



MSU  
MOSCOW  
STATE UNIVERSITY  
RESEARCH  
COMPUTING CENTER



# Суперкомпьютерное моделирование деятельного слоя суши и геофизических пограничных слоёв

Степаненко В.М., Е.В.Мортиков

*Научно-исследовательский вычислительный центр  
МГУ имени М.В.Ломоносова,*

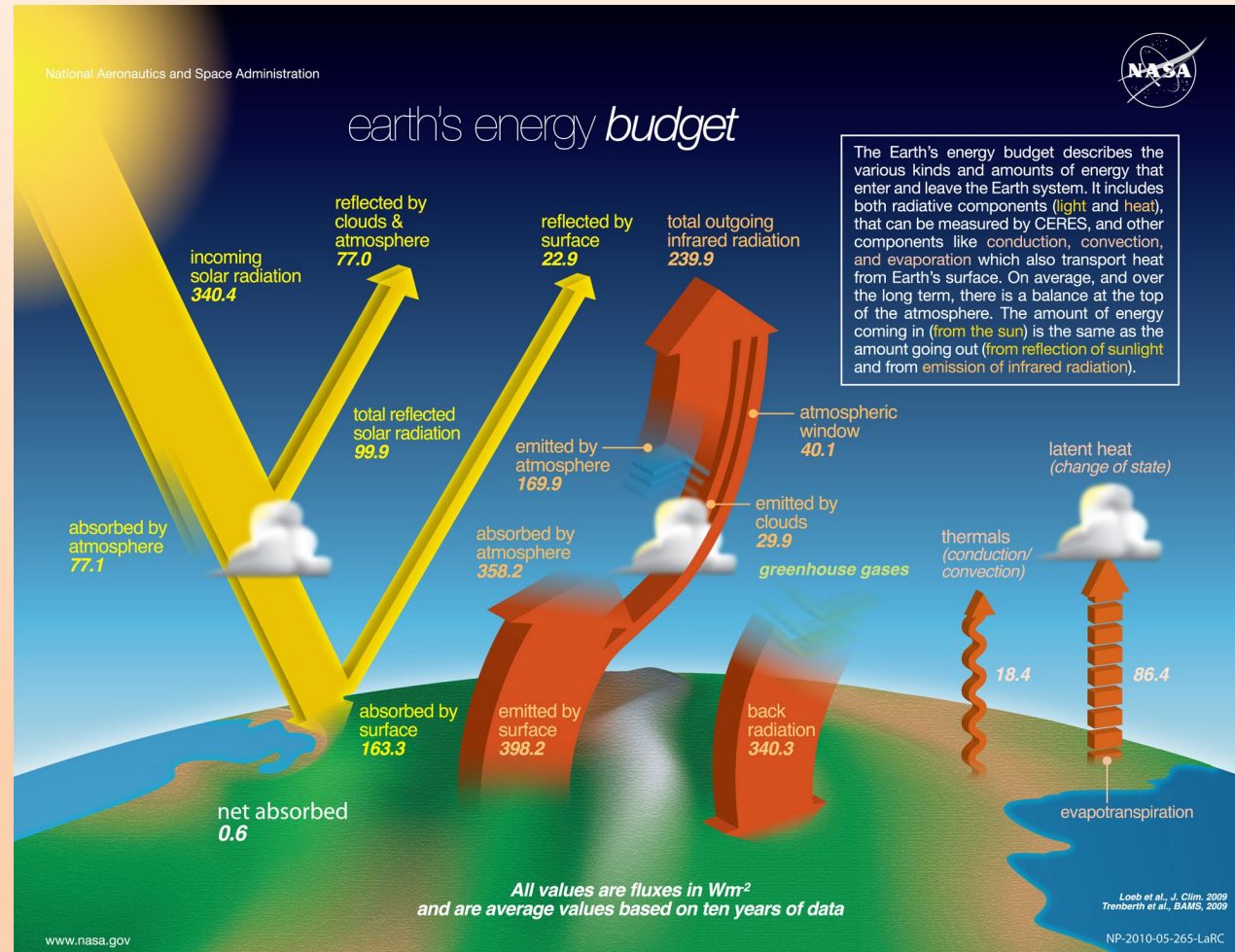
*Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,*

*Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН,*

*Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН*

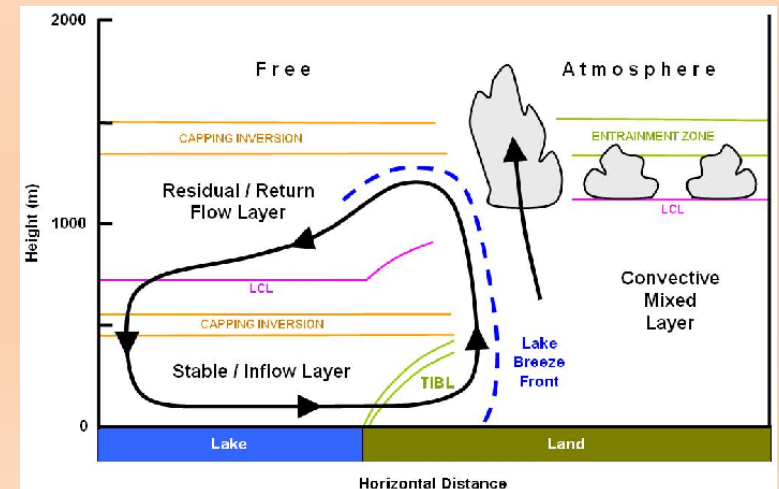
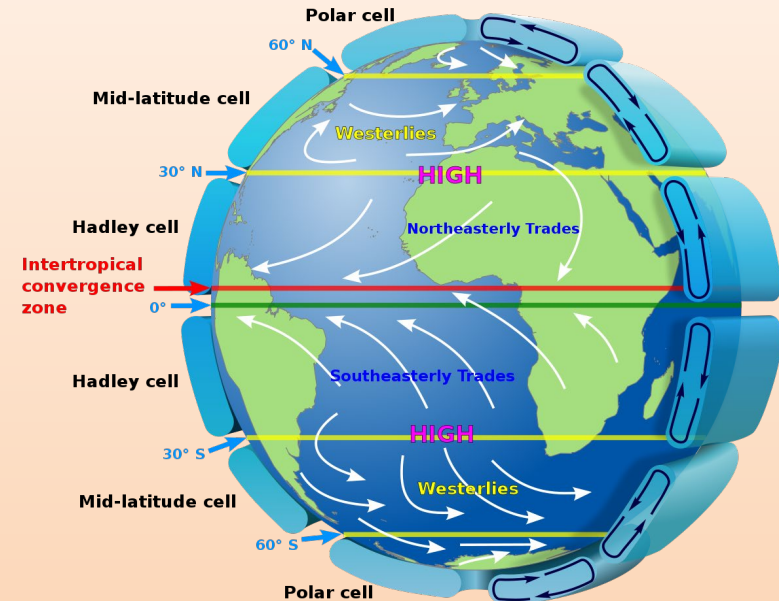
# Тепловой баланс поверхности Земли

