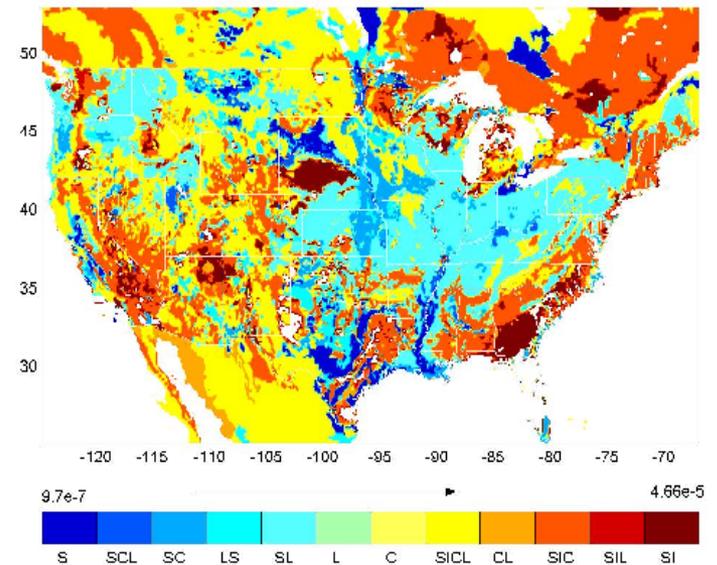
LDAS Predominant UMD Vegetation Derived From 1km EROS Data



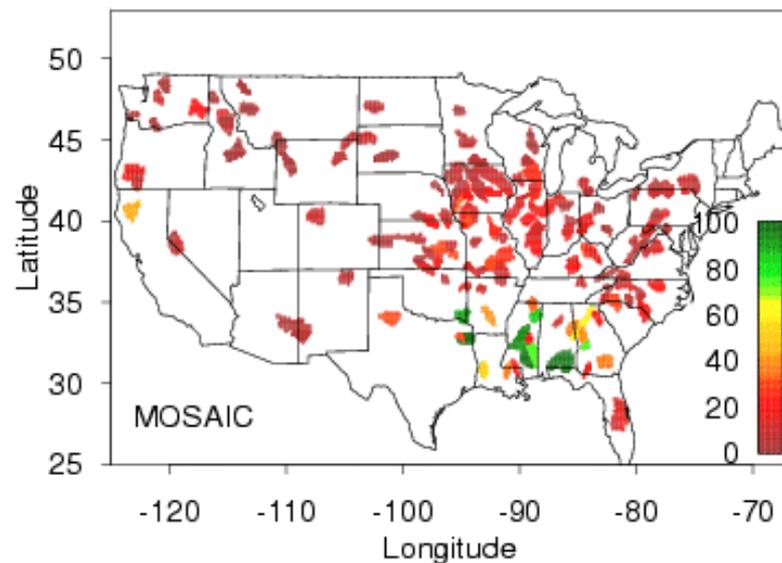
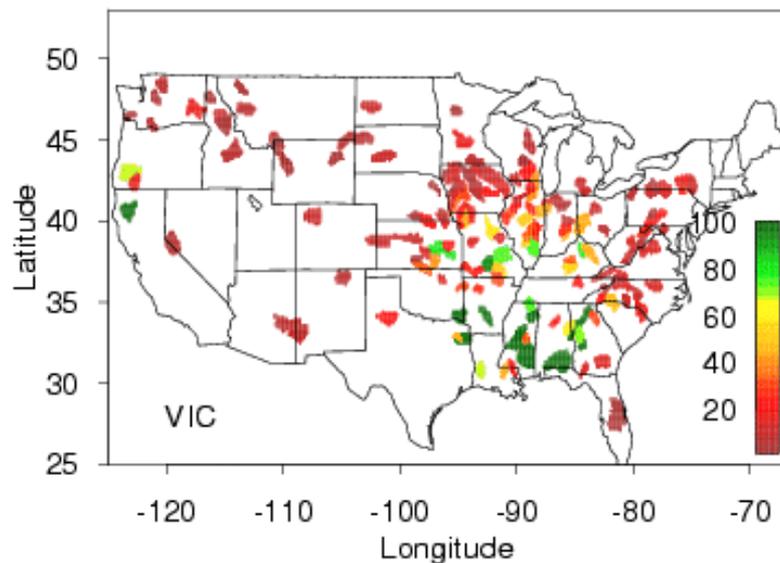
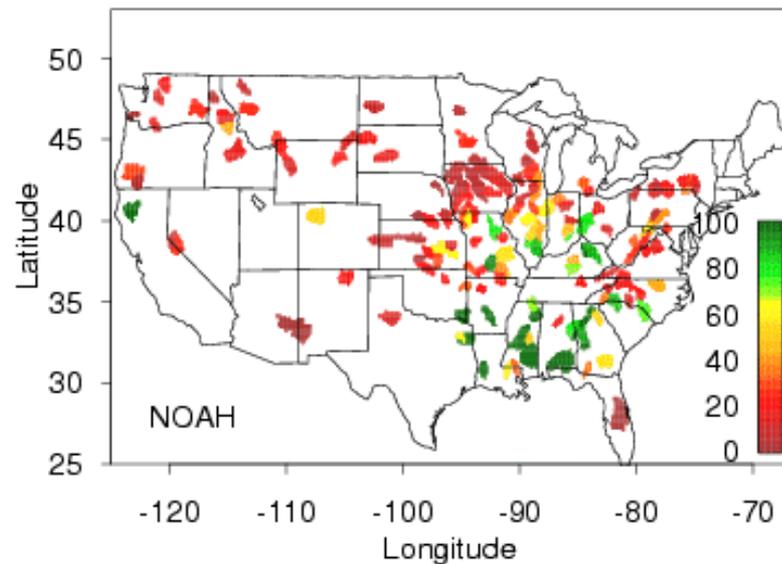
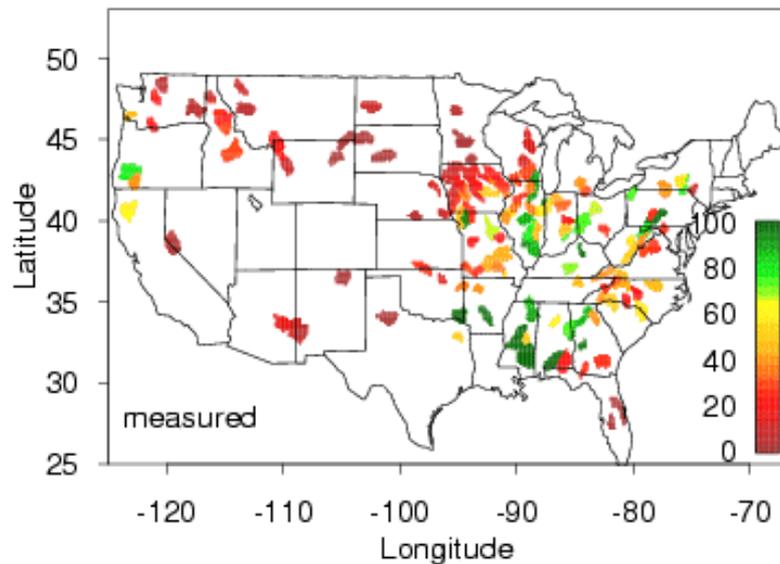
Brian Casagrove, NASA/GSFC

Типы почв на сетке N-LDAS

Saturated Hydraulic Conductivity (m/s)



Полный гидрологический сток, рассчитанный с помощью различных моделей, в сравнении с данными наблюдений ноябрь 2000 – июль 2001



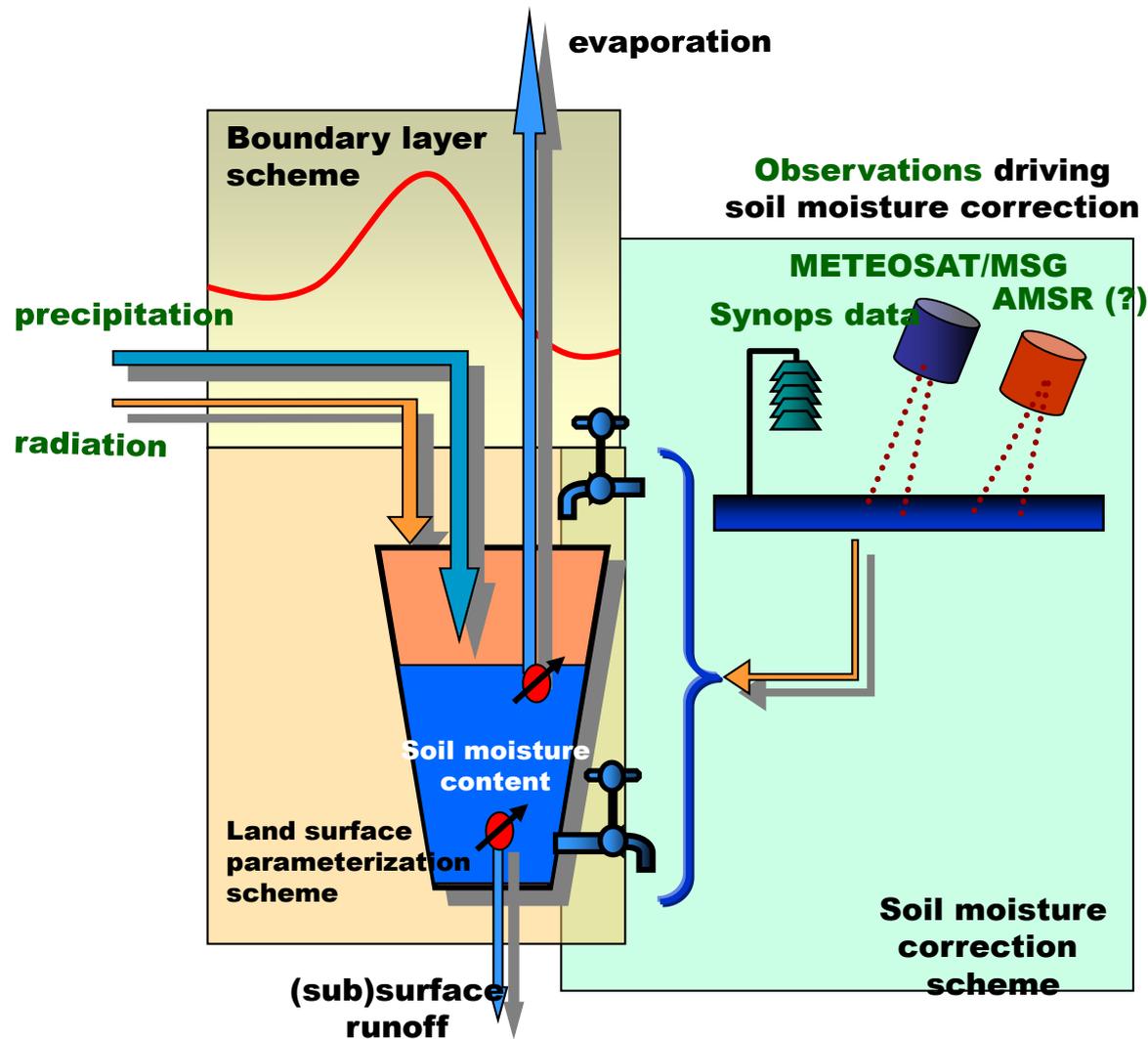
Initialization of Land-Surface Schemes for Subseasonal Predictions (P. Dirmeyer, 2004)

