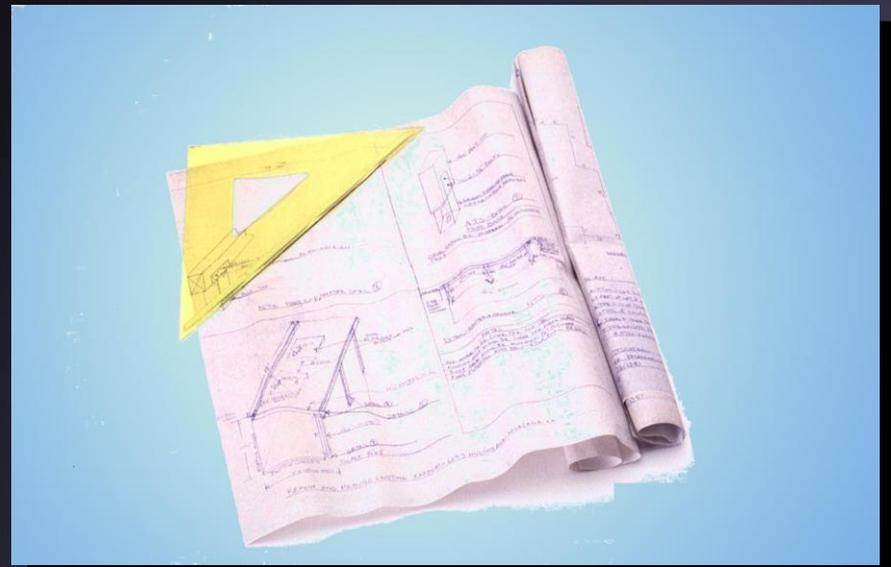


**Физико-математическая
модель взаимодействия
поверхности суши с
атмосферой SWAP и ее
приложение к решению
гидрологических и
экологических задач**

**Авторы:
Е.М.Гусев
О.Н.Насонова**



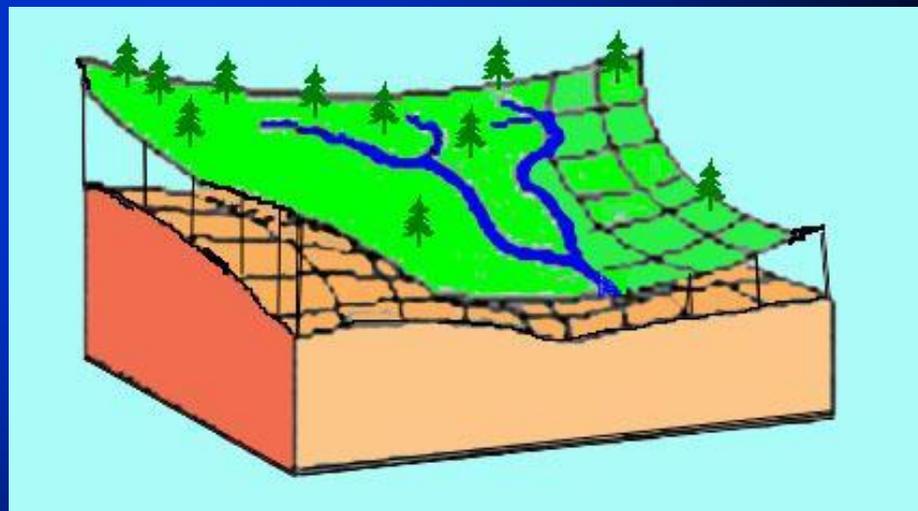
Цель доклада - показать возможности физико-математических моделей SWAP, воспроизводящей радиационный, тепловой, водный и углеродный обмен (в их взаимосвязи) в геофизических объектах различных пространственных масштабах и находящихся в различных природных условиях ^{*)}, для решения ряда задач, связанных с динамикой окружающей среды

^{*)} в международной литературе подобные модели относятся к классу так называемых **LSM**-моделей – Land Surface Models

Используемый метод

LSM – моделей

Физико-математическое моделирование процессов тепло- массообмена в системе «почва – растительный/снежный покров – атмосфера»

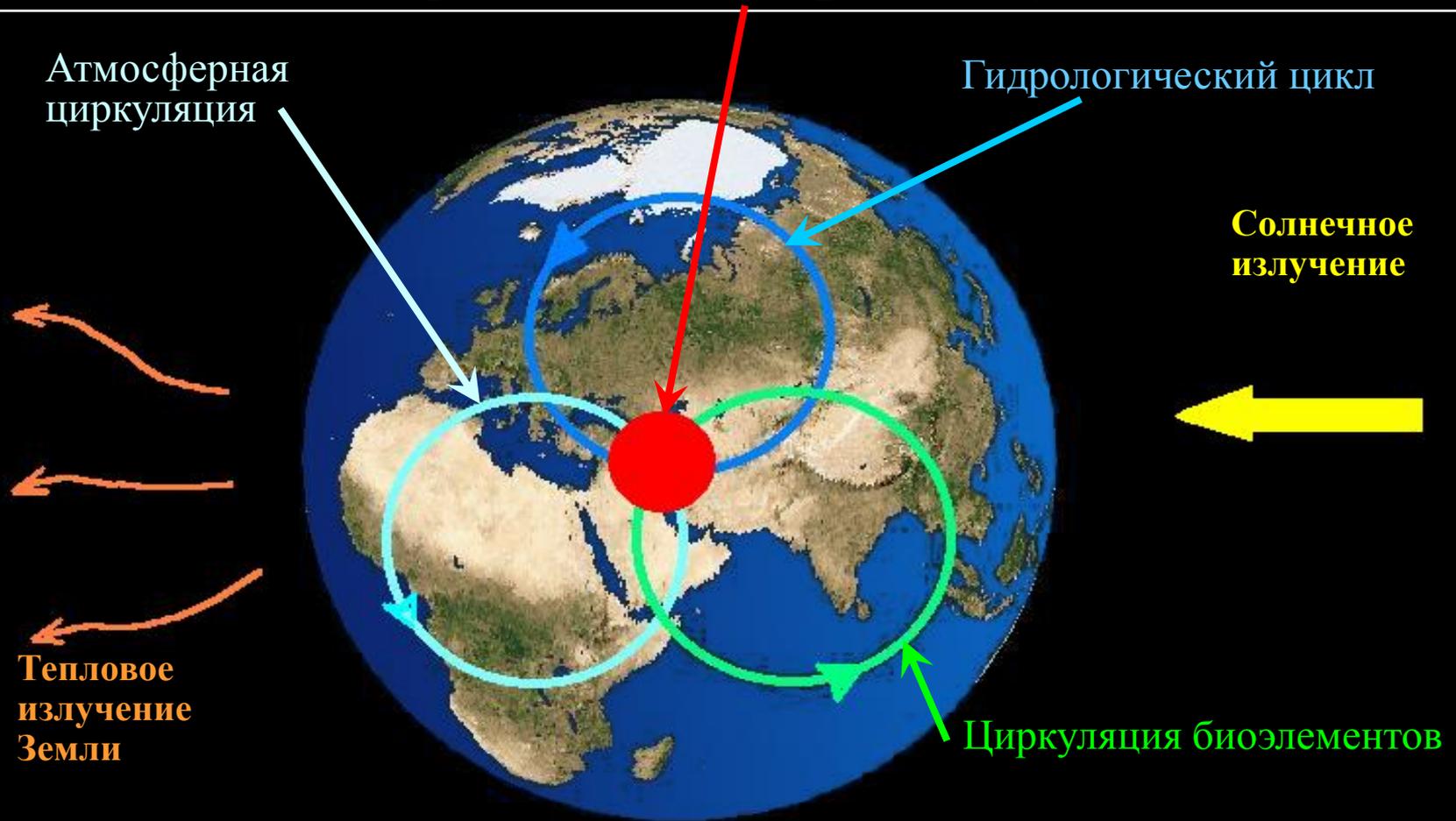


Land surface model SWAP

(Soil Water - Atmosphere – Plants)

Система почва – растительный/снежный покров атмосфера

Soil - Vegetation - Atmosphere - System



Часть литературы по модели SWAP

«Право, печатной бумаги развелось столько, что не придумаешь скоро, что бы такое завернуть в нее».

Н.В.Гоголь. ВЕЧЕРА НА ХУТОРЕ БЛИЗ ДИКАНЬКИ

- ♥ Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The land surface parameterization scheme Swap: description and partial validation. *Global and Planetary Change*. 1998. Vol.19, N 1-4, pp.63-86.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н. Опыт моделирования процессов тепловлагообмена на поверхности суши в региональном масштабе // Водные ресурсы. 2000. Т.27, № 1, с.32-47.
- ♥ Gusev Ye.M., Nasonova O.N. An experience of modelling heat and water exchange at the land surface on a large river basin scale // Journal of Hydrology. 2000. Vol.233, N 1-4, pp.1-18.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды - почва - растительный / снежный покров - атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6, с.733-748.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в бореальных лесных экосистемах // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 182-200.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н., Бусарова О.Е. Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши для территорий с умеренным континентальным климатом // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 1. С. 107-119.
- ♥ Gusev Ye.M. Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange at the land-atmosphere interface for the boreal grassland by the land-surface model SWAP. Hydrological Processes. 2002. Volume 16, № 10, pp. 1893-1919.
- ♥ Gusev Yeugeniy M. and Nasonova Olga N. The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // *Journal of Hydrology*, Volume 280, Issues 1-4, September 2003, Pages 162-191.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н. Проблемы изучения и моделирования тепло- и влагообмена в системе почва - растительный и (или) снежный покров - приземный слой атмосферы // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 2. С. 148-164.
- ♥ Гусев Е.М.Б Насонова О.Н., Моханти Б.П. Оценка радиационного, теплового и водного обмена степных экосистем с атмосферой на основе модели SWAP // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004, том 40, №3, с.330-346.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов тепловлагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004, №9, с. 1077-1092.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование процессов теплового, водного и углеродного обмена в экосистеме соснового леса. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Том 41, №2, стр.227-241.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Водные ресурсы. 2006, №2, стр.133-145.
- ♥ Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши земного шара // Водные ресурсы. 2006. № 6, с.664-676.
- ♥ Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой для расчетов речного стока в высоких широтах. Водные ресурсы. 2008. Т.35, №2. С.181-195. **И Т.Д.**

Основные особенности модели SWAP

Структура системы “почва – растительный / снежный покров – приземный слой атмосферы”

Почва	Задача формирования теплового режима:	1 – 3 слоя
	Задача формирования водного режима:	3 – 4 слоя
Снежный покров	Задача формирования водного и теплового режимов	1 слой
Растительность	Задача формирования водного, теплового режимов и углеродного режима	1 – 2 слоя
Приземный слой атмосферы		1 слой

Основные уравнения

Уравнения сохранения (баланса)
Уравнения переноса
Уравнения состояния
Граничные условия
Начальные условия

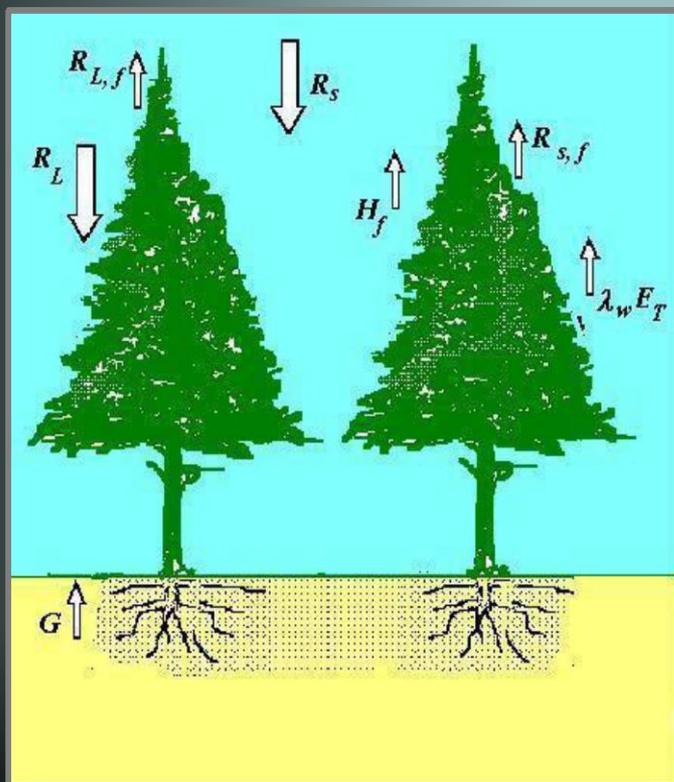
Расчетные методы

преимущественно **аналитические** по пространству
численные по времени

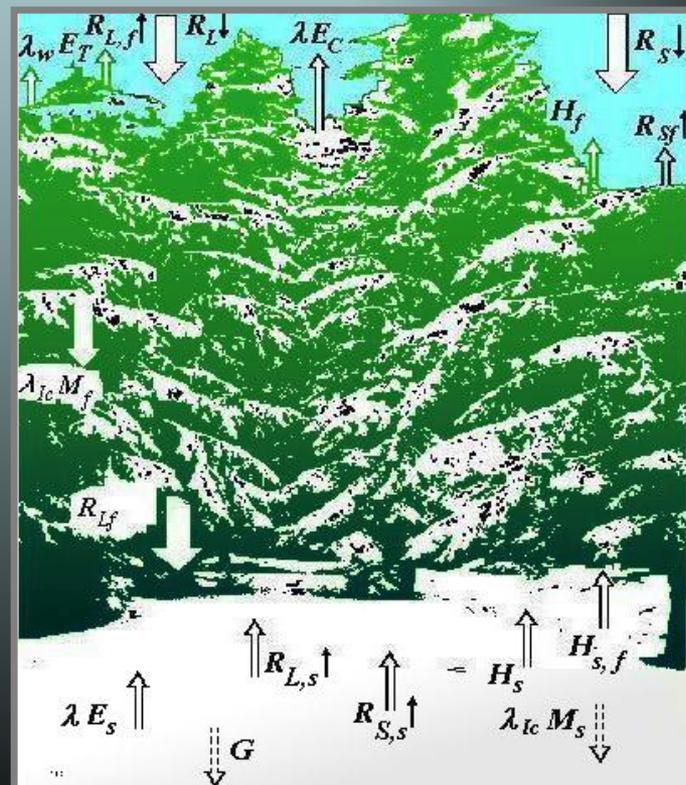
Схематизация формирования теплового баланса в SVAS в летний и зимний периоды года.

$R_{S\downarrow}$ и $R_{L\downarrow}$ - соответственно входящие на верхнюю границу крон потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, $R_{L,f\downarrow}$ - длинноволновое излучение древесного яруса в направлении подстилающей поверхности, $R_{L,s}$ - длинноволновое излучение подстилающей поверхности, $R_{S,s}$ - отраженная поверхностью солнечная радиация, $R_{L,f}$ - длинноволновое излучение древесного яруса в атмосферу, $R_{S,f}$ - отраженная кронами радиация, H_f и E_f - соответственно вертикальные турбулентные потоки тепла и водяного пара, генерируемые кронами деревьев; H_s и H_{sf} - турбулентные потоки явного тепла под пологом леса, характеризующие соответственно теплообмен с атмосферой и фитоэлементами древесного яруса; G - поток тепла в почву от подстилающей поверхности; λE_C , $\lambda_w E_T$, λE_s , $\lambda_{ic} M_f$, $\lambda_{ic} M_s$ - затраты тепла на испарение перехваченных осадков, транспирацию, снега, на таяние снега на деревьях, на таяние снежного покрова под пологом леса, соответственно ($\lambda = \lambda_{ic} + \lambda_w$ - удельная теплота сублимации, равная сумме значений удельной теплоты плавления льда λ_{ic} и удельной теплоты испарения воды λ_w).

ЛЕТО



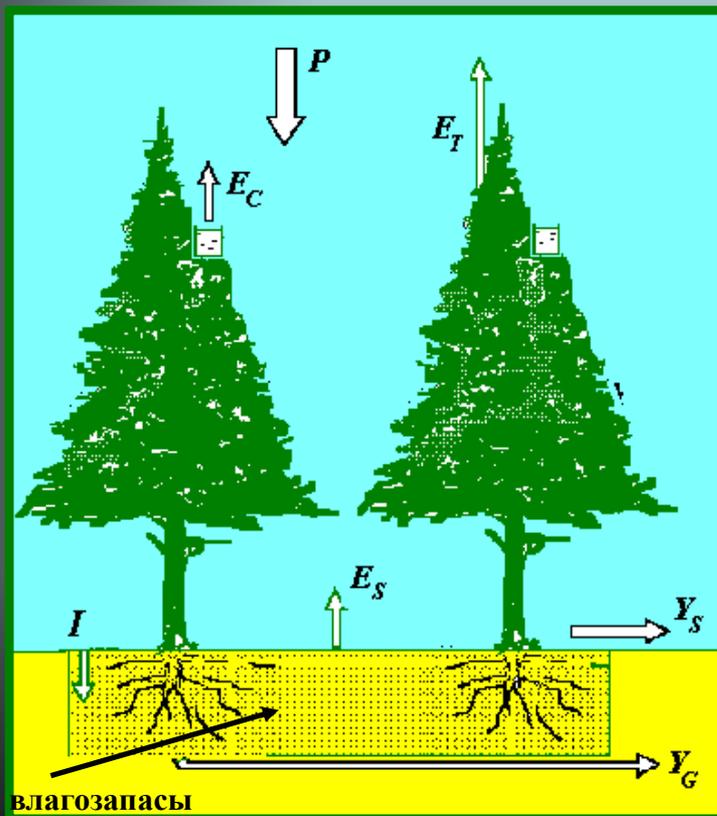
ЗИМА



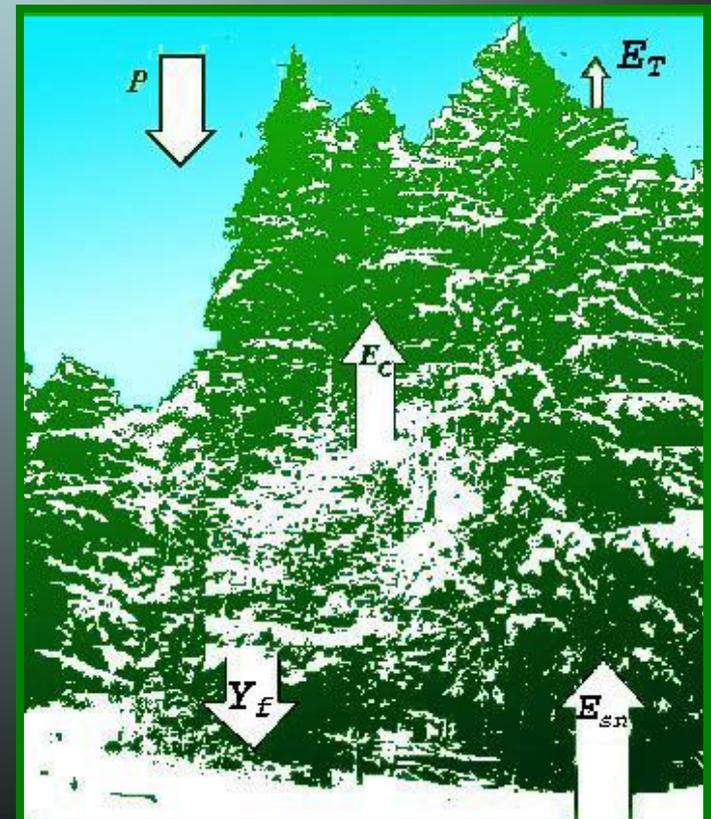
Схематизация формирования водного баланса в системе “почва – растительный / снежный покров – атмосфера” в летний и зимний периоды года.

P - атмосферные осадки, E_T - транспирация; E_S - испарение воды почвой; E_C - испарение осадков, перехваченных растительным покровом; E_{sn} - испарение снега; I - впитывание воды в почву; Y_S - поверхностный сток; Y_G - сток грунтовых вод, Y_f - водоотдача снега на кронах деревьев.

ЛЕТО



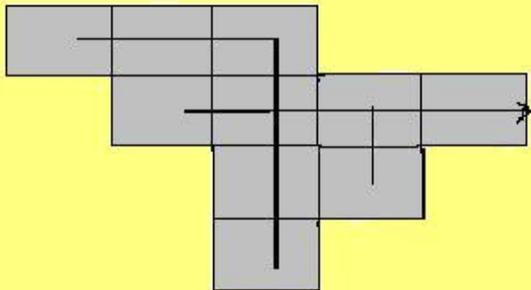
ЗИМА



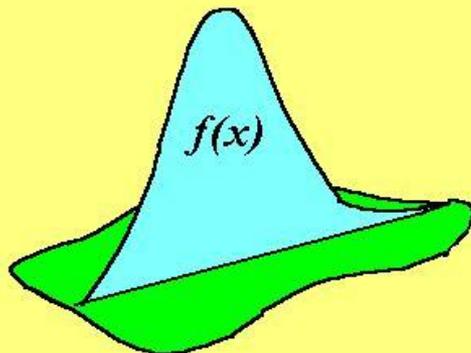
UPSCALING



Метод эффективных параметров



Явный учет
пространственной
неоднородности



Статистический
подход

ИСХОДНЫЕ ДААННЫЕ



Гидрометеорологические данные

- ♥ **Tair** Приповерхностная температура воздуха (на 2 м)
- ♥ **Qair** Приповерхностная удельная влажность воздуха (на 2 м)
- ♥ **Wind** Приповерхностная скорость ветра (на 10 м)
- ♥ **SWdown** Приходящая коротковолновая радиация
- ♥ **LWdown** Приходящая длинноволновая радиация
- ♥ **Psurf** Приповерхностное давление воздуха
- ♥ **Rainf** Интенсивность жидких осадков
- ♥ **Rainf_C** Интенсивность конвективных жидких осадков
- ♥ **Snowf** Интенсивность твердых осадков

Параметры растительного покрова

- ♥ **VegClass** Класс растительного покрова
- ♥ **LAI** Относительная площадь листьев (*Total LAI*)
- ♥ **vegFrac** Доля площади, занятая растительностью
- ♥ **grnFrac** Доля зеленых листьев (*green LAI / Total LAI*)
- ♥ **classFrac** Доля каждого класса растительного покрова
- ♥ **Z0Surf** Параметр шероховатости
- ♥ **DispH** Высота слоя вытеснения
- ♥ **Albedo** Альбеда поверхности в отсутствии снега
- ♥ **RootDepth** Толщина корнеобитаемой зоны
(зоны, где сосредоточено 95% корневой биомассы)
- ♥ **Rs_min** Минимальное устьичное сопротивление

Почвенные параметры:

SoilClass	Тип почвы по мехсоставу
SoilDepth	Глубина почвенной колонки
Clay	Clay fraction
Sand	Sand fraction
Silt	Silt fraction
Organic	Доля органики
W_fieldcap	Наименьшая влагоемкость
W_wilt	Влажность завядания
W_sat	Пористость
W_bpower	Степенной показатель В
W_sat_hydc	Коэффициент фильтрации
W_sat_matp	Потенциал почвы при насыщении
Albedo_vi	Альbedo почвы в видимом диапазоне
Albedo_ir	Альbedo почвы в инфракрасном диапазоне

Основные выходные переменные модели SWAP



Гидрологические характеристики

- данные о перехвате осадков (жидких и твердых) растительным покровом
- снегозапасы, высота и плотность снега
- интенсивность снеготаяния или замерзания жидкой воды в снеге, водоотдача снежного покрова
- влагозапасы в различных слоях почвенного профиля
- уровень грунтовых вод
- поверхностный и подземный сток
- испарение с почвы, транспирация, испарение задержанных осадков, испарение со снега, суммарное испарение
- глубины промерзания и оттаивания почвы



Энергетические характеристики

- отраженная коротковолновая радиация, длинноволновое излучение подстилающей поверхности
- радиационный баланс и радиационная температура подстилающей поверхности, температура почвы и снега
- турбулентные потоки явного и скрытого тепла, поток тепла в почву



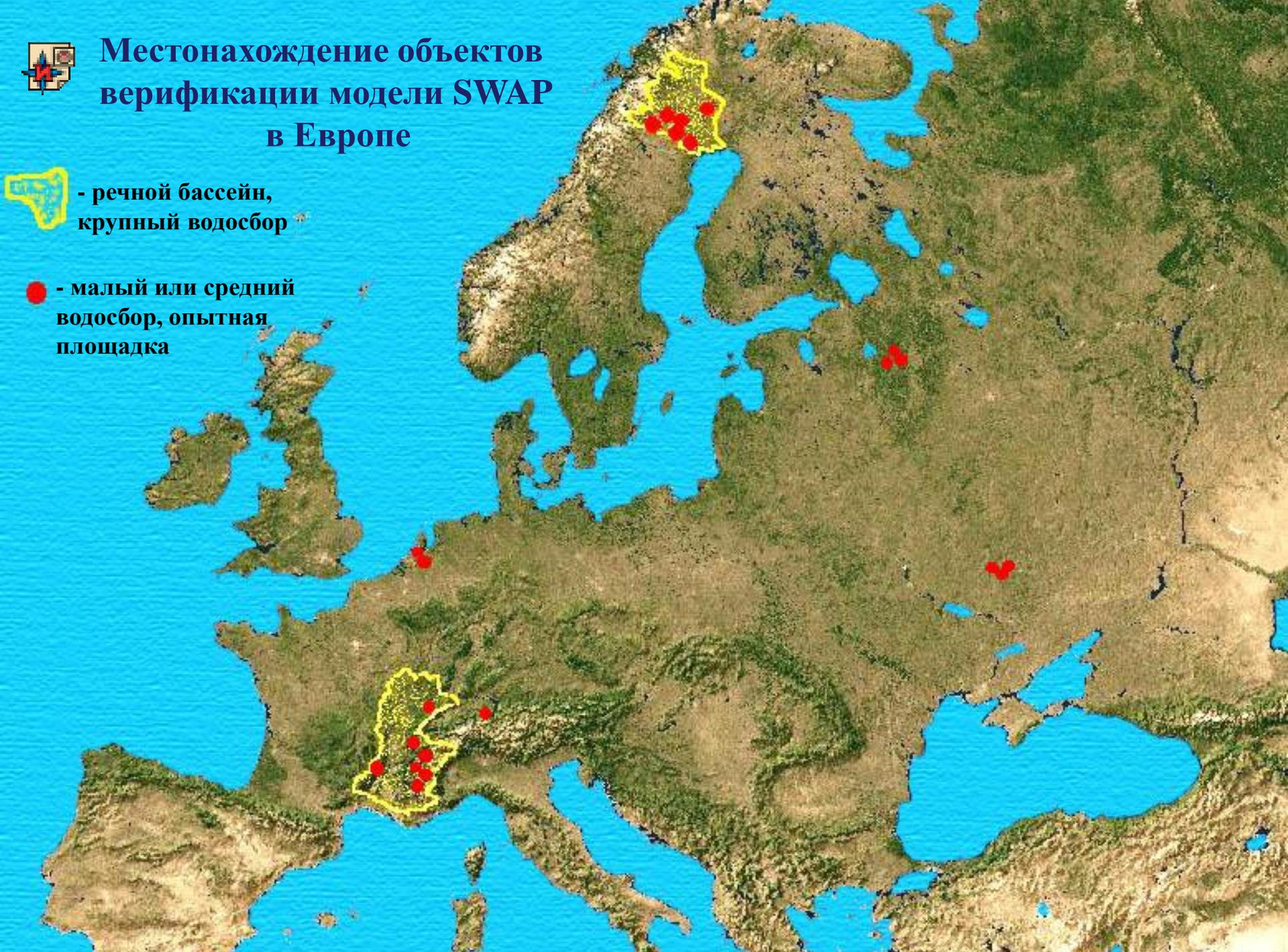
Местонахождение объектов верификации модели SWAP в Европе



- речной бассейн,
крупный водосбор

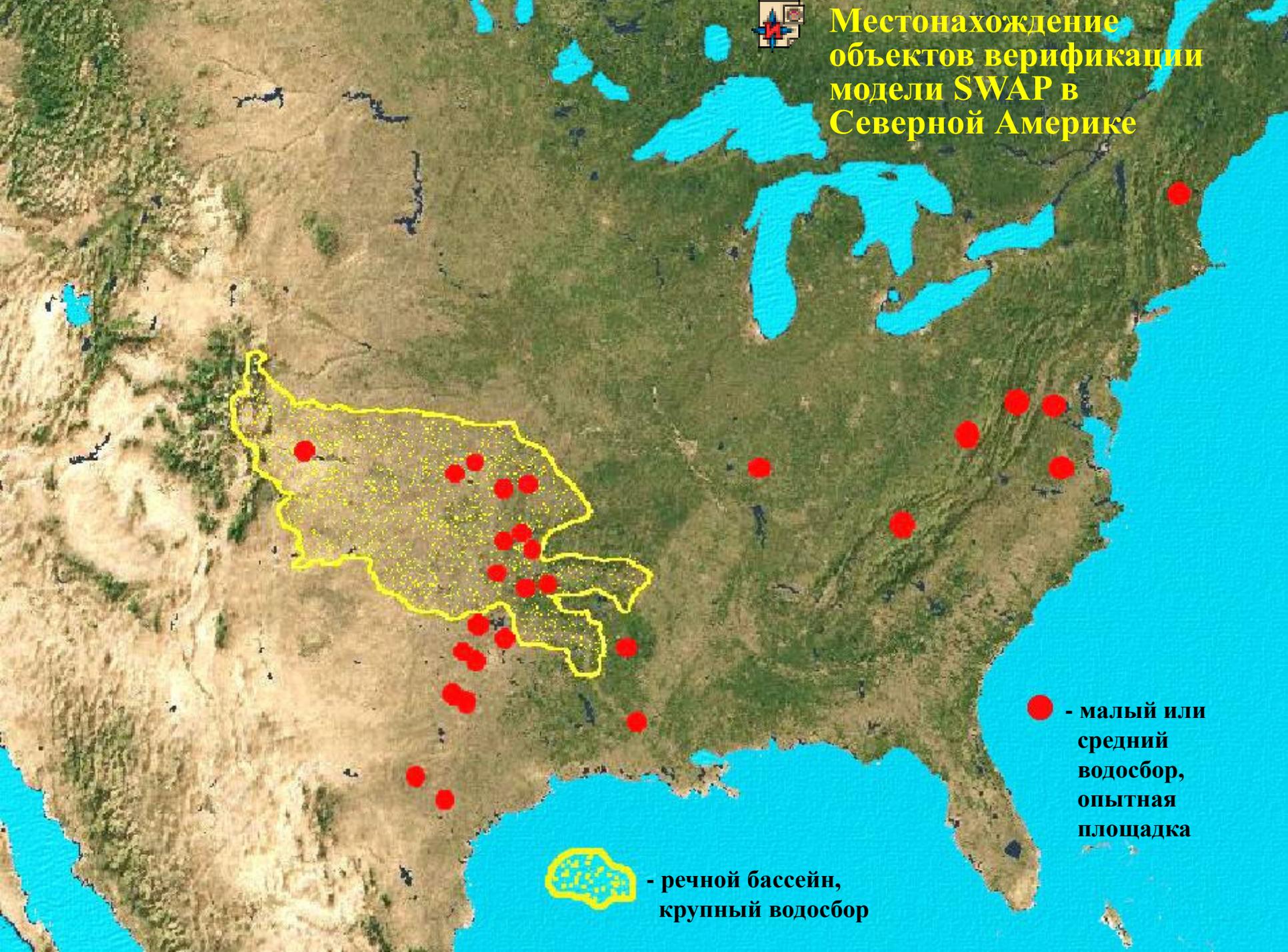


- малый или средний
водосбор, опытная
площадка





Местонахождение объектов верификации модели SWAP в Северной Америке



● - малый или средний водосбор, опытная площадка

▨ - речной бассейн, крупный водосбор

**Россия, Валдайская возвышенность
Валдайская научно-исследовательская
гидрологическая лаборатория**

Климат

умеренно-континентальный

Почва

подзолистая, средний суглинок

Период наблюдений

1966-1983



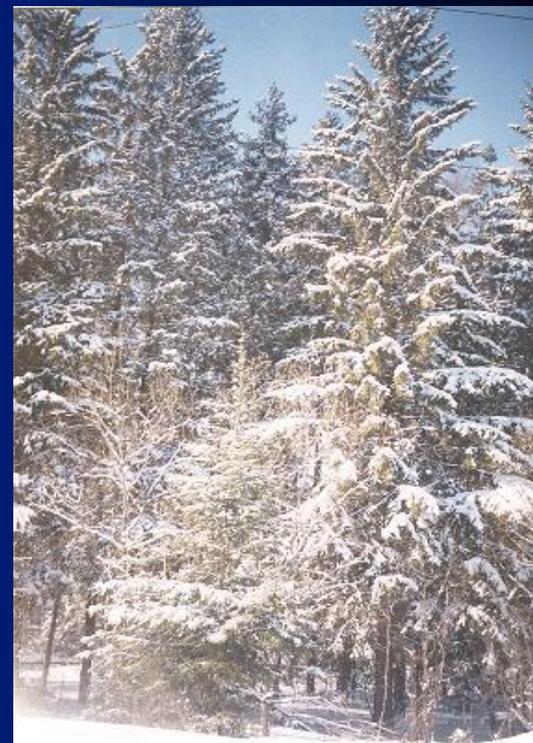
водосбор лога Усадьевского

площадь

0.36 км²

растительность

многолетние
травы



водосбор лога

Таежного

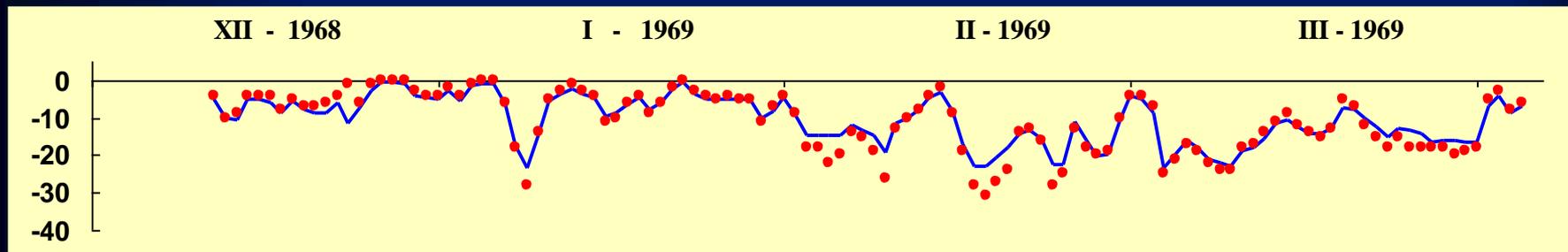
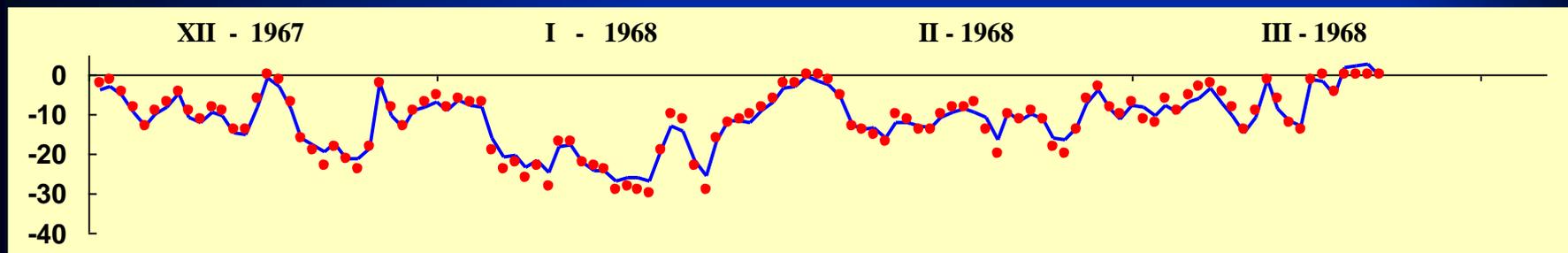
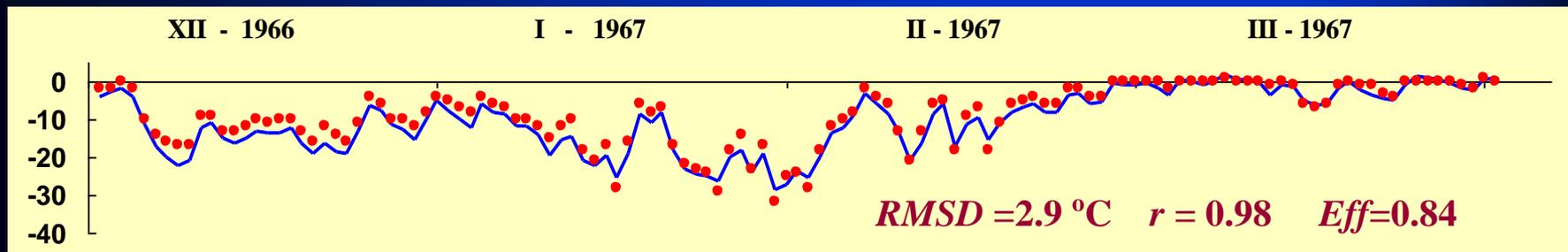
площадь

0.45 км²

растительность

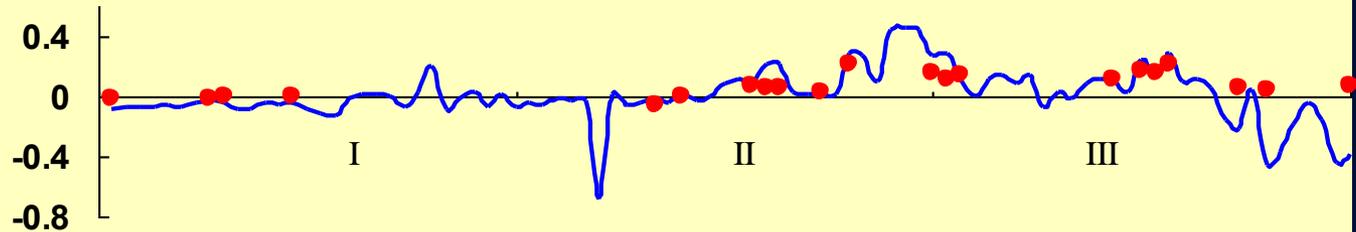
хвойный
лес, ельник-кисличник,
возраст 80-90 лет

Динамика измеренной (●) и рассчитанной (—) среднесуточной температуры поверхности снега (°C) на водосборе лога Усадьевский

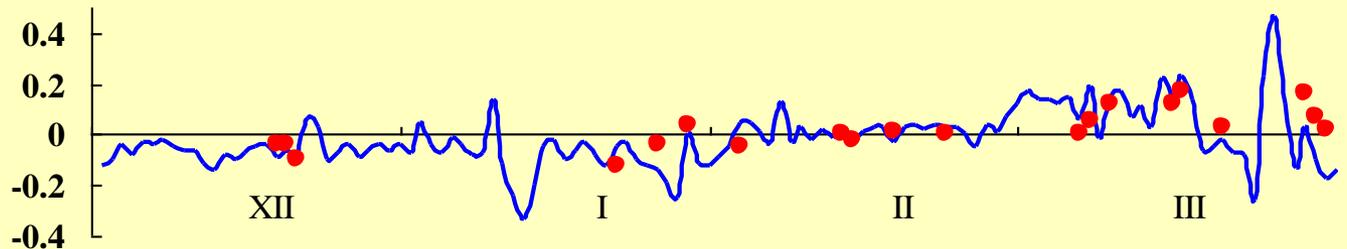


Динамика измеренного (●) и рассчитанного (—) испарения (мм/сут) со снежного покрова на водосборе лога Усадьевский