- Солнечная радиация – основной источник энергии в Земной системе (солнечная постоянная –  $1367 \text{ Вт/м}^2$ , геотермальный поток тепла –  $\sim 0.1 \text{ Вт/м}^2$ )
- На поверхности Земли поглощается в 2.1 раза больше солнечной радиации, чем во всей толще атмосферы – подстилающая поверхность является основным источником тепла в Земной системе

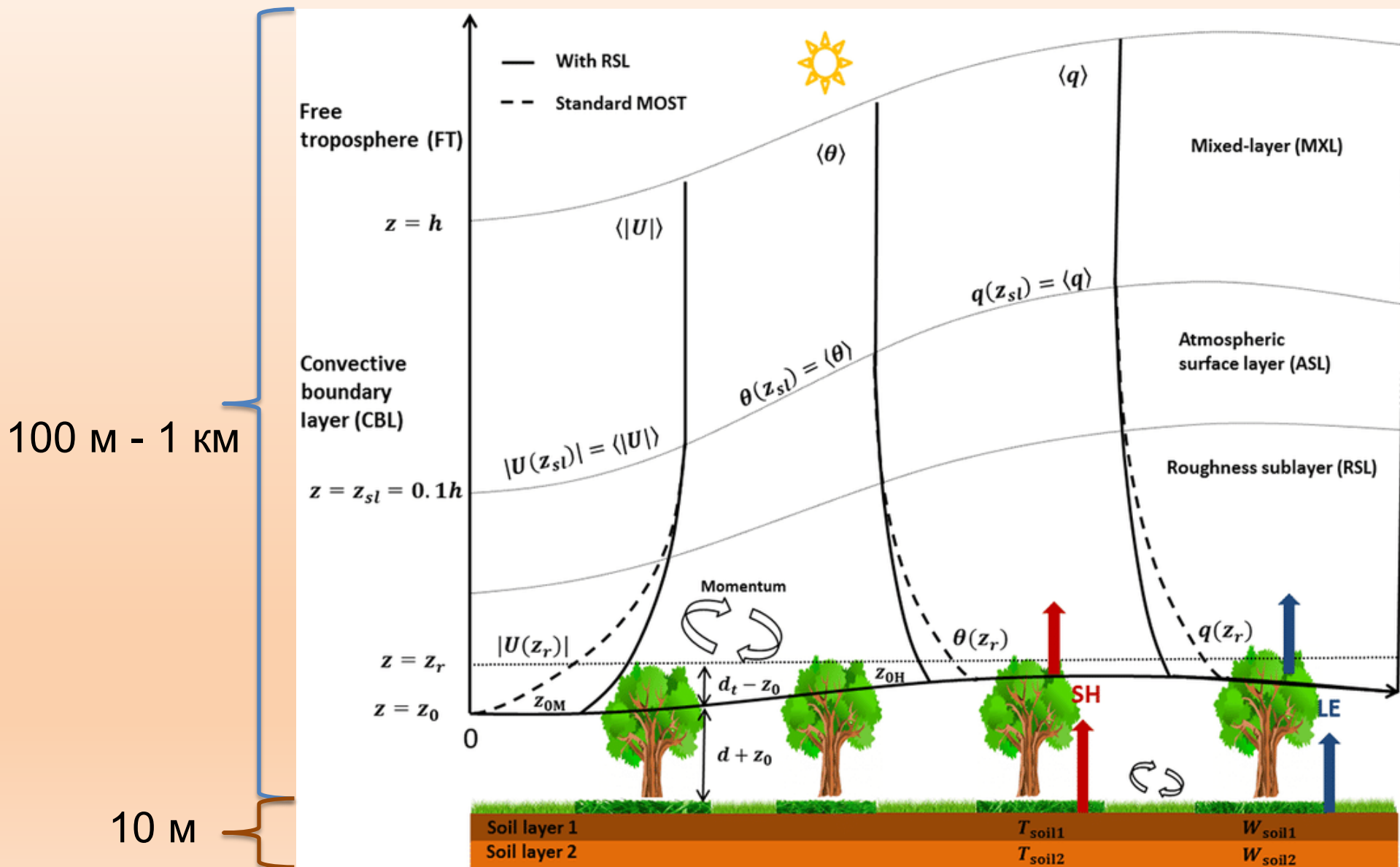


# Атмосфера как тепловая машина

- Различный приток радиации на разных широтах и различное альbedo суши и океана создаёт градиент температуры воздуха, градиент давления и тем самым основные моды атмосферной циркуляции (атмосфера действует как тепловая машина)
- Правильное воспроизведение потоков тепла и влаги между поверхностью и атмосферой — ключевое условие успешного воспроизведения погоды и климата