Европейская система
ELDAS (ECMWF,
DWD, CNRM/Meteo
France)

- Адаптация параметров
планетарного
пограничного слоя к
данным наблюдений

- Усвоение наблюдений
для коррекции
влажности почвы

- Набор моделей



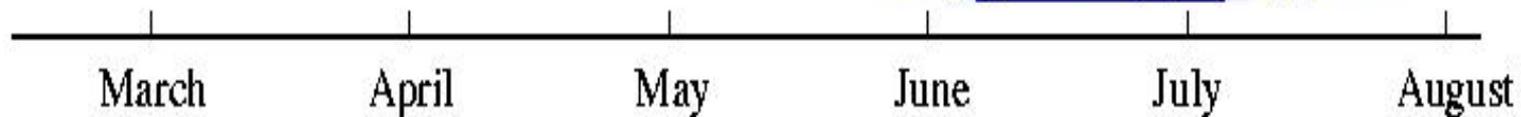
SOIL MOISTURE INITIALIZATION

"LDAS-style" phase: soil moistures guided by observed precipitation

Forecast phase: soil moistures are free to evolve and diverge

Start of forecast: Assume soil moisture is "realistic"; stop use of observed precip.

soil moisture



P. Viterbo et al. The representation of soil moisture freezing and its impact on the stable boundary layer. – Q.J.R. Meteorol. Soc., 1999, v. 125, 2401-2426.

- В «одномерных» схемах параметризации приземного слоя атмосферы реализуется положительная обратная связь между температурой подстилающей поверхности и устойчивой стратификацией пограничного слоя атмосферы, наиболее сильно проявляющаяся при больших числах Ричардсона.
- Процесс промерзания почвы – важный механизм регулирования сезонного хода температуры (зимой препятствует чрезмерному усилению устойчивости пограничного слоя).

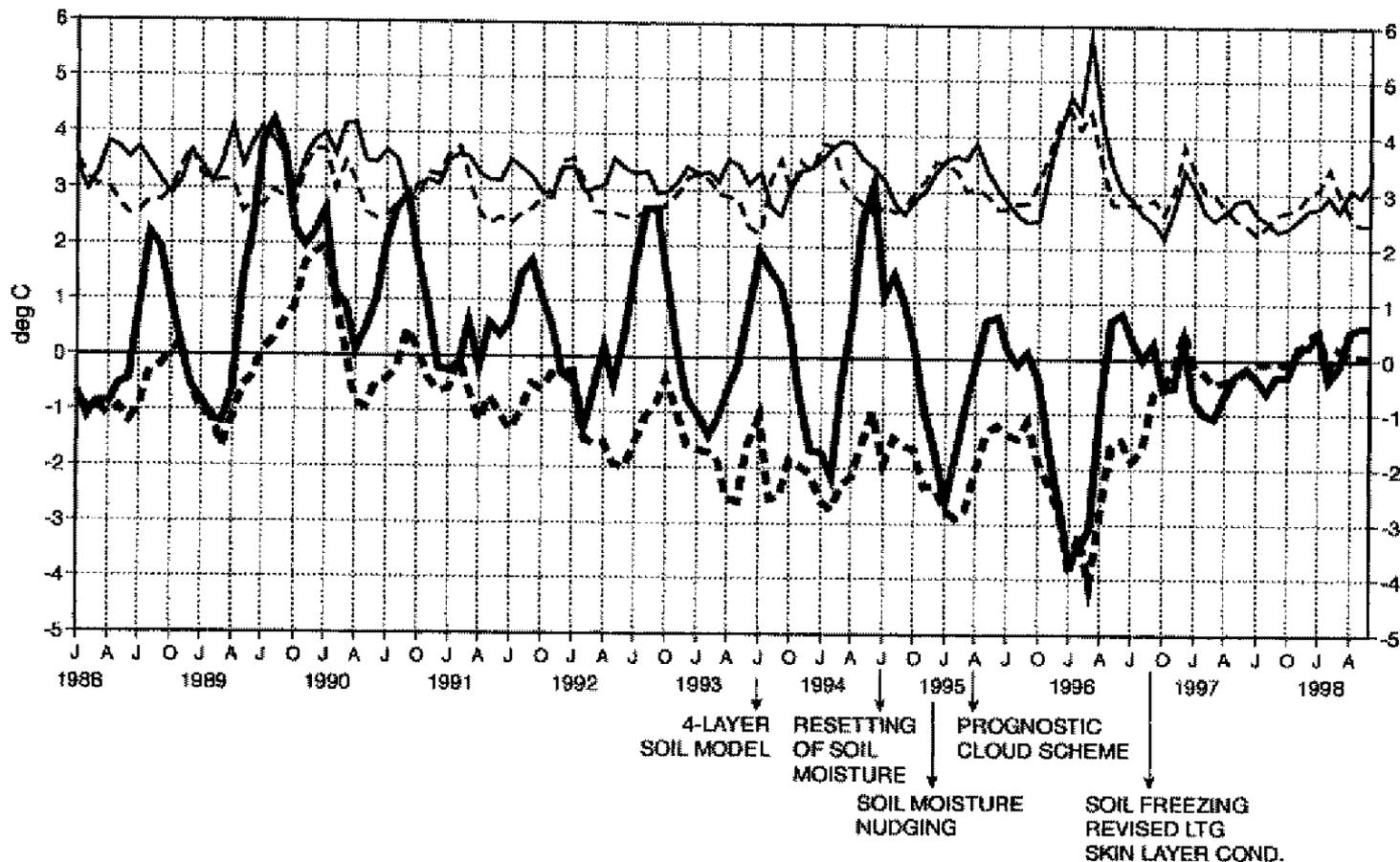


Figure 15. History of monthly biases (thick solid and dashed lines) and standard deviations (thin solid and dashed lines) with respect to observations of the daytime (72-hour: solid lines) and night-time (60-hour: dashed lines) operational 2 m temperature forecasts, averaged over all available SYNOP stations in the European area of 30°N to 72°N and 22°W to 42°E.

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 - гидравлический поток вследствие просвчивания 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.

Эмпирические зависимости

- Суммарная теплоемкость почвы: $C = C_g + C_w W + C_i I$
- Коэффициент теплопроводности: $\lambda_T = \max[\exp(-P_f - 2.7), 0.00041]$
- где $P_f = \log(-\psi)$ и ψ - потенциал почвенной влаги (в см)
- Потенциал влаги, коэффициент влагопроводности, гидравлический поток