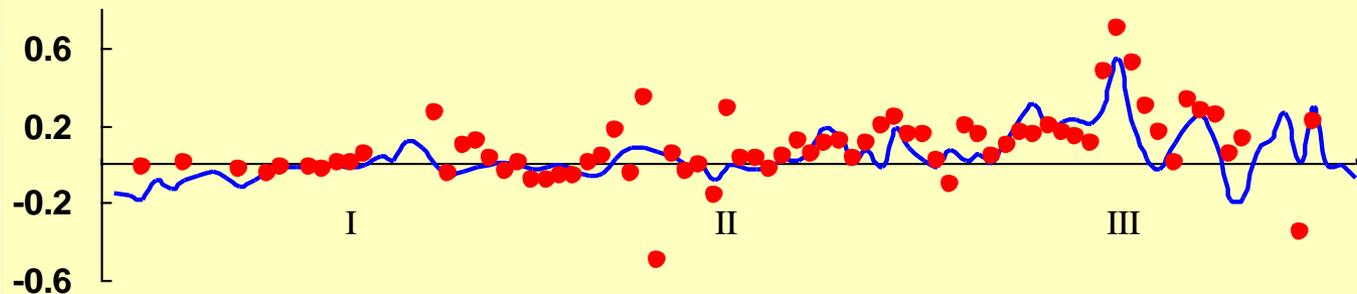
1970



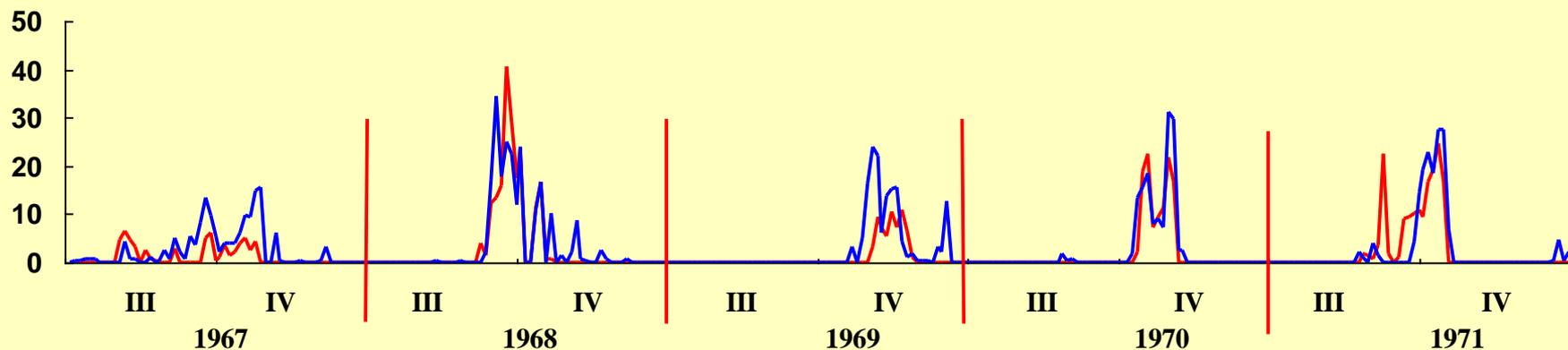
1970-1971



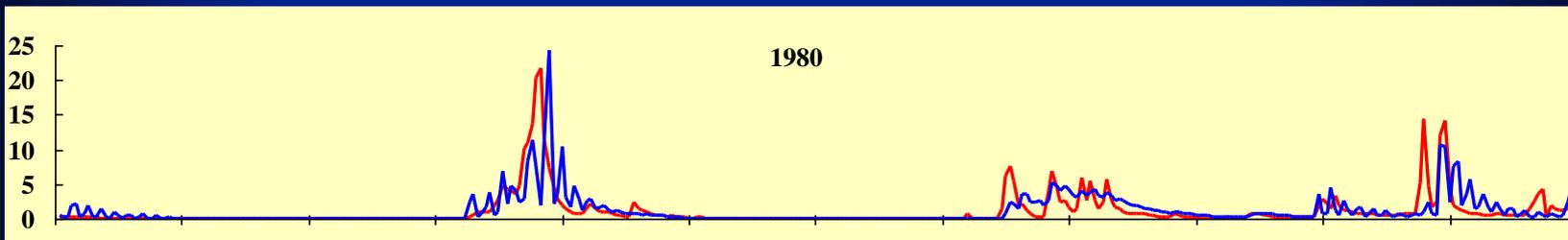
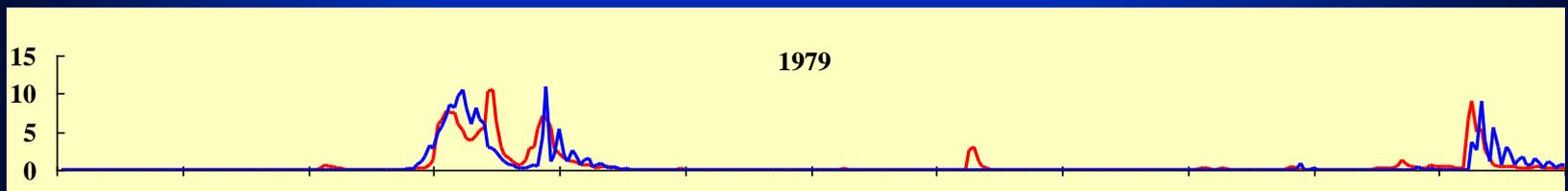
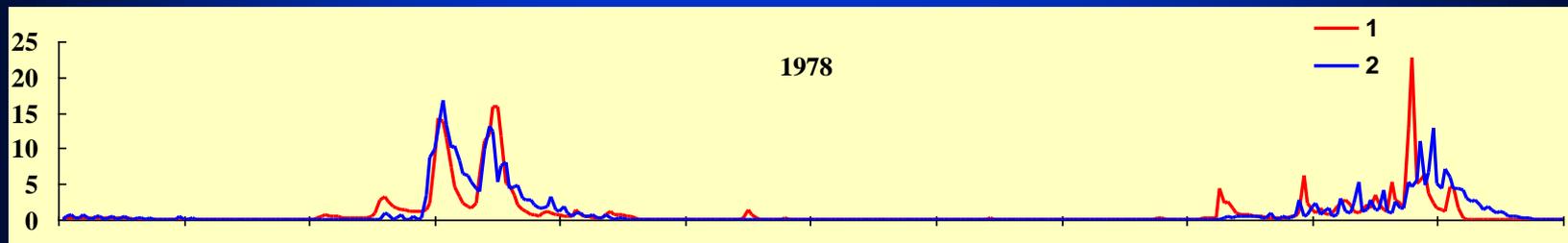
1972



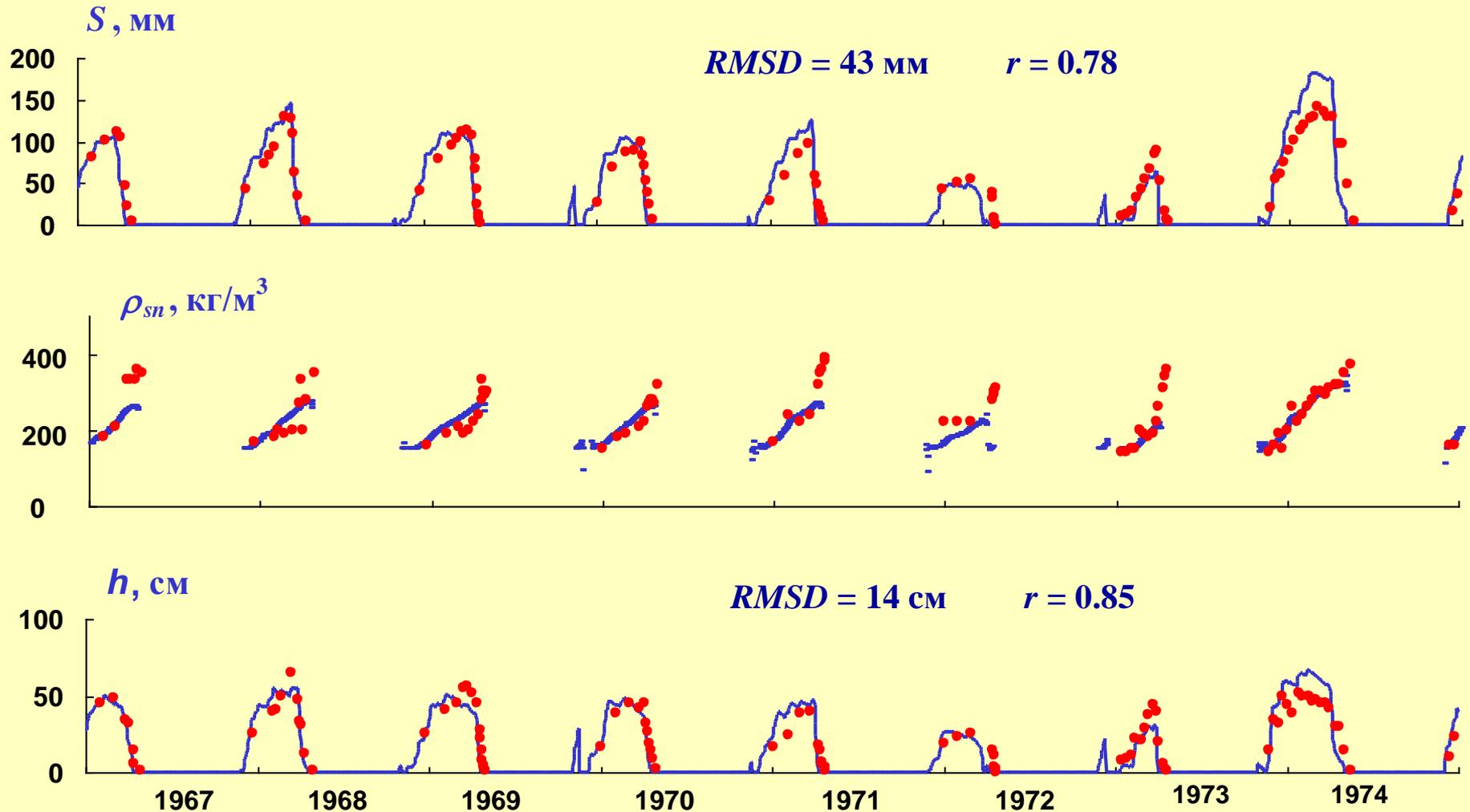
**Динамика измеренной (—) и рассчитанной (—) водоотдачи
снежного покрова (мм/сут) в период весеннего снеготаяния
на водосборе лога Усадьевский**



Динамика измеренного (1) и рассчитанного (2) стока (мм/сут) с водосбора лога Усадьевского (1978-1981).



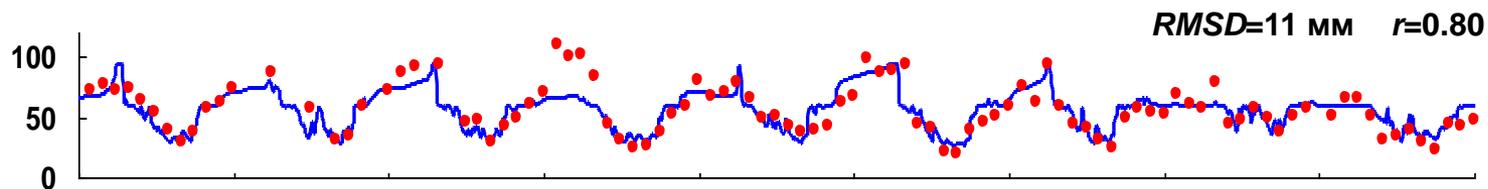
Динамика измеренных (●) и рассчитанных (—) значений снегозапасов S , плотности снега ρ_{sn} и высоты снежного покрова h (лог Таежный)



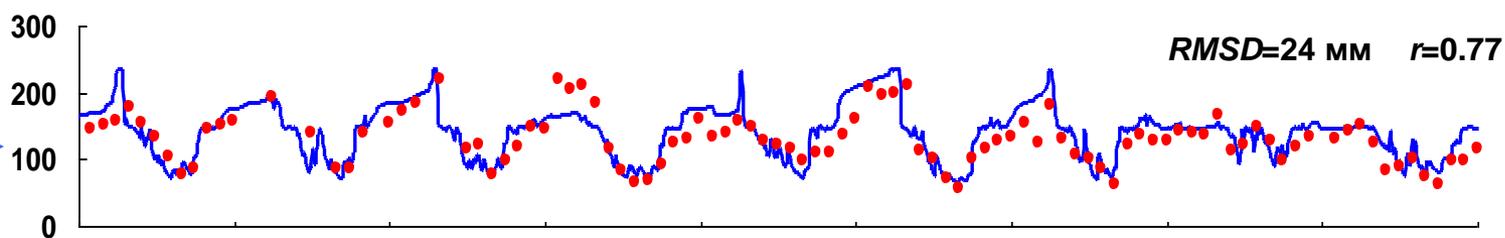
Измеренные (●) и рассчитанные (—) влагозапасы в различных слоях почвы и уровень грунтовых вод (ВНИГЛ, лог Таежный)

Влагозапасы почвы, мм в слоях

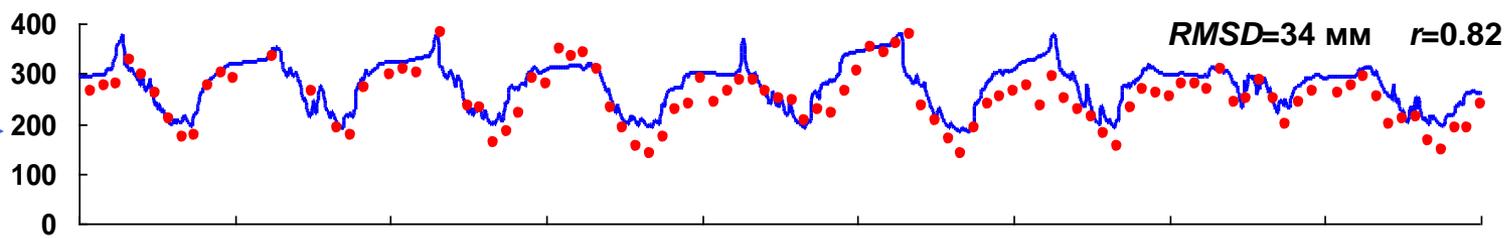
0-20 см



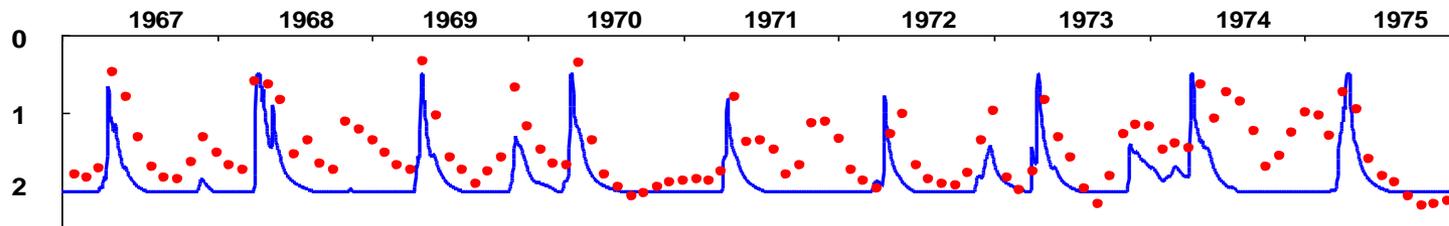
0-50 см



0-100 см



Уровень грунтовых вод, м



Моделирование тепловлагообмена поверхности суши с атмосферой в районах субтропических степей

США, Южные Великие Равнины,
Оклахома,

«South Gate Plains Hydrology Experiment
1997»



David Muench/ALLSTOCK, INC

Климат

Растительный покров

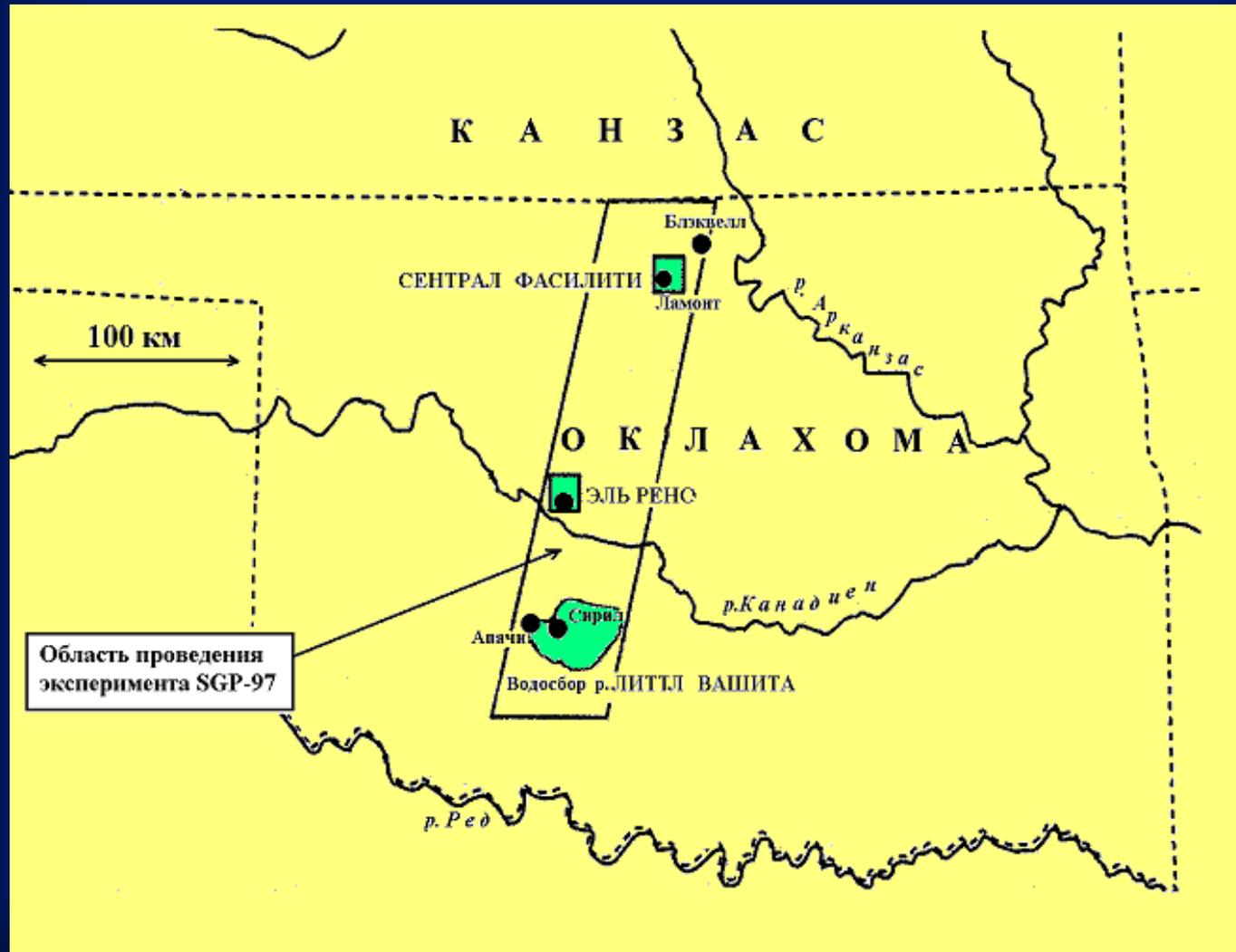
Почва

субтропический континентальный

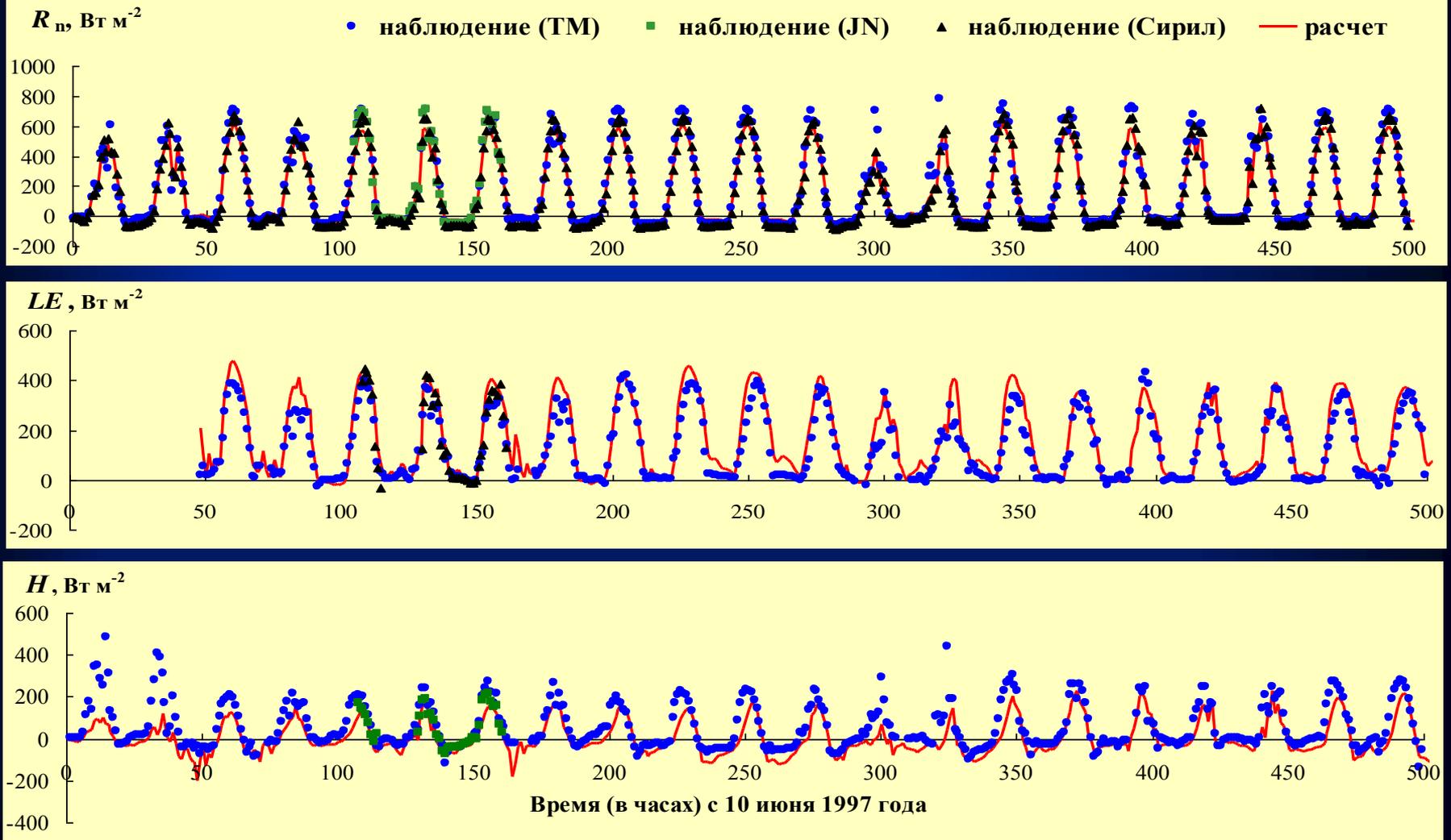
пастбищные травы

средний суглинок

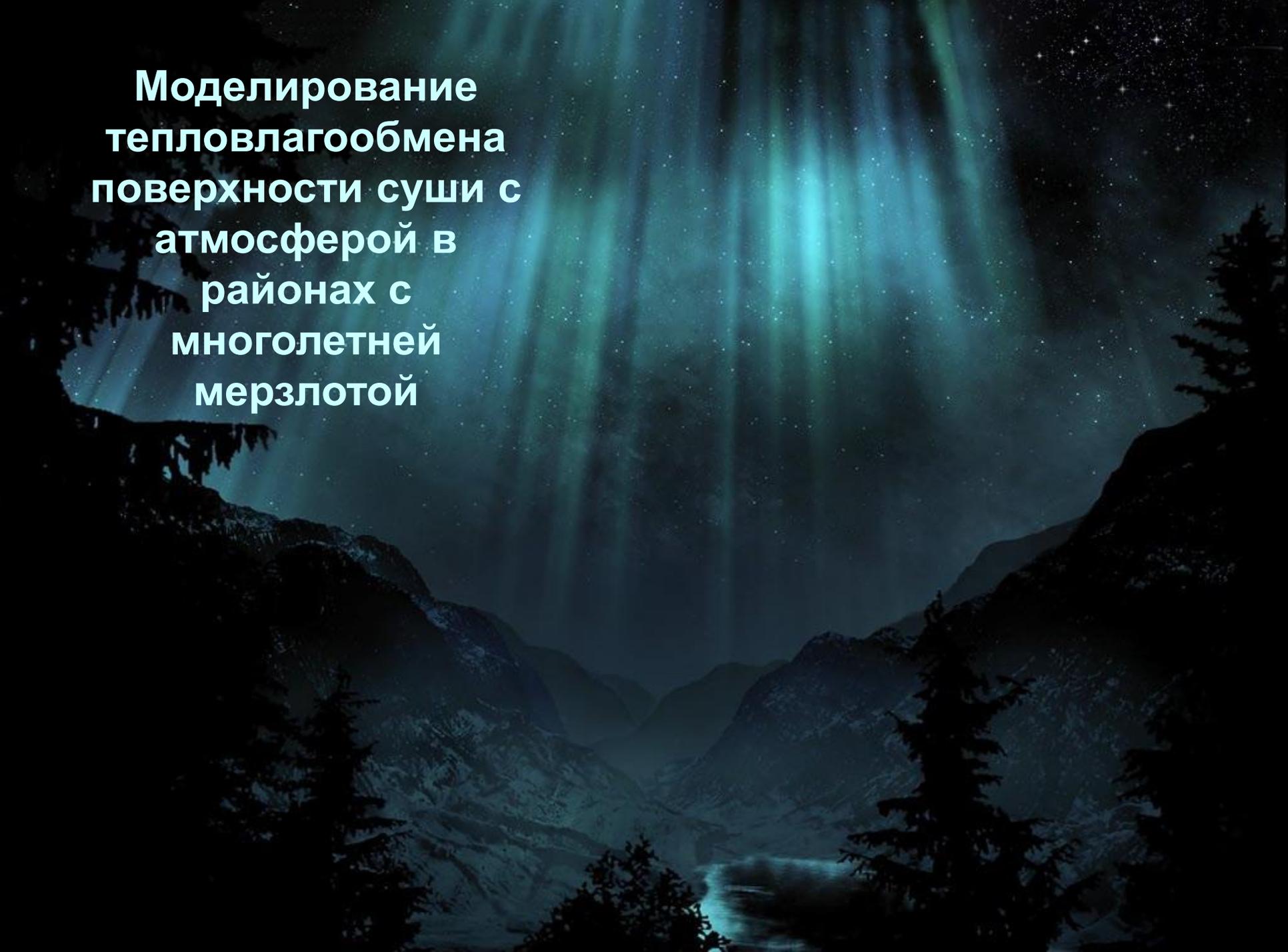
Карта-схема района исследований.



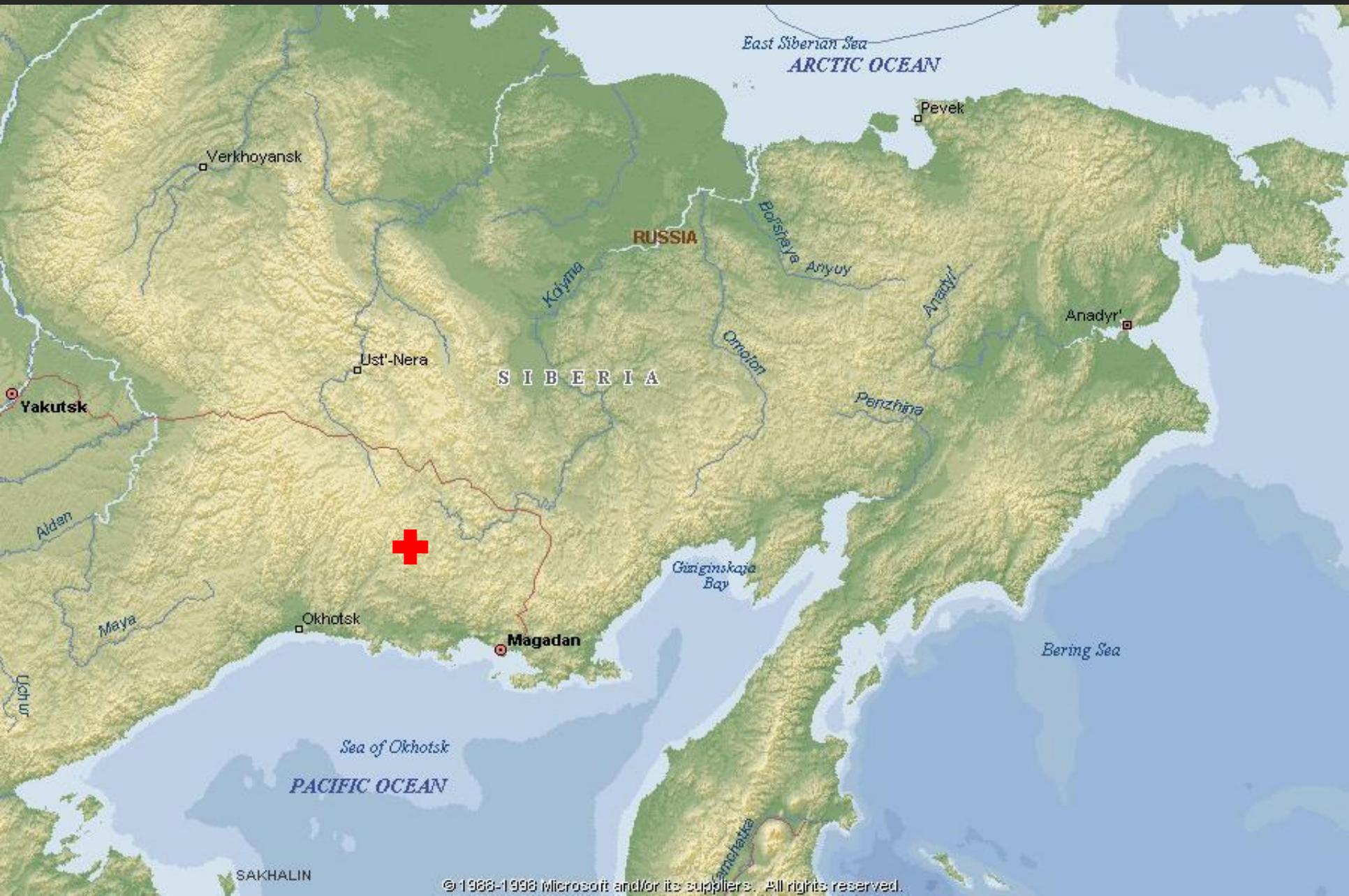
Динамика рассчитанных и измеренных различными участниками эксперимента SGP-97 значений радиационного баланса R_n , а также турбулентных потоков скрытого LE и явного H тепла для экспериментальной площадки с травяным покровом в районе Литтл Вашита (35° с.ш., 98° з.д., Оклахома, США)



**Моделирование
тепловлагообмена
поверхности суши с
атмосферой в
районах с
многолетней
мерзлотой**



Высокогорный район с многолетней мерзлотой – водосбор ручья Контактный (красный крест), верняя часть бассейна р.Колымы





Francis Gohier/Photo Researchers, Inc.

Колымская воднобалансовая станции (КВС)

**«Колыма, ты Колыма,
Чудная планета.
Двенадцать месяцев зима,
Остальное – лето.»**

/ ГУЛАГовский фольклор /



Высота: 1000-2000 m

Климат: субарктический

Зона многолетней мерзлоты

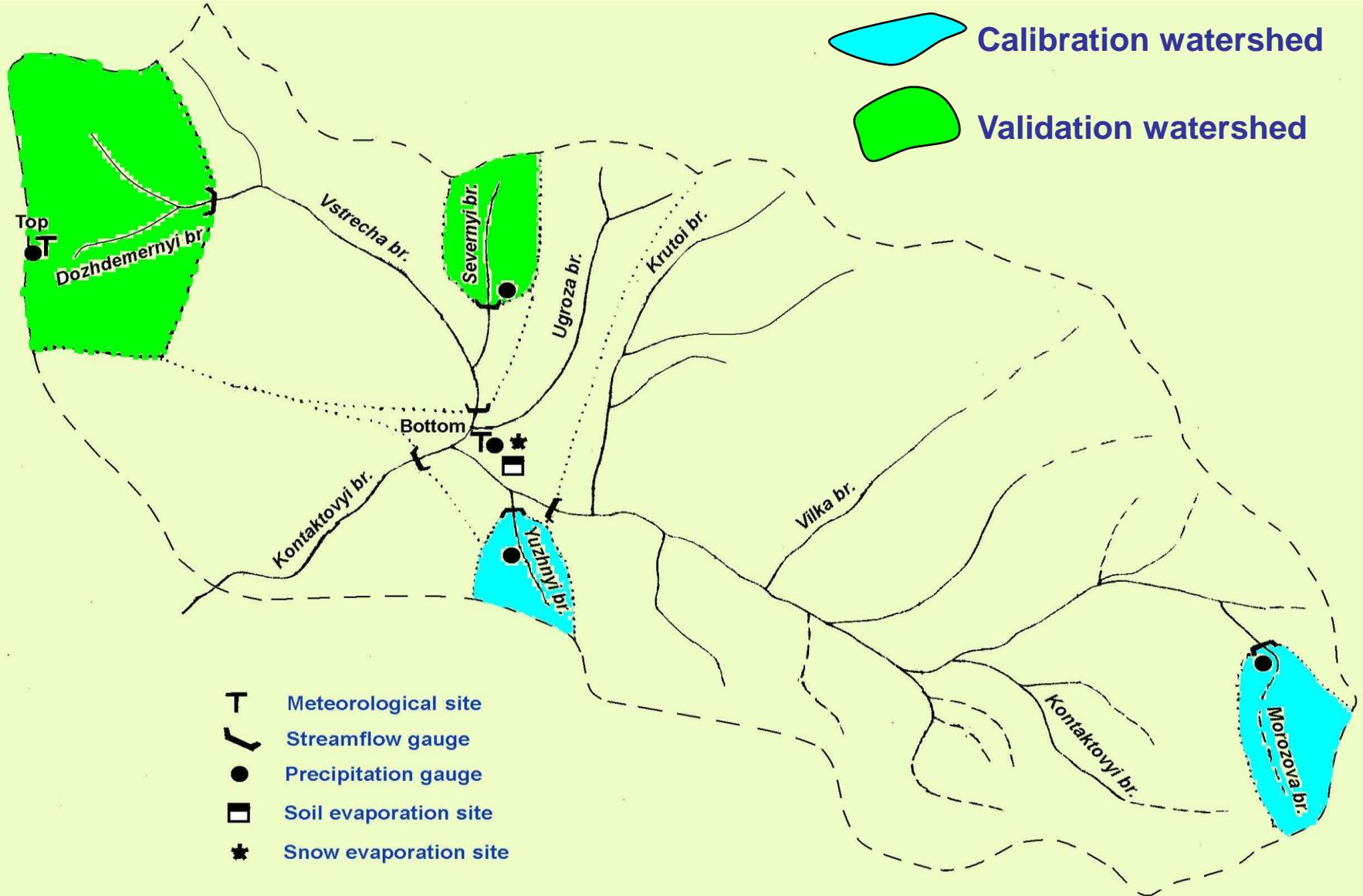
Почвы:

**глинистые,
каменнистые осыпи**

Тип поверхности:

**каменистые осыпи,
редколесье,
низкорослый кустарник**

Водосбор ручья Контактный (площадь водосбора - 21.2 km²)



Параметризация поступающей к поверхности суши длинноволновой радиации для районов высоких широт (характеризующих географический пояс бореальной зоны)

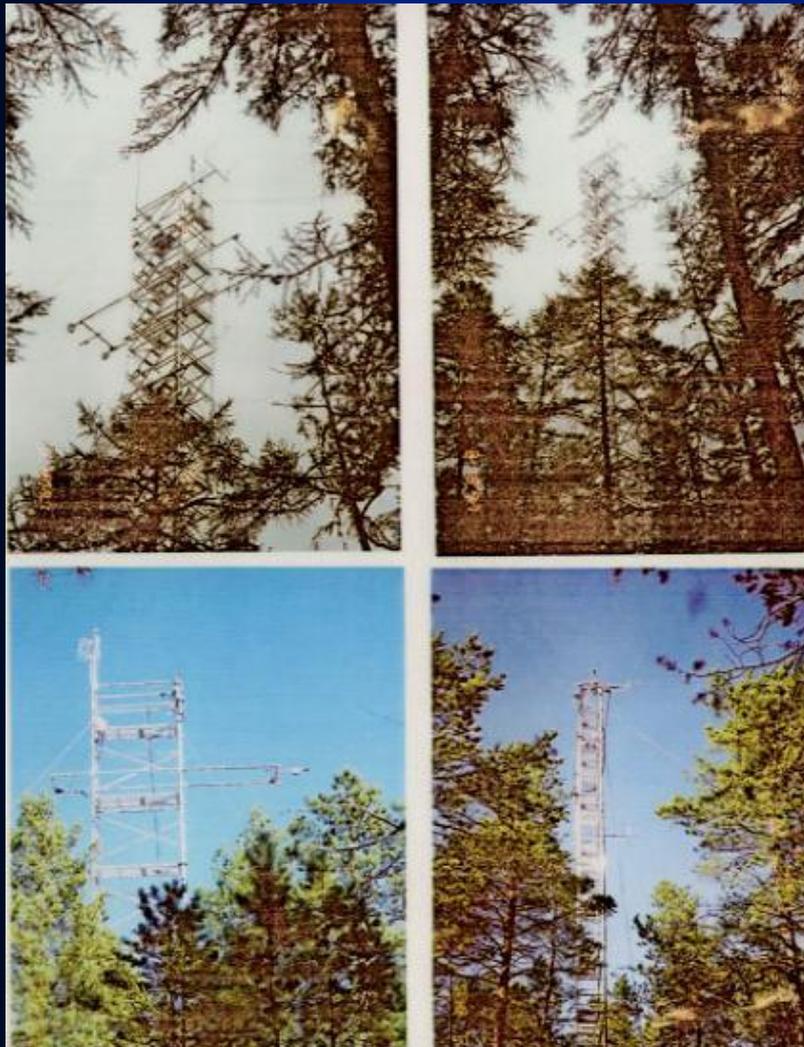


Основа расчета: модель формирования приходящей длинноволновой радиации $R_L \downarrow$:

$R_L \downarrow = R_{L0} \downarrow (1 + aN)^b$, $R_{L0} \downarrow = \varepsilon \sigma T^4$,
где $R_{L0} \downarrow$ - приходящая длинноволновая радиация при ясном небе, ε - коэффициент длинноволнового излучения атмосферы при ясном небе (коэффициент “серости”),
 σ - постоянная Стефана-Больцмана,
 N - облачность, T - температура воздуха на 2 м, a и b – эмпирические параметры.

GEWEX Asian Monsoon Experiment

GAME-Siberia



Значения параметров

$$\varepsilon = 0.76, a = 0.126 \text{ и } b = 3.17$$

были получены по уникальным данным измерений $R_L \downarrow$, проводившимся в районе Якутска в 1998-2000 гг. в рамках международного проекта

GAME

(GEWEX Asian Monsoon Experiment),

а также с использованием стандартных метеорологических наблюдений за температурой воздуха и облачностью на близлежащей метеостанции.