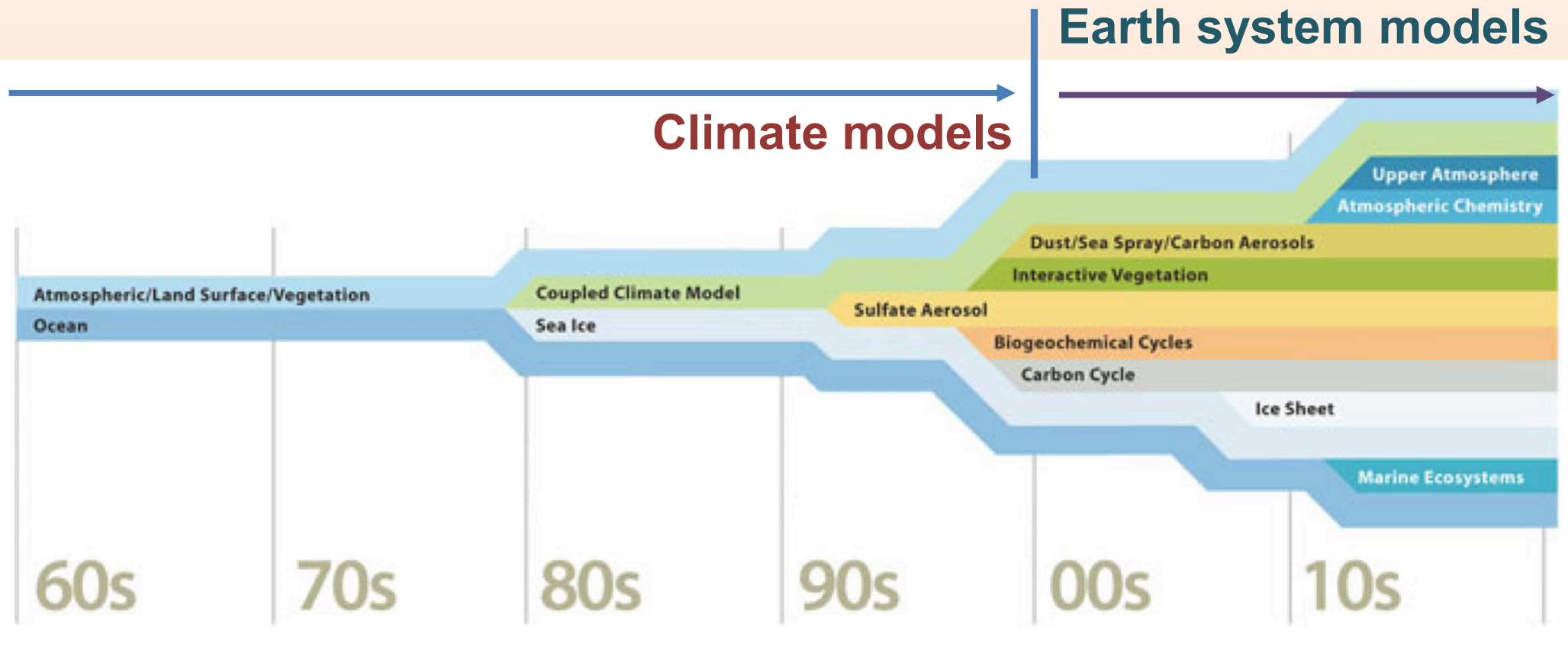


# Пограничный слой атмосферы и деятельный слой суши





# Land surface in the Earth system models



# «Суперзадача для суперкомпьютеров» в СССР и России



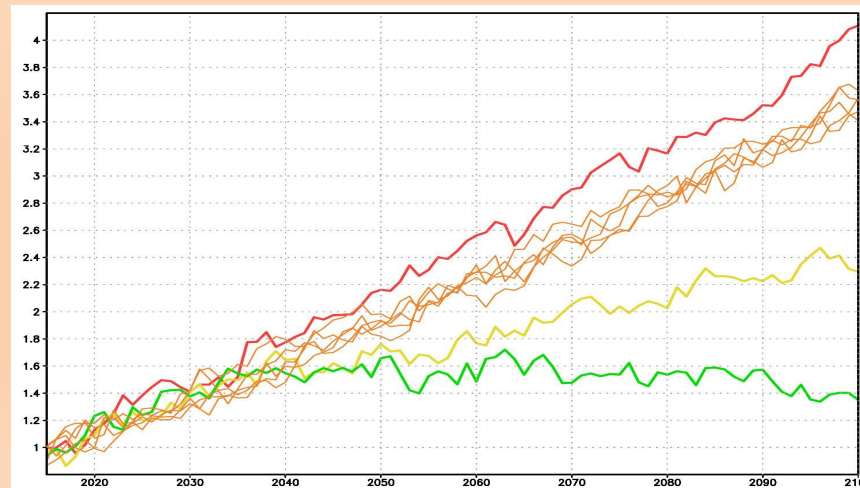
Г.И.Марчук



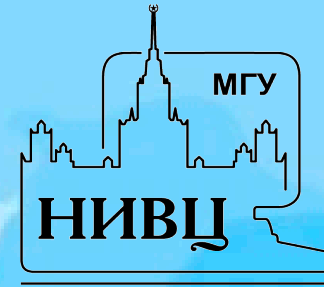
- В Советском Союзе математические модели климата разрабатываются с 1970-х гг. под руководством Г.И. Марчука
- В настоящее время модель климата Земной системы ИВМ РАН (INM-CM5) активно развивается консорциумом организаций, включая Московский университет
- Большое значение применение моделей климата имеет для решения задачи эффективного энергеперехода
- Критическая роль в дальнейшем развитии моделей климата принадлежит супервычислениям



*Изменение глобально осреднённой приземной температуры по модели INM-CM5 в XXI в. при различных сценариях экономического развития*