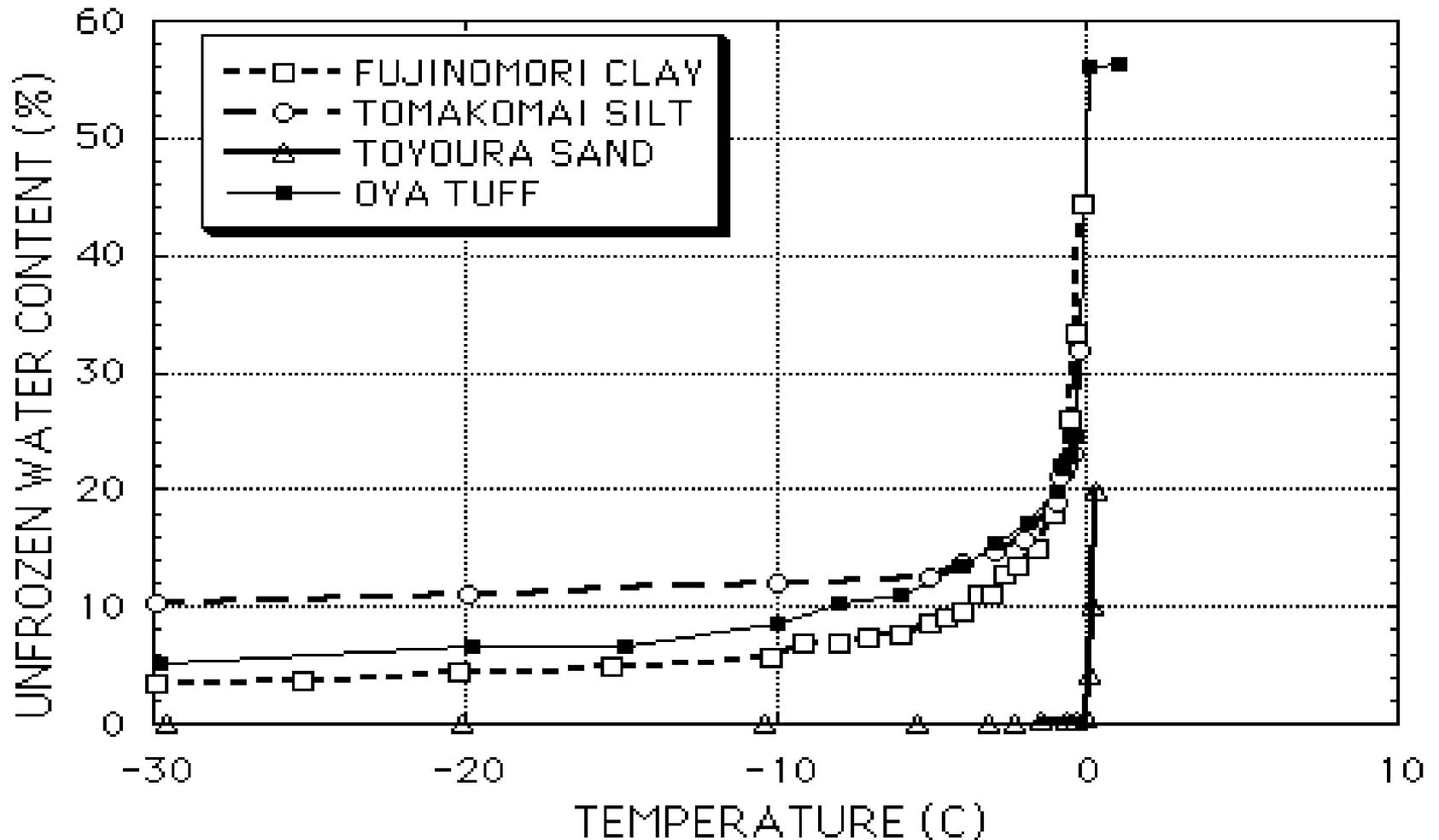
$$\psi = \psi_{\max} (W_{\max} / W)^b, \lambda_W = \lambda_{\max} (W / W_{\max})^{b+2}, \gamma = \gamma_{\max} (W / W_{\max})^{2b+3}$$

- Количество незамерзшей воды при отрицательной температуре

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

Содержание незамерзшей воды как функция температуры почвы

(Ishizaki, 1994)



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 оголенной почвы, покрытые снегом, занятые внутренними водами, 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. Для заснеженной и водной поверхности, а также увлажненного растительного покрова, величина q_i равна насыщающему значению удельной влажности, рассчитанному при температуре поверхности $q_{max}(T_s)$. В случае же открытой почвы q_i вычисляется как

$$\frac{q_i}{q_{max}} = \max \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi W_s}{W_{s,max}} \right), \min \left(1, \frac{q_a}{q_{max}} \right) \right] .$$

В обоих этих случаях 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.

Для сухой растительности также предполагается, что $q_i = q_{max}$, но сопротивление R_i определяется согласно (Sellers et al., 1986) в виде

$$R_i = \frac{1}{C_H U} + \frac{R(S_{ph})}{F_T F_q F_W},$$

где

$$\frac{1}{R(S_{ph})} = \frac{1}{kc} \left[\frac{b_i}{d_i S_{ph}} \ln \left(\frac{d_i e^{kL_i + 1}}{d_i + 1} \right) - \ln \left(\frac{d_i + e^{-kL_i}}{d_i + 1} \right) \right]$$

и

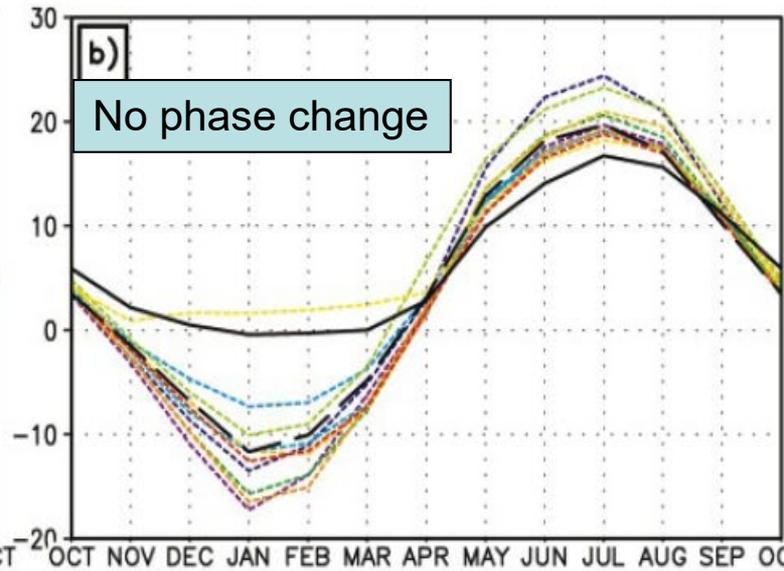
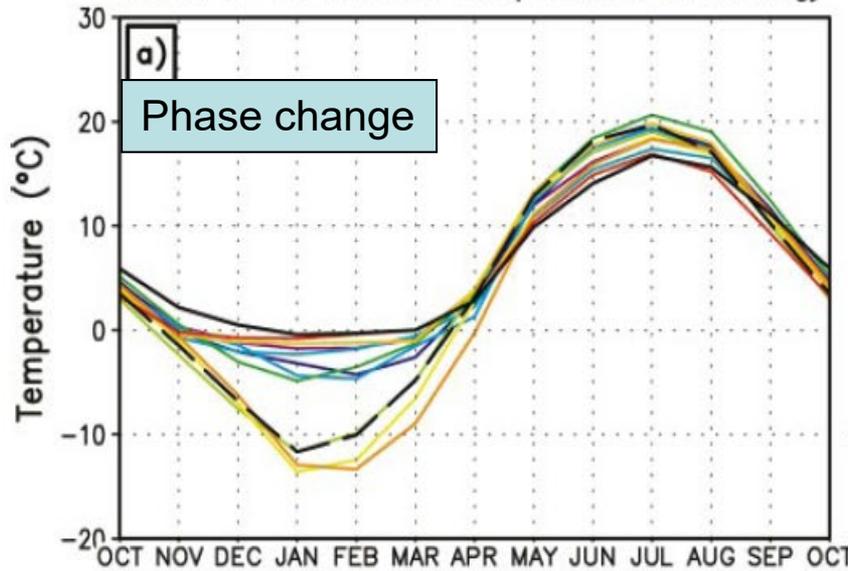
$$d_i = \frac{a_i + b_i c_i}{c_i S_{ph}}, \quad k = 0.9.$$

Здесь S_{ph} - часть достигающей поверхности коротковолновой радиации (в модели 55 процентов от S), используемая в процессе фотосинтеза; a_i, b_i, c_i - параметры, зависящие от типа растительности, L_i - листовой индекс.

PILPS 2(d) – ст. Валдай, Россия (Luo et al, 2003)

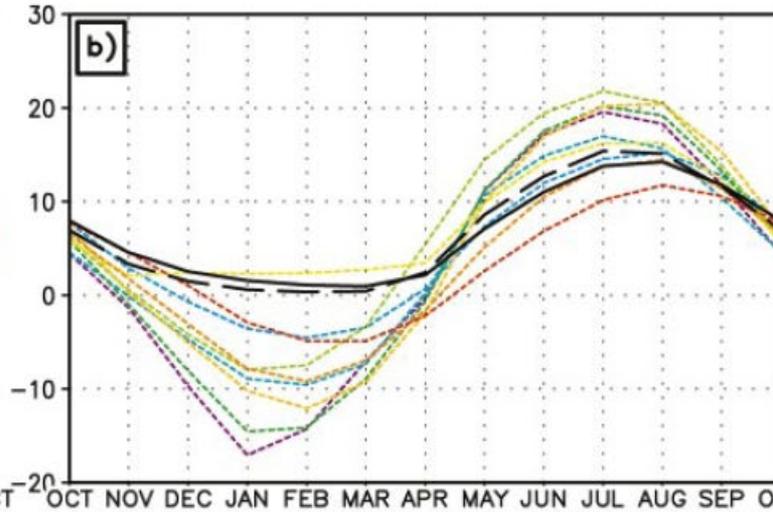
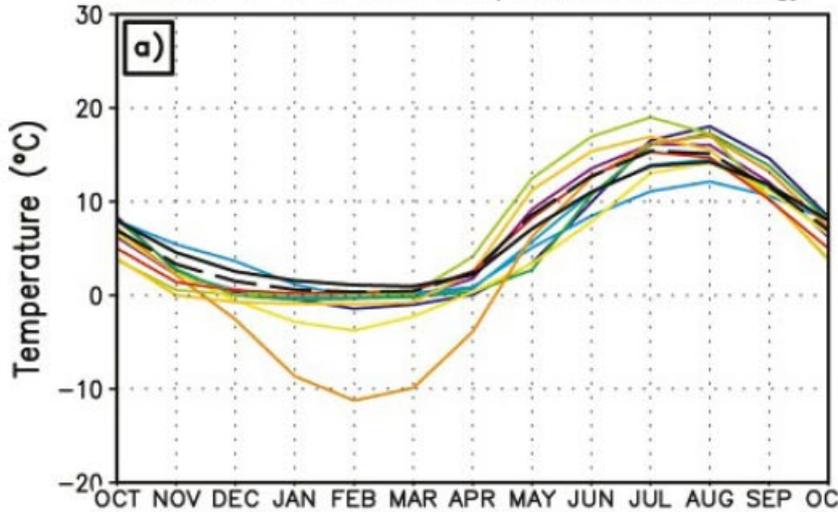
0-10cm