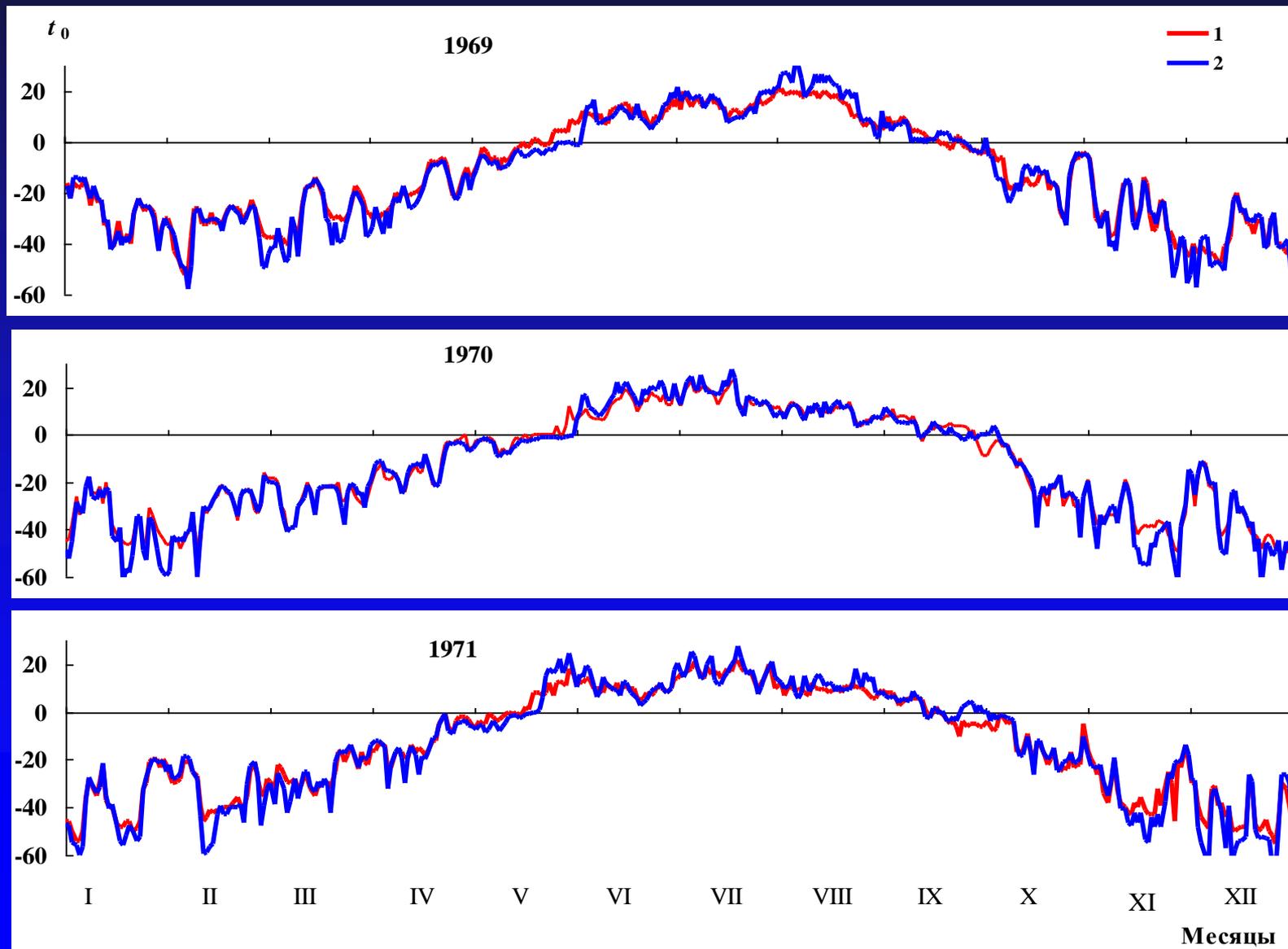
Сопоставление рассчитанных (—) и измеренных (—) значений приходящей длинноволновой радиации в районе г.Якутска



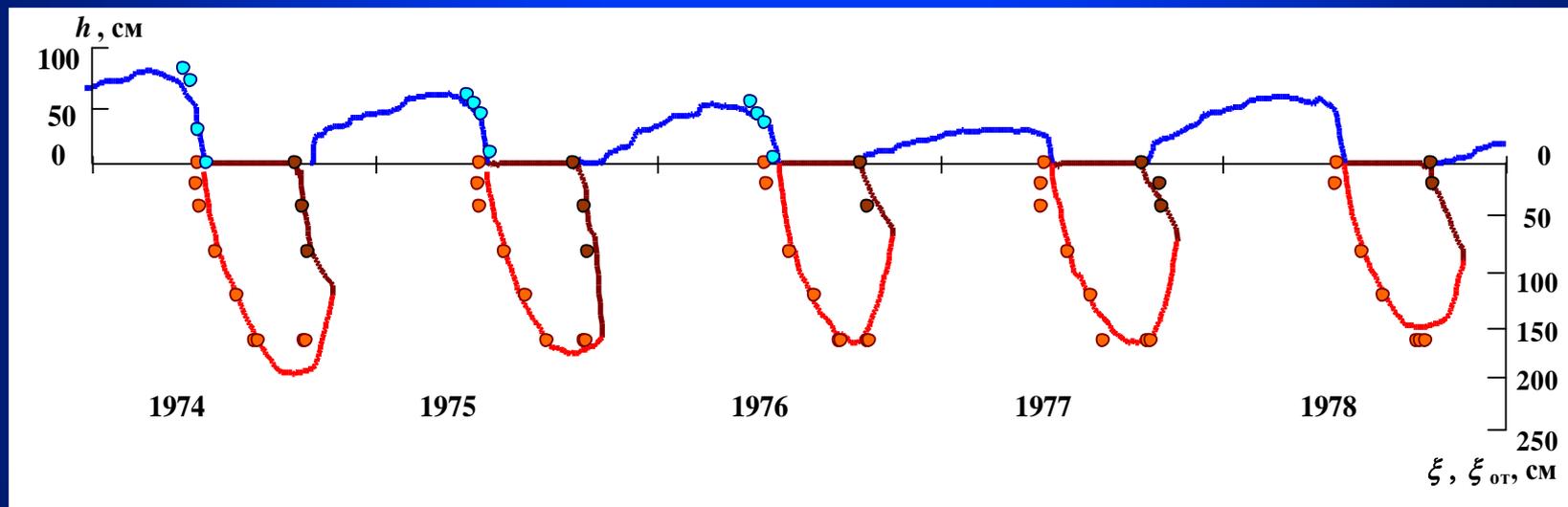
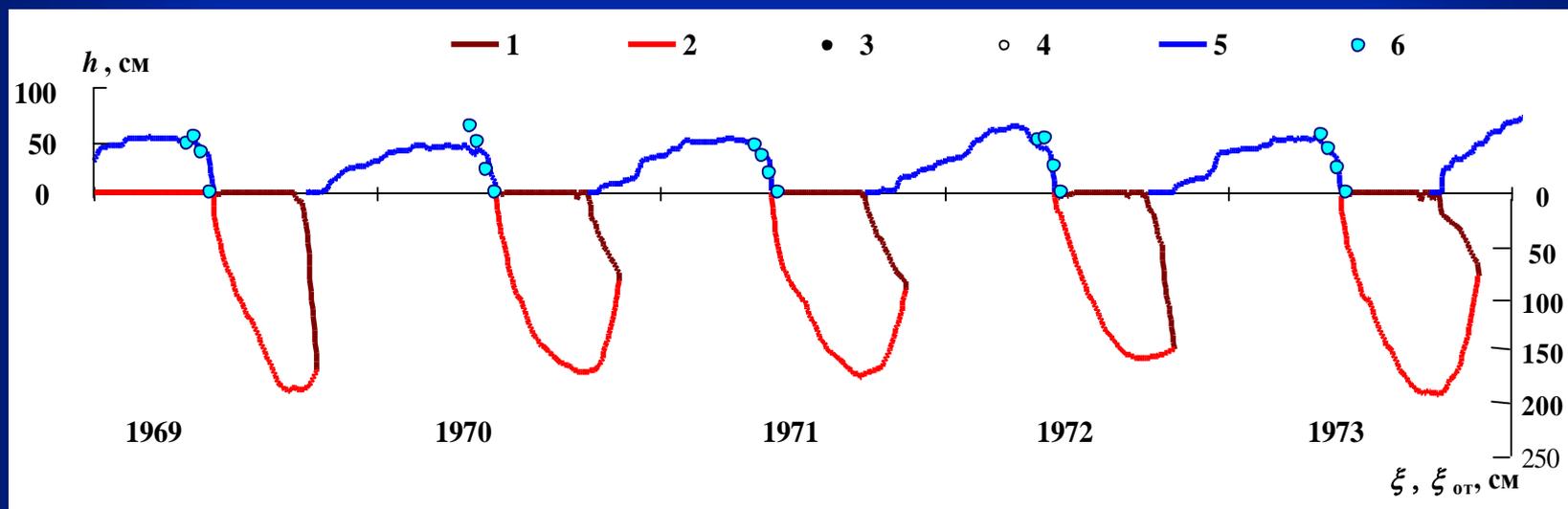
Рассчитанные
среднесуточные
значения
приходящей
коротковолновой и
длинноволновой
радиации в районе
КВС



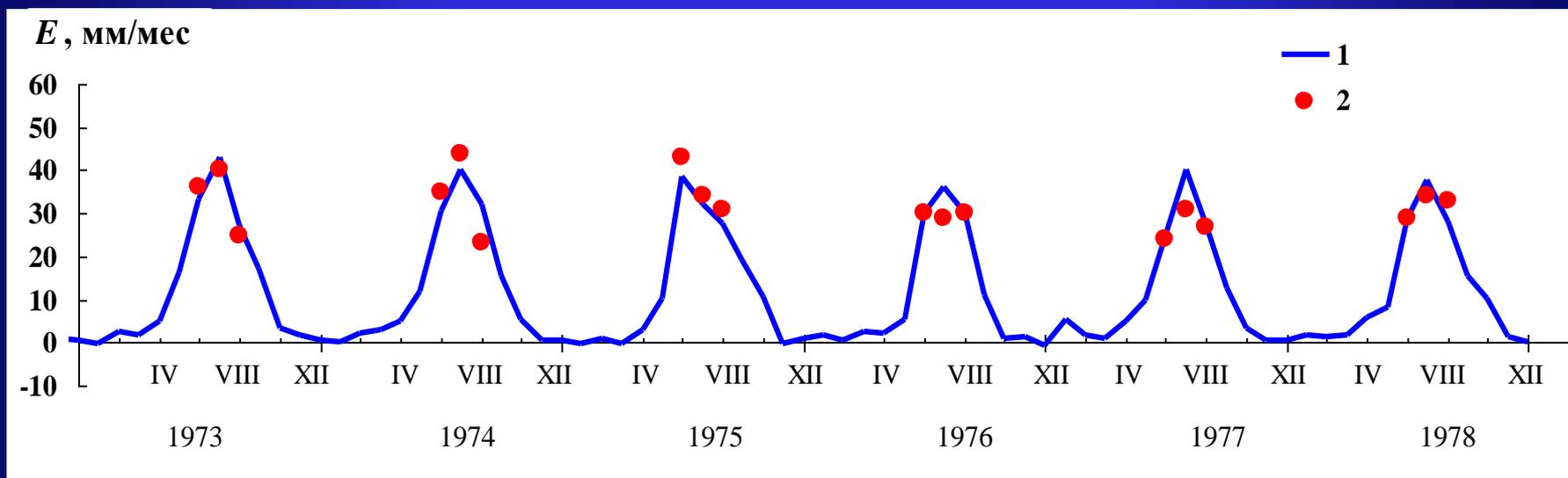
Годовой ход измеренных (1) и рассчитанных по модели SWAP (2) средних суточных температур (°C) поверхности почвы или снега на метеоплощадке “Нижняя”



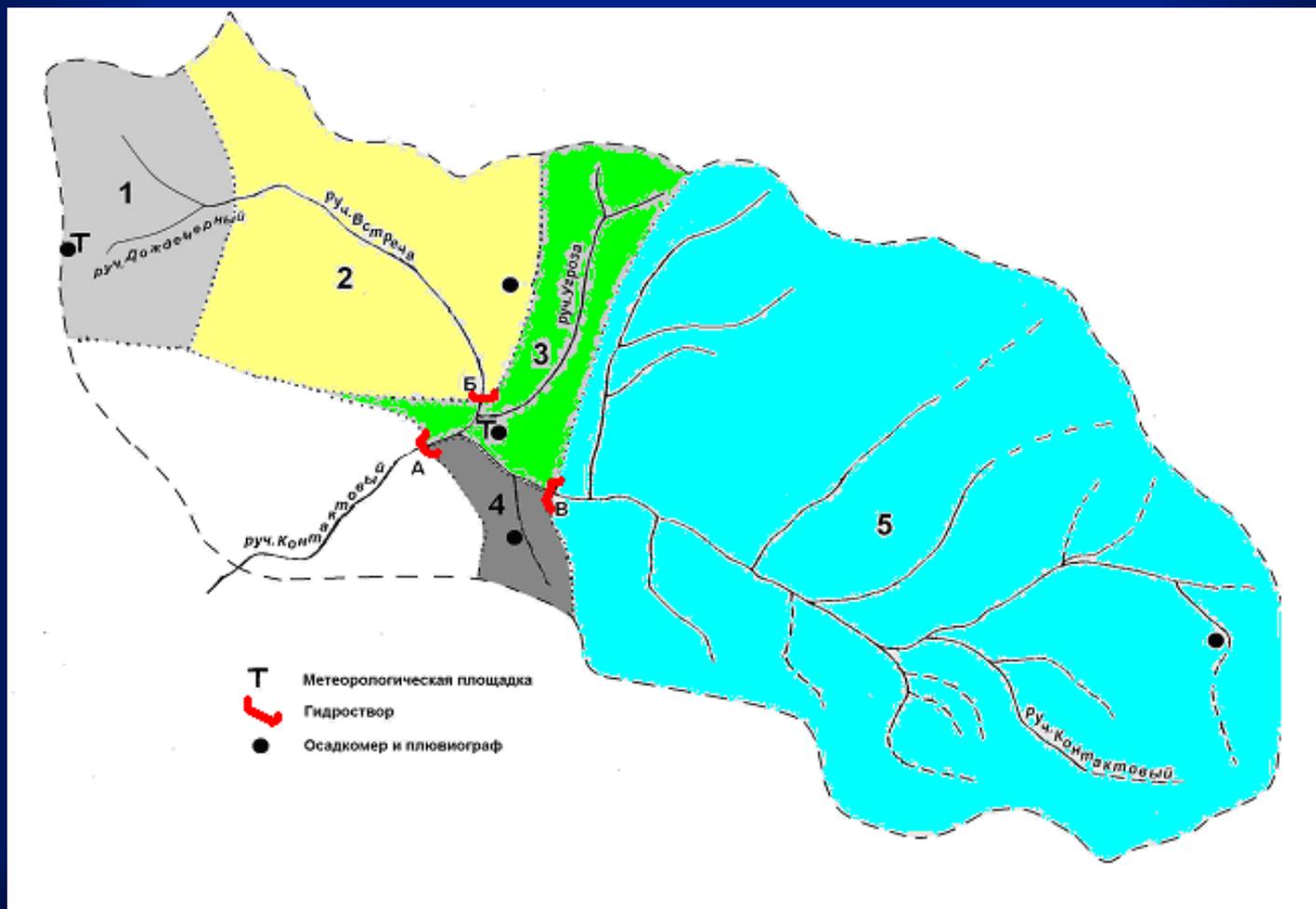
Многолетняя динамика смоделированных (1, 2, 5) и измеренных (3, 4, 6) на метеоплощадке “Нижняя” значений **глубин промерзания ξ** (1, 3) и **оттаивания $\xi_{от}$** (2, 4) почвы, а также **высоты снежного покрова h** (5, 6).



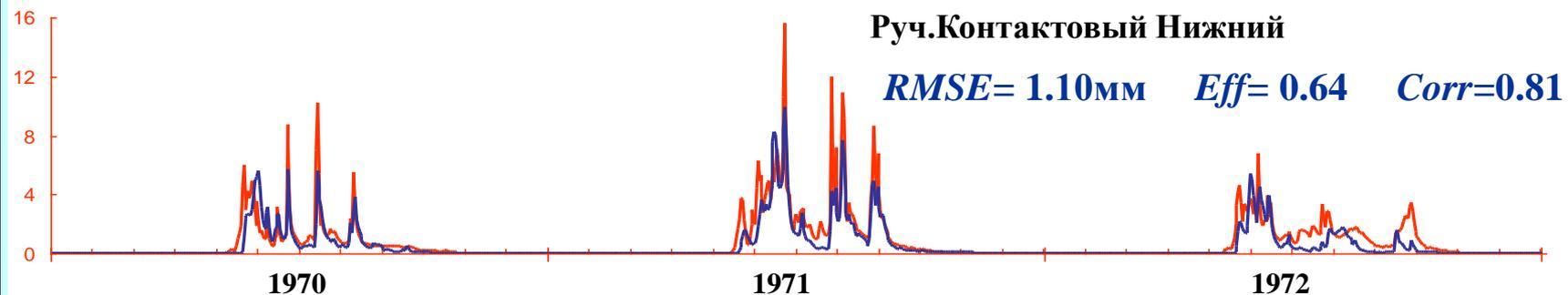
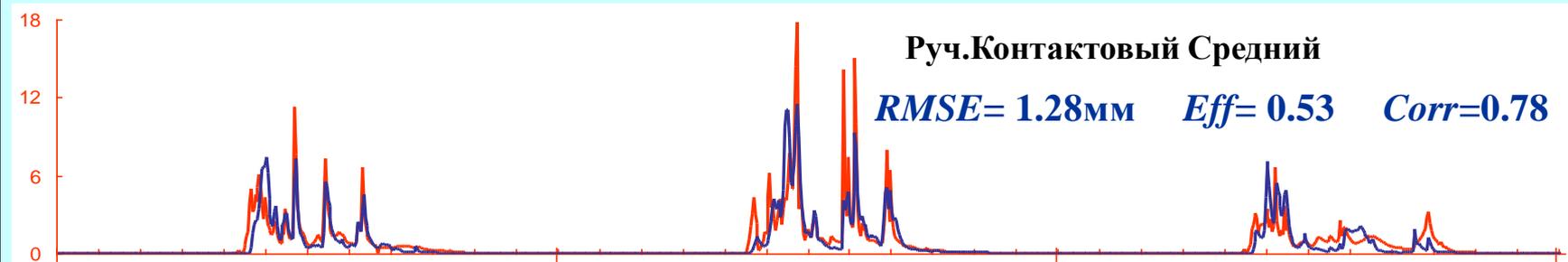
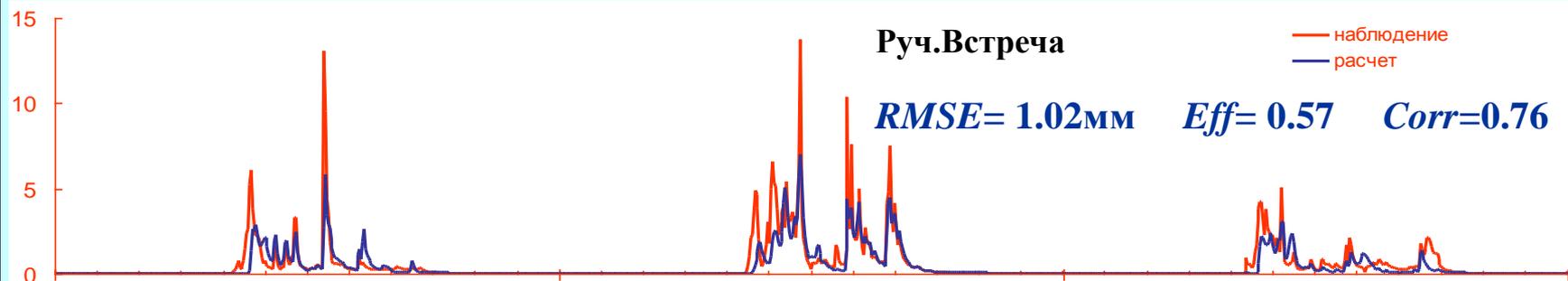
Динамика смоделированных (1) и измеренных (2) на метеоплощадке “Нижняя” месячных значений суммарного испарения.



**Деление исследуемого водосбора руч.Контактный на частные водосборы.
Гидростворы: А – Контактный-Нижний, Б – Встреча,
В – Контактный-Средний.**

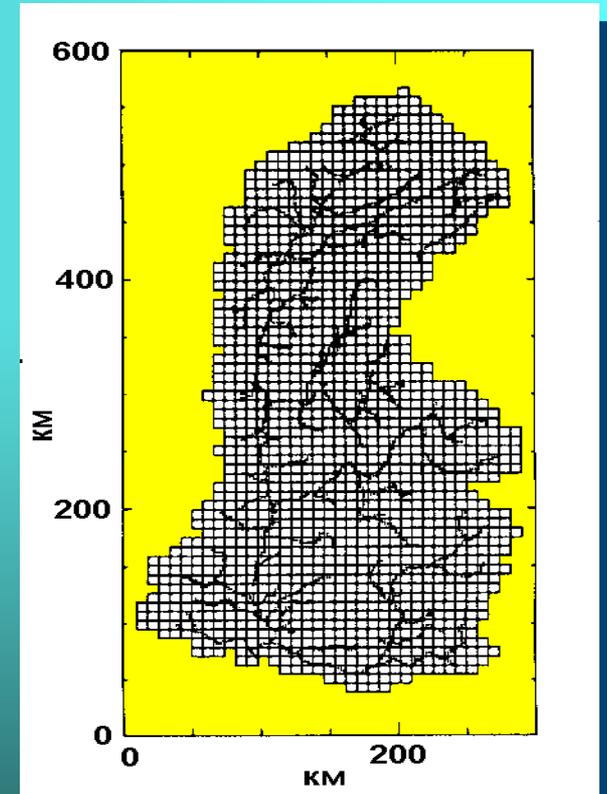
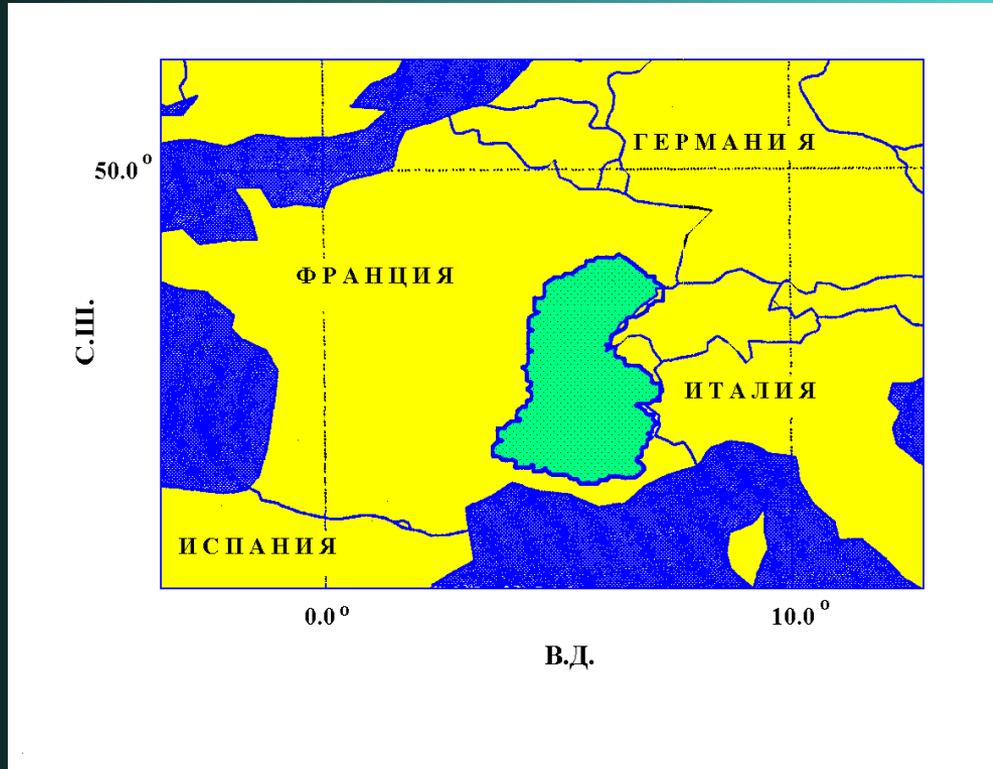


Сопоставление гидрографов смоделированных и измеренных суточных слоев стока R (мм) в гидростворах руч. Встреча, Контактный-Средний и Контактный-Нижний



Международный проект Rhone-AGG

Местонахождение (зеленая часть карты) и сеточная схематизация бассейна р. Роны (площадь: 86996 км²)



Рельеф На юго-западе и юго-востоке - горные массивы (высотой до 4000 м в районе французских Альп), остальная часть бассейна равнинная

Климат От средиземноморского до умеренно-континентального и альпийского в горных районах

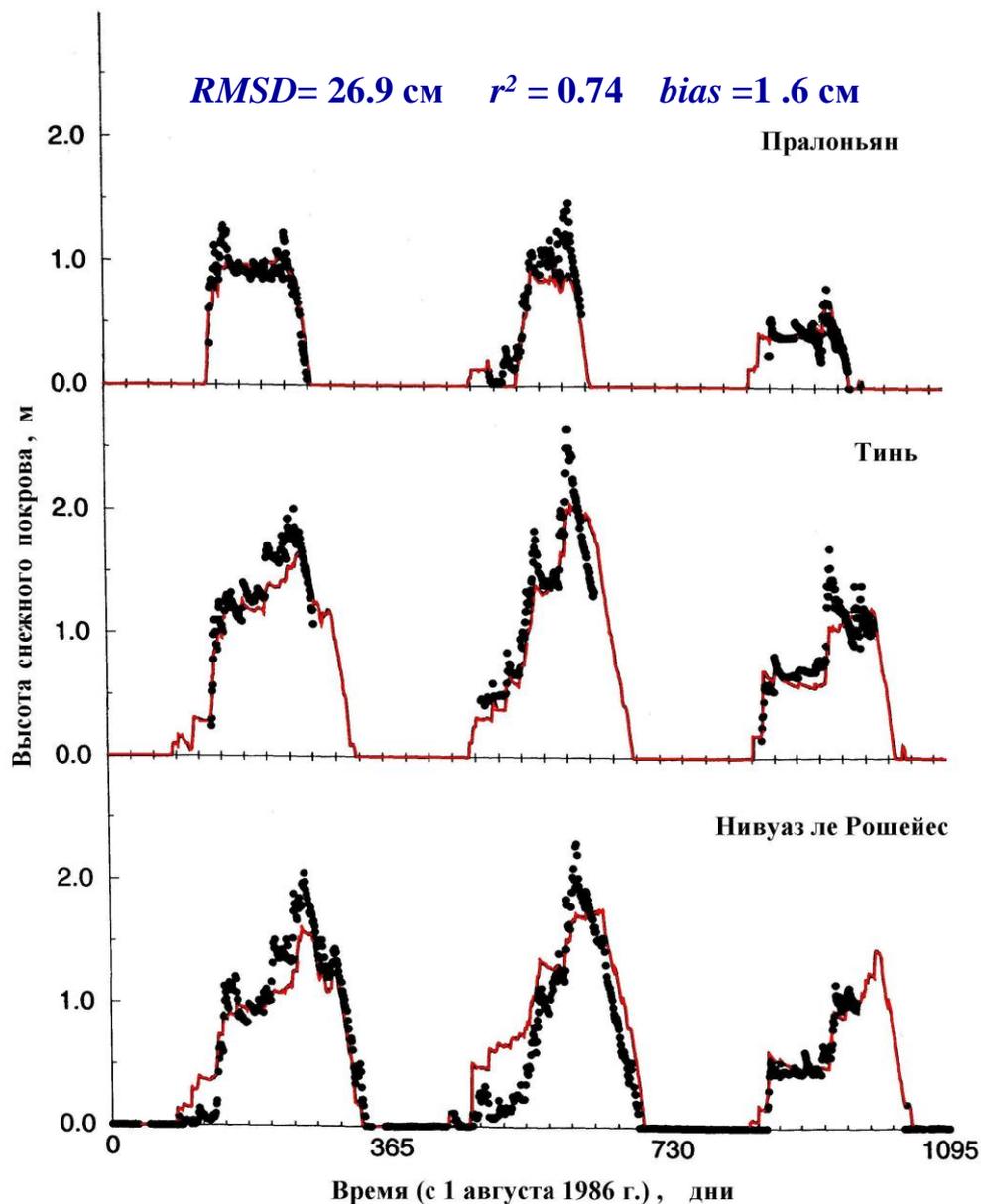
Растительность Лиственные и хвойными леса, луговые травы и сельскохозяйственные культуры



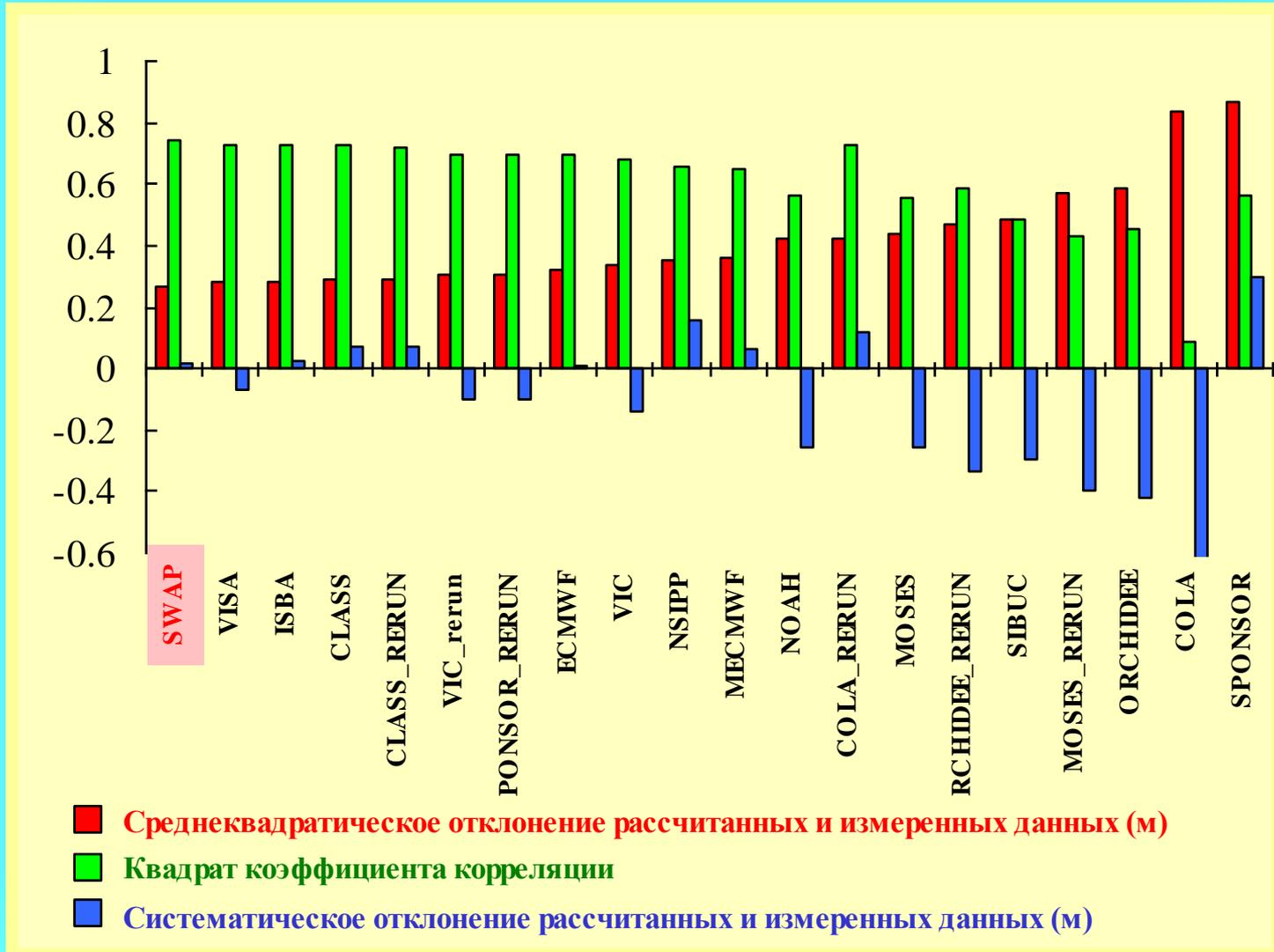
Sylvie Chappaz/Photo Researchers, Inc.

Динамика
измеренных (• 1)
и рассчитанных (— 2)
высот снежного покрова
на наблюдательных постах
во французских Альпах
(1986-1989 гг.):

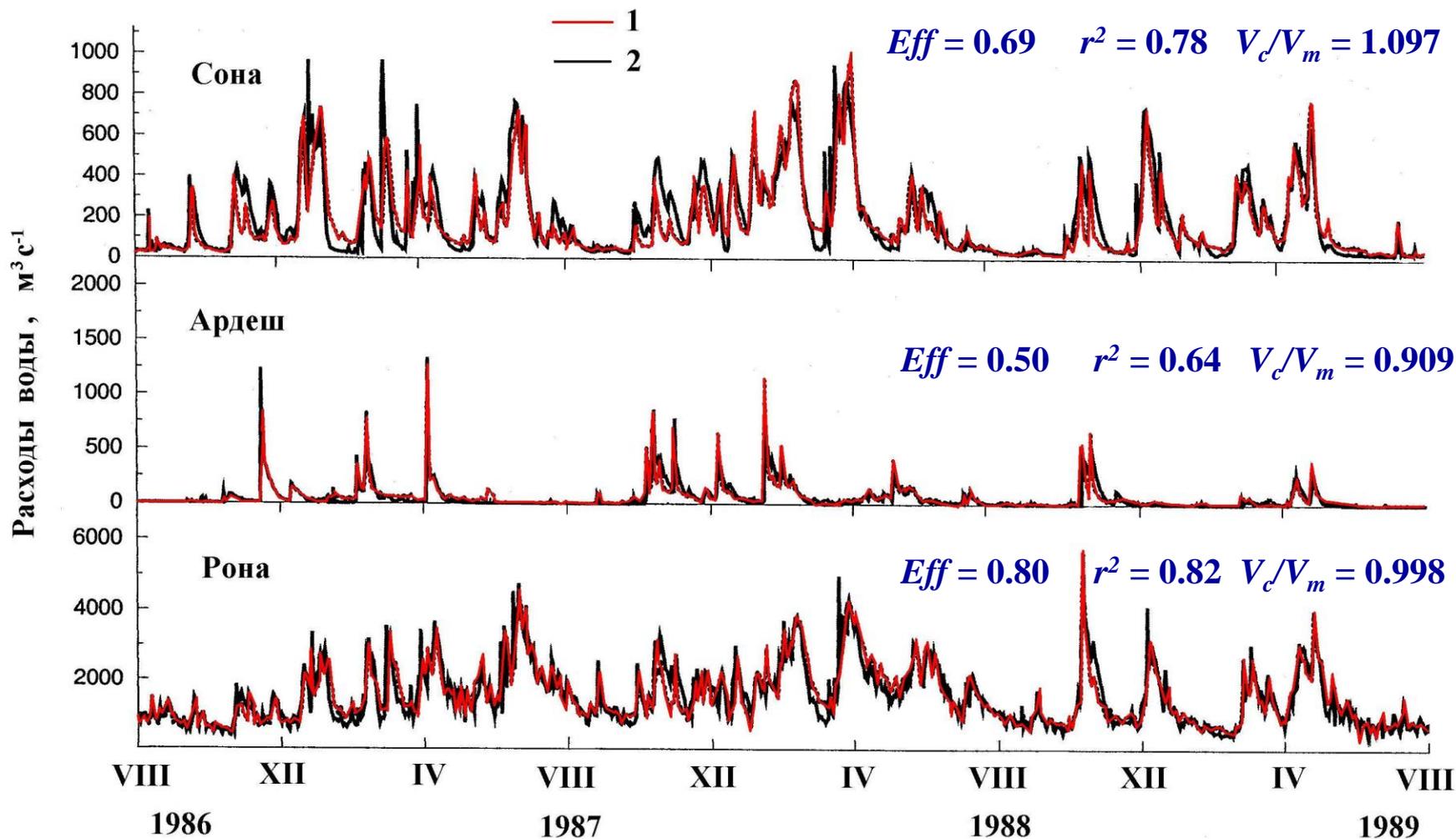
- Пралоньян
- Тинь
- Нивуаз ле Рошейес



Статистические характеристики точности расчета высоты снежного покрова во Французских Альпах различными моделями, участвовавшими в международном эксперименте Rhone-AGG (в среднем за 3 года и по 24 измерительным площадкам)



Динамика измеренных (1) и рассчитанных (2) расходов воды в замыкающих створах р.Роны, а также ее притоков - р.Соны и р.Ардеш

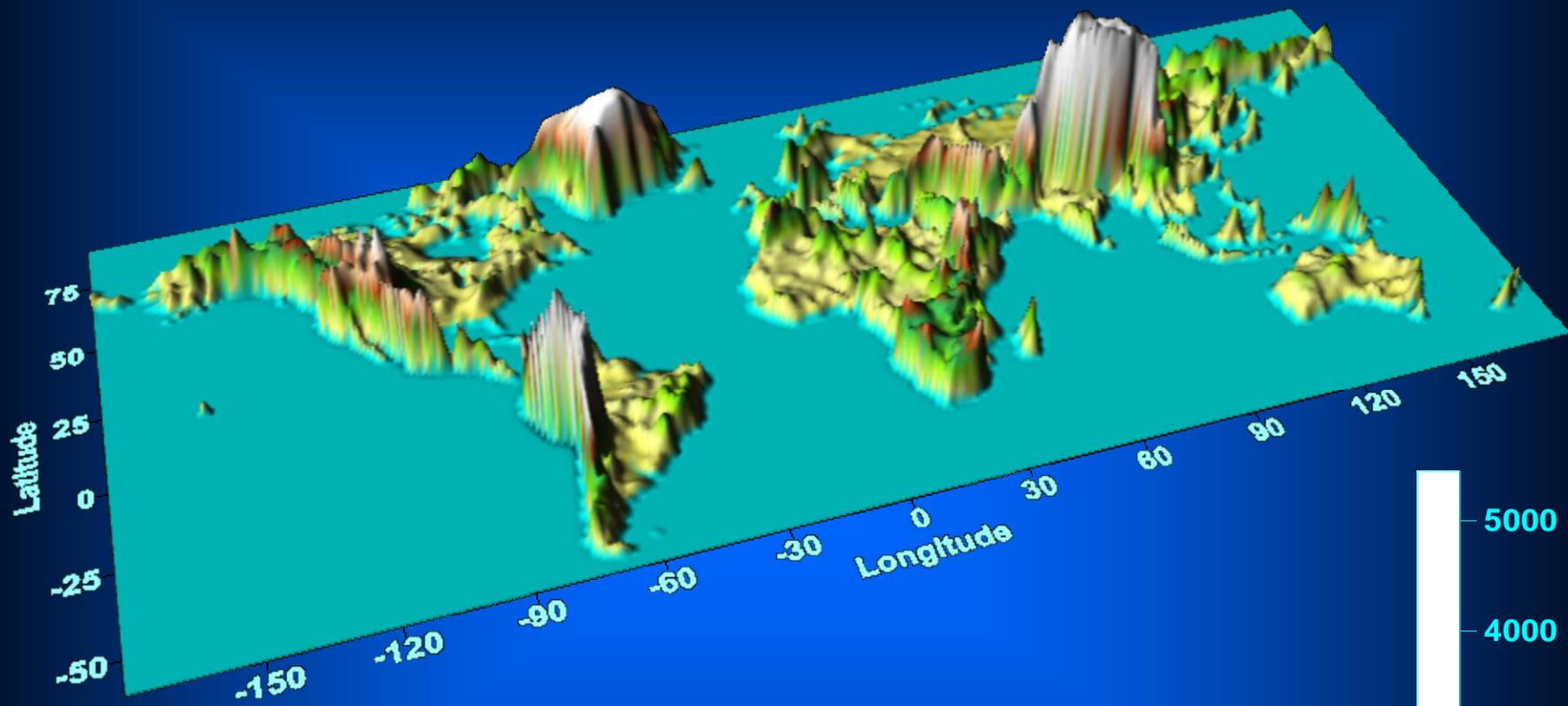


GSWP-2

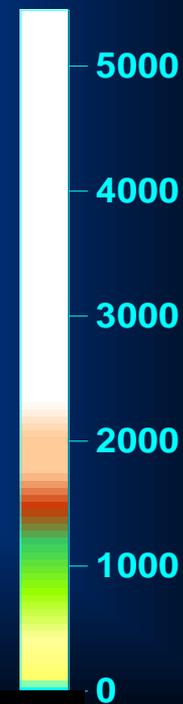
The Second Global Soil Wetness Project

Цель проекта GSWP-2:

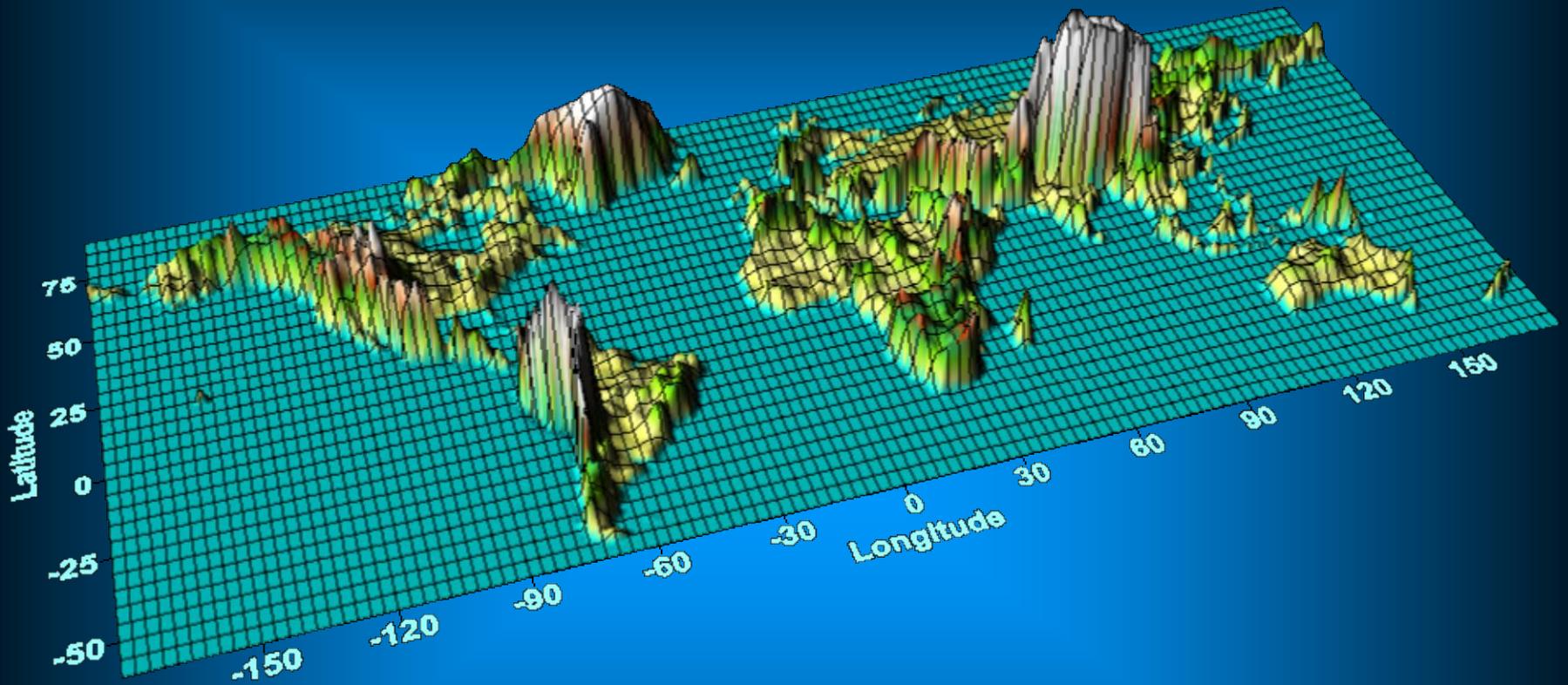
оценка возможностей получения **LSM-моделями** глобальных оценок динамики почвенной влажности и температуры, снегозапасов, речного стока, а также вертикальных потоков различных субстанций для 10-летнего периода (**1986-1995 гг.**) при использовании моделями заданных значений гидрометеорологических факторов и стандартной информации по почвам и растительному покрову



**Глобальное распределение высоты
подстилающей поверхности над
уровнем моря, м**



Пример дискретизации поверхности Земли



Пространственное разрешение в проекте GSWP-2 равно **1 градусу** и число расчетных ячеек поверхности суши равно **15238**