# Консорциум разработчиков модели Земной системы ИВМ РАН



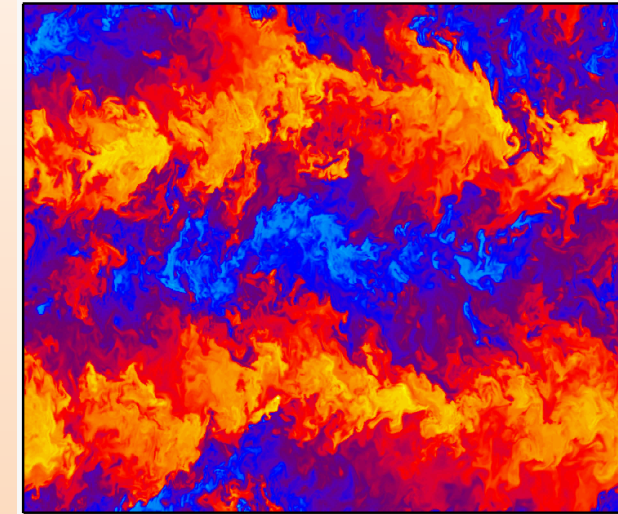
Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С., Гусев А.В., Дианский Н.А., Дымников В.П., Ибраев Р.А., Калмыков В.В., Кострыкин С.В., Кулямин Д.В., Лыкосов В.Н., Мортиков Е.В., Рыбак О.О., Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Чернов И.А., Шашкин В.В., Яковлев Н.Г. Математическое моделирование Земной системы. – Коллективная монография под ред. Н.Г. Яковлева, М.: МАКС Пресс, 2016, 328 с.



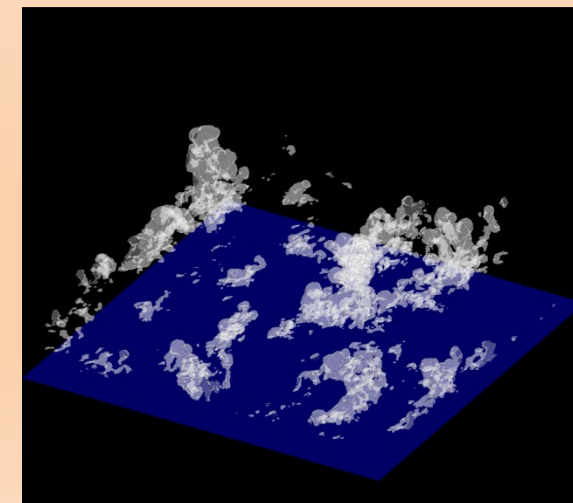
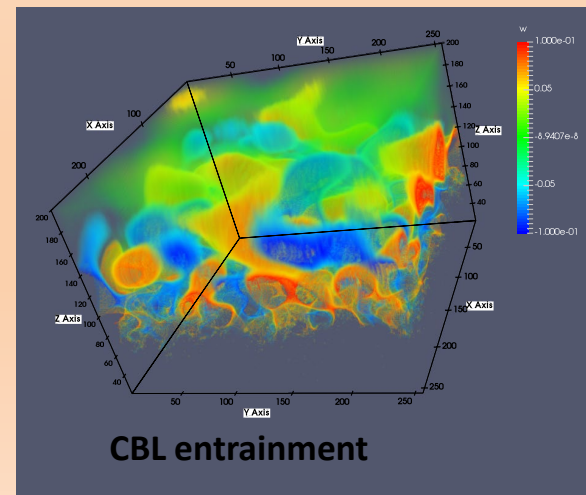
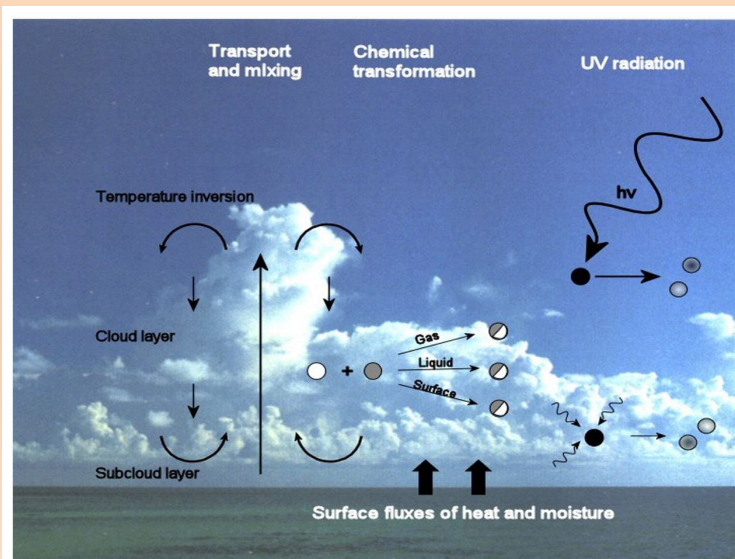
# Блок атмосферного пограничного слоя

(НИВЦ, Лаборатория математического моделирования геофизических пограничных слоёв)

- Унифицированный DNS-, LES-, RANS- код НИВЦ МГУ/ИВМ РАН
- Вихреразрешающая (LES) модель
  - Динамическое подсеточное замыкание
  - Модуль радиационного переноса RRTM
  - Блок микрофизических процессов: двухмоментная схема
  - Модель тепло- и влагопереноса в почве
  - Упрощенный блок переноса химических веществ
  - Масштабируется до  $n \cdot 1000$  ядер
  - MPI, OpenMP, CUDA



Plane Couette flow



Shallow cumulus convection



# Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ Terrestrial Model (TerM)