Model 0-10 cm Soil Temperature Climatology



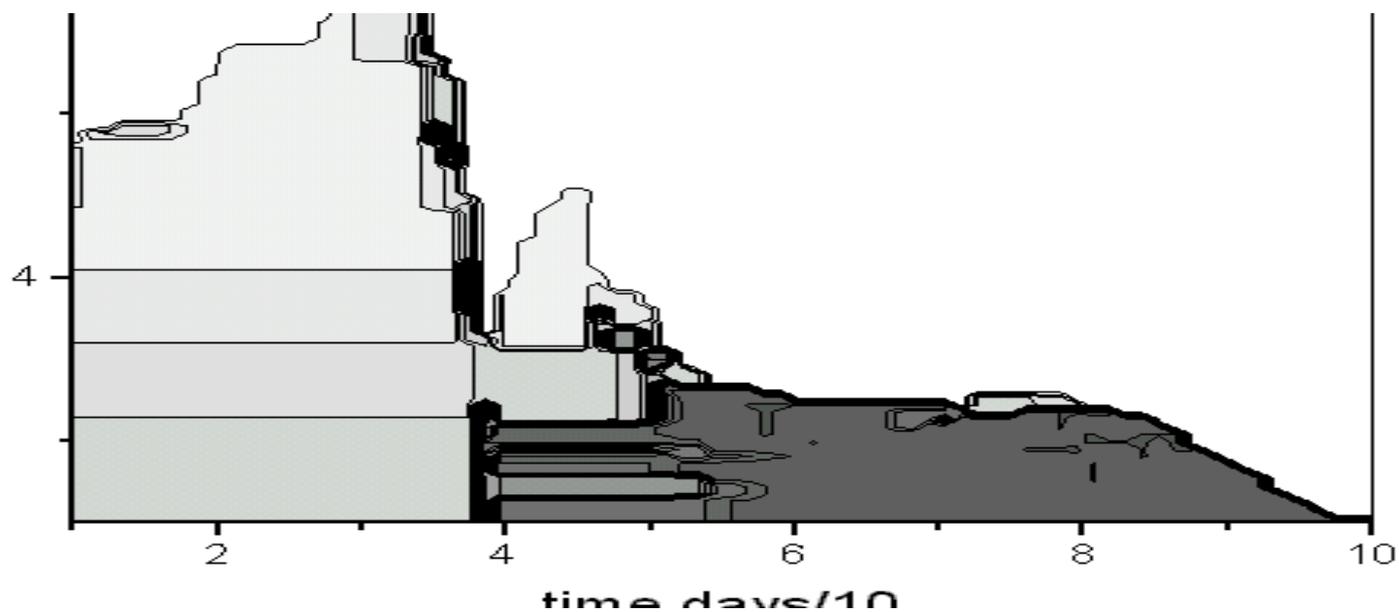
0-100cm

Model 0-1 m Soil Temperature Climatology

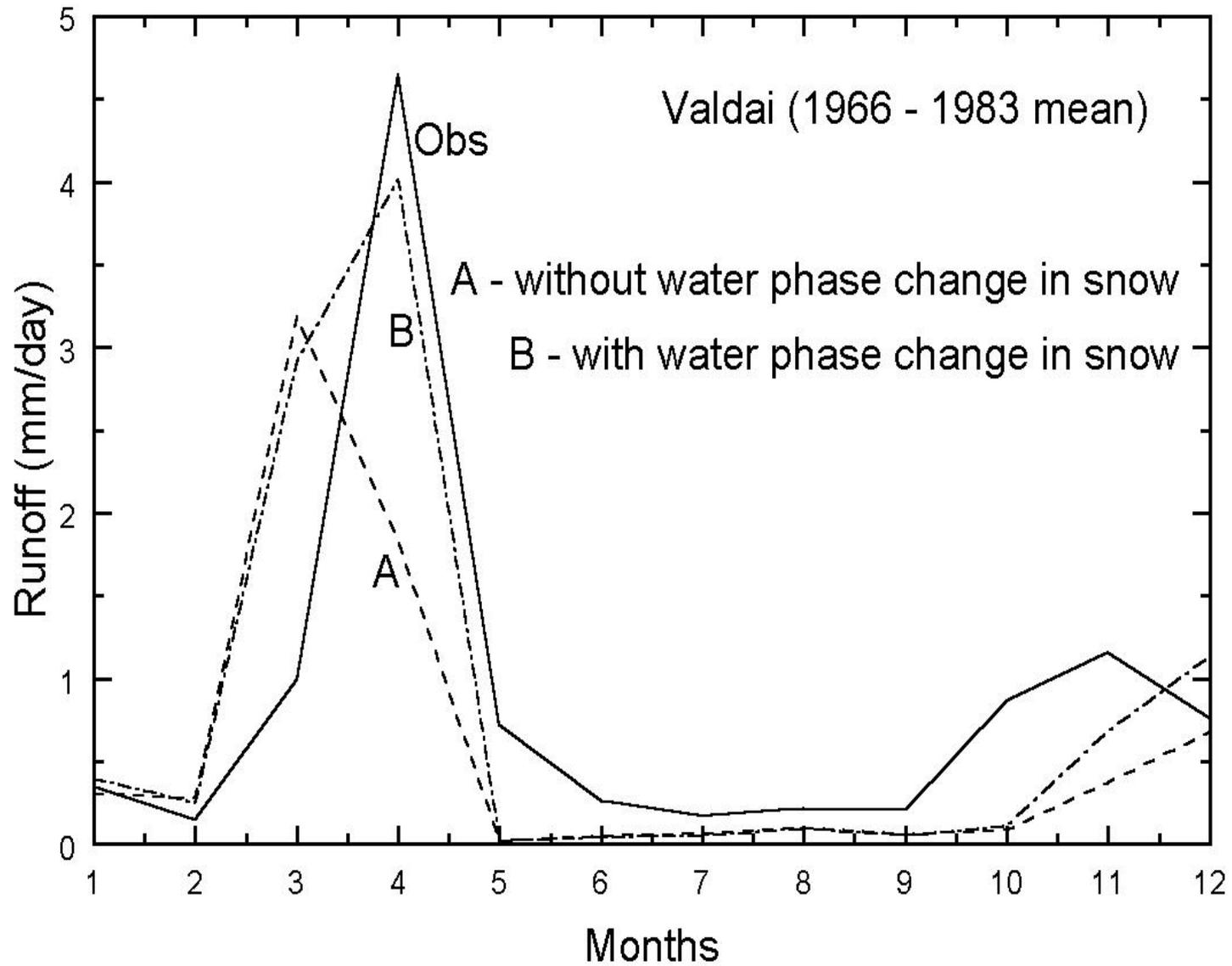


Толщина снежного покрова по данным моделирования с учетом фазовых переходов влаги для ст. Валдай (февраль-апрель 1977 г.).