Гидрометеорологические данные

- ♥ **Tair** Приповерхностная температура воздуха (на 2 м)
- ♥ **Qair** Приповерхностная удельная влажность воздуха (на 2 м)
- ♥ **Wind** Приповерхностная скорость ветра (на 10 м)
- ♥ **SWdown** Приходящая коротковолновая радиация
- ♥ **LWdown** Приходящая длинноволновая радиация
- ♥ **Psurf** Приповерхностное давление воздуха
- ♥ **Rainf** Интенсивность жидких осадков
- ♥ **Rainf_C** Интенсивность конвективных жидких осадков
- ♥ **Snowf** Интенсивность твердых осадков

Базы данных по осадкам

/основа баз данных - ISLSCP II (International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II) / GSWP-2 ("The Second Global Soil Wetness Project")/

- ♥ Использование «чистого» реанализа:
NCEP-DOE (The National Center for Environmental Prediction - Department of Energy) или
ERA-40 (ECMWF Re-analysis-40, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)
- ♥ Гибридизация результатов реанализа с данными наземных наблюдений без введения поправки «на ветер», т.е. обусловленной влиянием ветра на проведение измерений
- ♥ Гибридизация данных реанализа с данными наземных наблюдений с введением поправки «на ветер»
- ♥ Подключение к результатам гибридизации данных спутниковых наблюдений

База данных об осадках, использованная в работе

Гибридизация

результатов реанализа *NCEP-DOE*
с данными наземных наблюдений,
учитывающими поправку на ветер, и
с подключением к результатам гибридации
данных спутниковых наблюдений

База данных по приходящей к поверхности суши коротковолновой и длинноволновой радиации, использованная в работе

Для периода с января 1986 г. по октябрь 1995 г. - база данных **SRB** (Surface Radiation Budget)

Получена при реализации проекта **GSWP-2** на основе 3-часовых данных по радиации, подготовленных Исследовательским центром НАСА/Лэнгли (NASA/Langley Research Center)

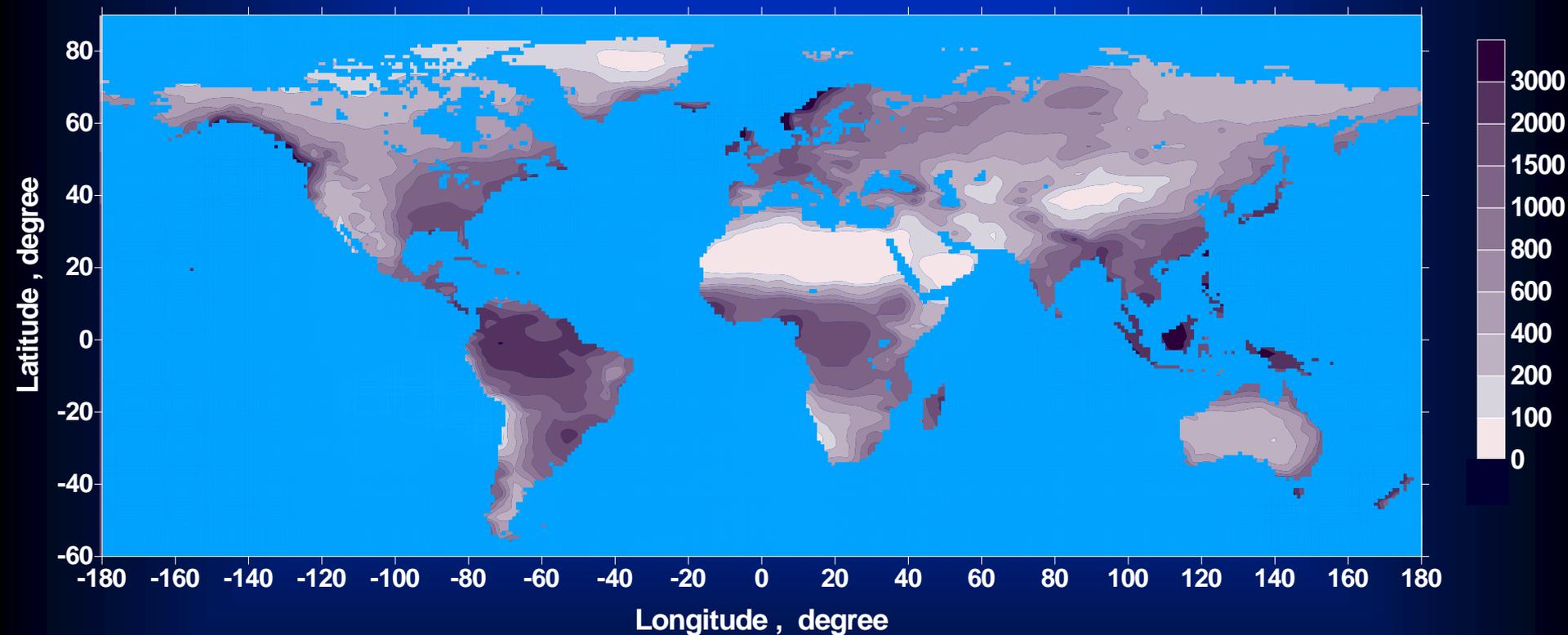
Для периода с июня 1982 г. по декабрь 1985 г. для ноября - декабря 1995 г. – гибридизация результатов реанализа **NCEP-DOE** с климатическими данными, полученными на основе **SRB**

**Примеры глобального
распределения
гидрометеорологических
характеристик**

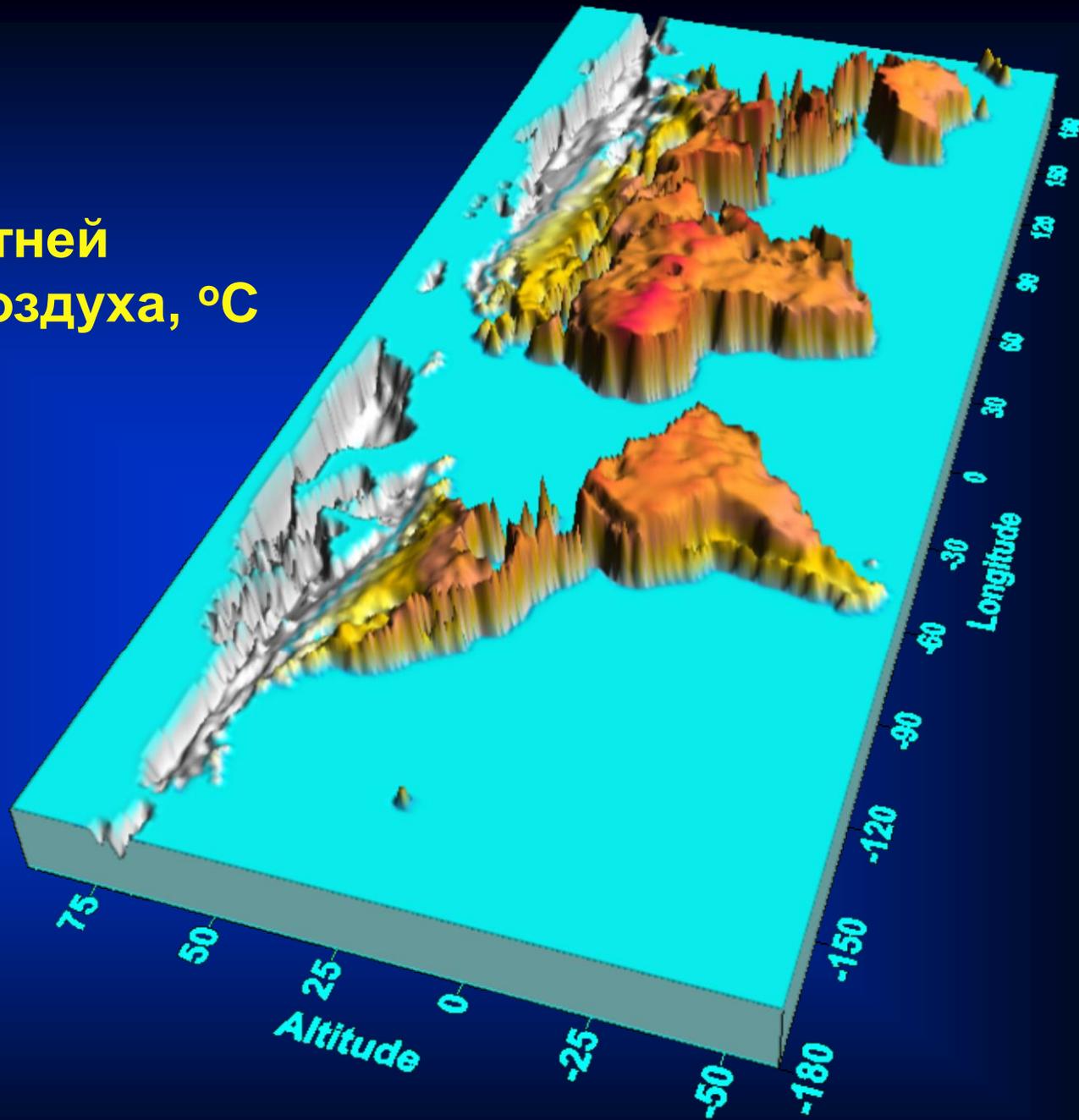
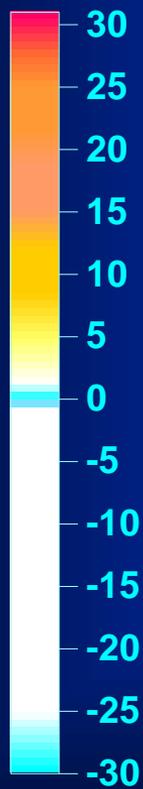


Глобальное распределение среднегодовых осадков (жидких и твердых), мм/год

(осреднение за 1986 – 1995 гг.)

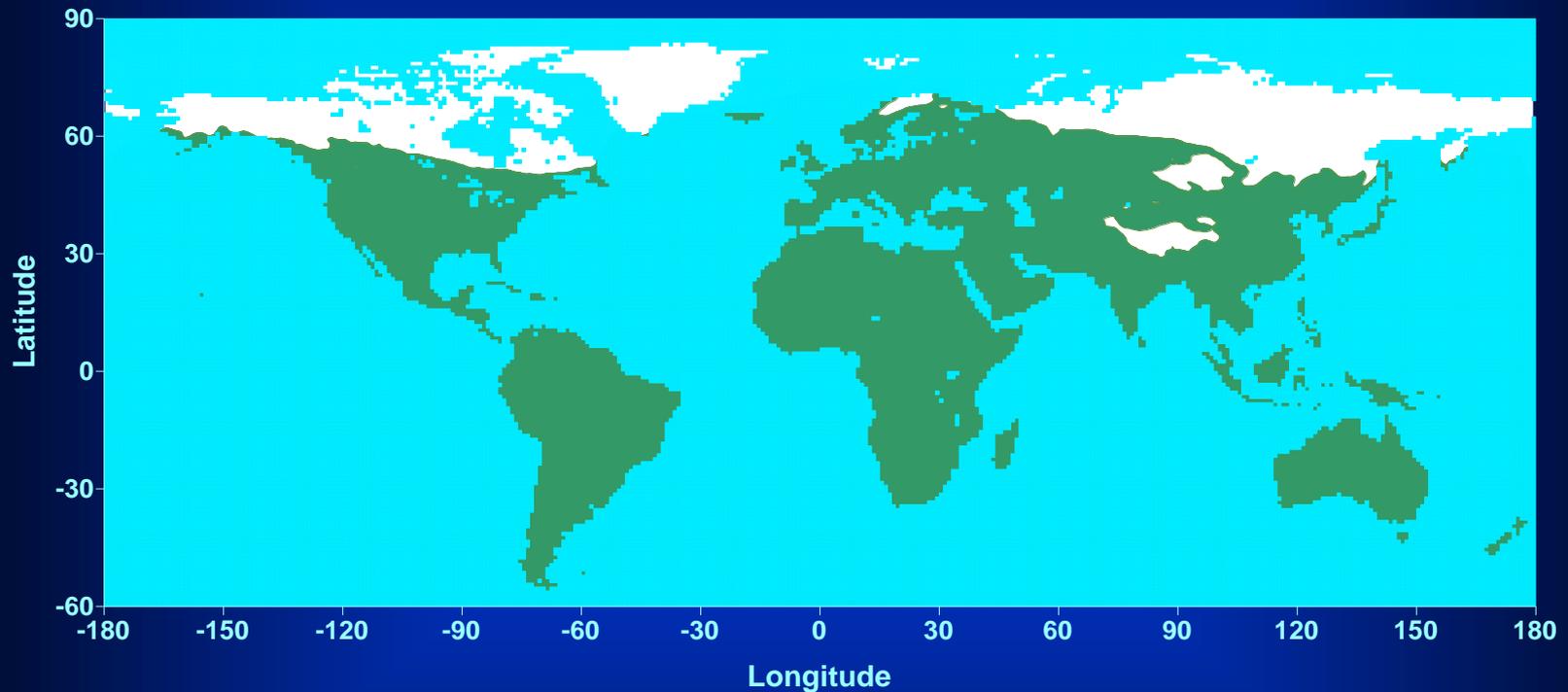


Глобальное распределение среднемноголетней температуры воздуха, °C



Глобальное распределение зоны многолетней мерзлоты

(белая зона)



За южную границу зоны многолетней мерзлоты принято положение
среднемноголетней изотермы воздуха с температурой $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Подготовка

глобальных

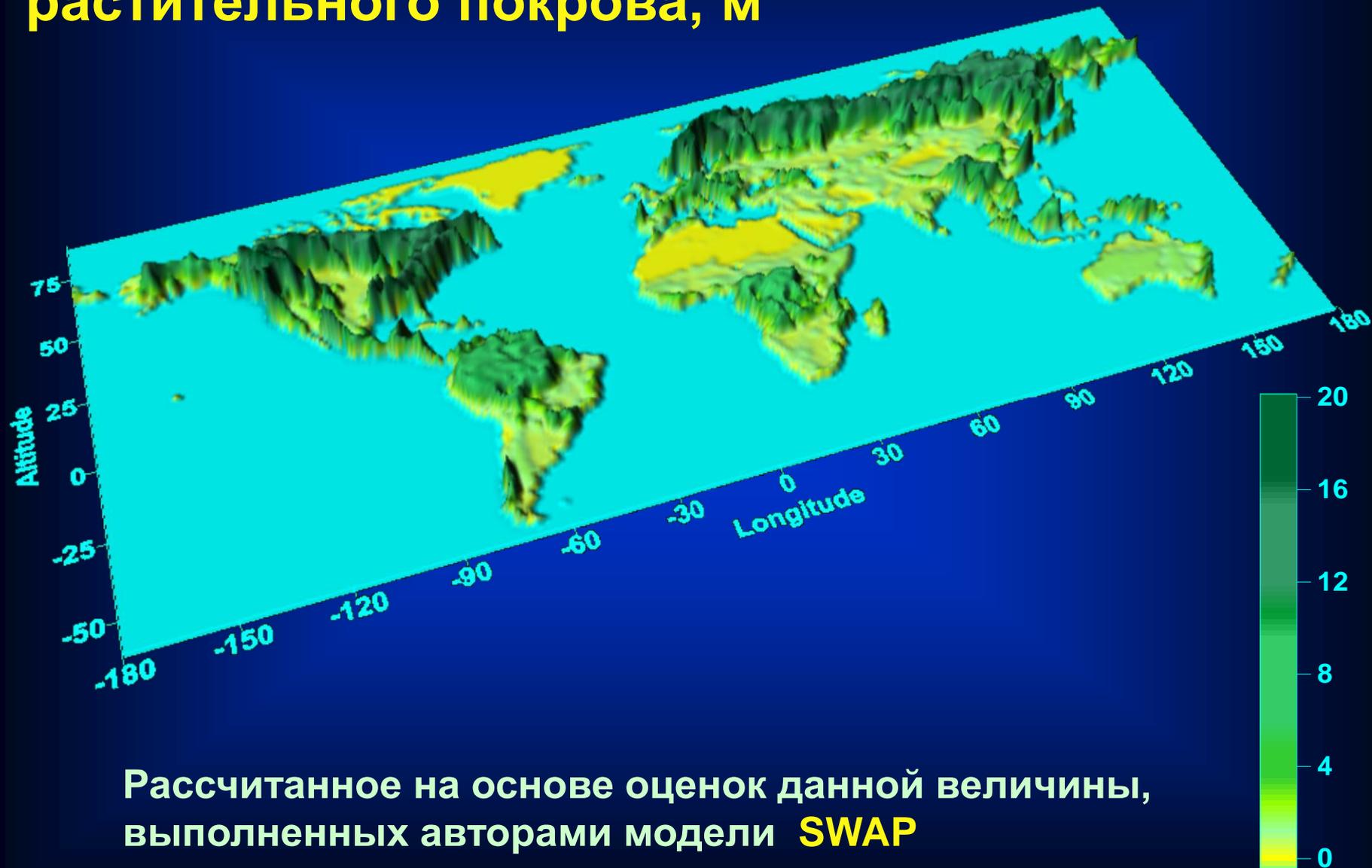
банков данных

по параметрам

подстилающей поверхности

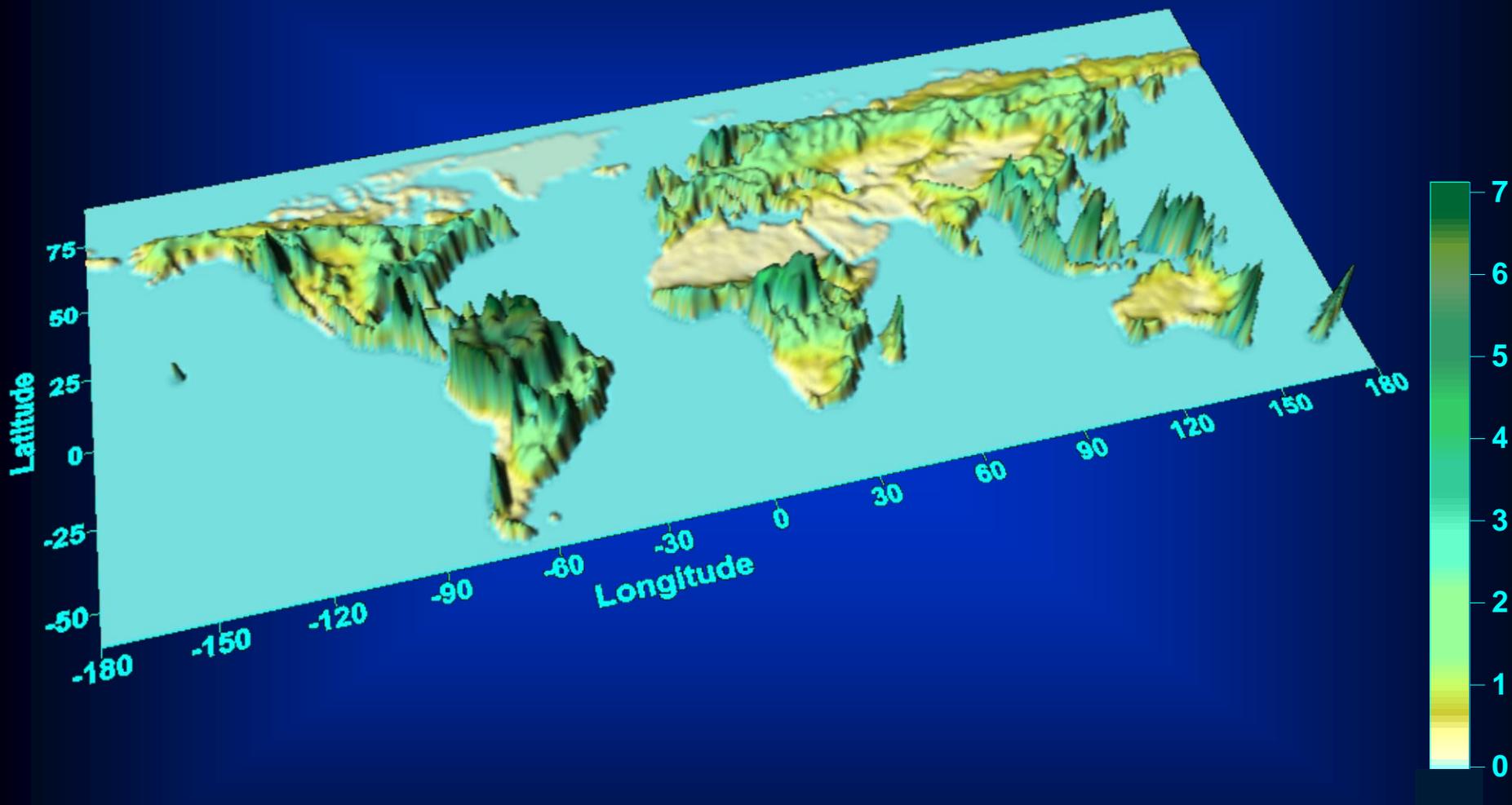


Глобальное распределение высоты растительного покрова, м



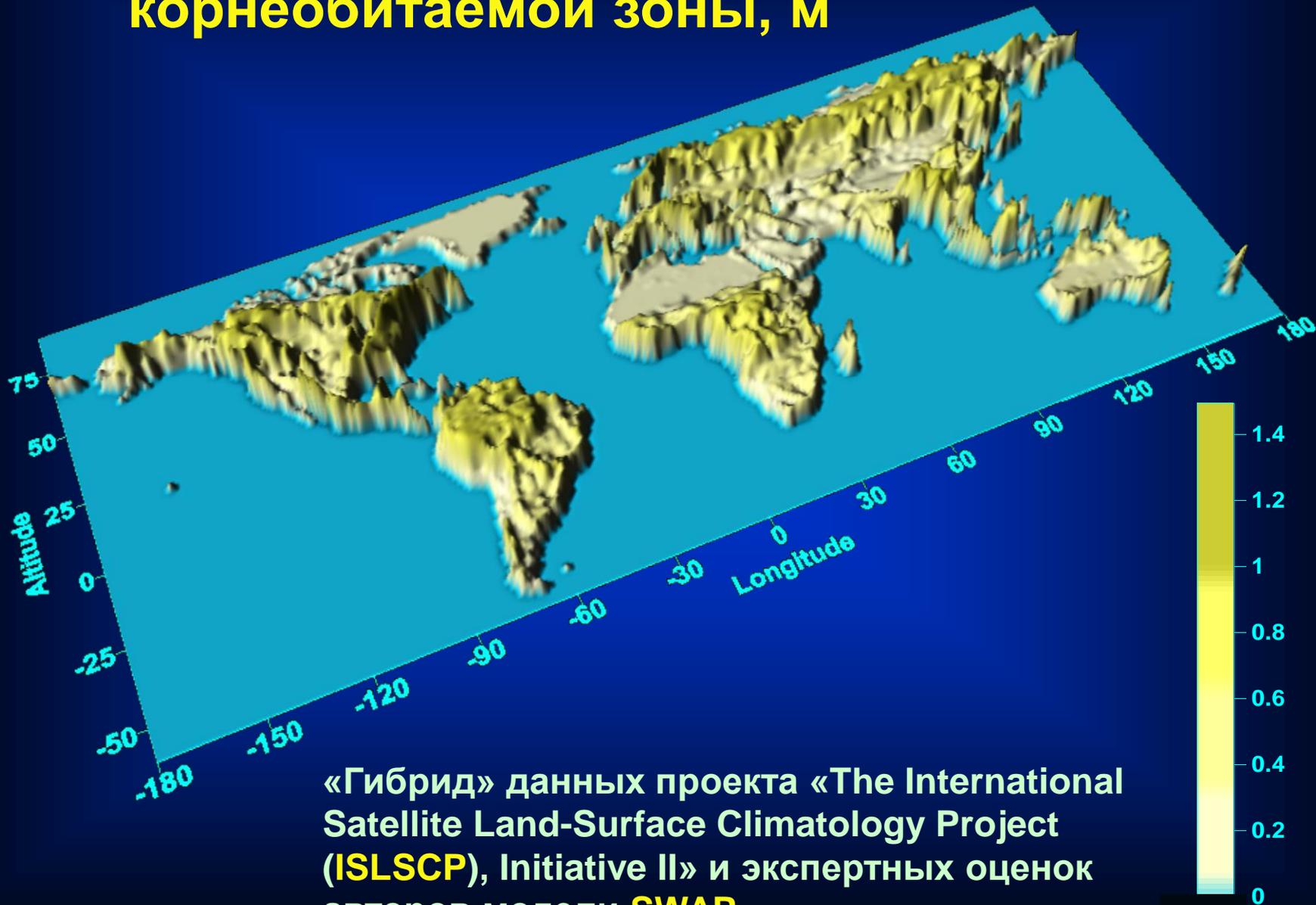
Рассчитанное на основе оценок данной величины, выполненных авторами модели **SWAP**

Глобальное распределение среднееголетних значений относительной площади листьев (LAI)



В соответствии с данными проекта GSWP-2

Глобальное распределение глубины корнеобитаемой зоны, м



Полученные

результаты

моделирования

глобального

тепло- и влагообмена

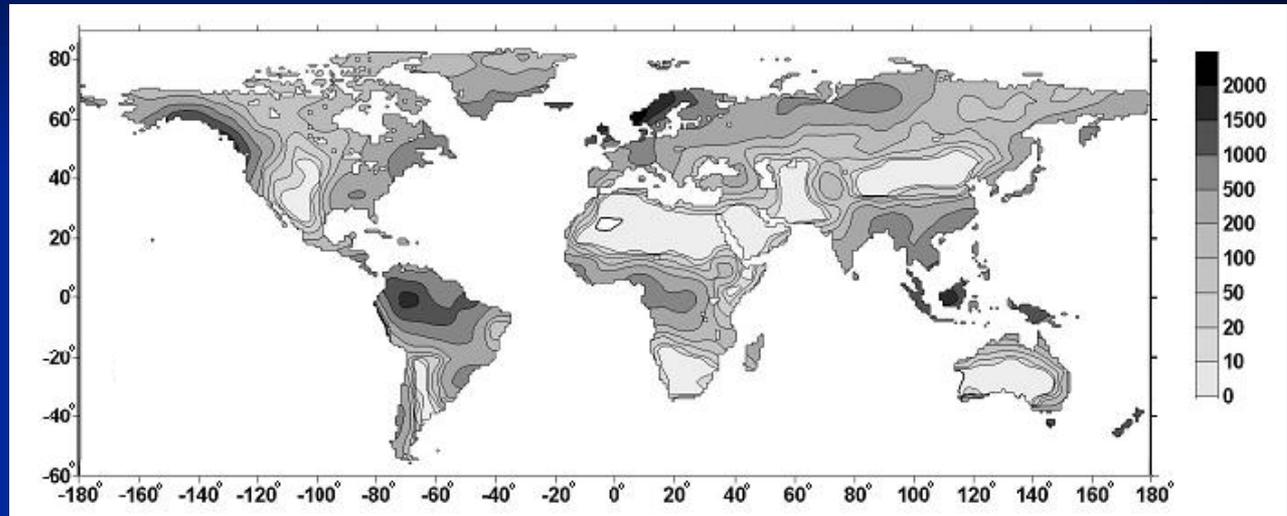
на поверхности суши



Пространственное распределение формирования суммарного стока на суше, мм/год

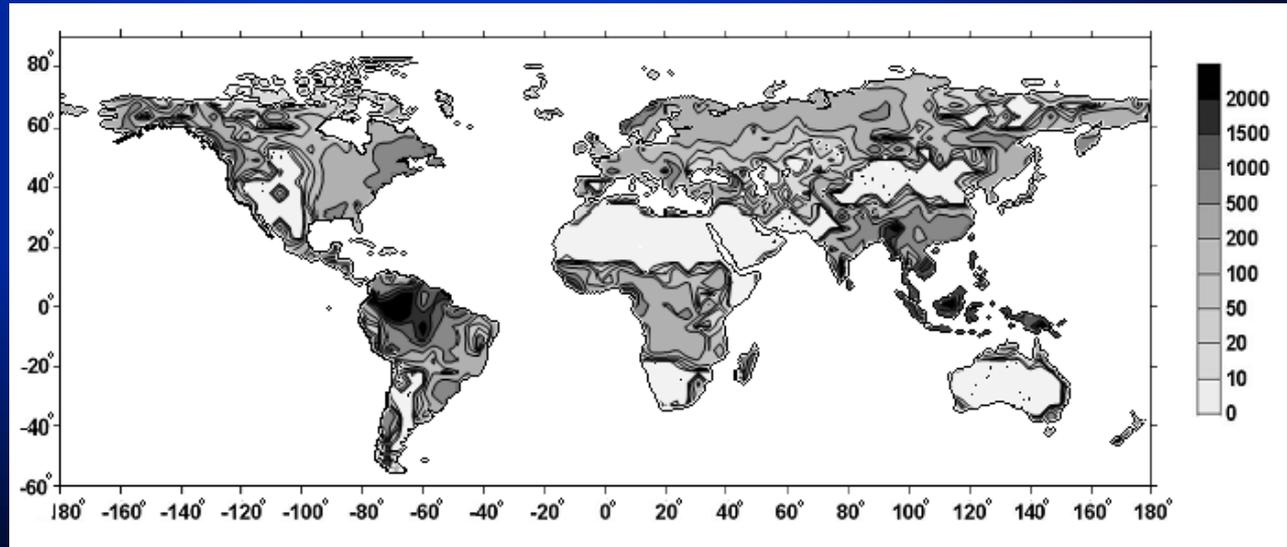
Модель SWAP
(осреднение за
1985-1996 гг.)

Latitude



Composite mean
annual runoff
(mm/yr) derived by
Fekete et al. (2002)
“by combining
observed river
discharge
information with
climate-driven
water balance model
(WBM) outputs”

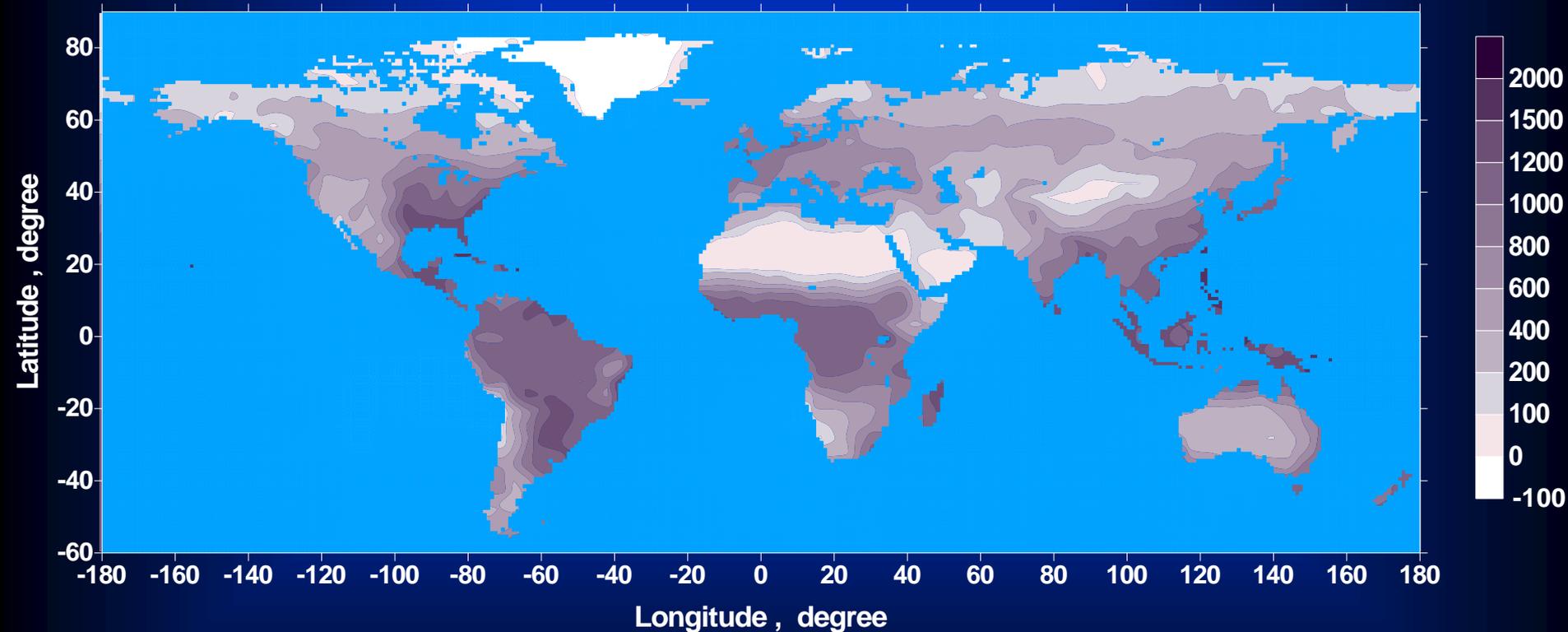
Latitude



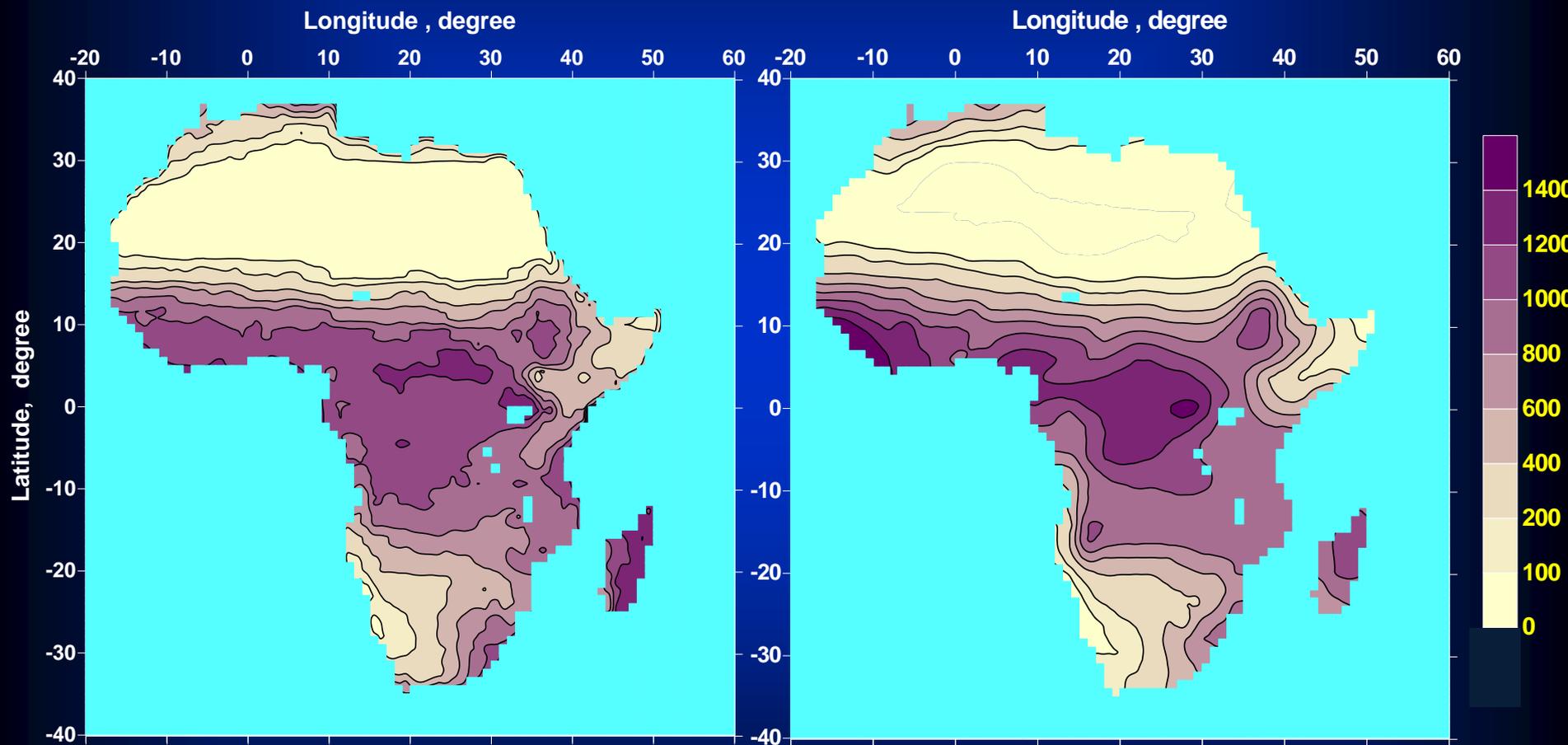
Longitude

Пространственное распределение суммарного испарения с поверхности суши Земли, мм/год

Модель SWAP (осреднение за 1985-1996 гг.)



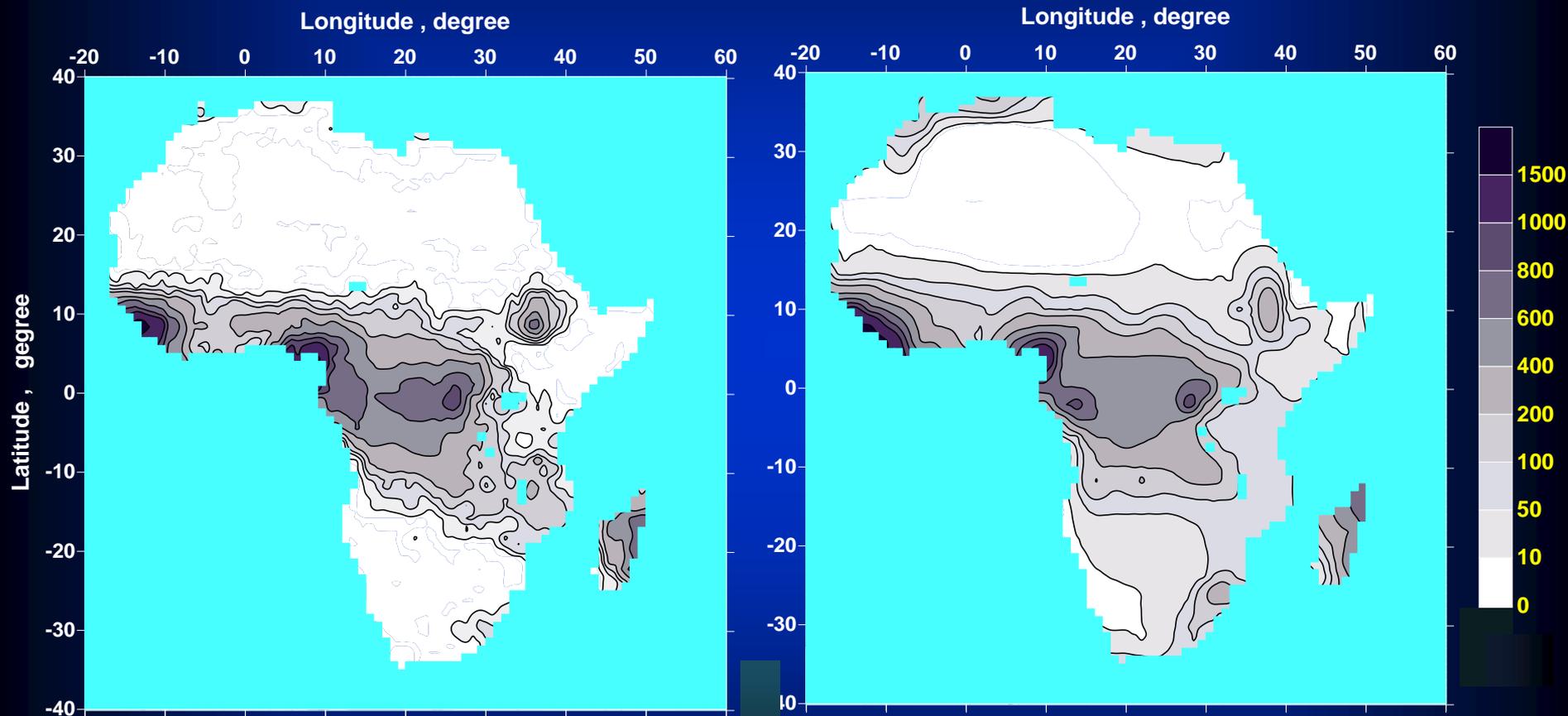
Пространственное распределение суммарного испарения с территории Африки, мм/год



Расчет по модели SWAP
(осреднение за 1986 – 1995 гг.)

Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. **1974.**

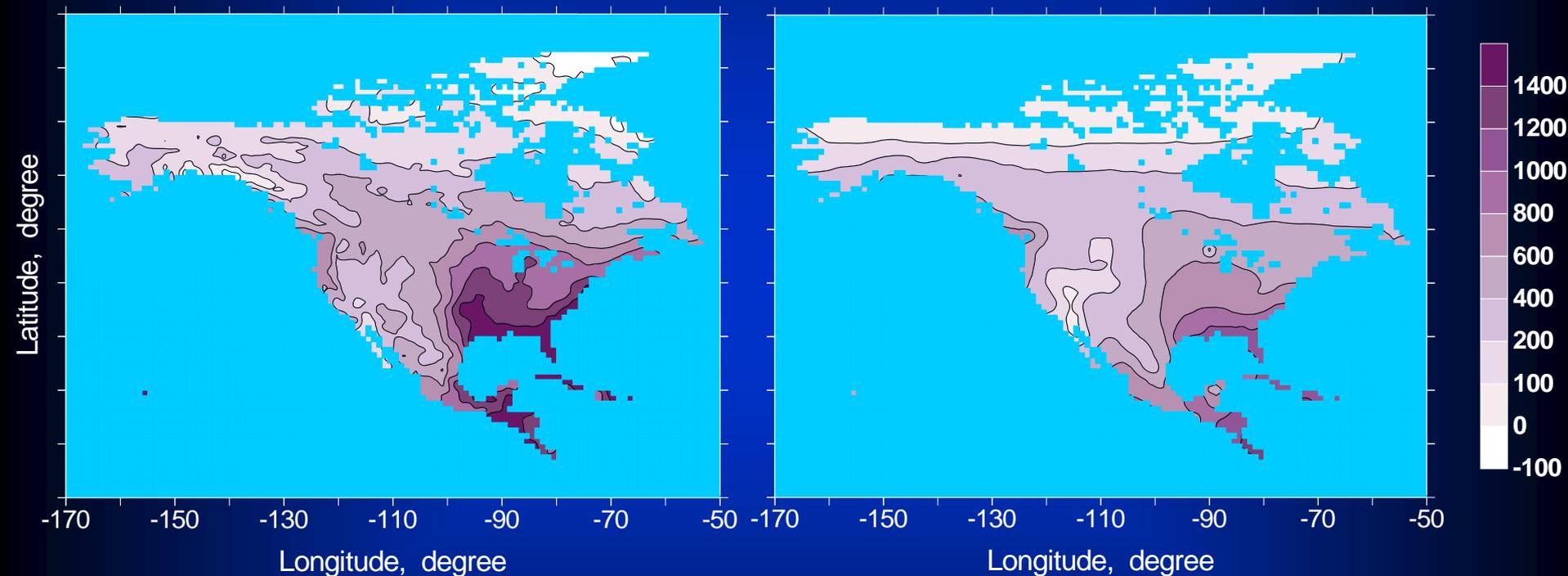
Пространственное распределение формирования стока на территории Африки, мм/год



Расчет по модели SWAP
(осреднение за 1986 – 1995 гг.)

Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. **1974.**

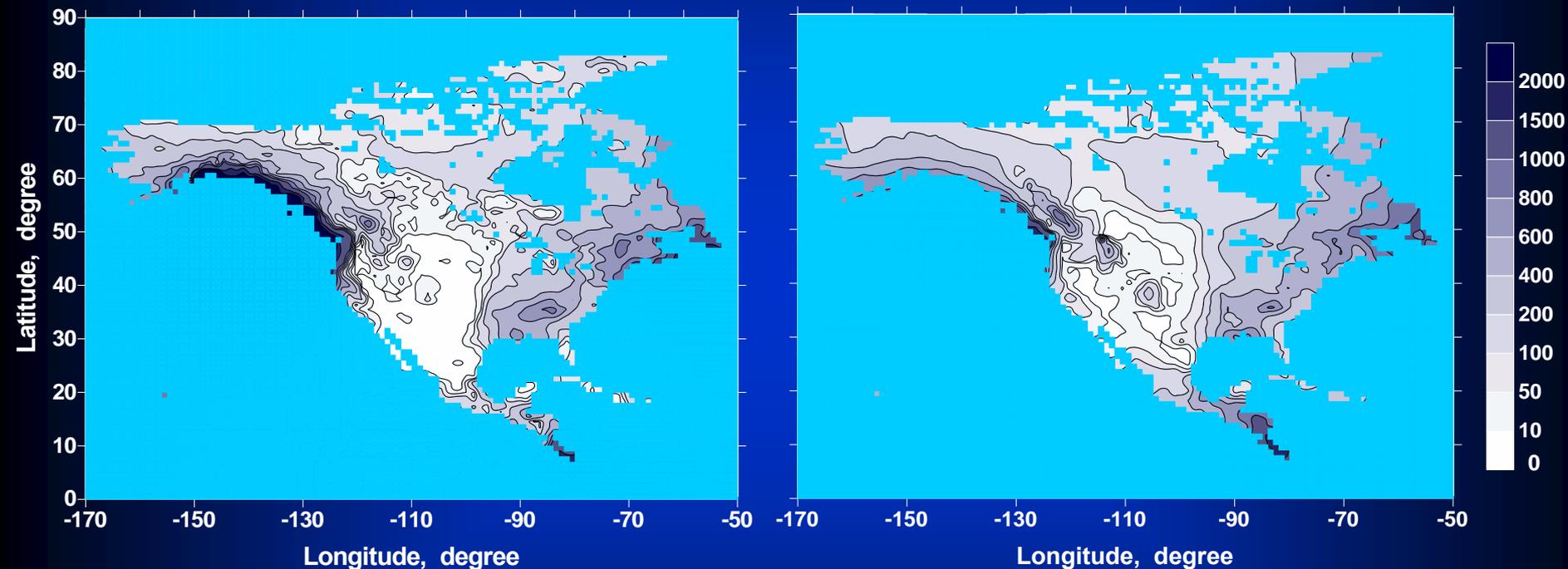
Пространственное распределение суммарного испарения с территории Северной Америки (без Гренландии), мм/год



Расчет по модели SWAP
(осреднение за 1986 – 1995 гг.)

Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. **1974.**

Пространственное распределение формирования стока на территории Северной Америки (без Гренландии), мм/год

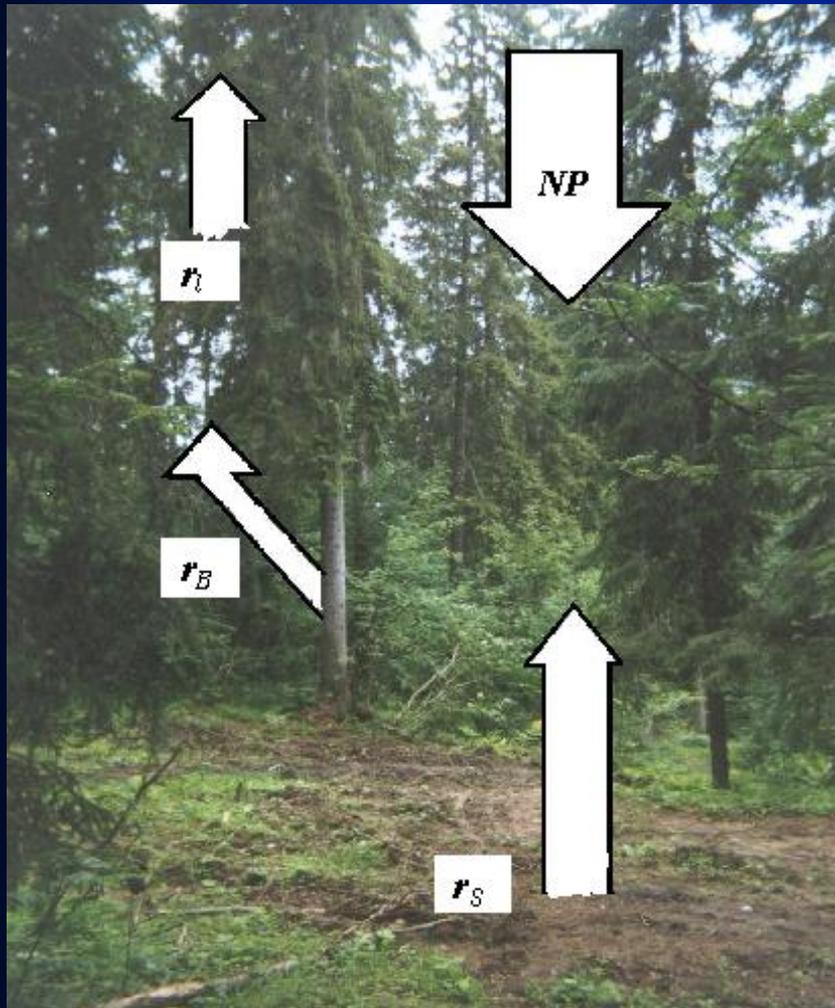


Расчет по модели SWAP
(осреднение за 1986 – 1995 гг.)

Львович М.И. Мировые водные
ресурсы и их будущее. **1974.**

- **Экологические задачи**

Схематизация формирования углеродного баланса в системе “почва – растительный покров – атмосфера”



NP - нетто фотосинтез,

r_l - дыхание фотосинтезирующей фитомассы,

r_B - дыхание одревесневшей фитомассы (стволов и веток),

r_S - дыхание почвы,

включающее автотрофное дыхание подземной фитомассы (корней, клубней)

и дыхание гетеротрофов - микроорганизмов, разлагающих лесную подстилку и опад, а также участвующих в минерализации почвенной органики.

Основные резервуары углерода в экосистеме хвойного леса:

- § (1) фотосинтезирующие элементы хвойных деревьев (хвоя),
- § (2) надземная фитомасса живой древесины (ветки, стволы),
- § (3) подземная живая фитомасса (корни деревьев),
- § (4) надземная фотосинтезирующая фитомасса под пологом леса (кустарниковый или травяной покров),
- § (5) подземная корневая фитомасса травяного покрова,
- § (6) опад и лесная подстилка,
- § (7) органический углерод почвы.

Система уравнений, описывающих динамику углеродного баланса рассматриваемой лесной экосистемы

$$\frac{dC_n}{dt} = \begin{cases} k_n GPP - O_n & \text{при } S_{sh} > 0 \\ -R_n - O_n & \text{при } S_{sh} \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{dC_w}{dt} = k_w GPP - R_w - O_w$$

$$\frac{dC_r}{dt} = k_r GPP - R_r - O_r$$

$$\frac{dC_{gu}}{dt} = k_{gu} GPP_g - R_{gu} - O_{gu} - ATr$$

$$\frac{dC_{go}}{dt} = \begin{cases} k_{go} GPP_{go} - O_{go} + ATr & \text{при } S_{sh} > 0 \\ -R_{go} - O_{go} + ATr & \text{при } S_{sh} \geq 0 \end{cases}$$

$$\frac{dC_l}{dt} = O_n + O_w + O_r - O_{go} - O_{gu} - R_l - \Pi$$

$$\frac{dC_s}{dt} = \Pi - R_s$$

где $C_n, C_w, C_r, C_{go}, C_{gu}, C_l, C_s$ - масса углерода (на единице площади экосистемы), содержащегося в хвое; ветках и стволах; корнях деревьев; живой надземной биомассе травы; живой подземной биомассе травы; мертвой биомассе (опаде, корневых остатках, лесной подстилке); гумусе почвы, соответственно;

GPP – общая первичная продуктивность хвой, равная ее неттофотосинтезу минус темновое дыхание днем и нулю ночью;

GPP_g – общая первичная продуктивность травы, равная ее неттофотосинтезу минус темновое дыхание днем и нулю ночью;

$R_n, R_w, R_r, R_{go}, R_{gu}$ - автотрофное дыхание (дыхание хвой; веток и стволов; корней деревьев; надземной фитомассы травы; подземной фитомассы травы, соответственно);

R_p, R_s - гетеротрофное дыхание (дыхание организмов, разлагающих отмершую биомассу опада, корневых остатков, лесной подстилки; дыхание микроорганизмов, обеспечивающих минерализацию гумуса, соответственно);

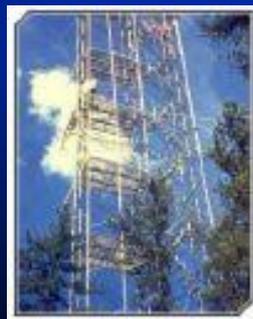
$O_n, O_w, O_r, O_{go}, O_{gu}$ - интенсивность убыли углерода в соответствующих резервуарах вследствие опада или отмирания различных фитоэлементов экосистемы (хвой; веток и стволов; корней деревьев; надземной биомассы травы; подземной биомассы травы, соответственно);

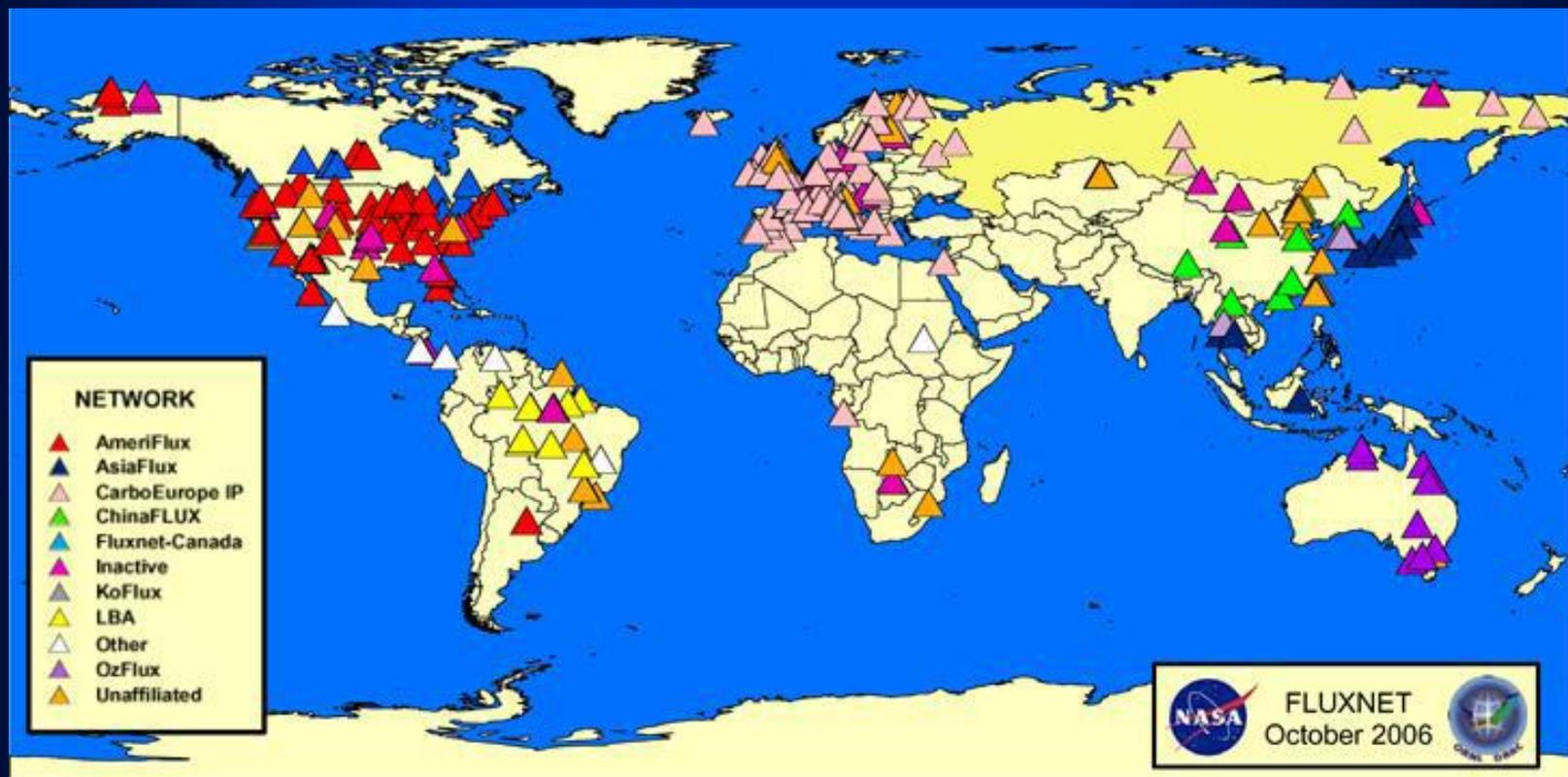
Π – интенсивность пополнения углерода почвенной органики в результате разложения отмершей биомассы (как надземной, так и подземной) экосистемы;

ATr - интенсивность поступления ассимилятов многолетних трав из подземной биомассы (луковиц, клубней и т.д) в надземную (в основном в весенний период для создания системы побегов);

S_{sh} – интенсивность солнечного излучения (коротковолновая радиация). Коэффициенты $K_n, K_w, K_r, K_{go}, K_{gu}$ характеризуют распределение углерода, связанного с поступлением ассимилятов после фотосинтеза в различные компоненты

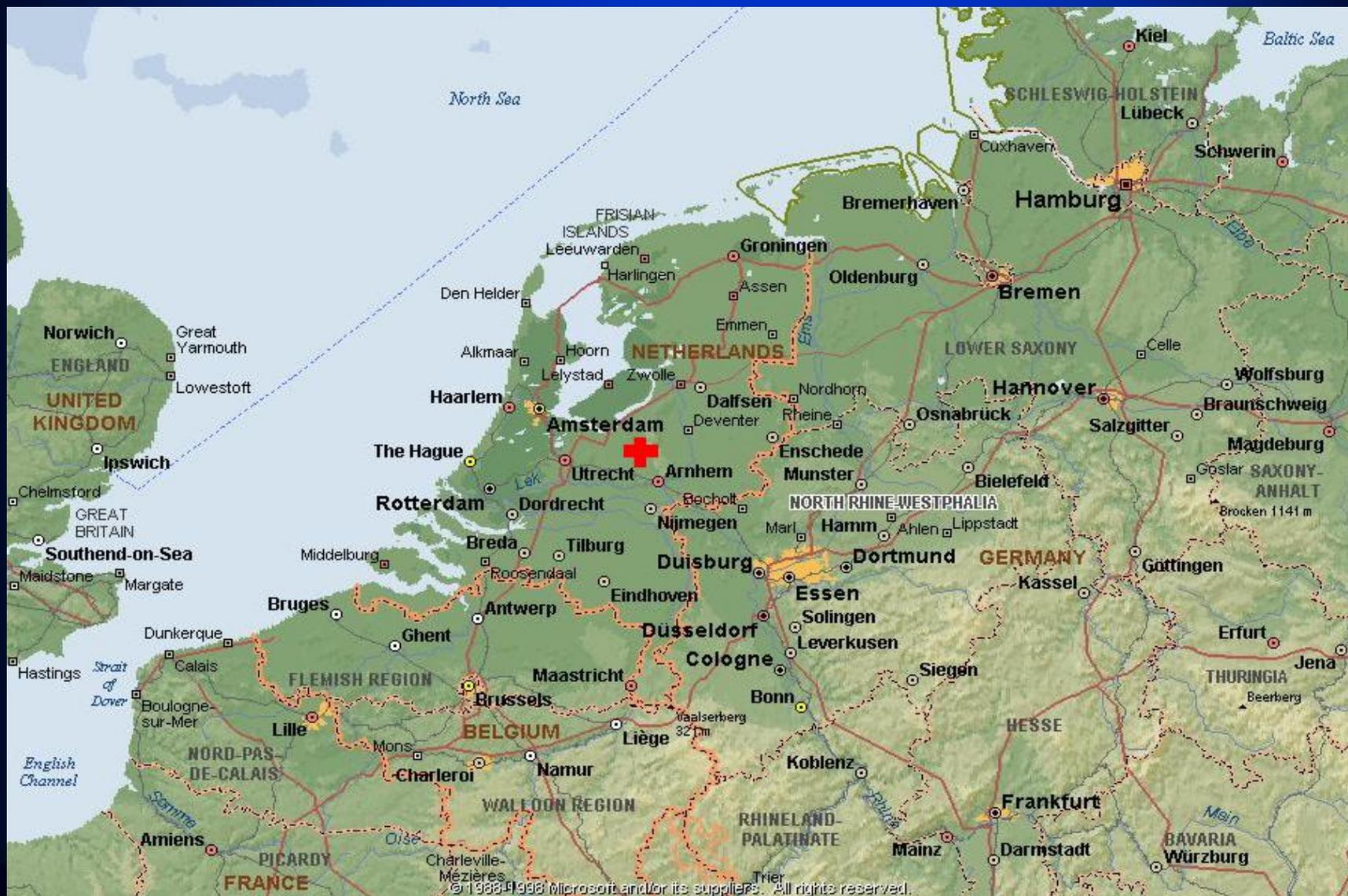
Международная сеть наблюдений водного, теплового и углеродного обмена в лесных и полевых экосистемах





Важной предпосылкой развития LSM-моделей явилось создание с середины 90-ых годов прошлого столетия международной инструментальной сети наблюдений за потоками тепла, водяного пара и углекислого газа в различных экосистемах планеты **FLUXNET**. Широкий спектр экспериментальных данных, полученных в данной сети наблюдений, позволяет осуществлять апробацию разрабатываемых LSM-моделей по формированию в экосистемах суши радиационного, теплового, водного и углеродного обмена

Экспериментальный полигон Лубус международной сети "CarboEuroflux" (красный крест)





**Экосистема соснового
леса, высаженного на
песчаных дюнах**

Вид полигона Лубус в 1906 г.

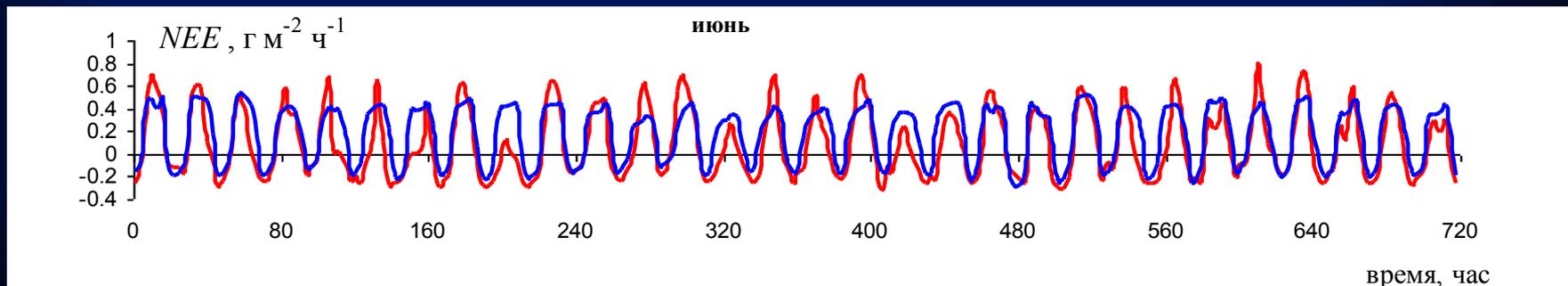
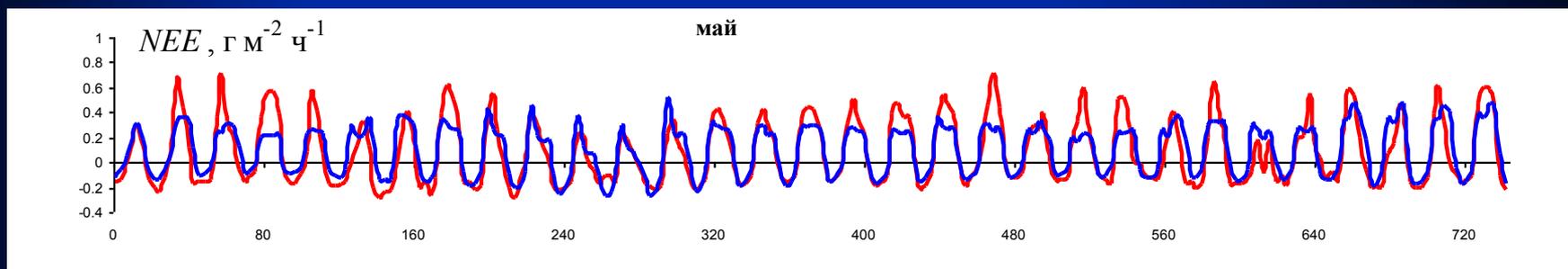
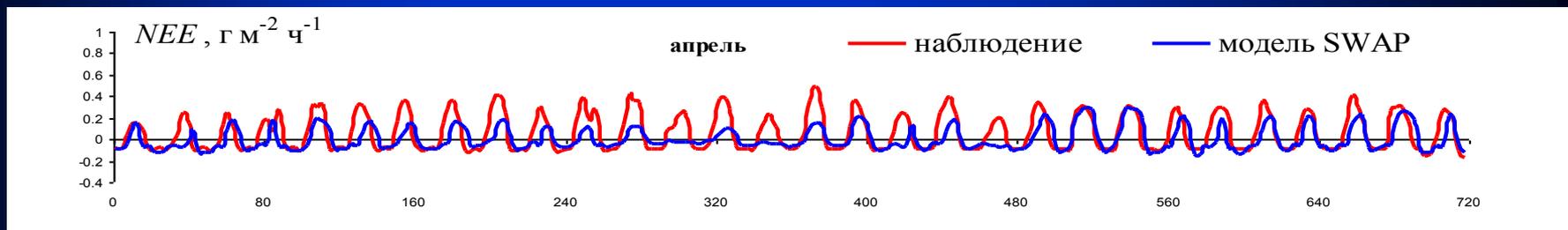
вверху →

и в настоящее время

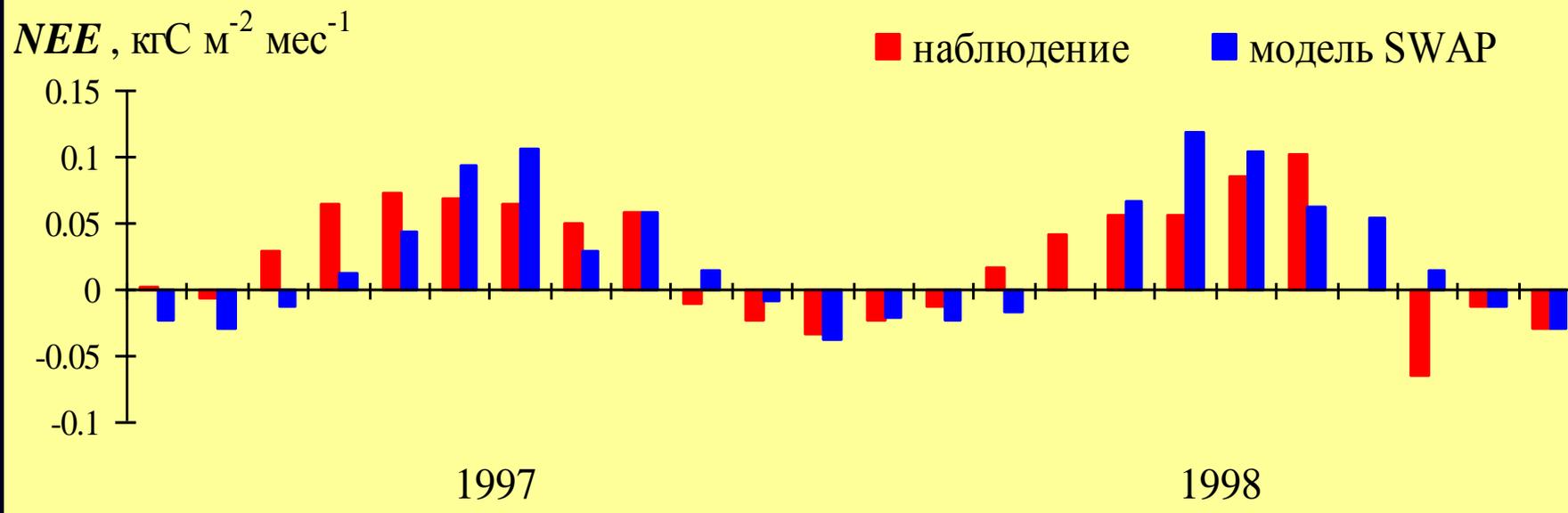
справа →



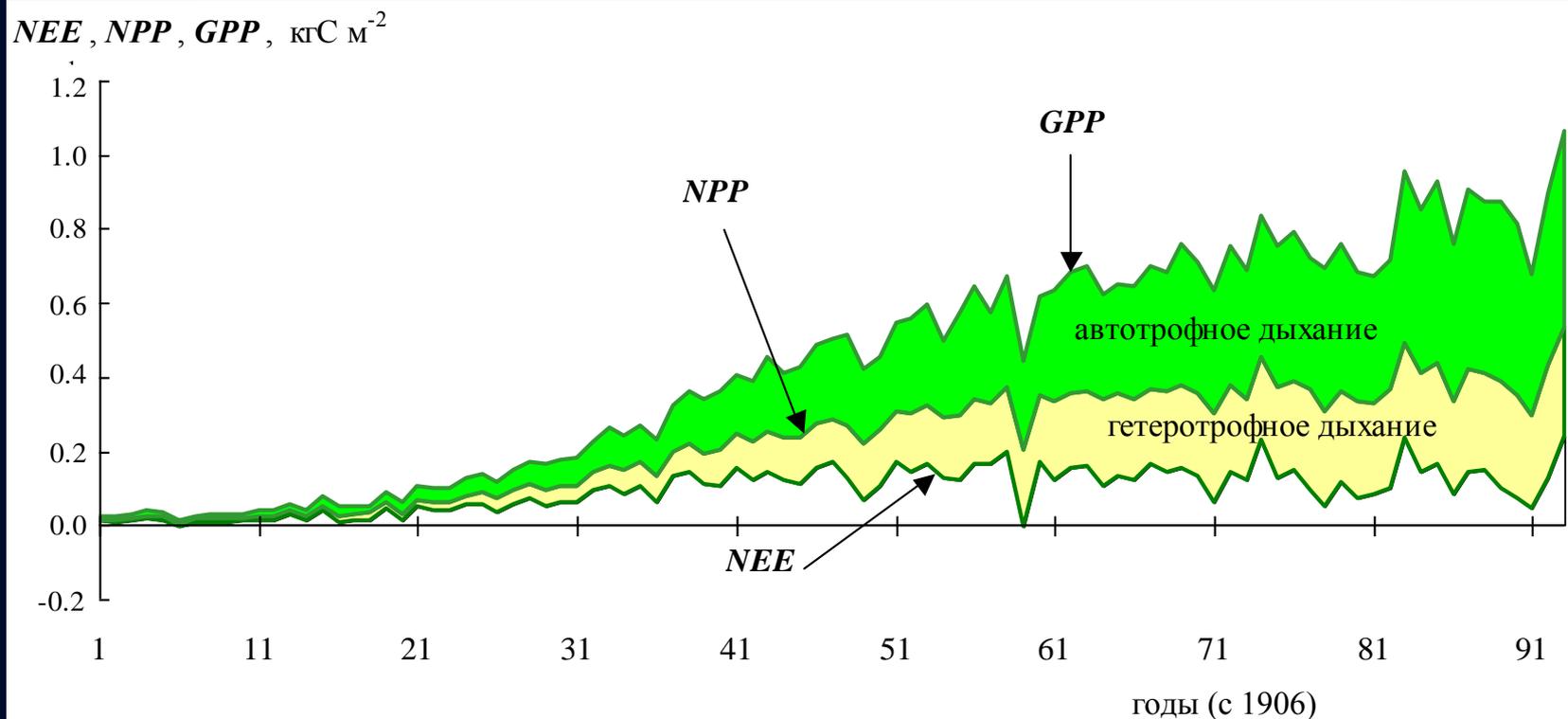
Динамика углеродного баланса экосистемы соснового леса NEE в районе исследовательской станции Лубос в апреле - июне 1998 года.



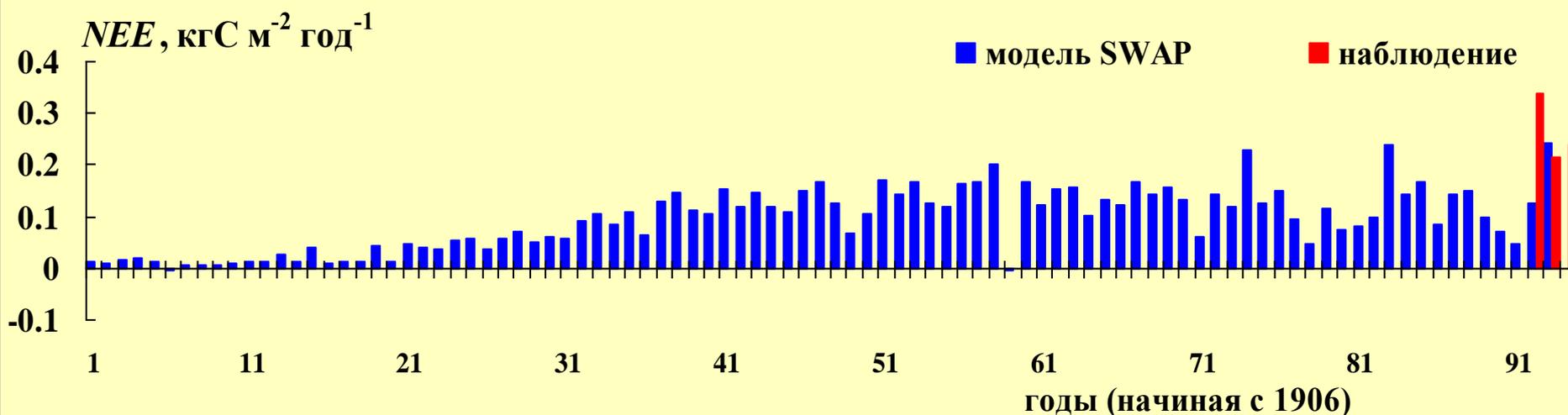
Внутригодовая динамика углеродного баланса *NEE* экосистемы соснового леса в районе исследовательской станции Лубос.



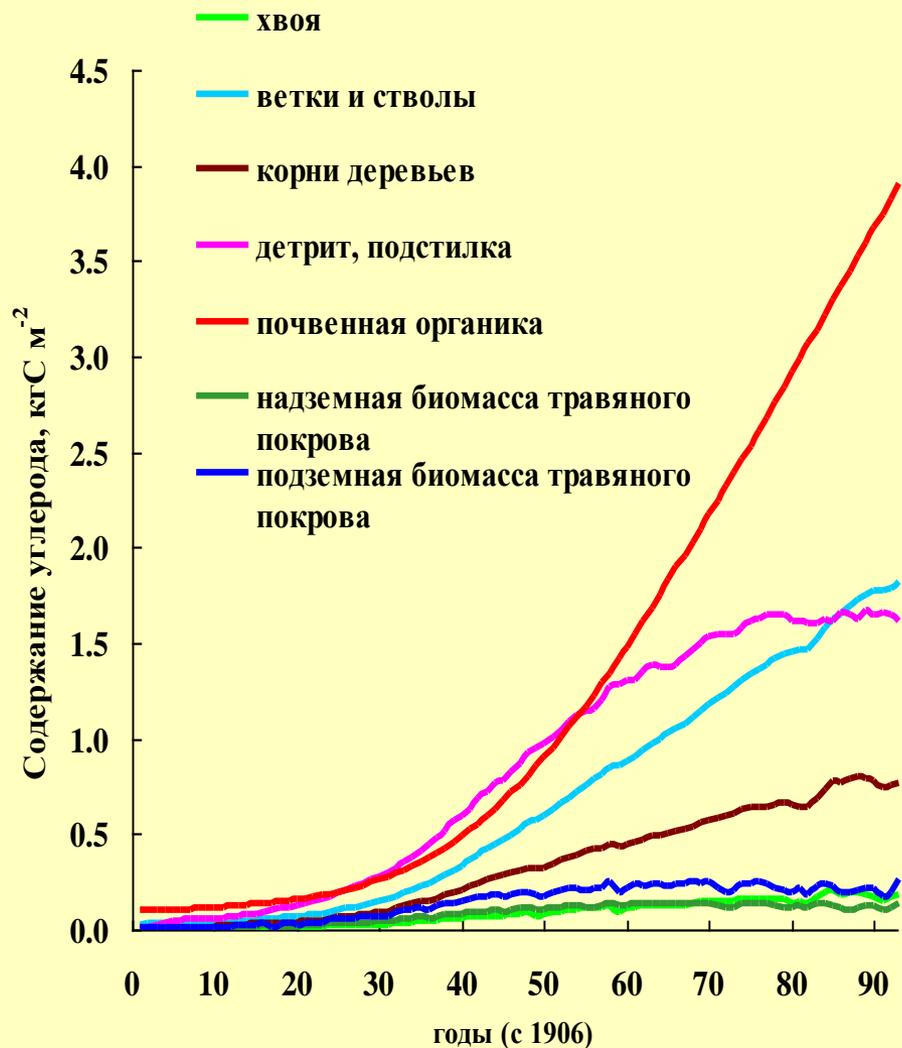
Многолетняя динамика полной первичной продуктивности **GPP**, неттопродуктивности **NPP** и углеродного баланса **NEE** экосистемы соснового леса в районе исследовательской станции Лубос (моделирование)



Многолетняя динамика углеродного баланса экосистемы соснового леса *NEE* в районе исследовательской станции Лубос.