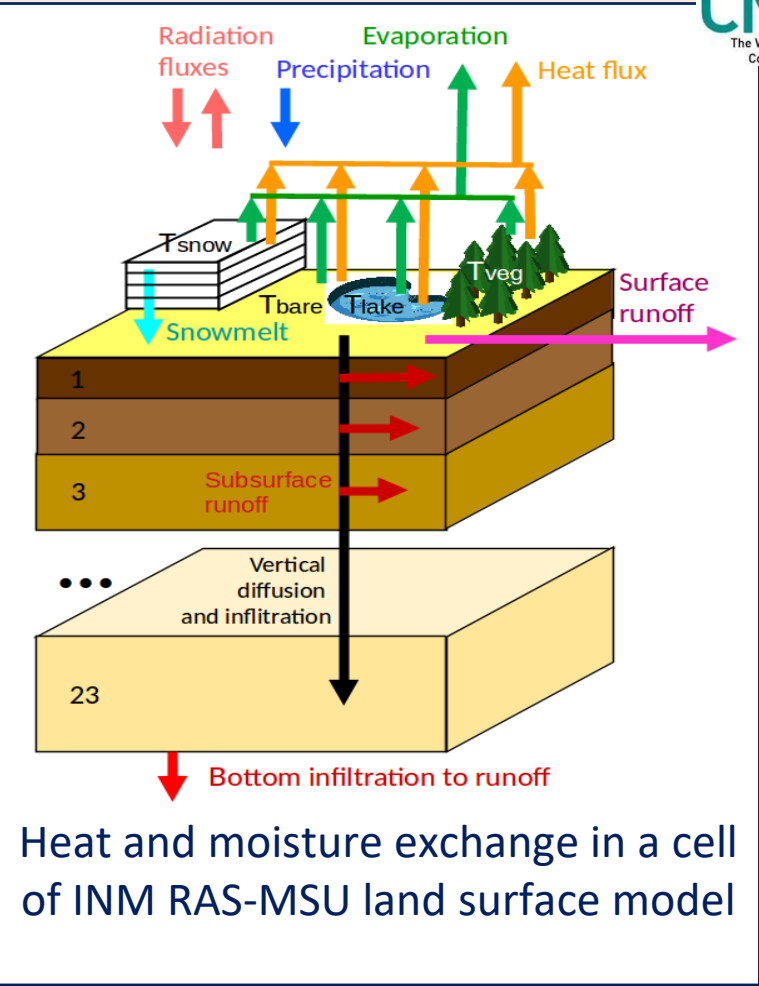
Чл.-корр. РАН В.Н.Лыкосов –  
основатель направления



INM RAS-MSU land  
surface scheme

Climate model  
of Institute of  
Numerical  
Mathematics  
(INMCM)

Global  
numerical  
weather  
prediction SL-  
AV model

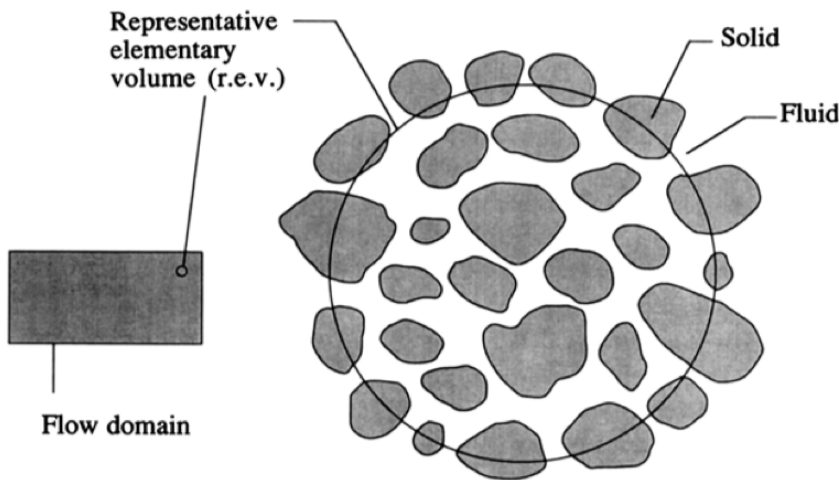


- Heat, moisture, water vapor and ice dynamics in soil (23 lrs)
- Snow cover with liquid water treatment (4 lrs)
- Soil and vegetation carbon dynamics
- Wetland CH<sub>4</sub> model
- LAKE model
- River routing scheme
- MPI+OpenMP\*

- (Marchuk, Dymnikov, Lykosov, 1981)
- (Володин и Лыкосов, 1998а,б)
- (Володин, 2008)

Модель реализована в автономном режиме (0.5°x0.5°)  
с предписанным атмосферным воздействием

# Уравнения тепловлагопереноса в пористой среде (*Nield and Bejan, 2006*)



$$\rho_f \left[ \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \nabla \left( \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{\varphi} \right) \right] = -\nabla P + \frac{\mu}{\varphi \rho_f} \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{\mu}{K} \mathbf{v} - \frac{c_F \rho_f}{K^{1/2}} |\mathbf{v}| \mathbf{v}$$