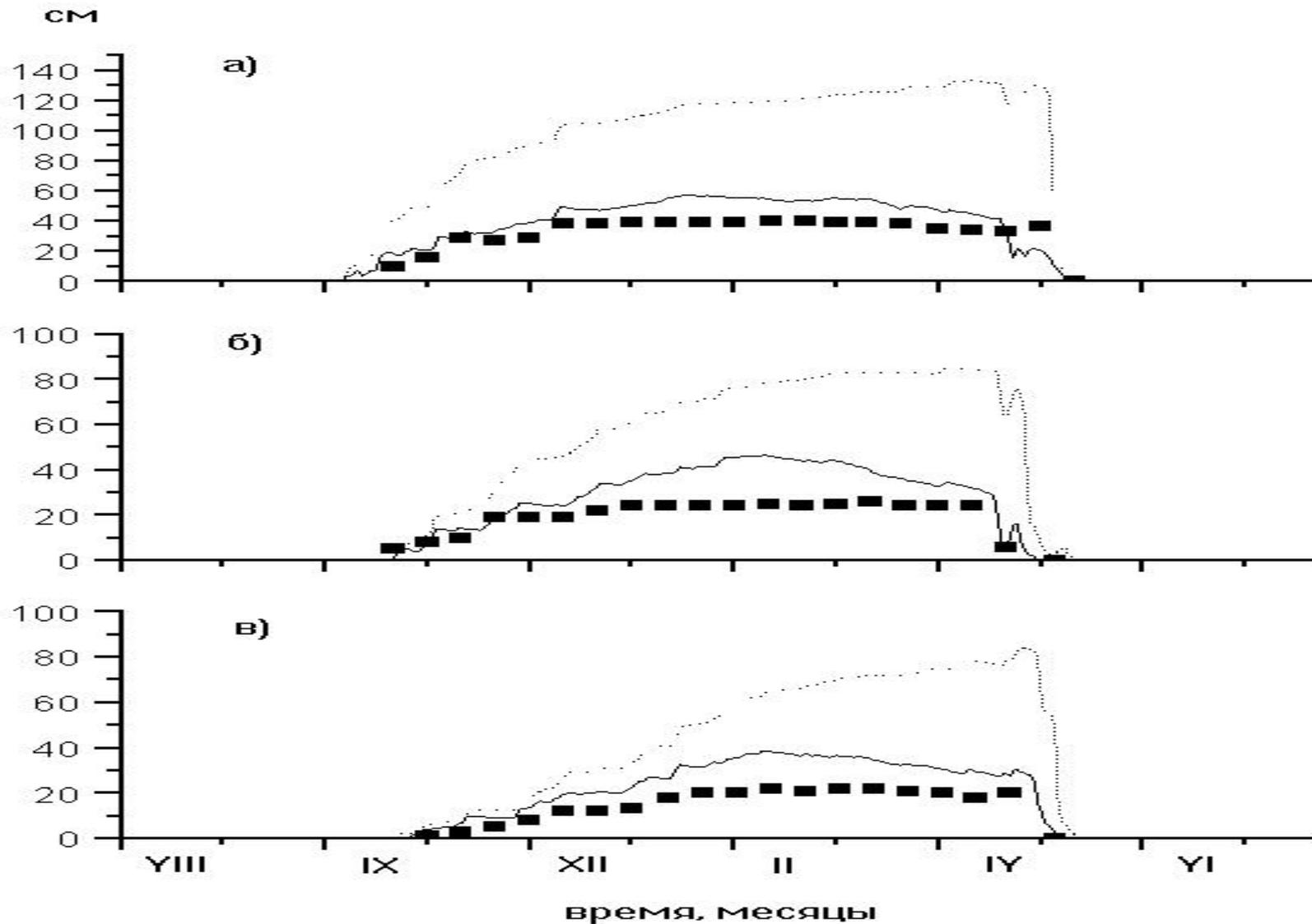
Изолинии: плотность снега



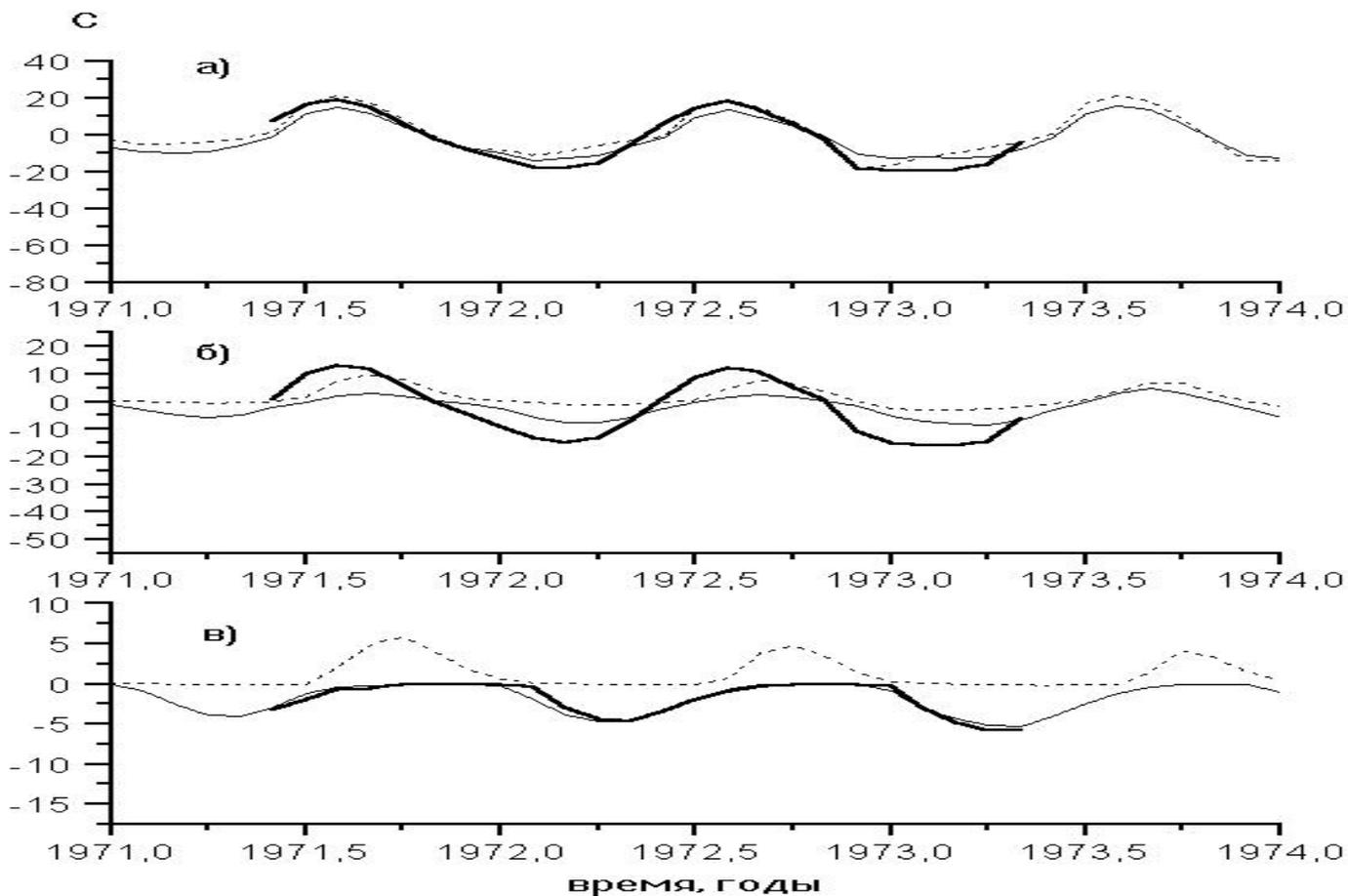
Volodina, Bengtsson and Lykosov (2000)

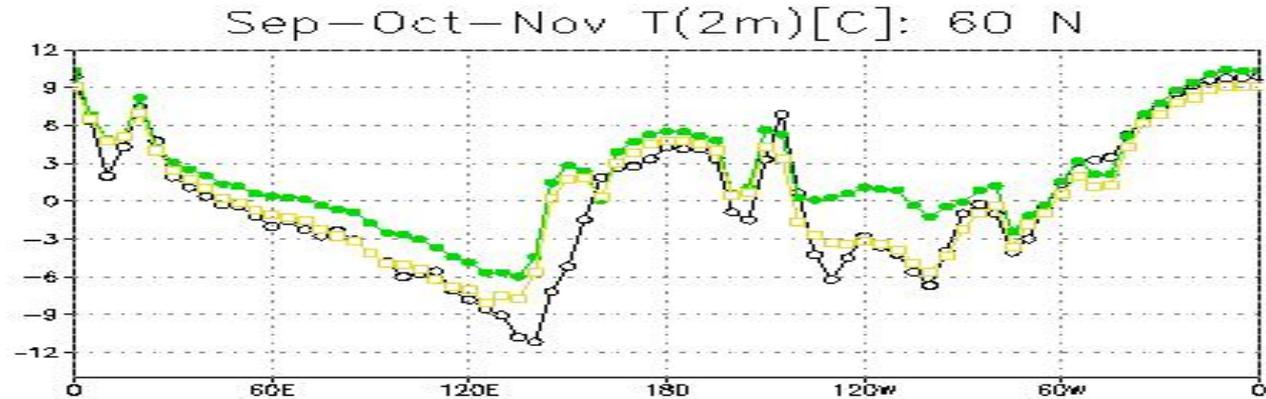
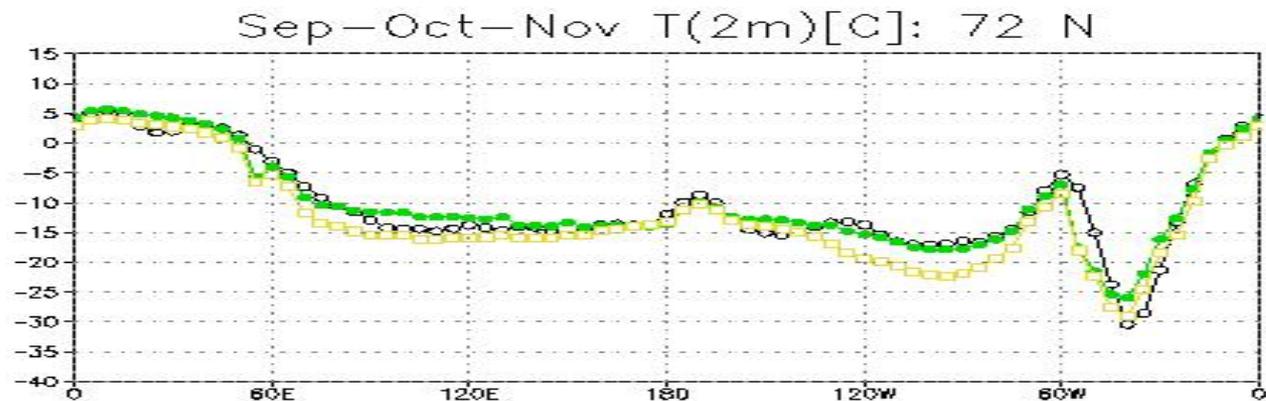


Высота снежного покрова в Якутске: 1970/71 (а), 1971/72 (б), 1972/73 (в).



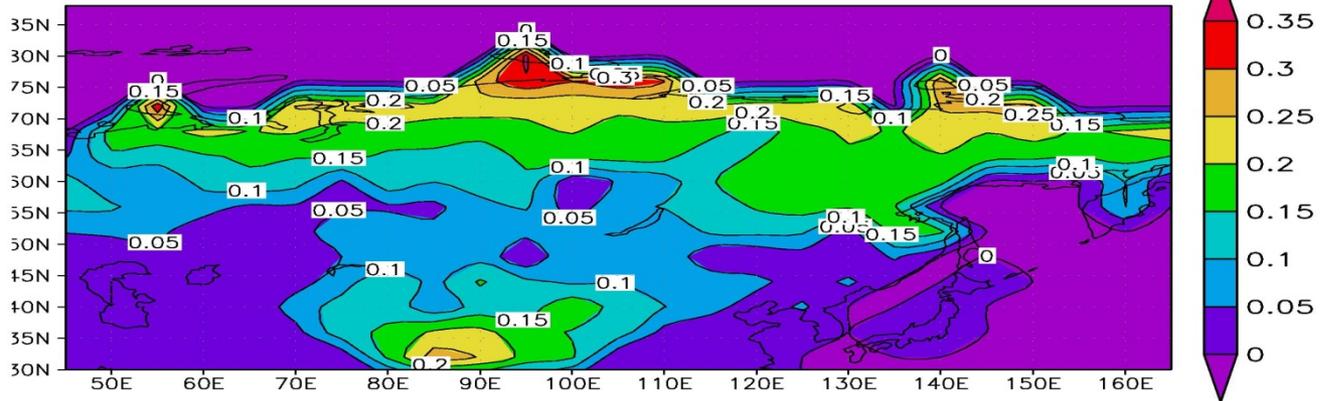
Температура почвы в Якутске на глубине 10 см (а), 50 см (б) и 200 см (в).
Утолщенная кривая – данные наблюдений, пунктир – расчет без
уплотнения снега, тонкая кривая – с уплотнением снега.