Динамика содержания углерода в различных компонентах экосистемы соснового леса в районе исследовательской станции Лубус (расчет)
(биомасса травяного покрова приведена по июльским данным, когда ее значения максимальны)



Содержание углерода (кг/м²) на станции в конце 90-х годов:

в почве, детрите, подстилке

5.6 - расчет

7.7±0.7 - измерение

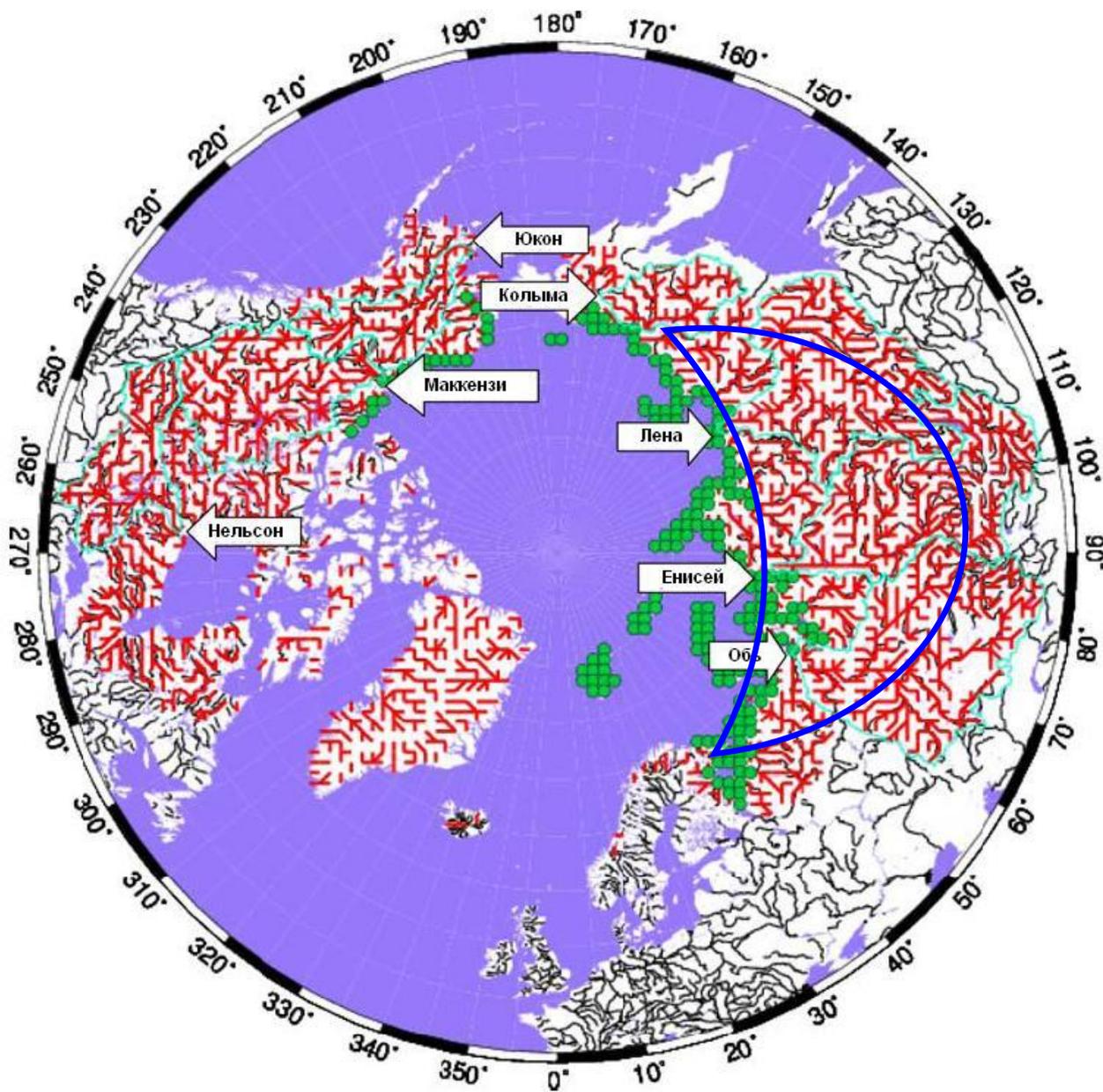
в живой биомассе

3.2 - расчет

3.5-4.5 - примерная оценка по дендрологическим характеристикам растительности

- **Гидрологические задачи**

Схематизация основных речных бассейнов и речной сети пан-Арктического бассейна с 100 - км разрешением
(зеленые точки – пункты наблюдений за речным стоком)



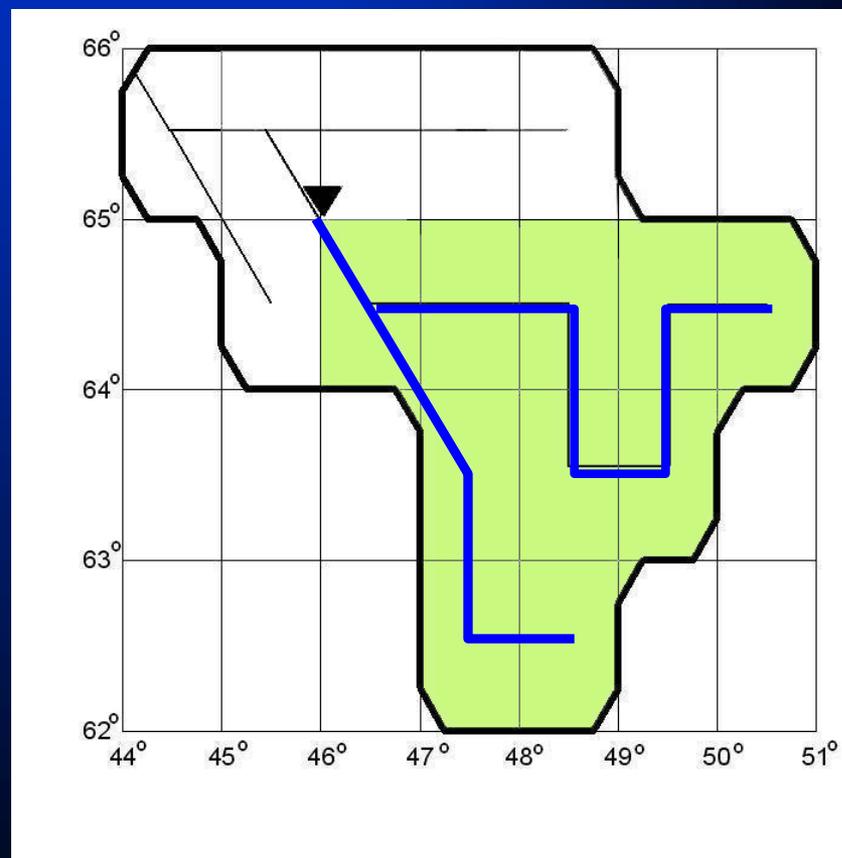
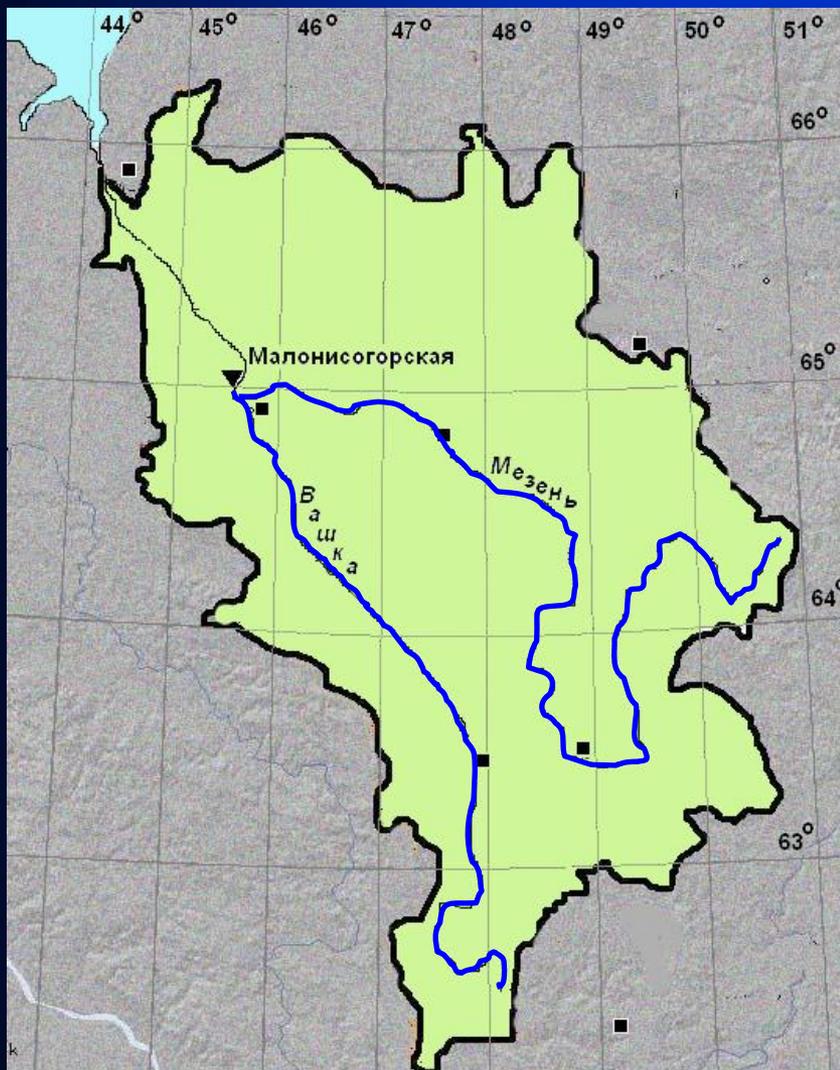
Местоположение бассейна р.Мезень (площадь 78000 км²)



Бассейн р.Мезень и его схематизация при проведении расчетов стока

■ – метеостанции

▼ – стоковая станция



Линейная модель формирования водного баланса в русловой сети [Kanae et al., 1995; Oki, 1997; Oki, Sud, 1998]

$$\frac{dS_r}{dt} = Y_{in} - Y_{out}$$

- S_r – запас воды в русловом канале в пределах одной расчетной ячейки
 Y_{in} – расход воды, поступающий в канал (как от каналов соседних ячеек, так и в виде боковой приточности в рассматриваемой ячейке)
 Y_{out} – расход воды в канале на выходе из ячейки

$$Y_{out} = \frac{u_e}{d_c} S_r$$

- d_c – расстояние между расчетными ячейками
 u_e – эффективная скорость движения воды в русловом канале (с учетом извилистости русла). Среднеглобальное значение u_e равно примерно 0.35 – 0.36 м/с [Miller et al., 1994; Kanae et al., 1995; Oki et al., 1999]

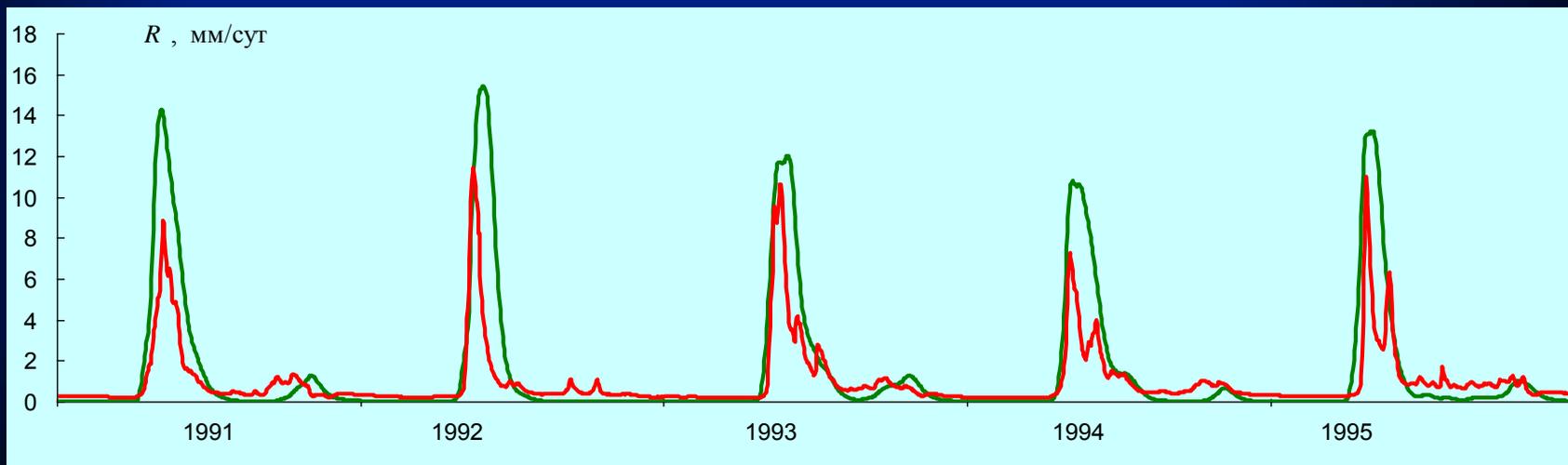
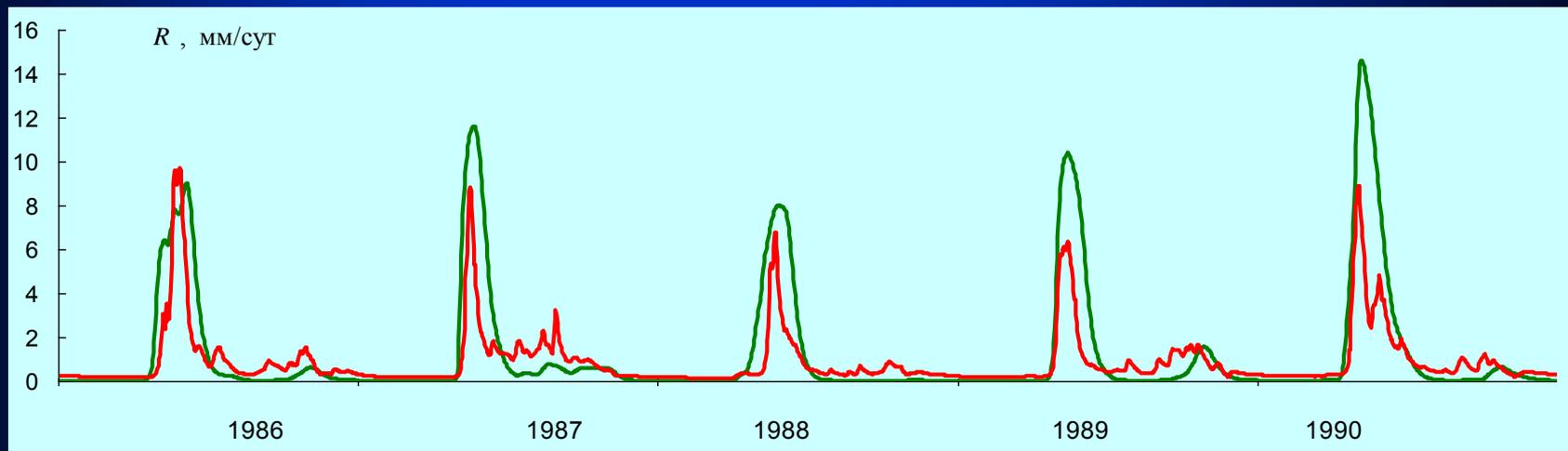
Статистические критерии соответствия рассчитанных и наблюдаемых значений стока

- ♥ Систематическая ошибка **bias**, равная разности между рассчитанными и наблюдаемыми значениями стока, усредненными по рассматриваемому периоду
- ♥ Коэффициент корреляции между рассчитанными (x_{cal}) и наблюдаемыми (x_{obs}) значениями стока **Corr** (суточными или месячными)
- ♥ Расчетная эффективность по Нэшу-Сатклиффу [*Nash, Sutcliffe, 1970*] **Eff**, определяемая следующим выражением

$$Eff = 1 - \frac{\sum (x_{cal} - x_{obs})^2}{\sum (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2}$$

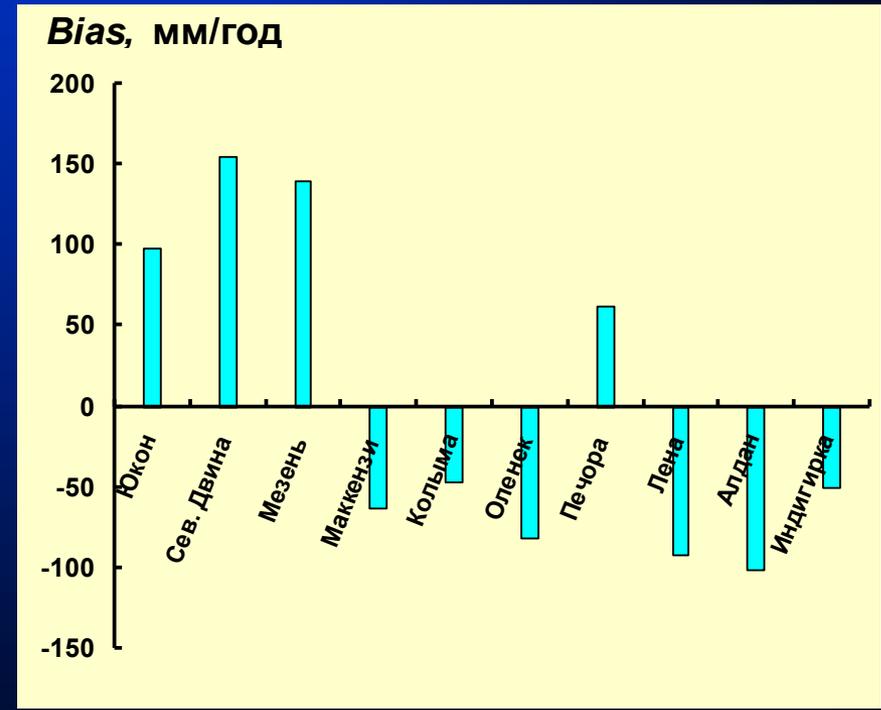
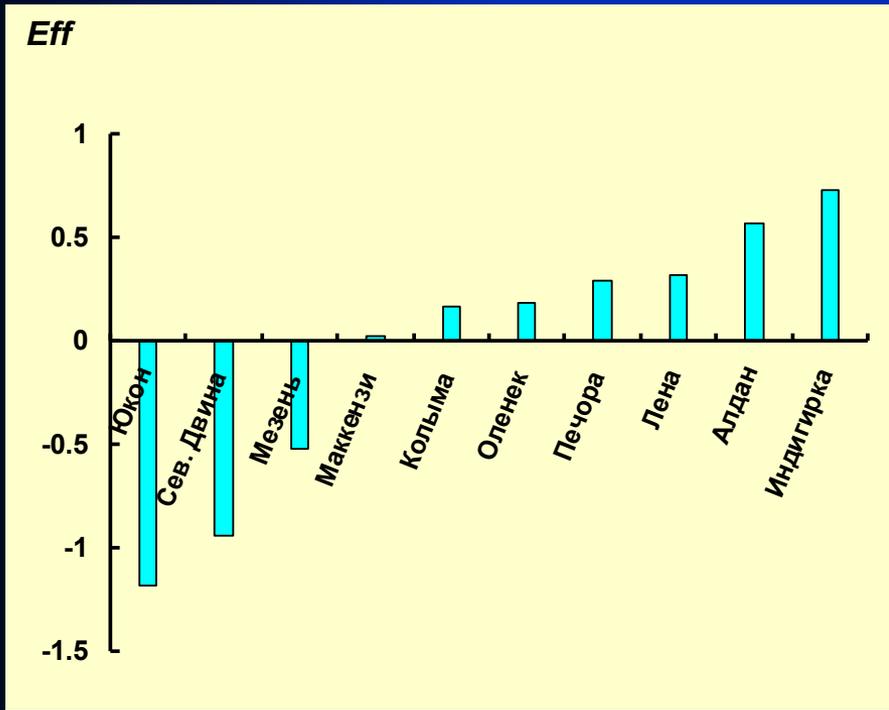
Согласно [Апполов и др., 1974]: «хорошая» точность – при $Eff > 0.75$
«удовлетворительная» - при $0.36 < Eff < 0.75$

Сопоставление наблюдаемых (—) и рассчитанных (—) суточных величин стока р.Мезень в районе ст. Малонисогорская с использованием априорных параметров $bias = 141$ мм/год (или 40% от наблюдаемого стока), $Corr = 0.94$, $Eff = -0.49$



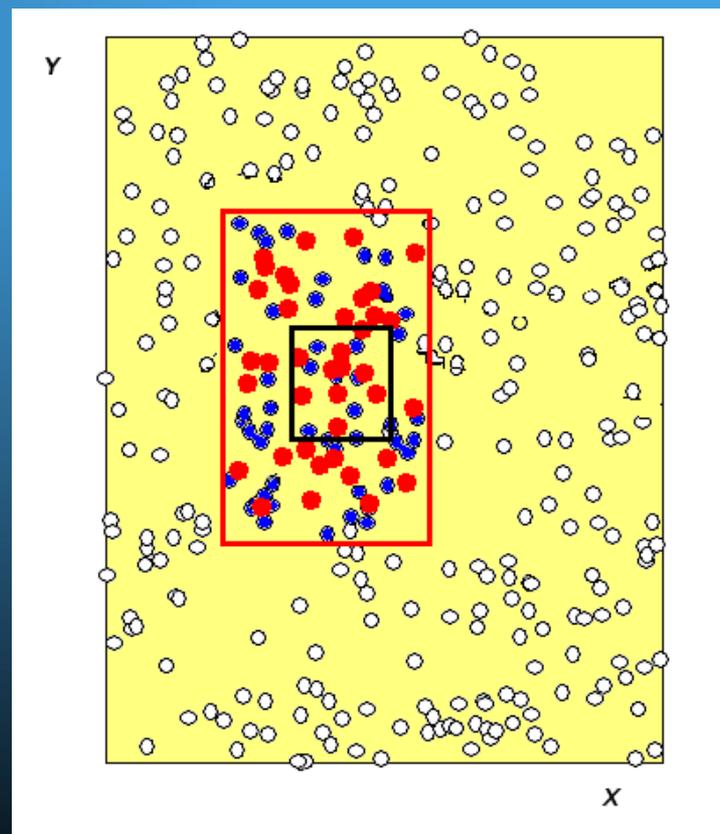
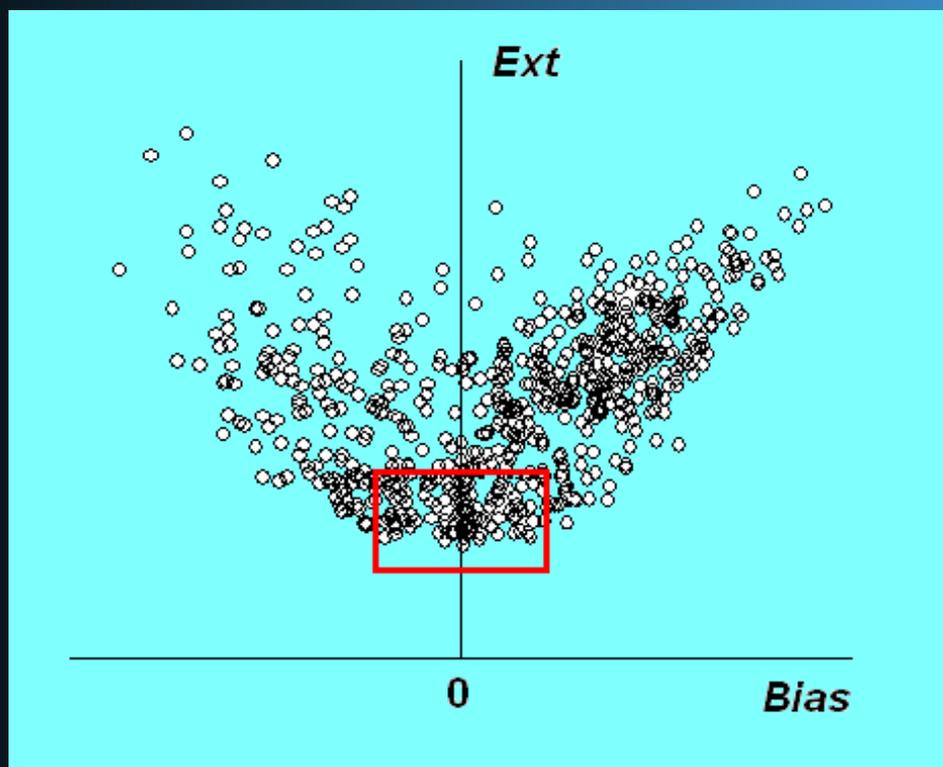
Эффективность расчетов *Eff* и систематическая ошибка *Bias*

месячных величин стока для ряда северных рек при использовании априорных параметров поверхности бассейнов и метеорологических характеристик из глобальной базы данных проекта GSWP-2 за 1983-1995 гг.



Пример прямого поиска минимума целевой функции Ext для двумерной области переменных X и Y (RST -метод)

- – точки первоначальной серии квазислучайных точек (X, Y)
- – «лучшие» точки первоначальной серии
- – точки повторной серии розыгрыша квазислучайных точек (X, Y)
- – область точек со значениями X и Y , близких к оптимальным



Метод эволюций тасуемых групп SCE-UA

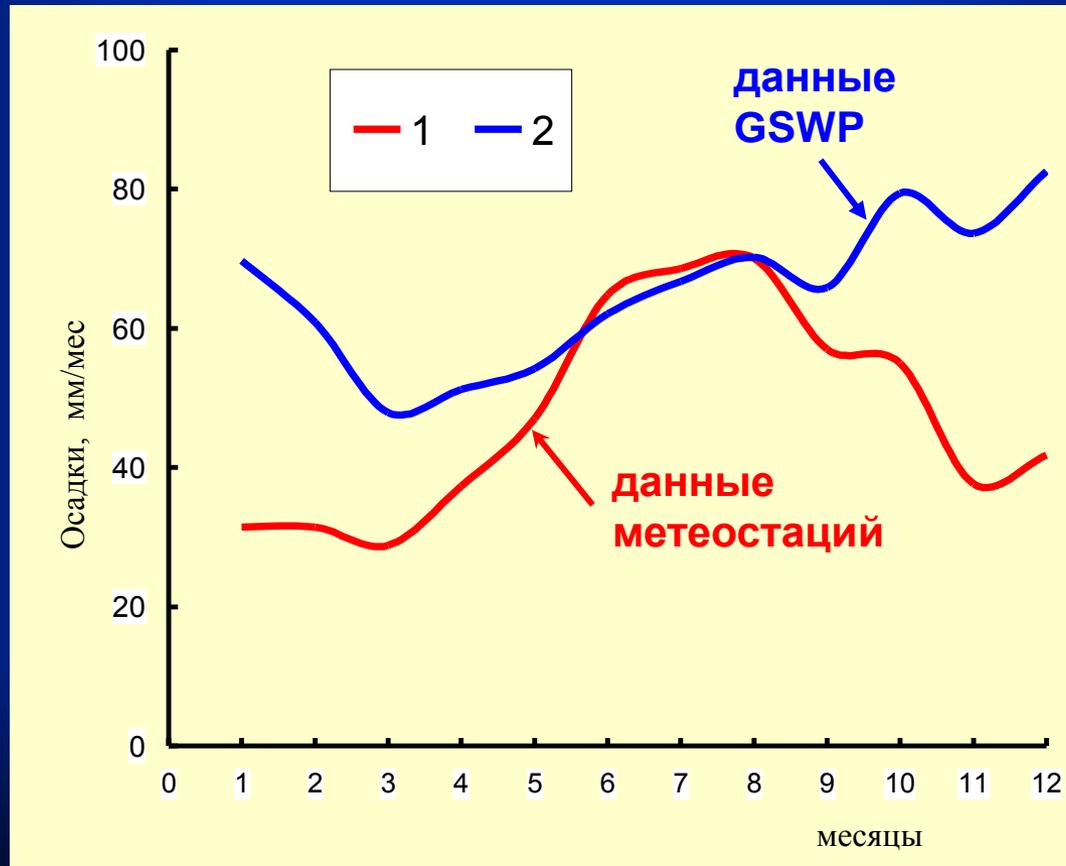
Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // Water Resour. Res. 1992. V. 28. № 4.

Метод SCE-UA был разработан для оптимизации какой-либо одной целевой функции. Чтобы применить его для двух целевых функций *Ext* и *Bias*, поиск минимального значения *Ext* осуществлялся при условии, что *Bias* не должен превышать 5%.

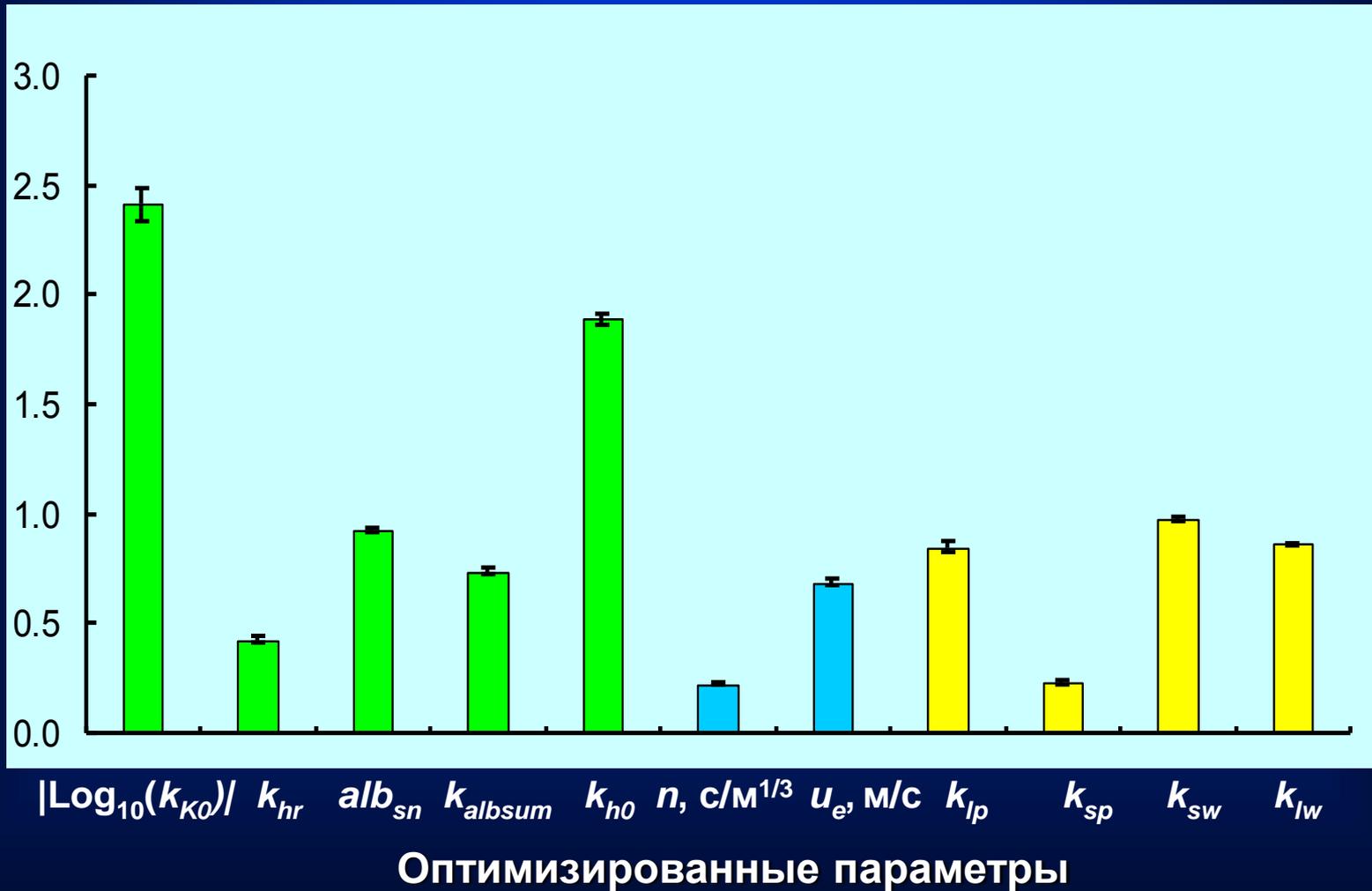
На первом этапе метода SCE-UA устанавливается исходная совокупность значений оптимизируемых параметров путем случайной выборки в пространстве допустимых значений n параметров, определяемом заданными диапазонами их значений. Для каждой точки вычисляется значение целевой функции. На основе этих значений выборка разделяется на несколько групп, каждая из которых состоит из $2n+1$ точек. В каждой группе поиск оптимума целевой функции осуществляется в течение заданного числа шагов независимо от других групп симплексным методом склонового спуска (downhill simplex method)], т.е. происходит независимая эволюция этих групп. Периодически группы объединяются в единую выборку, точки которой перемешиваются (тасуются) с целью обмена информацией и разделяются на новые группы. Затем осуществляется независимая эволюция вновь созданных групп. В процессе поиска вся совокупность точек сходится к глобальному оптимуму при условии, что исходная выборка достаточно велика. Эволюции и перемешивание повторяются до достижения заранее определенного критерия сходимости. В настоящей работе число групп задавалось равным 6 (с уменьшением до 3 в процессе работы алгоритма), а критерий сходимости составлял 0.1% (изменение значения *Ext*) в течение 8 циклов.

Среднемноголетняя (за 1986 – 1994 гг) динамика месячных значений осадков (усредненных по бассейну р.Мезень):

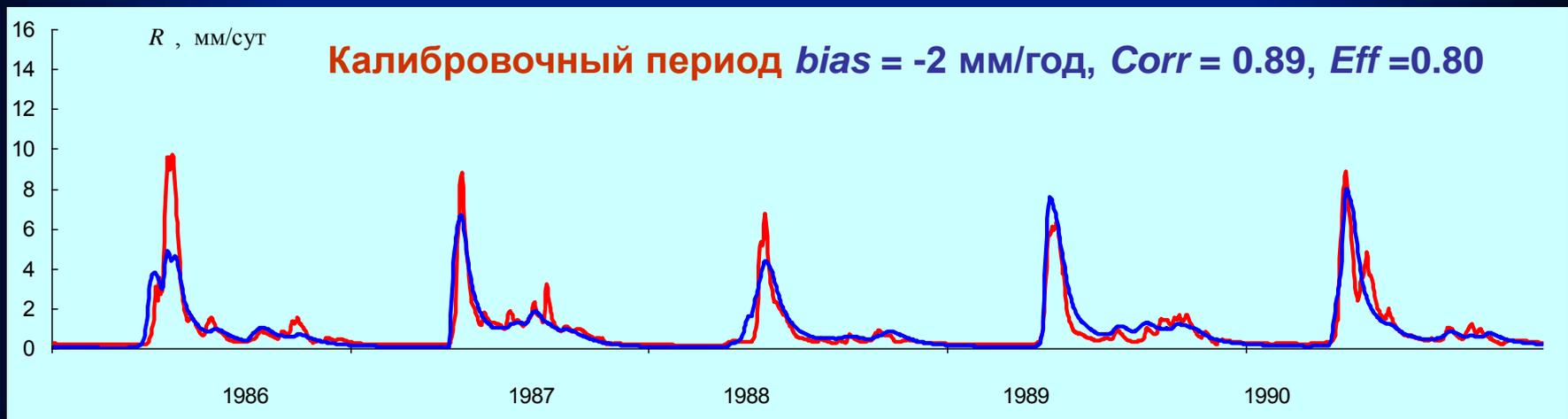
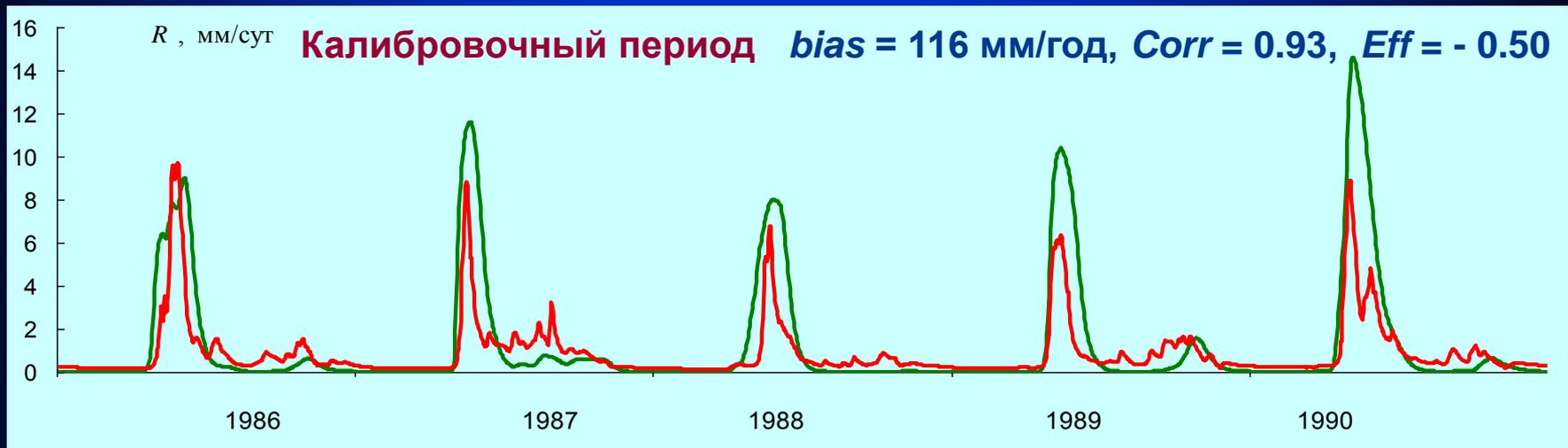
- (1) по данным наблюдений метеорологических станций
- (2) взятых из глобальной базы данных проекта GSWP-2



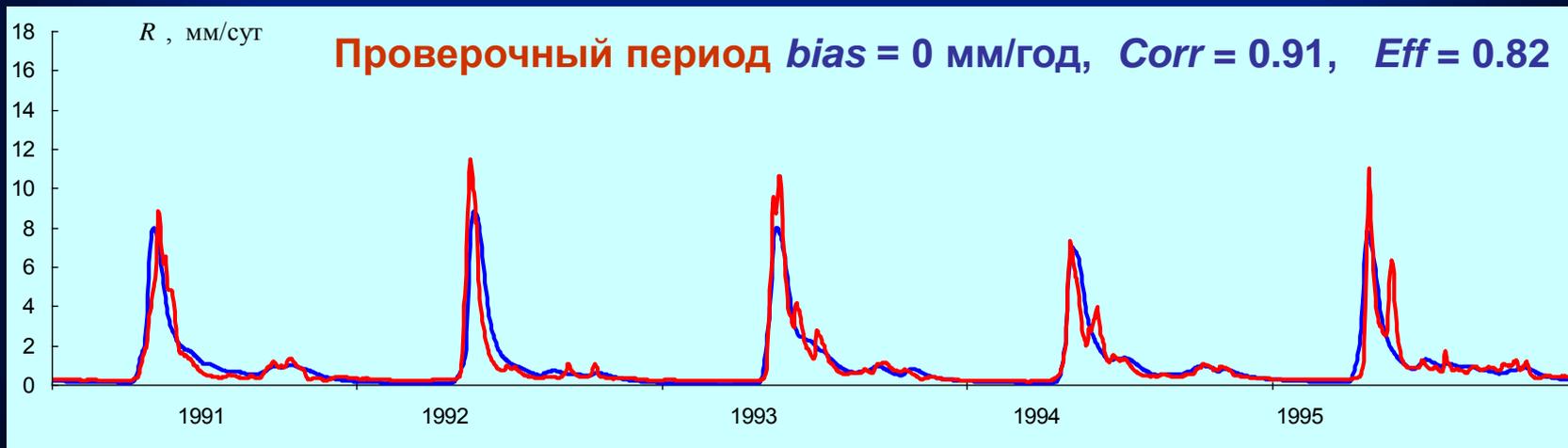
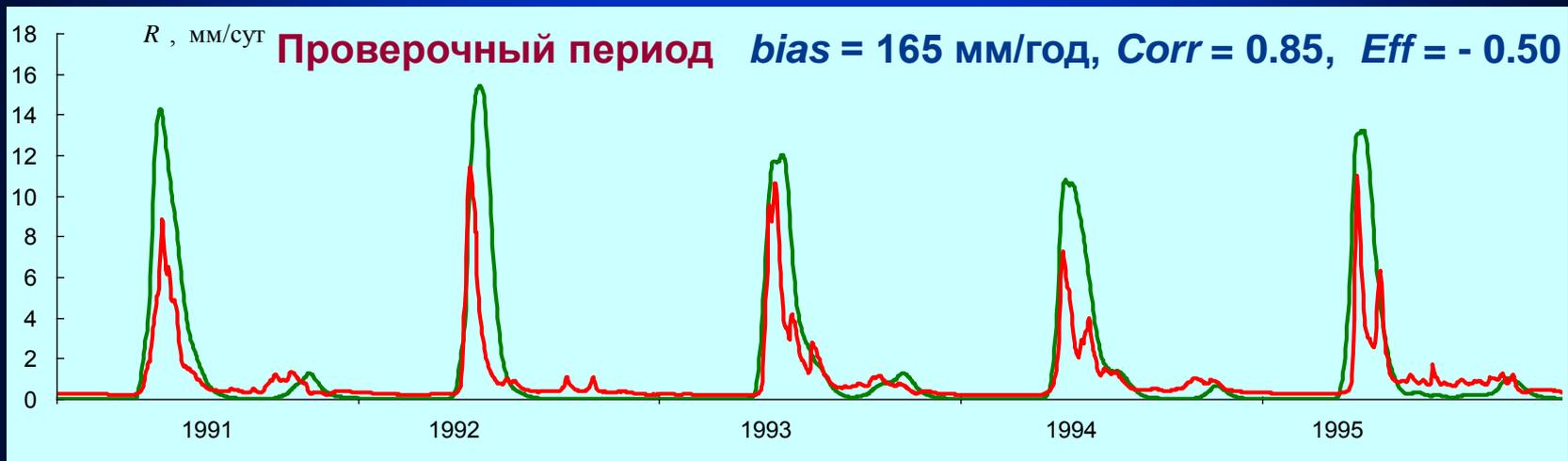
Набор калибруемых параметров



Сопоставление наблюдаемых (—) и рассчитанных суточных величин стока р.Мезень в районе ст. Малонисогорская с использованием априорных (—) и оптимизированных (—) параметров для калибровочного периода



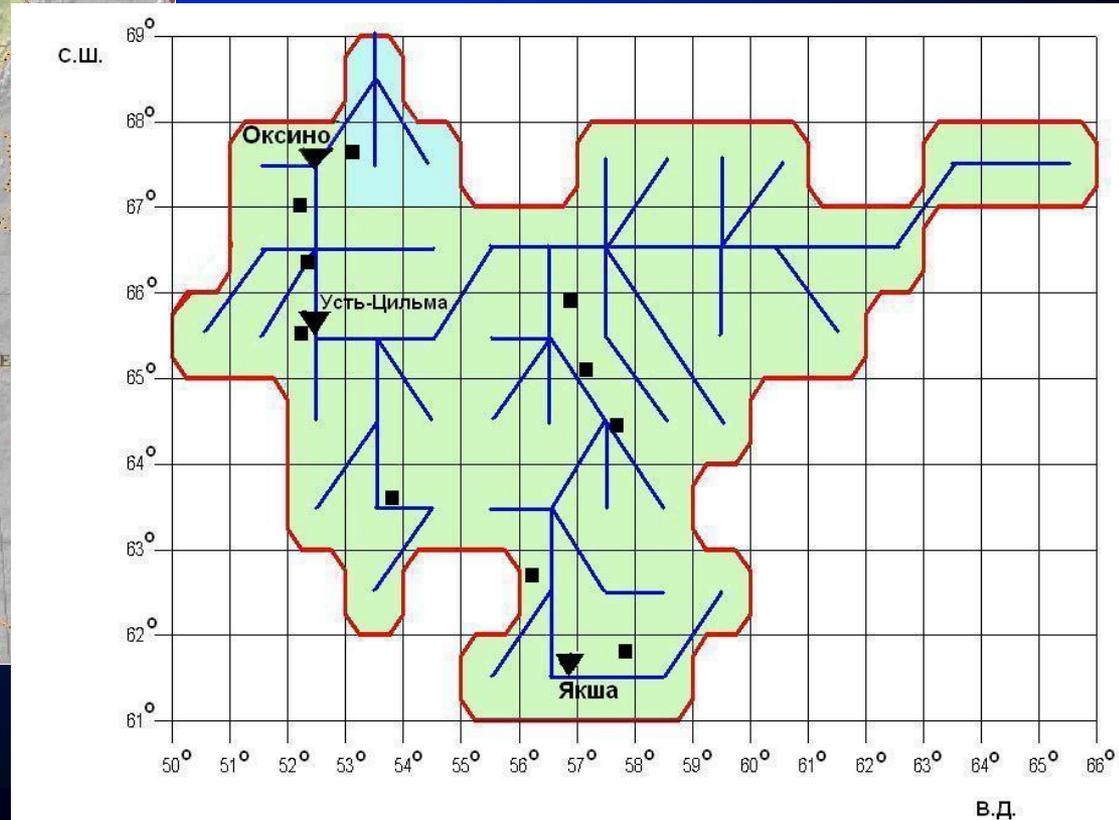
Сопоставление наблюдаемых (—) и рассчитанных суточных величин стока р.Мезень в районе ст. Малонисогорская с использованием априорных (—), т.е. основанных на глобальных базах данных проекта GSWP-2, и оптимизированных (—) параметров для проверочного периода



Бассейн р.Печора (324 000 кв.км) и его схематизация при проведении расчетов стока