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T) + q_m'''$$

Пространственная область  
осреднения  
термогидродинамических величин

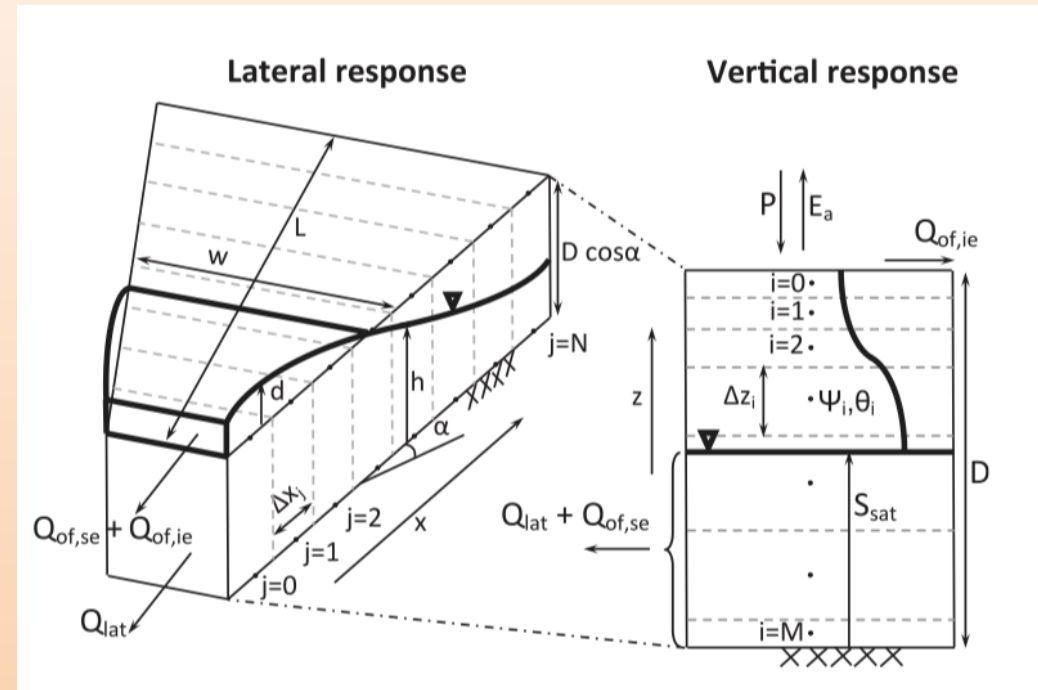
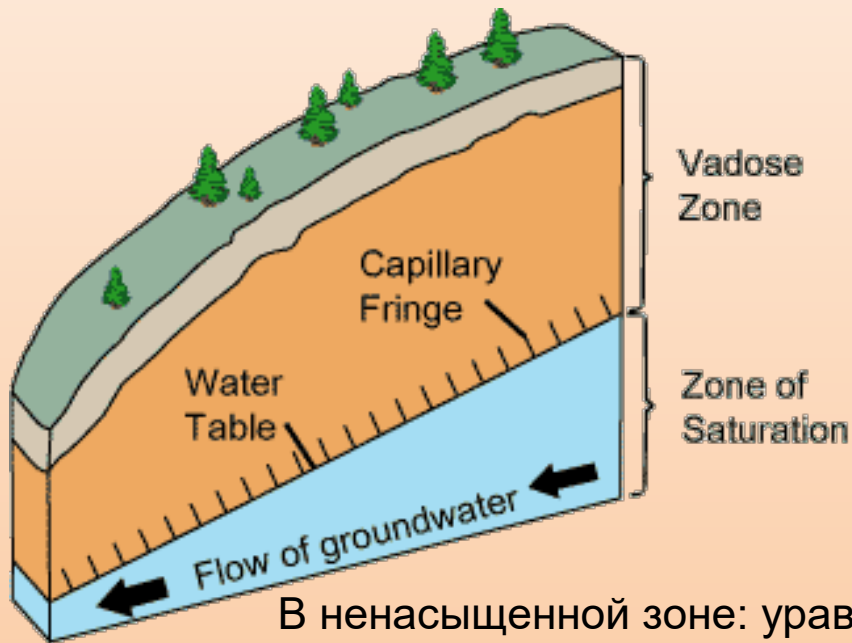
Нужно «уравнение состояния» –  
основная гидрофизическая  
характеристика  
(ОГХ)

Стационарное приближение в уравнении  
движения +  
пренебрежение фрикционными членами,  
кроме линейного (справедливо для  
медленных течений) = закон Дарси

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \mathbf{v}$$

# Насыщенная и ненасыщенная зона

(Hazenberg et al., 2015)



В ненасыщенной зоне: уравнение Дарси + уравнение сохранения массы + замыкающая уравнения связь между давлением и влажностью = уравнение Ричардса

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \mathbf{v}$$

В насыщенной зоне: уравнение Дарси по горизонтали + уравнение статики по вертикали – уравнение мелкой воды в пористой среде для уровня грунтовых вод

# Уравнения тепловлагопереноса в почве модели ИВМ РАН - МГУ

Уравнение притока тепла ( $T$  – температура):

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

Уравнение переноса жидкой влаги  $W$  (Moene and van Dam, 2014; Гельфан, 2007)  
(закон Дарси):

**Уравнение Ричардса**

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ -\gamma \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + F = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_W \frac{\partial W}{\partial z} + \lambda_I \frac{\partial I}{\partial z} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial z} + F$$

Коэффициент  
диффузии  
жидкой влаги:

$$\lambda_W = \gamma \frac{\partial \Psi}{\partial W}$$

Важна зависимость **потенциала почвенной влаги**  $\Psi$  и гидравлической проводимости  $\gamma$  от влажности  $W$  и содержания льда  $I$ .

Уравнение диффузии водяного пара  $V$ :

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

Динамика содержания льда  $I$  определяется только фазовыми переходами:

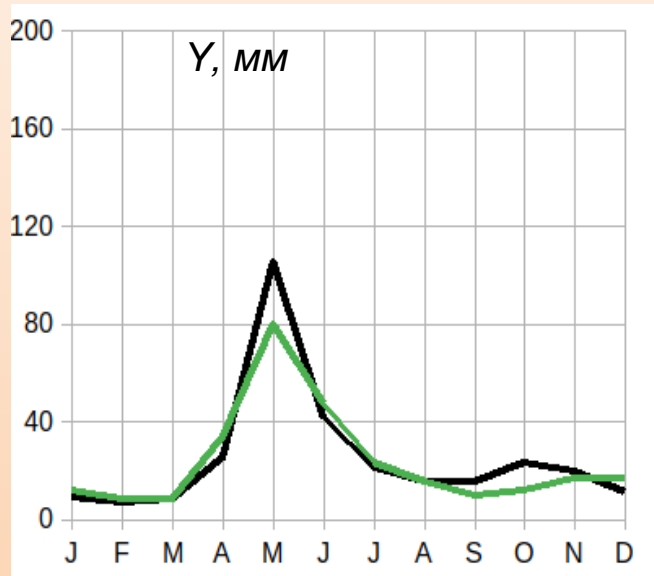
$$\frac{\partial I}{\partial t} = F_i$$

Рассматривается только ненасыщенная зона

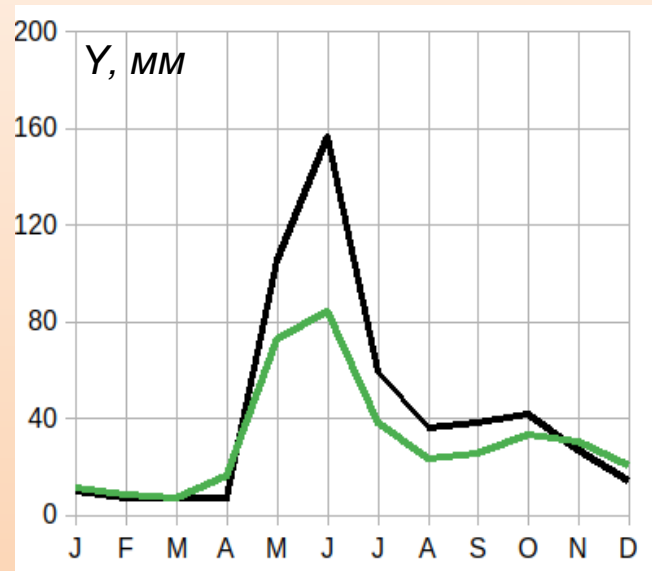


# Воспроизведение речного стока

Северная Двина



Печора



Средний слой стока  $Y$ , мм

■ наблюдения

■ МЗС ИВМ РАН

(Nasonova, 2018)

Репрезентативность воспроизведения процессов гидрологического цикла на масштабах речных бассейнов в ИВМ РАН-МГУ подробно не исследовалась

Для оценки эффекта от усовершенствований модель деятельного слоя отделялась от модели атмосферы

Численные эксперименты: период 2002-2020, форсинг — ERA5 (без корректировки осадков)

# Совершенствование описания гидрологических процессов в модели ИВМ РАН-МГУ

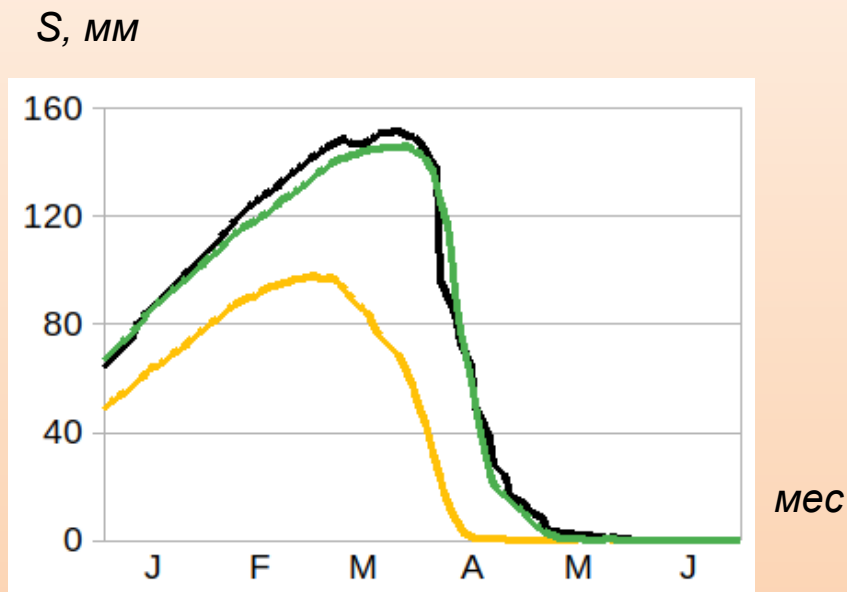
*динамика влажности и водоотдачи снежного покрова*

- добавлен учет содержания жидкой влаги в снеге, её перемещения по профилю и повторного замерзания (Мачульская, 2003)

*подсеточная изменчивость снегозапасов*

- изменение вида зависимости площади снежного покрова от снегозапаса  $f$ : линейная зависимость заменена на гамма-распределение (Корень, 1991)

$$f = 1 - \frac{\alpha^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^K x^{\alpha-1} e^{-\alpha x} dx, \quad \alpha = C_v^{-2}$$



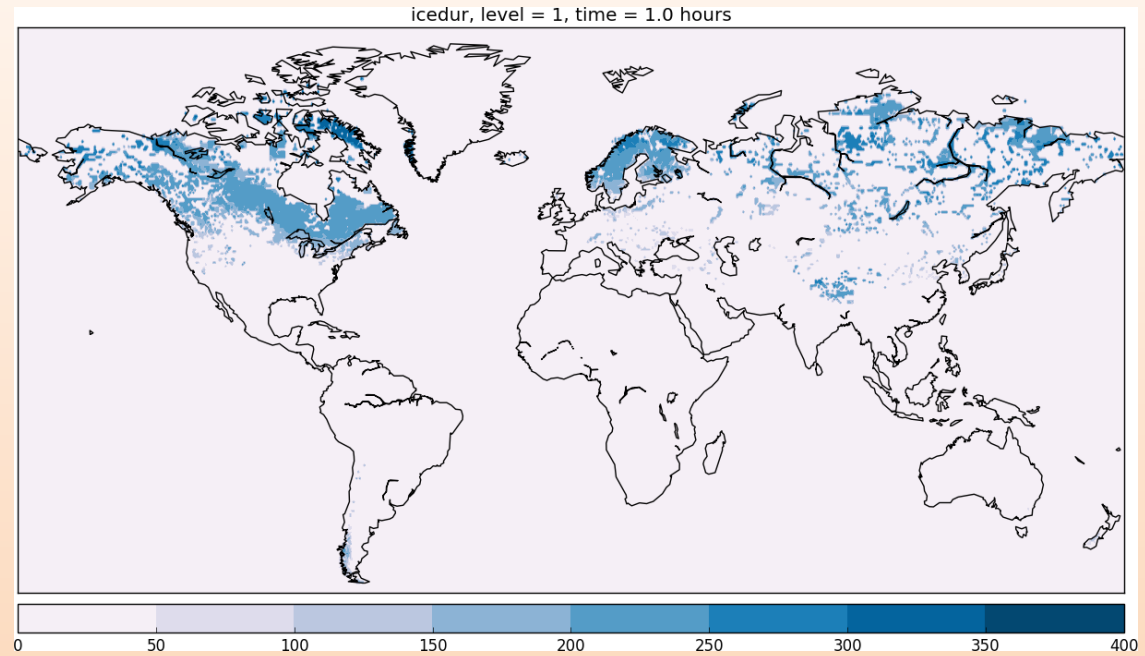
Средний влагосодержание в снежном покрове в поле  $S$ , мм (Сев. Двина, Печора):