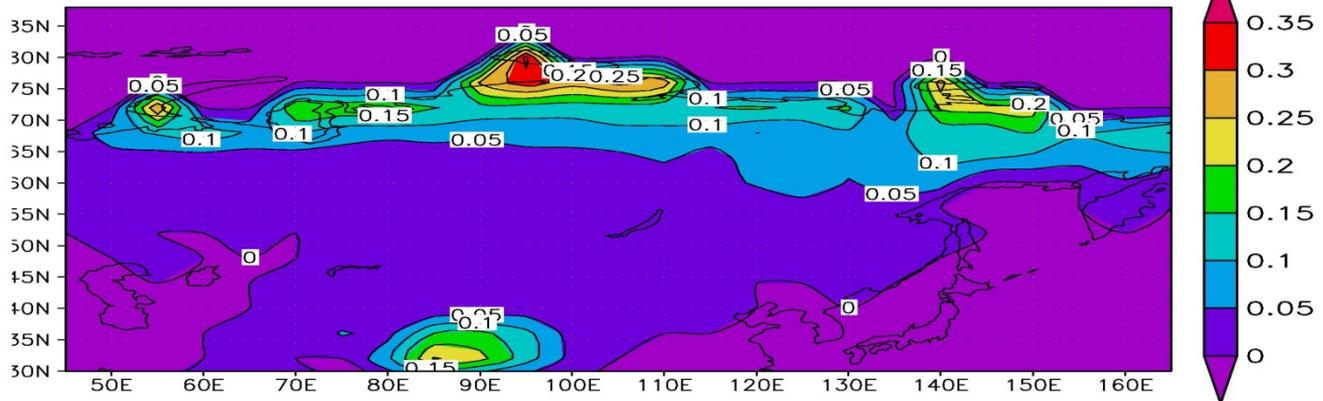


Сравнение рассчитанных распределений среднеосенней температуры на 2 м ($^{\circ}\text{C}$) вдоль 72° с.ш. (верхний рисунок) и 60° с.ш. (нижний) с данными наблюдений. Обозначения: кривая с открытыми кружочками – наблюдения, кривая с закрытыми кружочками – результаты расчета с помощью исходной модели, кривая с квадратиками – результаты расчета с помощью модифицированной модели

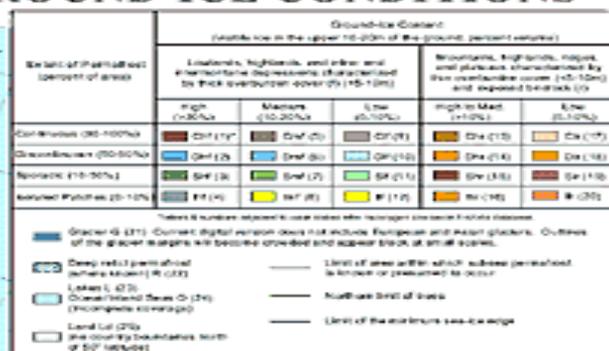
Winter 2m-mean Soil Ice: AMIP(60m)



Summer 2m-mean Soil Ice: AMIP(60m)



CIRCUM-ARCTIC MAP OF PERMAFROST AND GROUND-ICE CONDITIONS



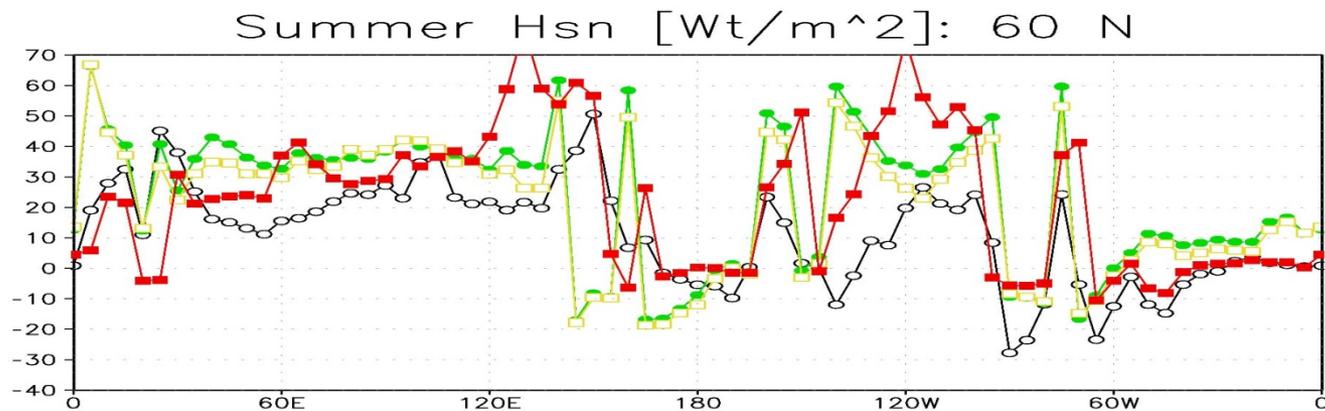
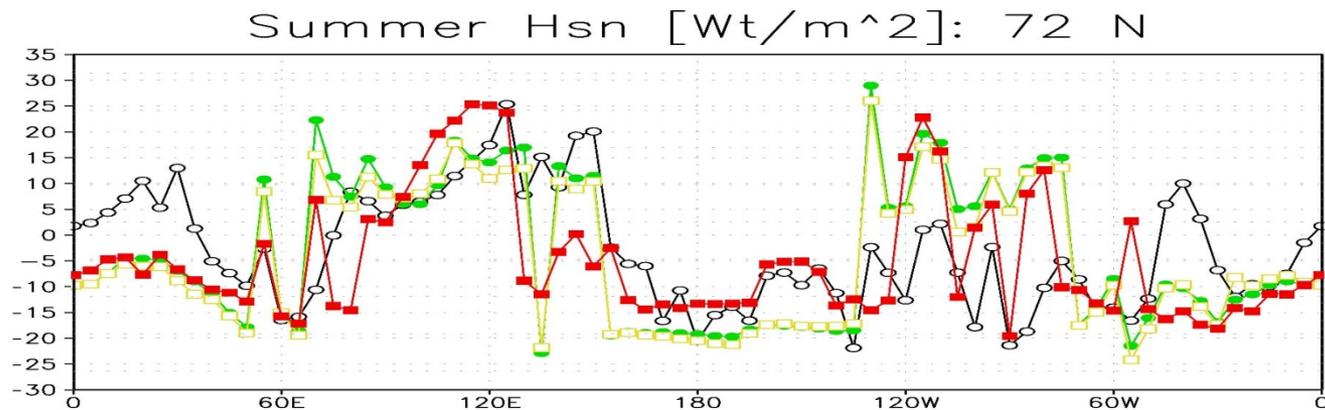
Digital version based on USGS Circum-Pacific Map Series Map CP-45, compiled and edited by Jerry Brown, Oscar J. Ferrians, Jr., J. Alan Hoganbottom, and Evgeny S. Melnikov. Original digital version prepared by UNEP/GRID-Arendal, Norway. Source: International Permafrost Association, Data and Information Working Group, comp., 1998. Circumpolar Active-Layer Permafrost System (CAPS), version 1.0. CD-ROM Available from National Snow and Ice Data Center, nwtc@layos.colorado.edu. Boulder, Colorado: NSIDC, University of Colorado at Boulder.

Lambert Azimuthal Equal-Area Projection
Map Center Point: North Pole
Scale 1:25,000,000