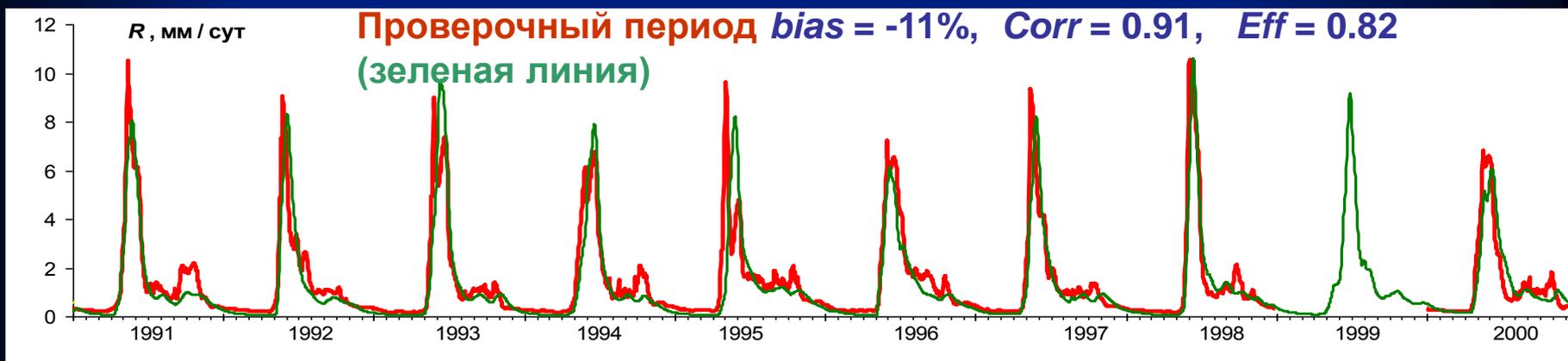
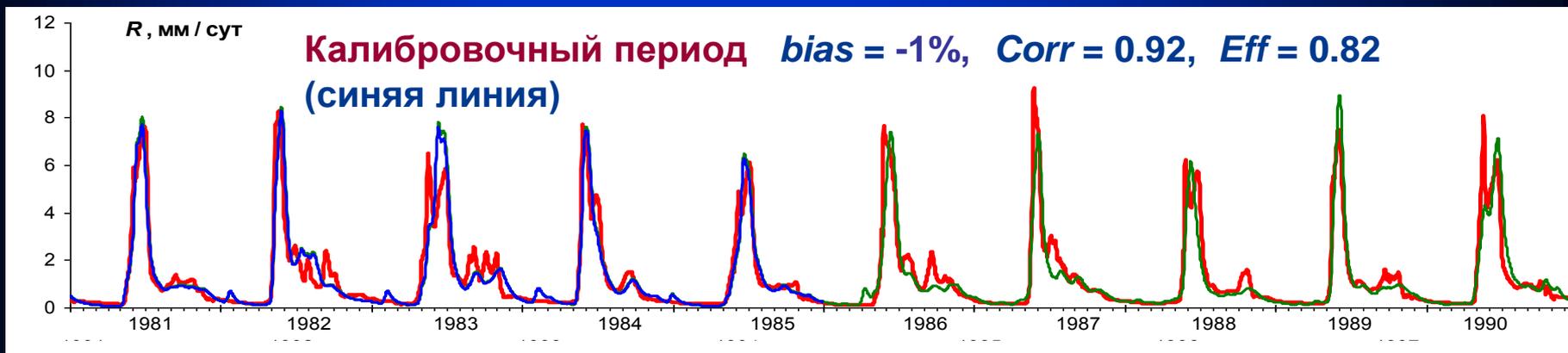


- ▼ – **СТОКОВЫЕ СТАНЦИИ**
- – **МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ**

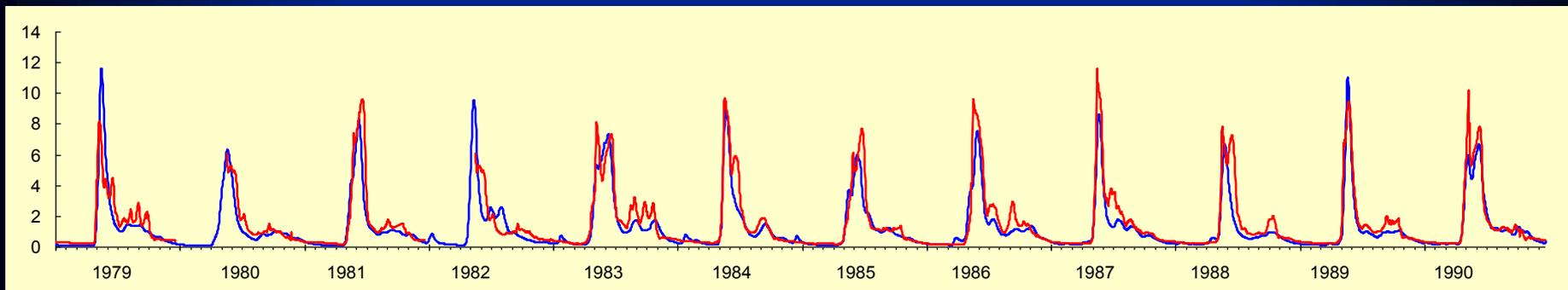
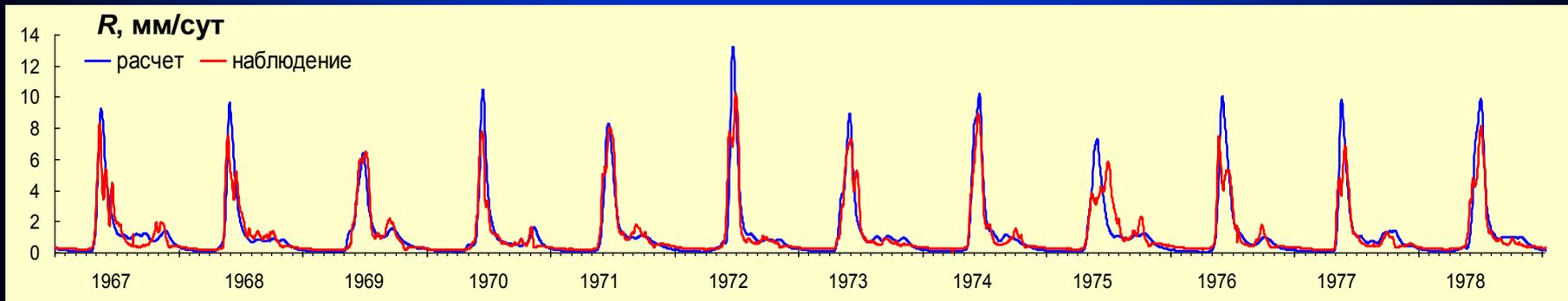


Сопоставление наблюдаемых (—) и рассчитанных (— —) суточных величин стока р.Печора в районе ст. Оксина с использованием оптимизированных параметров

/ метеорологические данные из данных наблюдений метеорологических станций/

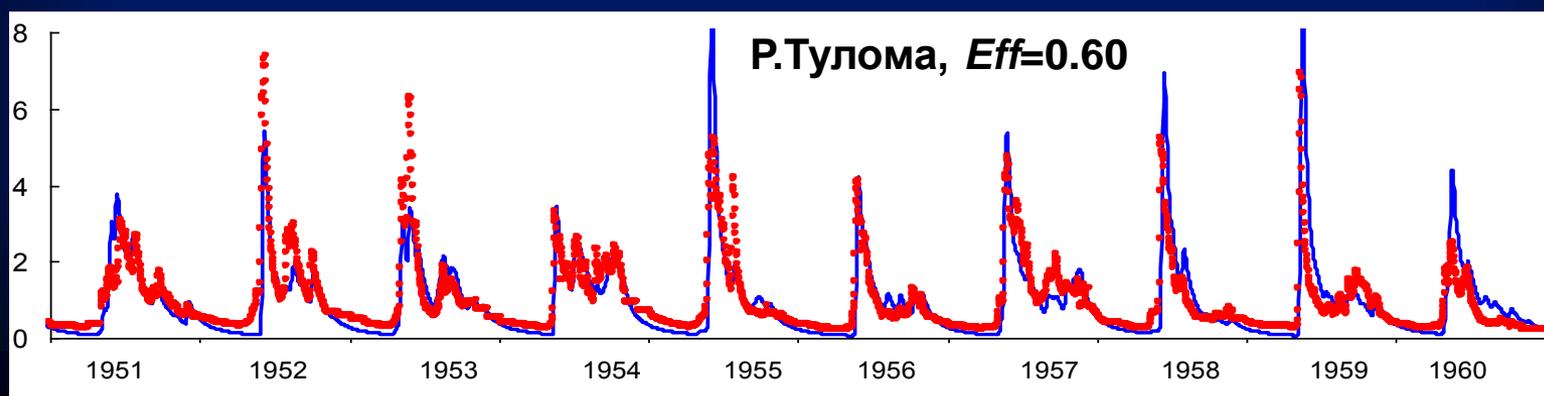
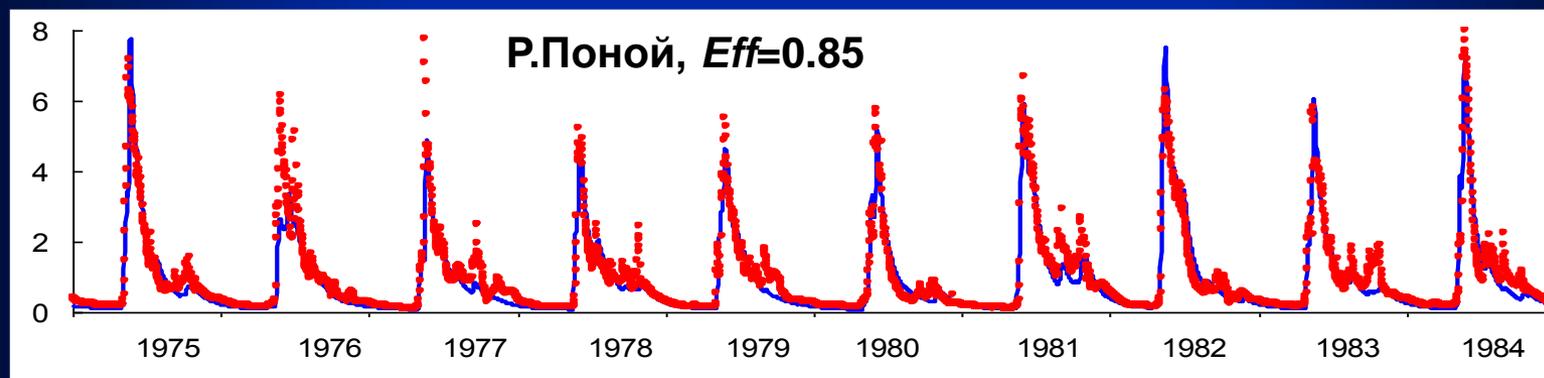
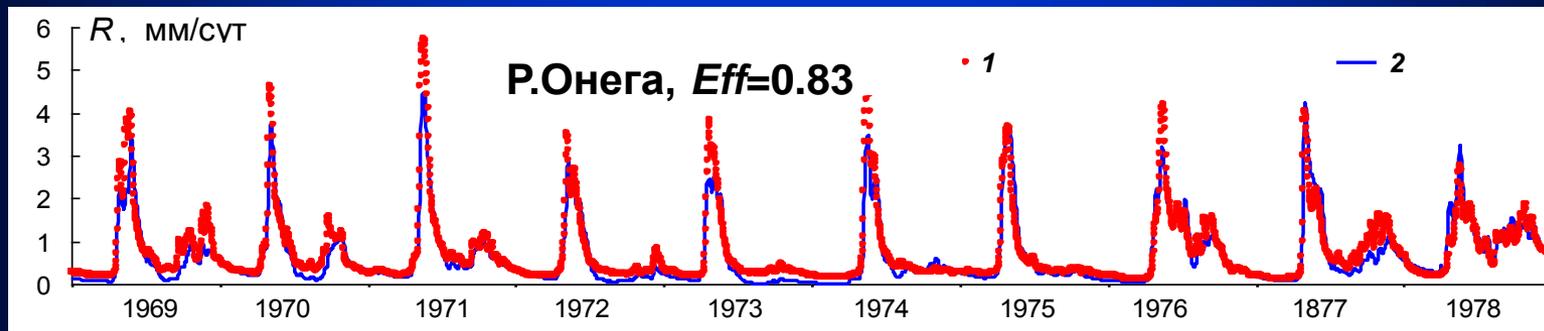


Сопоставление наблюдаемых (—) и рассчитанных (—) суточных величин стока р.Печора в районе ст. Усть-Цильма с использованием оптимизированных параметров (полученных по данным о стоке в районе ст.Оксино) / метеорологические данные из данных наблюдений метеорологических станций/

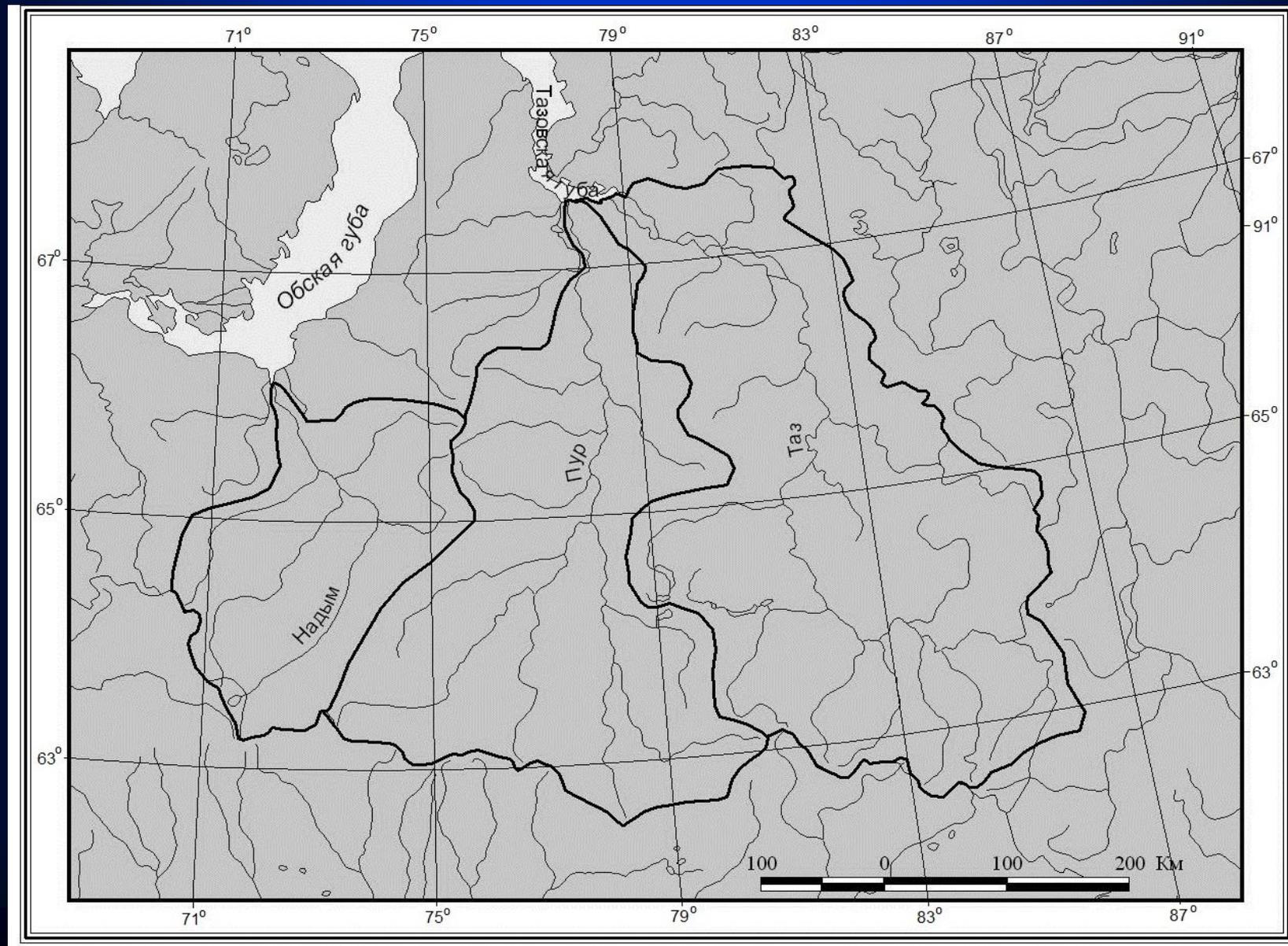


bias = -9 %, *Corr* = 0.90, *Eff* = 0.79

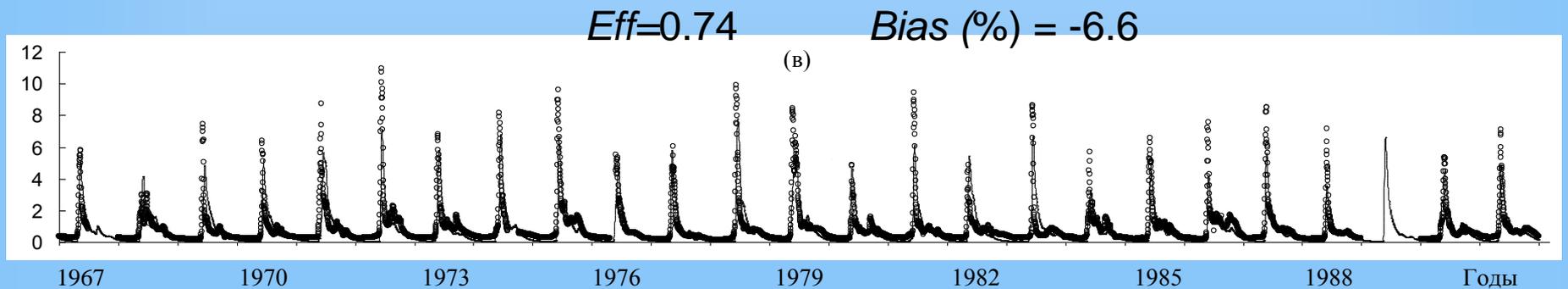
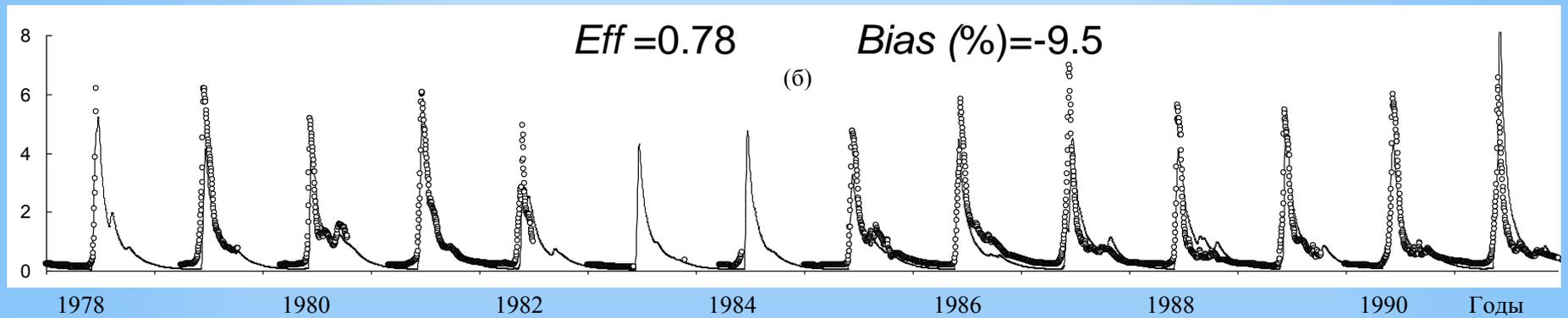
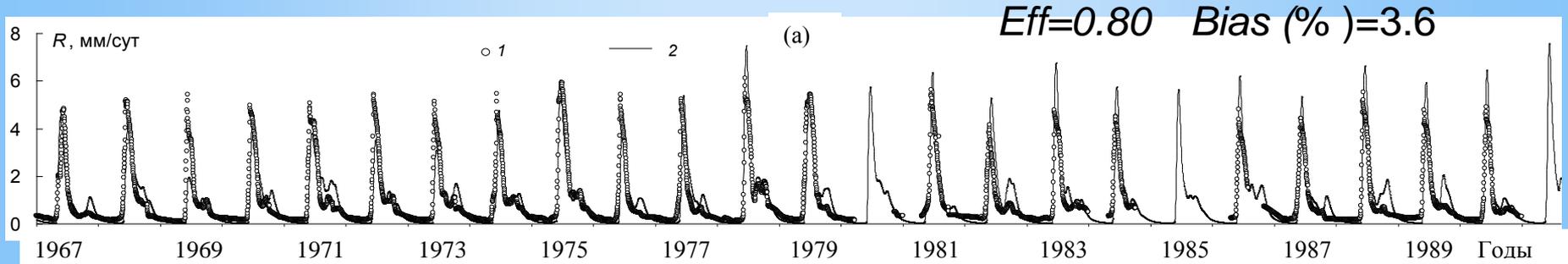
Примеры измеренных (1) и рассчитанных на основе модели SWAP (2) гидрографов суточного стока R рек Онеги, Поной и Туломы за части проверочных периодов



Географическое расположение бассейнов рек Таз, Пур и Надым.



Сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов суточного стока рек Таз (а), Пур (б) и Надым (в) за рассчитанные периоды.



Статистические характеристики соответствия наблюдаемых и рассчитанных на основе моделей SWAP и VIC месячных слоев стока рек Мезени, Печоры, Северной Двины, Индигирки, Оленек (*Bias*, %, и *Eff*)

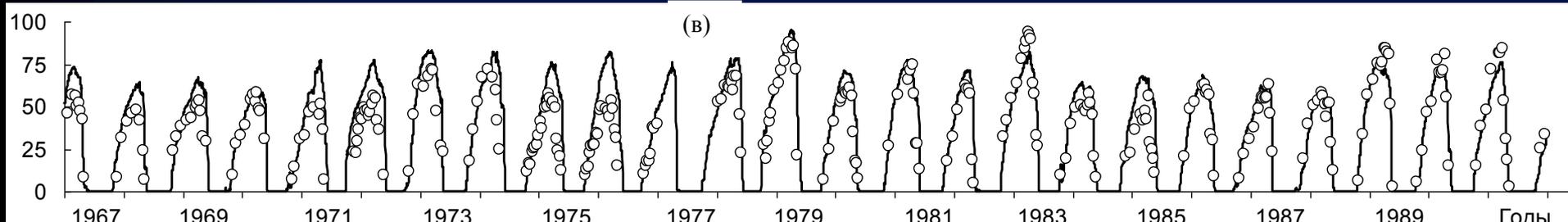
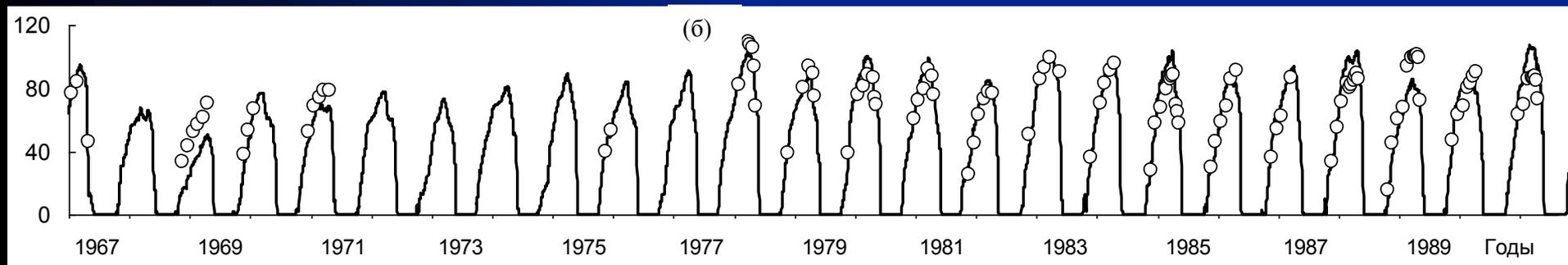
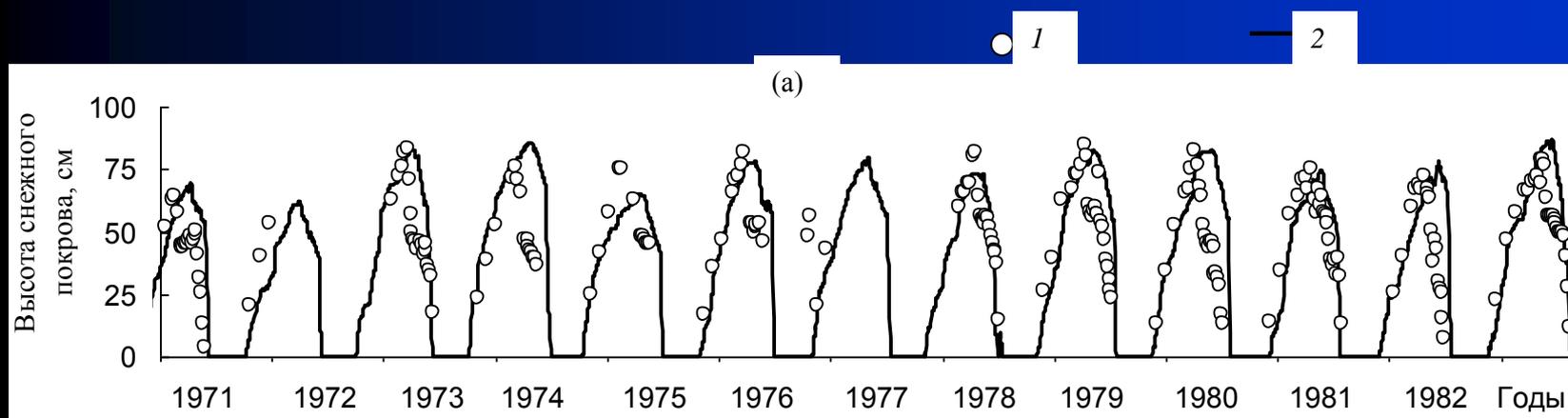
Модель	Река	Расчетный период, годы	<i>Bias</i>	<i>Eff</i>
SWAP	Мезень	1986-1994	-2	0.96
SWAP	Печора	1981-2000	-9	0.94
SWAP	Сев. Двина	1967-1998	3	0.91
SWAP	Индигирка	1967 – 1992	1	0.86
SWAP	Оленек	1967 – 1990	13	0.89
<i>VIC</i>	<i>Мезень</i>	<i>1979-1999</i>	<i>-9</i>	<i>0.83</i>
<i>VIC</i>	<i>Печора</i>	<i>1979-1999</i>	<i>-15</i>	<i>0.77</i>
<i>VIC</i>	<i>Сев. Двина</i>	<i>1979-1999</i>	<i>-1</i>	<i>0.85</i>
<i>VIC</i>	<i>Индигирка</i>	<i>1979-1999</i>	<i>6</i>	<i>0.83</i>
<i>VIC</i>	<i>Оленек</i>	<i>1979-1999</i>	<i>15</i>	<i>0.85</i>

Средняя разница абсолютных значений

4%

0.09

Сопоставления рассчитанных и измеренных средних по бассейнам рек Пур (а), Таз (б), и Надым (в) высот снежного покрова.



Социально-экономический A1 SRES (Special Report on Emissions Scenarios): -сценарий IPCC



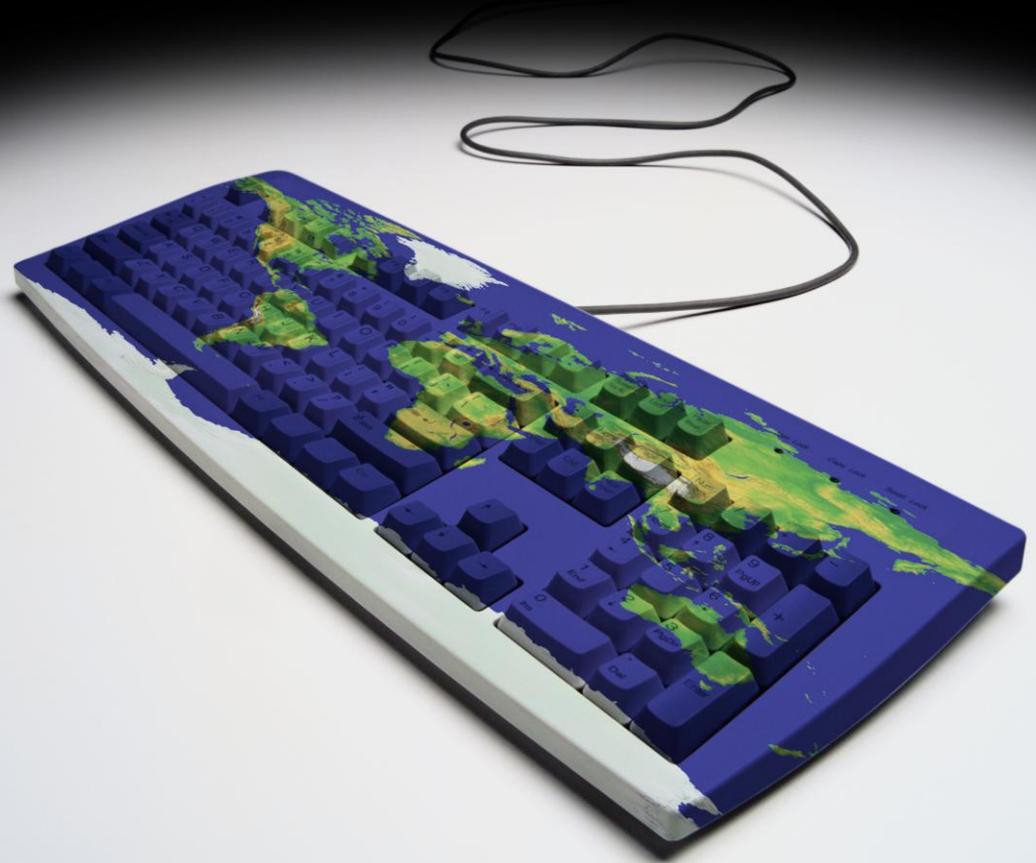
Сценарий A1 описывает будущий мир очень быстрого экономического роста, с низким приростом населения и быстрым внедрением новых и более эффективных технологий.

Основополагающими темами являются: сближение разных регионов, наращивание потенциала и активизация культурных и социальных взаимосвязей, а также существенное сокращение региональных различий в доходе на душу населения.

Для оценки динамики гидрометеорологических и актинометрических характеристик (в глобальном и региональном масштабах), служащих исходной информацией для расчетов воздействий климатических изменений на формирование водного, теплового и углеродного баланса в конкретной экосистеме, была использована компьютерная программа **MAGICC/SCENGEN**, представляющая собой по существу **генератор климатических сценариев**, предназначенный для оценки уязвимости или адаптации различных экосистем или биомов планеты к климатическим изменениям.

MAGICC / SCENGEN:
Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change / A Global and Regional Climate Scenario Generator

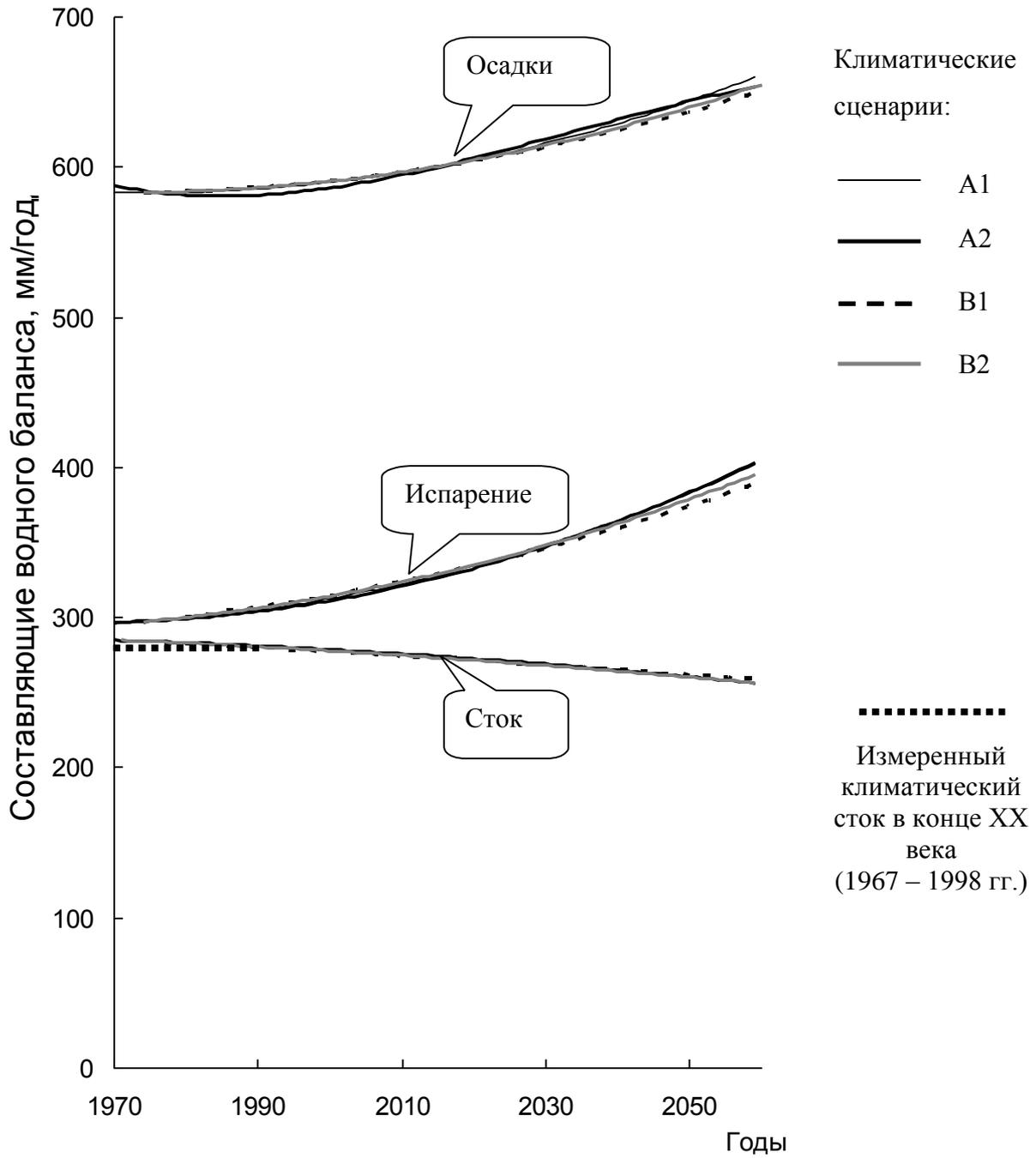
[Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change, 2000]



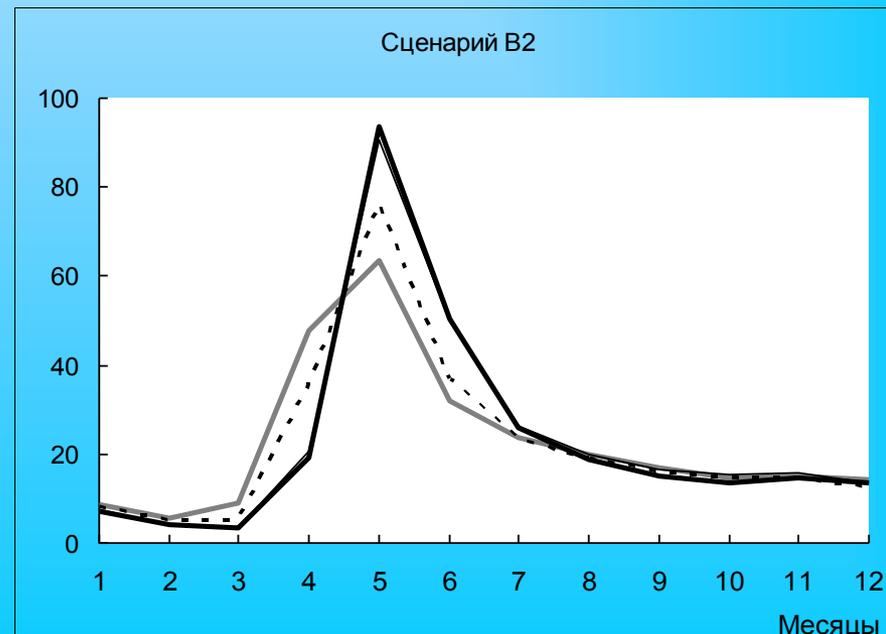
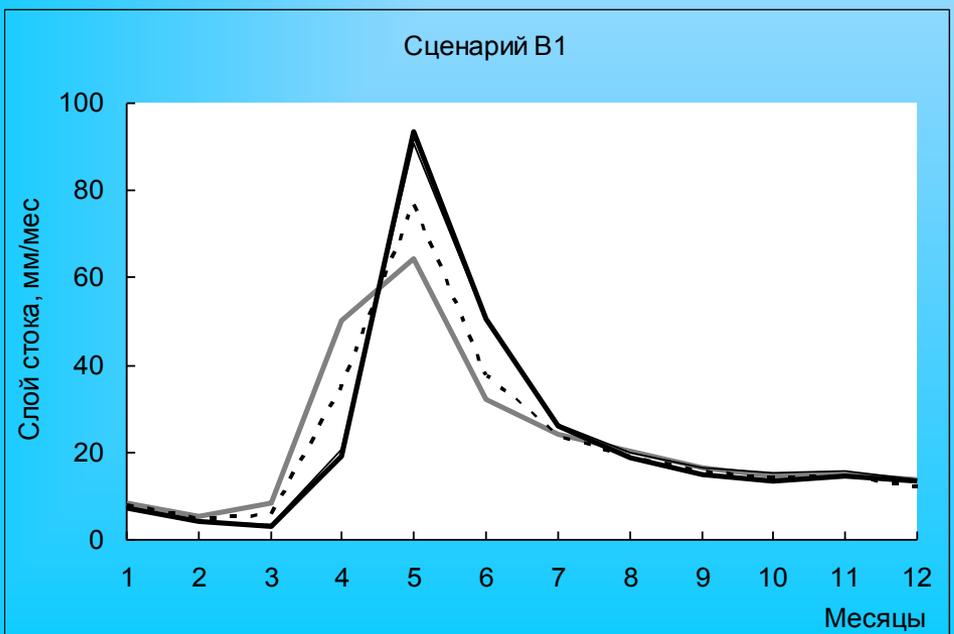
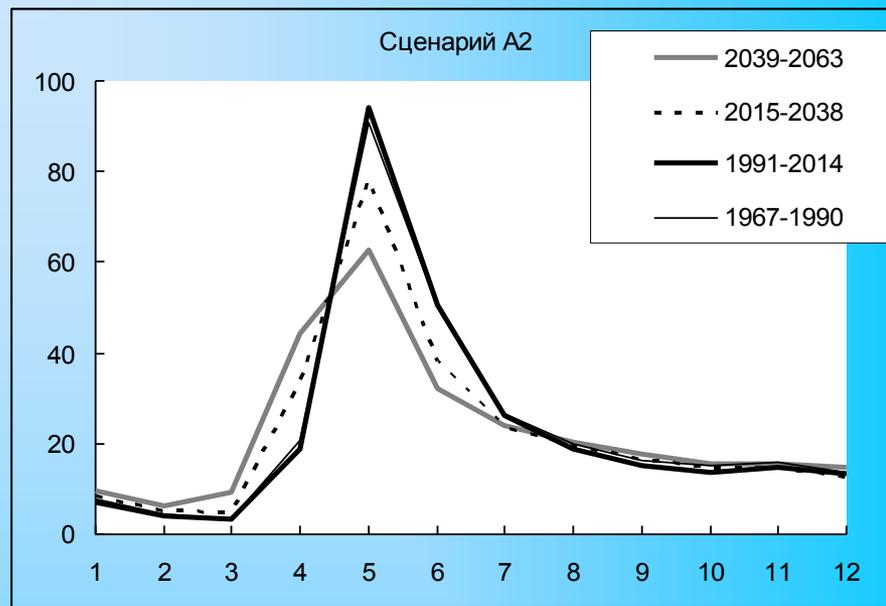
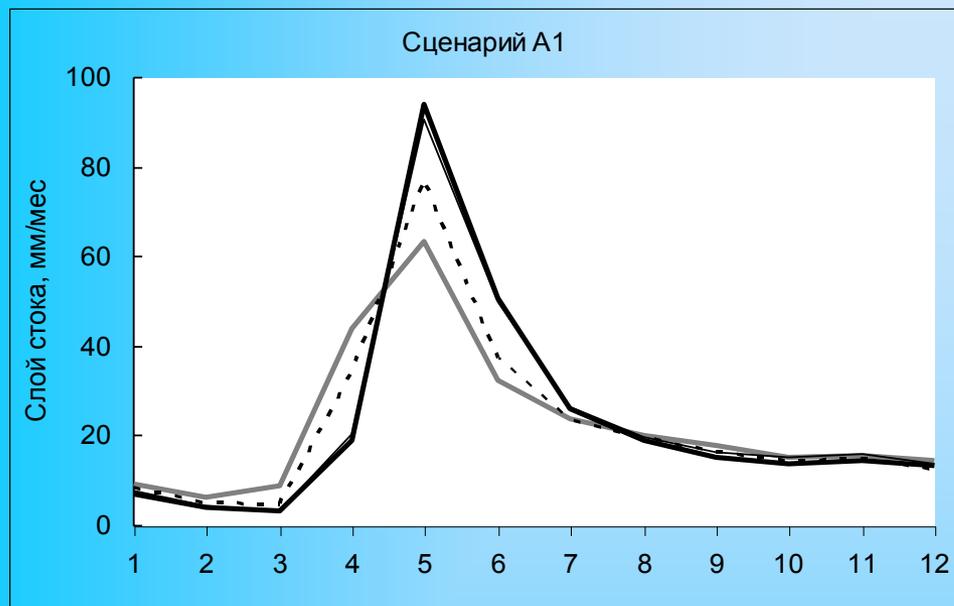
Модели глобальной циркуляции атмосферы (высокого разрешения), использованные в работе модельного комплекса SCENGEN.