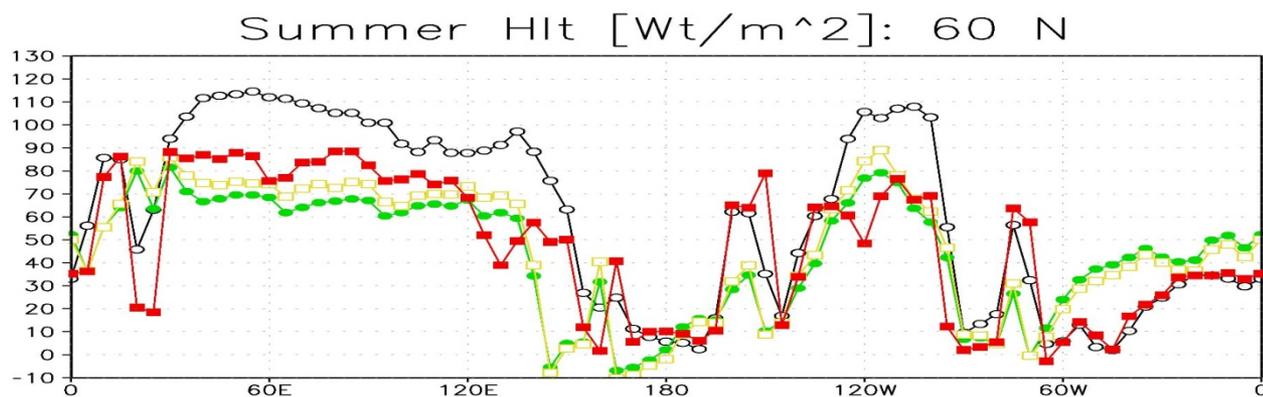
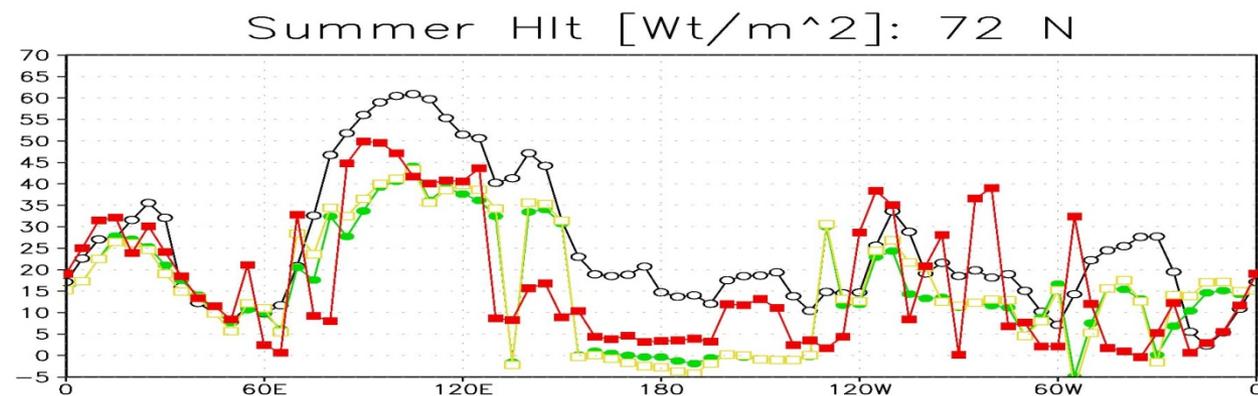


April 1998

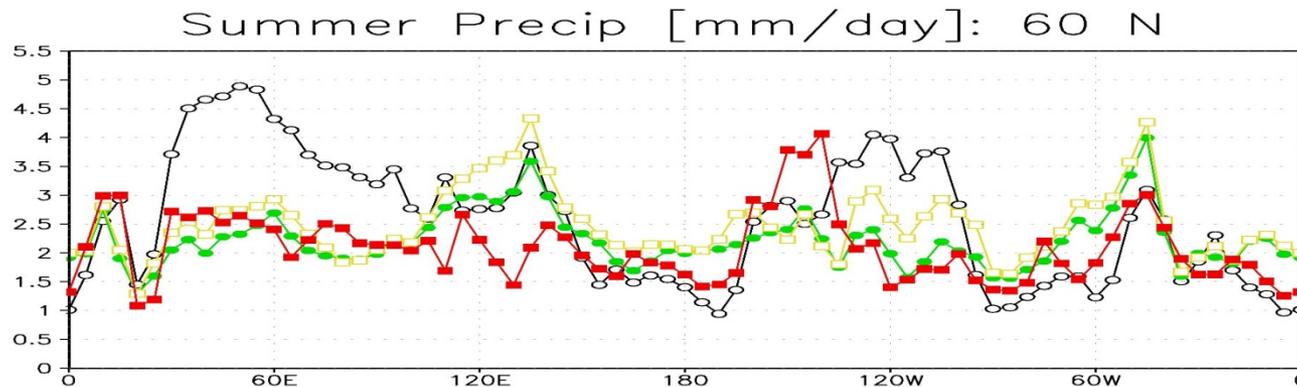
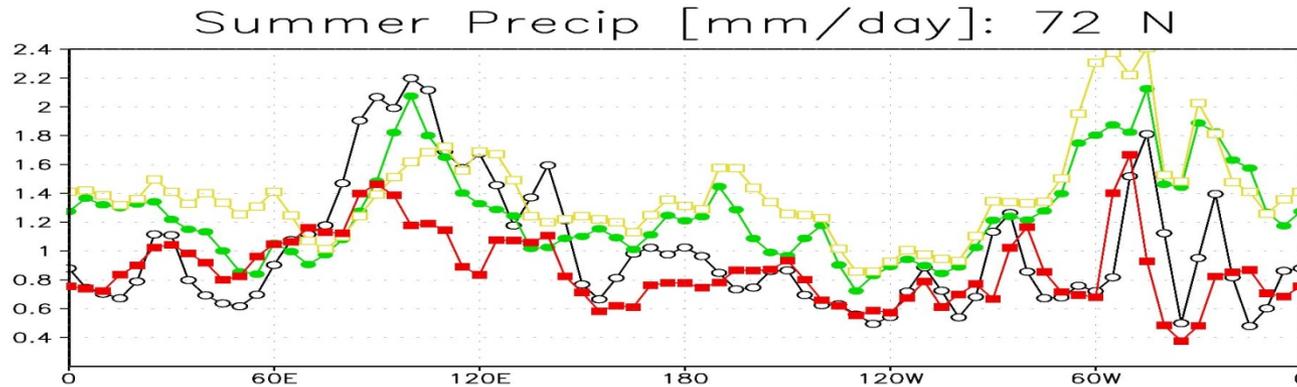
Поток явного тепла: серая кривая – реанализ NCAR/NCEP, красная – реанализ ECMWF, зеленая – воспроизведение современного климата, желтая - климат с удвоенным CO₂



Поток скрытого тепла: серая кривая – реанализ NCAR/NCEP, красная – реанализ ECMWF, зеленая – воспроизведение современного климата, желтая - климат с удвоенным CO₂



Осадки: серая кривая – реанализ NCAR/NCEP, красная – реанализ ESMWF, зеленая – воспроизведение современного климата, желтая - климат с удвоенным CO₂



Вместо заключения: Перспективы развития

Алгоритмы усвоения данных:

- Использование «модельно-независимых» алгоритмов усвоения данных.
- В частности, исследование возможностей статистических процедур типа “downscaling”.
- Оптимизация вычислительных ресурсов.

Усвоение новых данных:

- Речной сток, динамика растительности, грунтовые воды
- Процессы в пограничном слое атмосферы и растительном покрове

Наблюдательные системы:

- Регулярное обеспечение данными о снежном покрове, влажности почвы, температуре поверхности и т.д.
- Более точные знания о пространственно-временных ошибках наблюдений.
- Совершенствование методов выделения полезного сигнала из данных наблюдений.

Модели суши:

- Дальнейшее развитие моделей с целью лучшего согласования их результатов с данными наблюдений.
- Включение в рассмотрение дополнительных физических процессов: гидродинамика озер и рек, взаимодействие с грунтовыми водами, динамика растительности, углеродный цикл и цикл метана (болота).
- Анализ пространственно-временных систематических ошибок.

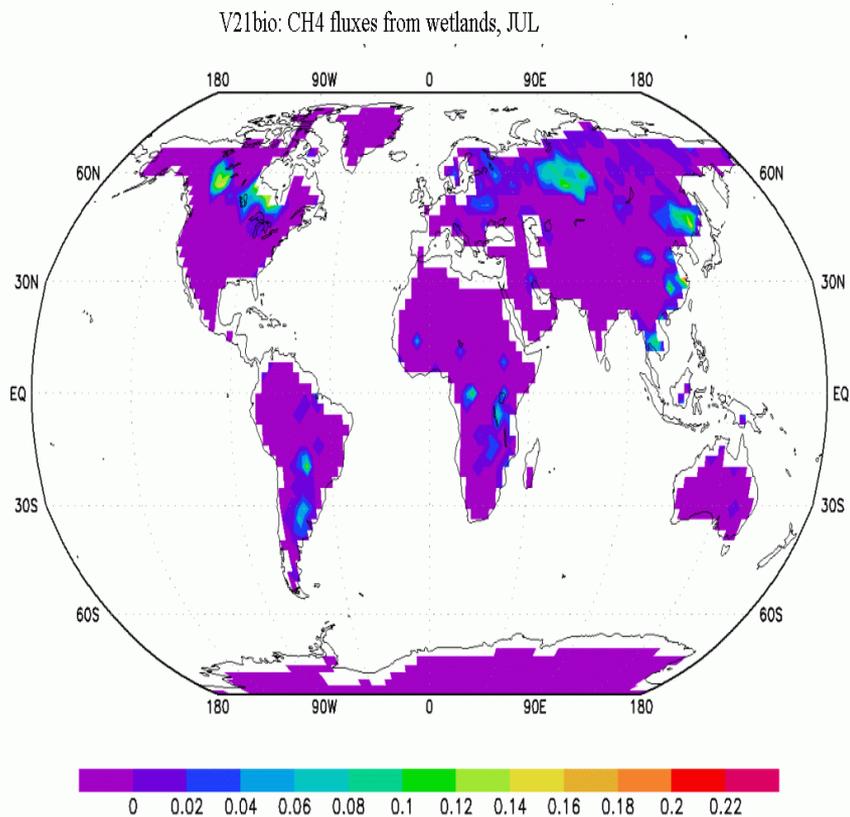
Модель деятельного слоя суши ИВМиМГ СО РАН (В.Н. Крупчатников и соавторы)

Особое внимание при разработке модели:

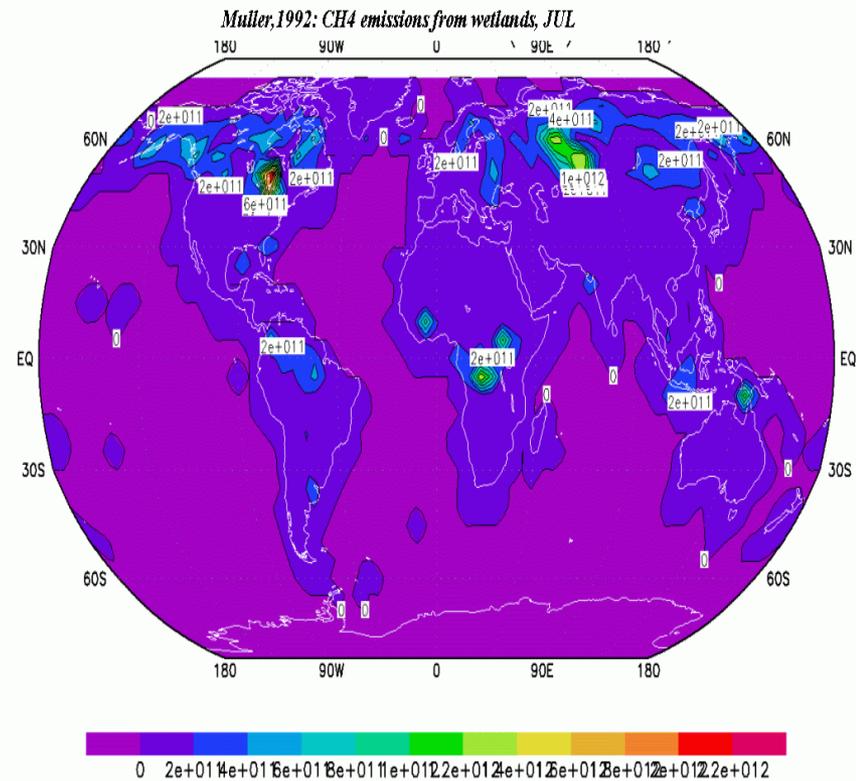
- **CO₂ и растительность (фотосинтез и дыхание) – см. также <http://CCDAS.org>**
- **Эмиссия метана из болот**
- **Использование совместно с климатическими моделями (в частности, с моделью ИВМ РАН)**

Биохимические потоки (CH₄)

Моделирование (on-line)



Наблюдения (Muller, 1992)



Knorr et al., 2004: Carbon end fAPAR assimilation with CCDAS

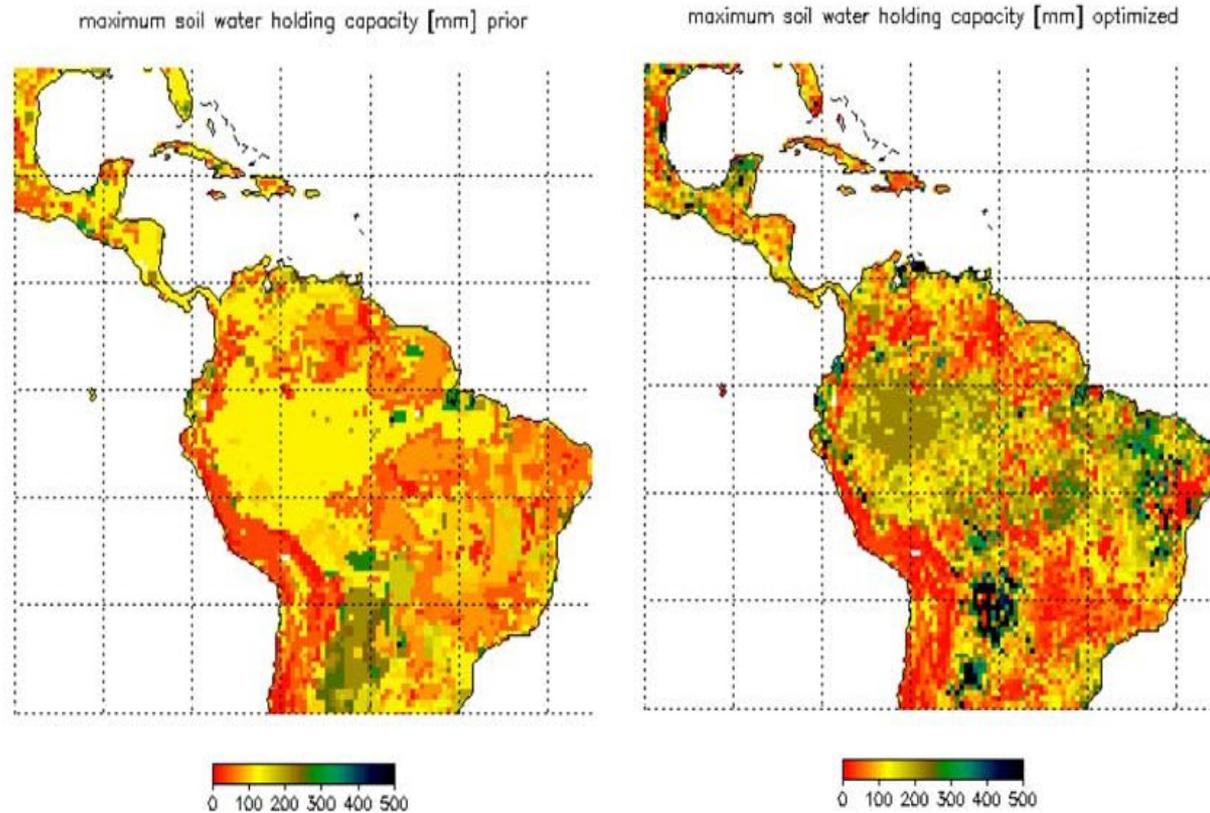
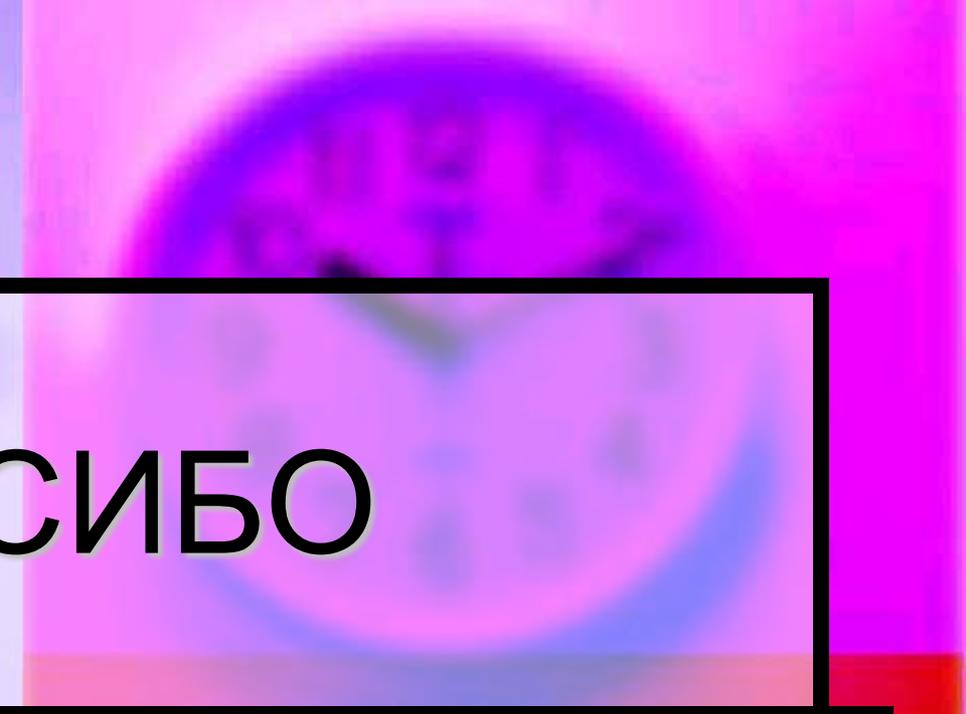
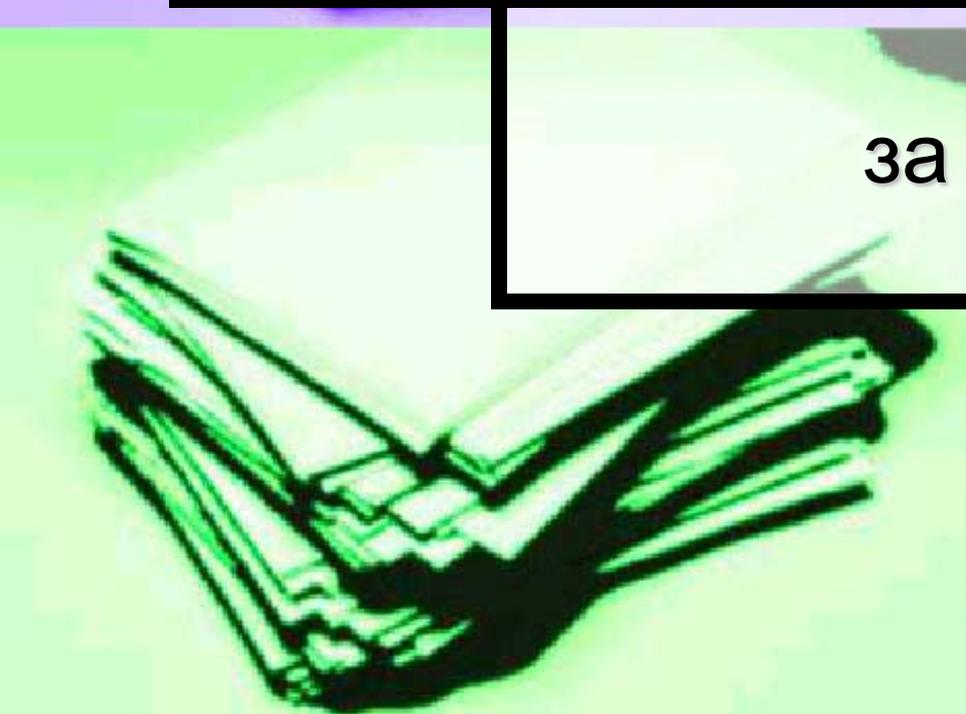


Figure 5: Soil water content prior (left panel) and posterior (right panel) values.



СПАСИБО



за ВНИМАНИЕ!