HadCM2	Hadley Centre Unified Model 2 Transient Ensemble-mean (UK)
UKTR	UK Met. Office/Hadley Centre Transient
CSIRO-TR	Commonwealth Scientific and Ind. Research Org., Transient (Australia)
ECHAM4	European Centre/Gamburg Model 4 Transient (Germany)
UKHI-EQ	UK Met. Office High Resolution
CSIRO2-EQ	Commonwealth Scientific and Ind. Research Org., Mark 2 (Australia)
ECHAM3	European Centre/Gamburg Model 3 Transient (Germany)
UIUC-EQ	University of Illinois at Urbana Champaign (USA)
ECHAM1	European Centre/Gamburg Model 1 Transient (Germany)
CSIRO1-EQ	Commonwealth Scientific and Ind. Research Org., Mark 1 (Australia)
CCC-EQ	Canadian Climate Centre (Canada)
GFDL-TR	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Transient (USA)
BMRC-EQ	Bureau of Meteorology Research Centre (Australia)
CGCM1-TR	Canadian Climate Centre for Modelling and Analysis 1 Transient (Canada)
NCAR-DOE	National Centre for Atmospheric Research (DoE) Transient (USA)
CCSR/NIES	Centre for Climate Research Studies/NIES (Japan)

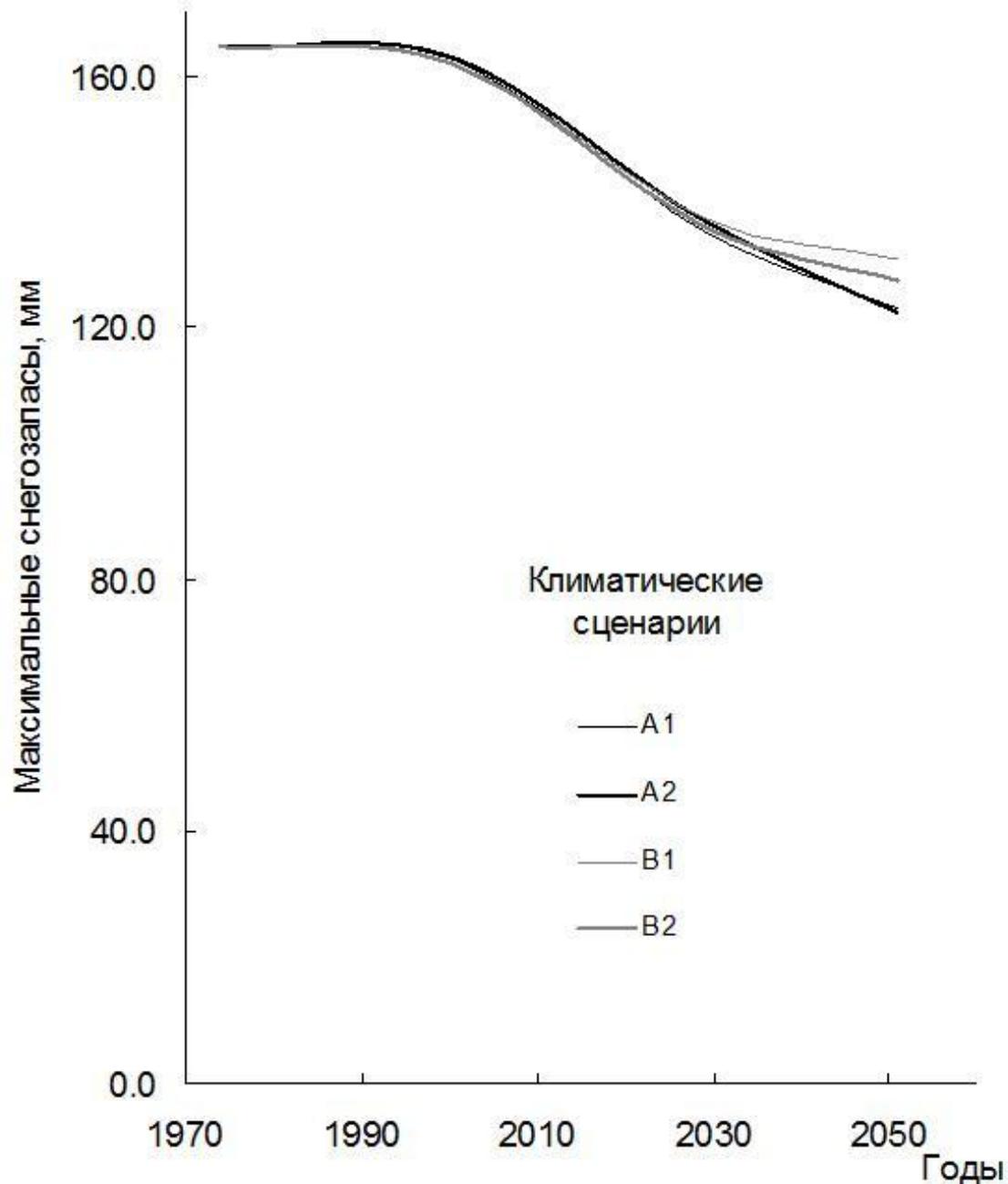
Изменение климатических значений осадков, испарения и речного стока в бассейне р. Северной Двины для первых двух третей XXI века при четырех различных сценариях глобального изменения климата согласно семейству сценариев SRES МГЭИК.



Изменения климатических гидрографов слоя стока р. Северной Двины для четырех сценариев изменения климата МГЭИК SRES.



**Изменение
максимальных
(весенних)
снегозапасов в
бассейне р. Северной
Двины для первых
двух третей XXI века
при четырех
различных сценариях
глобального
изменения климата
согласно семейству
сценариев SRES
МГЭИК.**

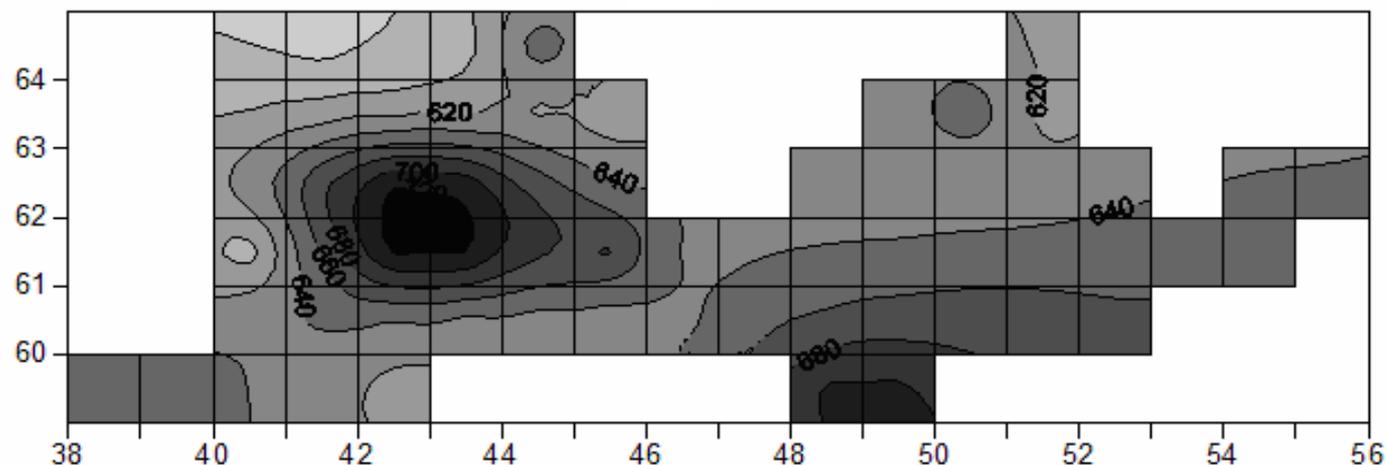


Пример пространственного распределения по бассейну р. Северной Двины климатических годовых значений осадков в мм/год, за 1967 – 1990 и 2039 – 2063 гг. в соответствии с реализацией климатического сценария

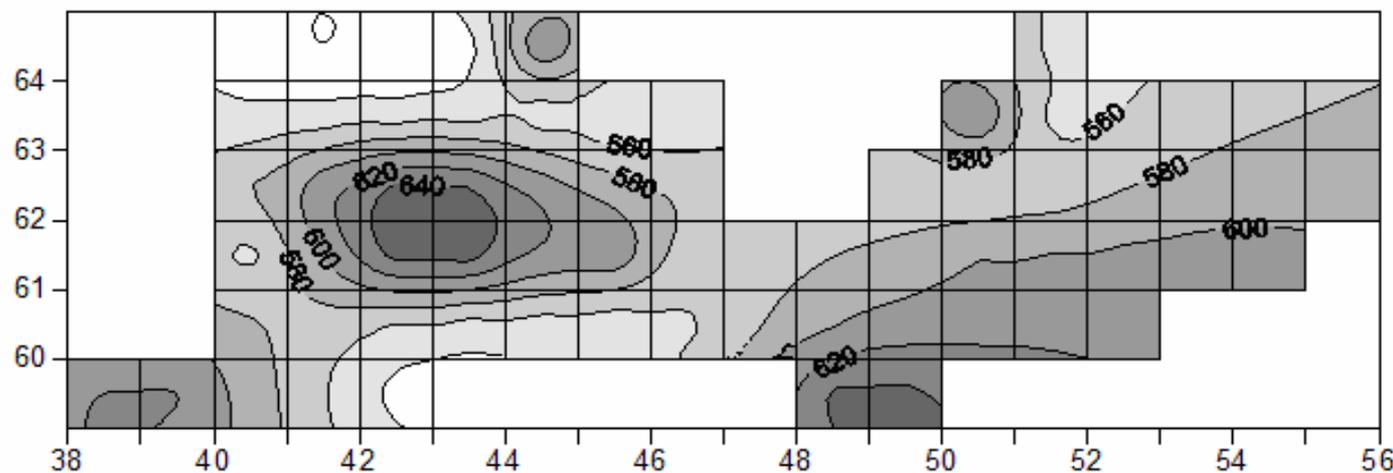
МГЭИК SRES A1

с.ш., град

(a)



2039 – 2063 гг.



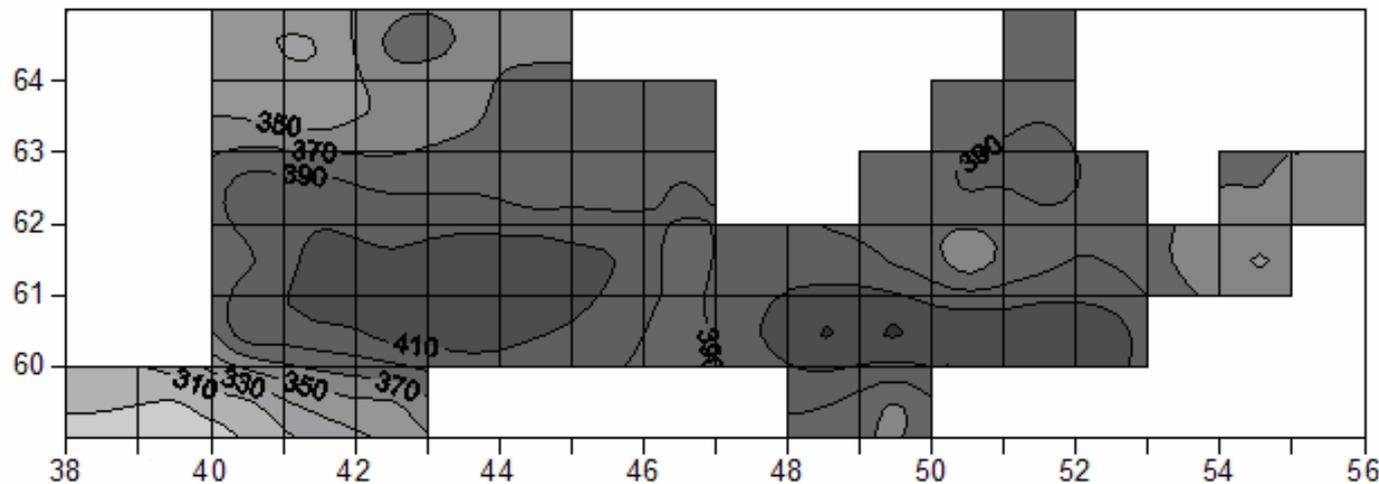
1967 – 1990 гг.

в.д., град

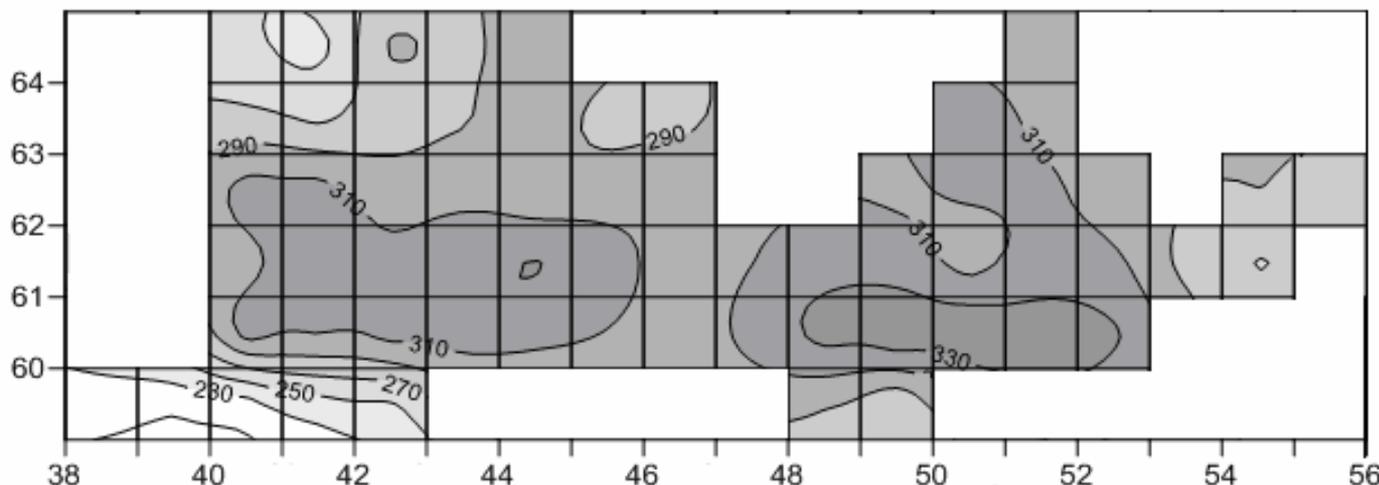
Пример пространственного распределения по бассейну р. Северной Двины климатических годовых значений испарение в мм/год, за 1967 – 1990 и 2039 – 2063 гг. в соответствии с реализацией климатического сценария МГЭИК SRES A1

с.ш., град

(б)



2039 – 2063 гг.

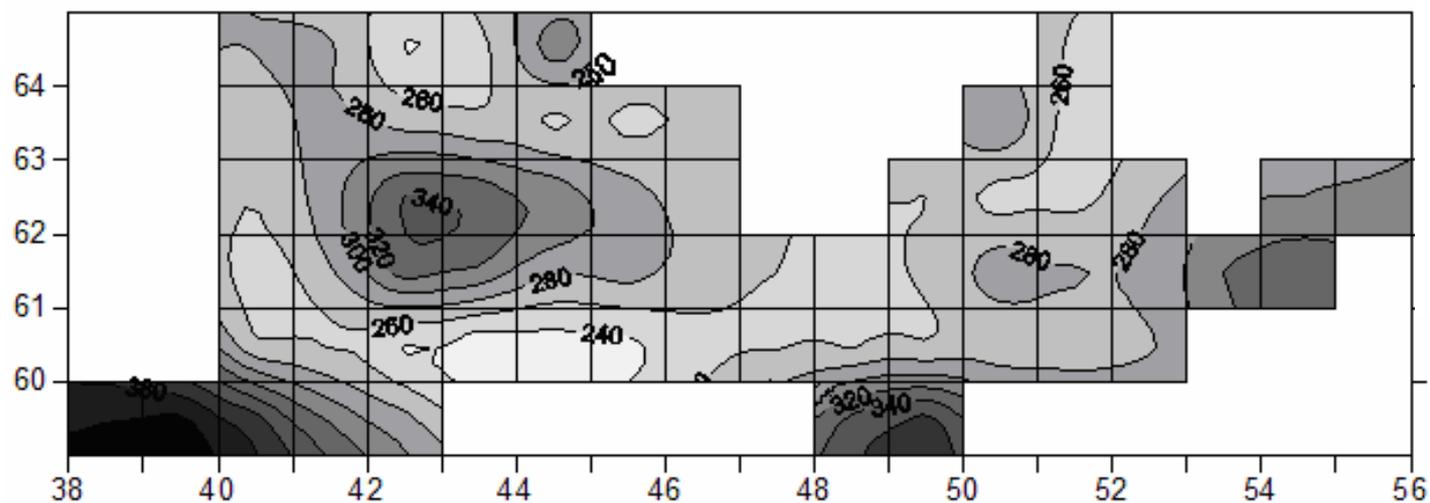
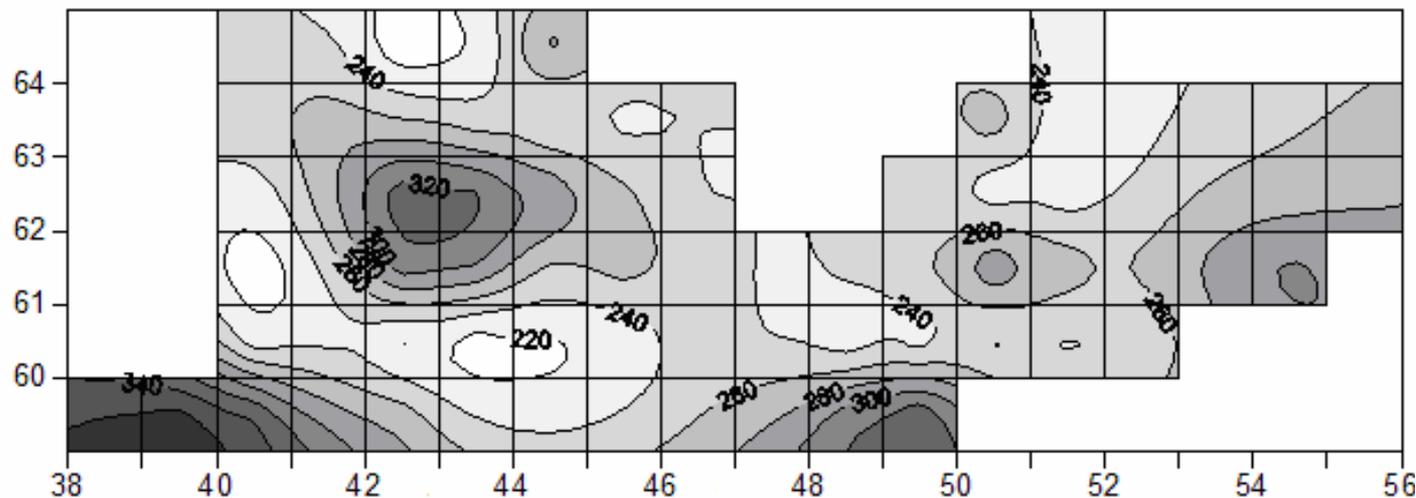


1967 – 1990 гг.

в.д., град

Пример пространственного распределения по бассейну р. Северной Двины климатических годовых значений стока в мм/год, за 1967 – 1990 и 2039 – 2063 гг. в соответствии с реализацией климатического сценария МГЭИК SRES A1

с.ш., град



в.д., град

♠ LAST SLIDE

 Thank you!

FOR CONTACT

Yeugeny M. GUSEV
gusev@aqua.laser.ru

Оценки составляющих водного баланса (мм/год) для континентов

Автор	Величина	Европа	Азия	Африка	Сев. Америка	Южн. Америка	Австралия	Суша в целом
Расчеты по SWAP *	<i>P</i>	1017	695	678	753	1506	749	837
	<i>E</i>	551	456	561	468	957	560	562
	<i>R</i>	463	238	118	275	548	188	272
	<i>R/P</i>	0.46	0.34	0.17	0.36	0.36	0.25	0.33
Львович (1974)**	<i>P</i>	734	726	686	670	1648	736	834
	<i>E</i>	415	433	547	383	1065	510	540
	<i>R</i>	319	293	139	287	583	226	294
	<i>R/P</i>	0.43	0.40	0.20	0.43	0.35	0.31	0.35
Будыко*** (1971), Зубенок (1970)	<i>P</i>	640	600	690	660	1630	470	730
	<i>E</i>	390	310	430	320	700	420	420
	<i>R</i>	250	290	260	340	930	50	310
	<i>R/P</i>	0.39	0.48	0.38	0.52	0.57	0.11	0.42
Зубенок**** (1976)	<i>E</i>	470	400	500	400	850	490	450
Корзун (1974)	<i>P</i>	790	740	740	756	1600	791	800
	<i>E</i>	507	416	587	418	910	511	480
	<i>R</i>	283	324	153	338	690	280	320
	<i>R/P</i>	0.36	0.44	0.21	0.45	0.43	0.35	0.40
Баумгартнер, Рейчел (1975)	<i>P</i>	657	696	696	645	1564	803	750
	<i>E</i>	375	420	582	403	946	534	480
	<i>R</i>	282	276	114	242	618	269	270
	<i>R/P</i>	0.43	0.40	0.16	0.38	0.40	0.33	0.36

* Северная Америка включает Канадский архипелаг и Гренландию, Австралия включает Тасманию, Новую Гвинею и новую Зеландию, суша не включает Антарктиду.

** Северная Америка не включает Канадский архипелаг и Гренландию, Австралия включает Тасманию, Новую Гвинею и Новую Зеландию (только на Австралии: $P=440$ мм/год, $R=47$ мм/год и $E=393$ мм/год), суша не включает Канадский архипелаг, Гренландию и Антарктиду.

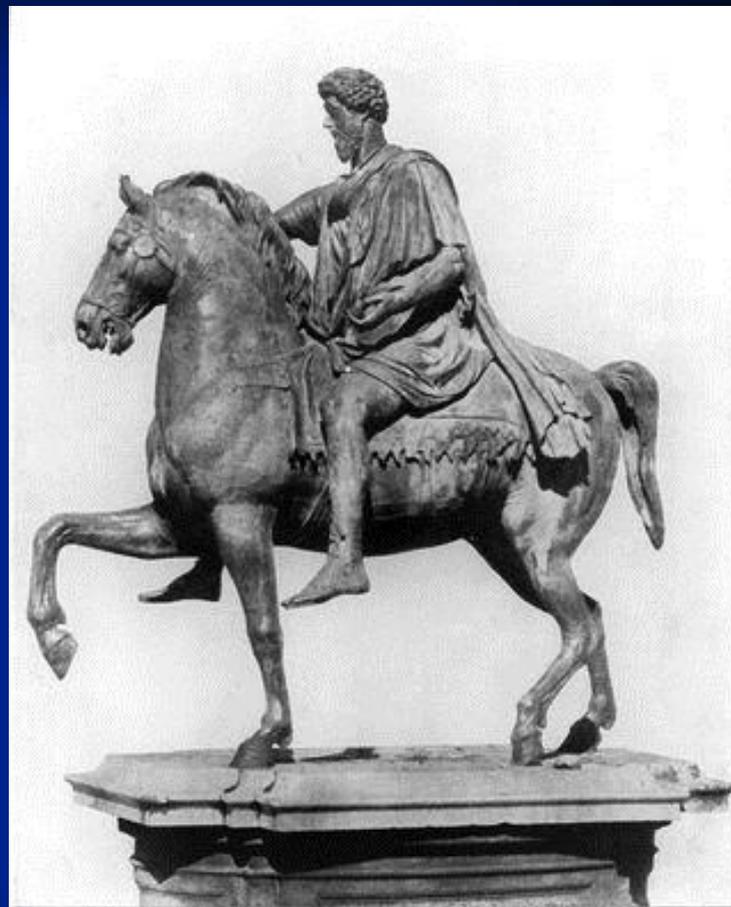
*** Суша включает Антарктиду.

**** Австралия с Тасманией, Новой Гвинеей и Новой Зеландией, Северная Америка с Гренландией.

Среднемноголетние глобальные годовые суммы (мм/год) осадков (P), стока (R), испарения (E), а также коэффициента стока (R/P) и отношения испарения к осадкам (E/P)

Источник информации	P	R	E	E/P	R/P
<i>Расчет по модели SWAP (включая Гренландию)</i>	837	273	563	0.67	0.33
<i>Расчет по модели SWAP (без Гренландии)</i>	845	271	573	0.68	0.32
Mather (1969)	712	274	438	0.62	0.38
Львович (1964)	730	250	470	0.64	0.34
Будыко (1971), Зубенок (1970)	730	310	420	0.58	0.42
Львович (1974)	834	294	540	0.65	0.35
Korzun et al. (1974)	800	320	480	0.60	0.40
Baumgartner, Reichel (1975)	746	266	480	0.64	0.36
Зубенок (1976)	804	354	450	0.56	0.44
Legates, Willmott(1990) **)	820				
UNESCO (1999)	800	294	506	0.63	0.37
Среднее по литературным данным (исключая **)	769	295	473	0.62	0.38

**Вверх, вниз по кругу
несутся первостихии <...>
некоторым образом все
сплетается одно с другим
<...> одно другому
сообразно,
а это благодаря
напряженному движению,
единодыханию и
единению естества.**



**Марк Аврелий
121-180**

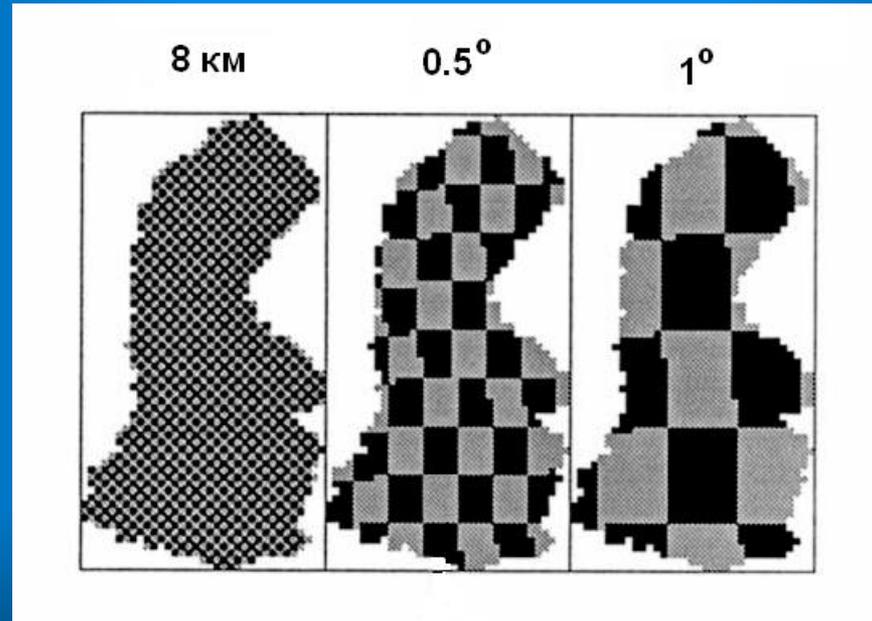
«Размышления»

Размеры расчетных ячеек при моделировании динамики водного баланса бассейна р.Роны в различных численных экспериментах

эксп1

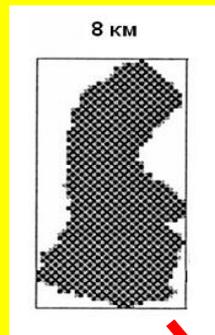
эксп2

эксп3

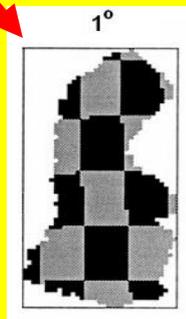


Расчетный период: август 1986 г. – июль 1989 г.

Разность значений различных компонентов водного баланса бассейна р.Роны (мм/год) для 1-го и 3-го численных экспериментов (средние значения за 3 года – с августа 1986 по июль 1989)

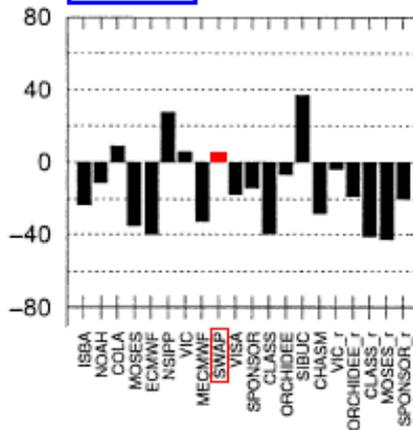


Эксп1

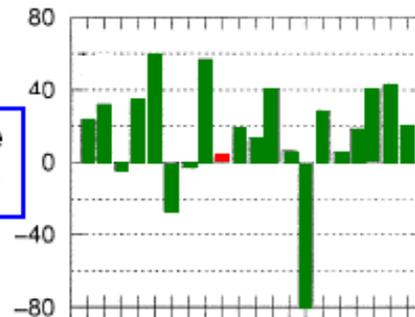


Эксп3

Сток



Суммарное испарение



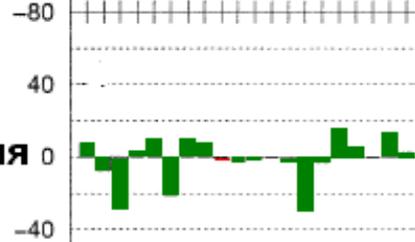
Испарение перехваченных осадков



Испарение с почвы



Транспирация



Базы данных по приходящей к поверхности суши коротковолновой и длинноволновой радиации

1. Базы данных, основанные на «чистом» реанализе:

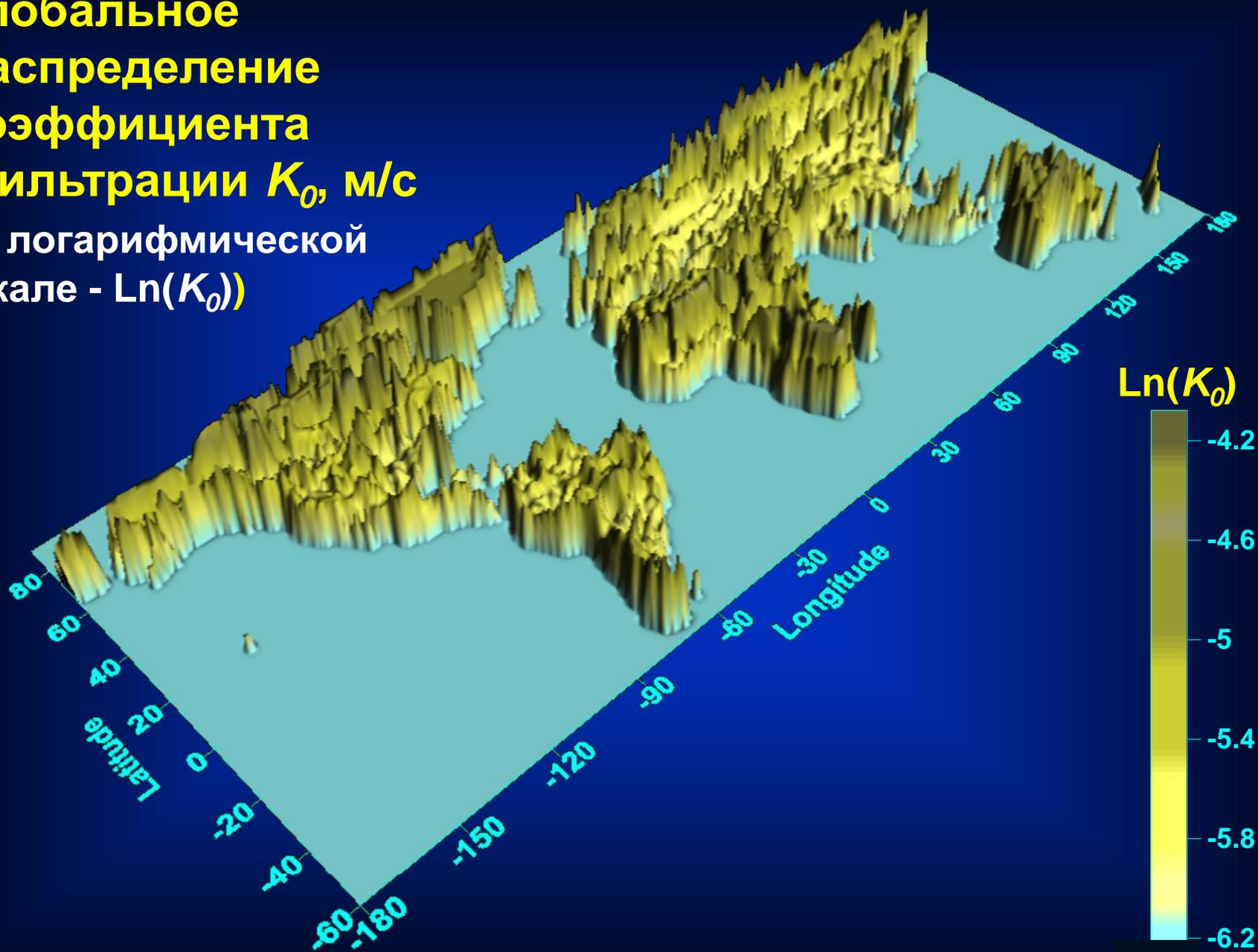
NCEP-DOE или *ERA-40*

2. База данных *SRB* (Surface Radiation Budget).

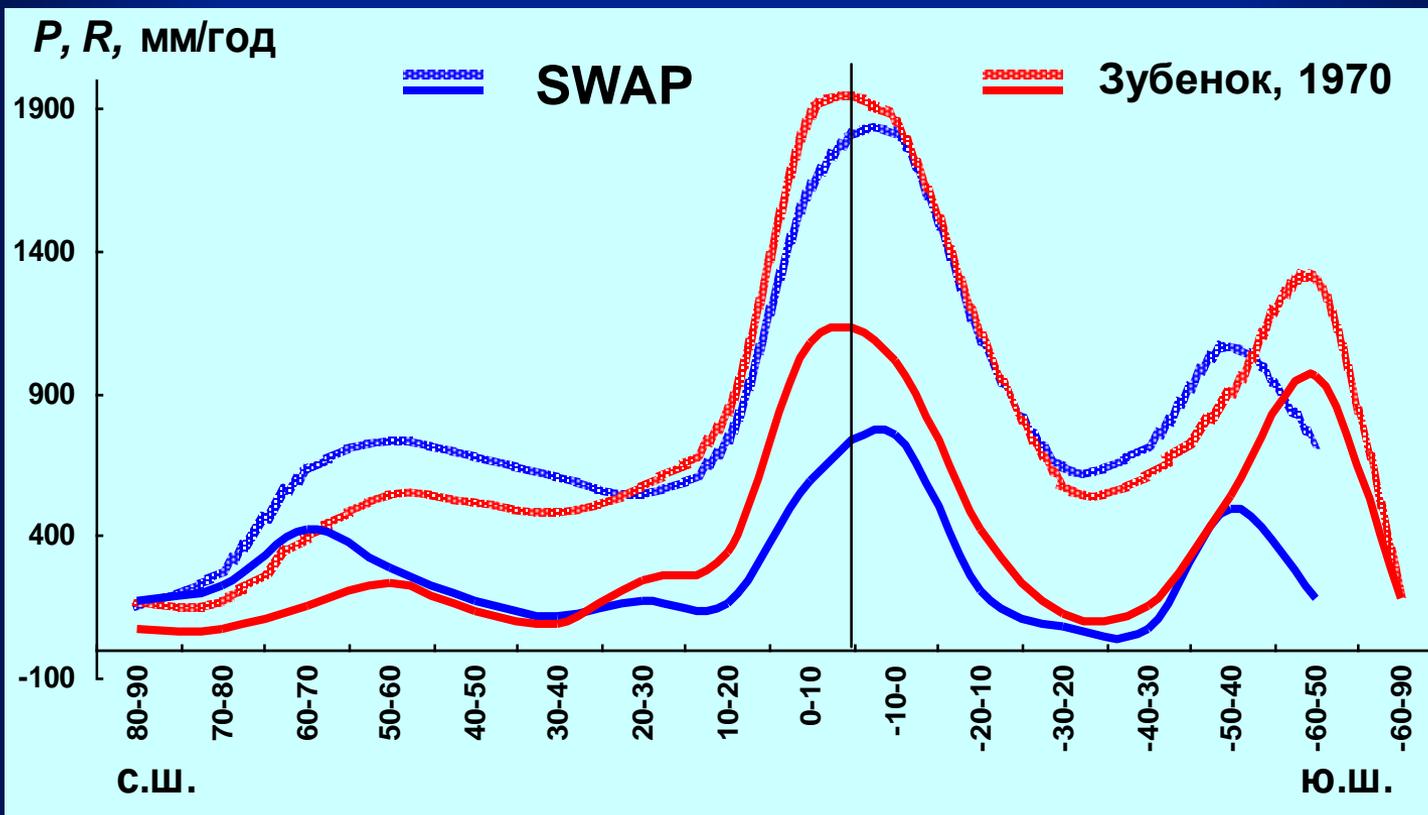
Получена при реализации проекта *GSWP-2* на основе 3-часовых данных по радиации, подготовленных Исследовательским центром НАСА/Лэнгли (NASA/Langley Research Center)

3. База данных *ISCCP*, подготовленная в результате реализации проекта «The International Satellite Cloud Climatology Project»

Глобальное
распределение
коэффициента
фильтрации K_0 , м/с
(в логарифмической
шкале - $\text{Ln}(K_0)$)

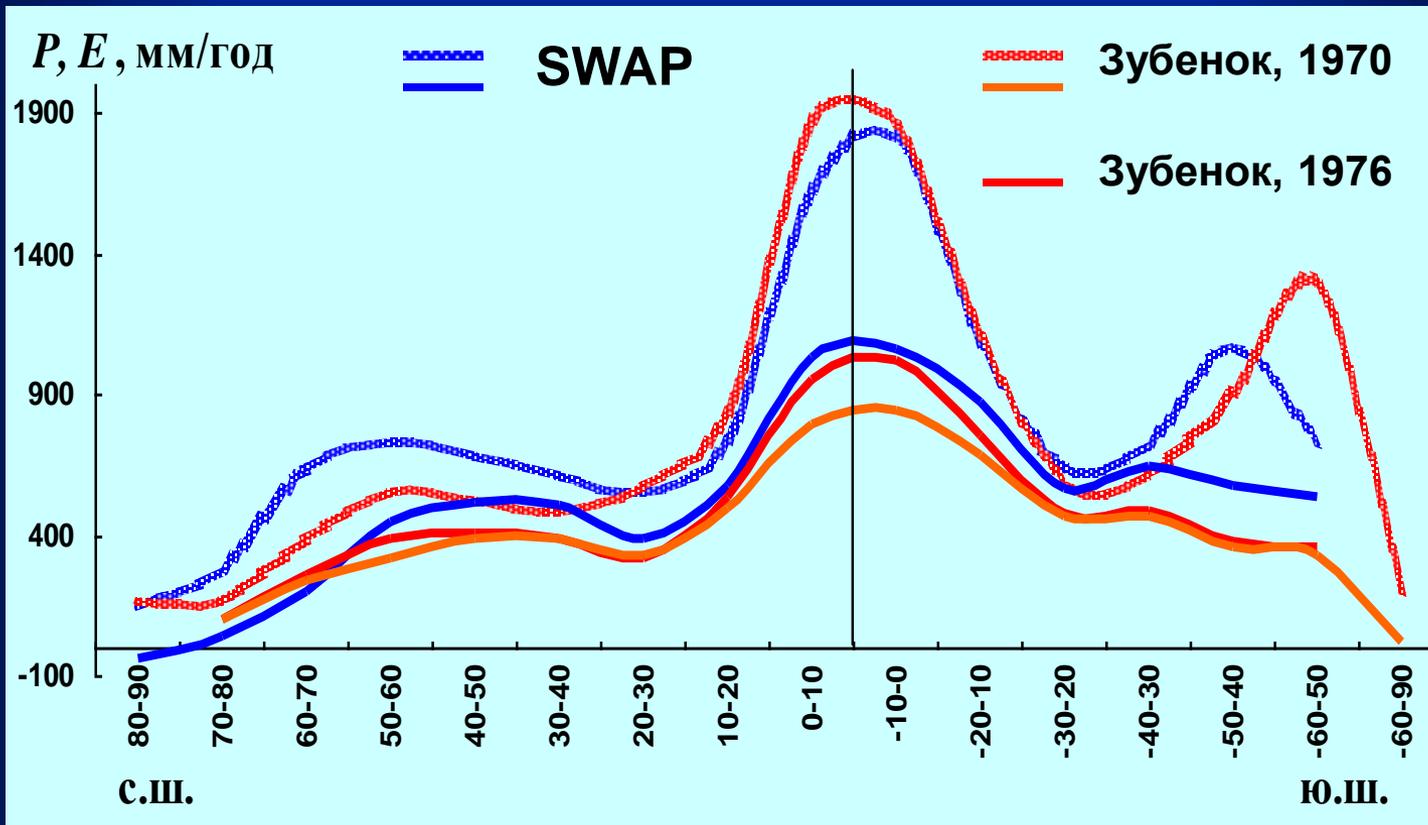


Средние широтные значения годовых сумм осадков P (, ) и стока R (, )



Примечание: модель SWAP - осреднение за 1985-1996 гг.

Средние широтные значения годовых сумм осадков P ( , ) и суммарного испарения E ( ,  , )



Примечание: модель SWAP - осреднение за 1985-1996 гг.