- наблюдения (маршрутные снегомерные съемки)
- модель, исходная
- модель, усовершенствованная

# ISIMIP2b simulations, lake sector

## Simulations with LAKE model:

- 0.5 x 0.5 deg lon-lat grid
- global lake area and depth database (*Choulga et al., 2014*)
- climate forcing from models: GFDL, MIROC, HadESM, IPSL
- climate change scenarios: picontrol, historical, rcp26, rcp60, rcp85
- 100 cores/run
- 5-6 hours wall clock time per 10 years of simulation
- ~170 000 processor-hours of Lomonosov-2 supercomputer
- >100 Tb of output data



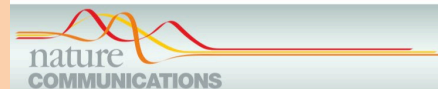
## Geophysical Research Letters

Research Letter | [Open Access](#) | [CC](#) | [i](#)

### Global Heat Uptake by Inland Waters

I. Vanderkelen [✉](#), N. P. M. van Lipzig, D. M. Lawrence, B. Droppers, M. Golub ... [See all authors](#) [v](#)

First published: 04 June 2020 | <https://doi.org/10.1029/2020GL087867>



ARTICLE



<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4> **OPEN**

Phenological shifts in lake stratification under climate change

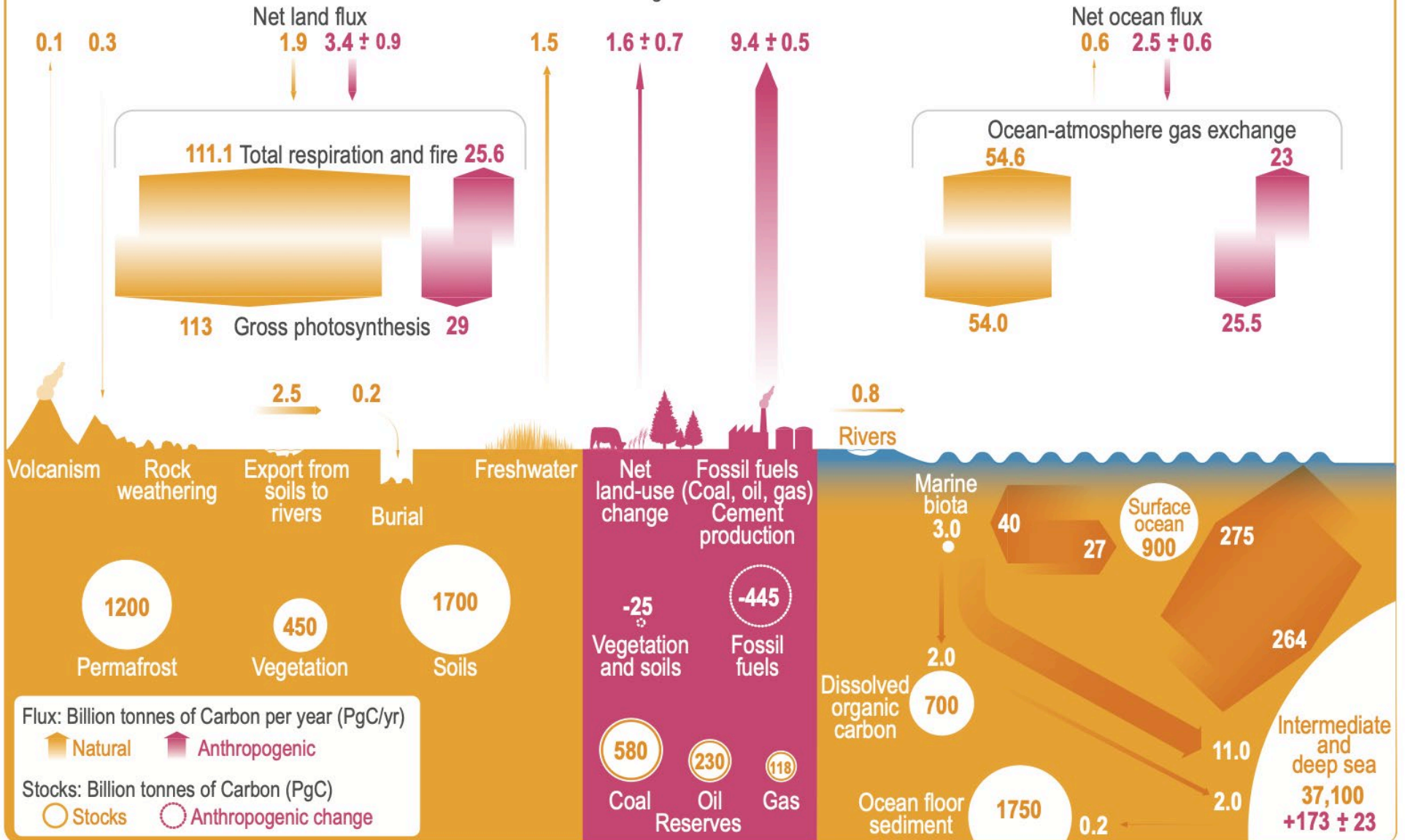
R. Iestyn Woolway [ORCID](#)<sup>1,2</sup>[✉](#), Sapna Sharma [ORCID](#)<sup>3</sup>, Gesa A. Weyhenmeyer [ORCID](#)<sup>4</sup>, Andrey Debolskiy<sup>5,6,7</sup>,

# Carbon (CO<sub>2</sub>) Budget

Atmosphere  
591 + 279 ± 5



Average increase 5.1 ± 0.02



Flux: Billion tonnes of Carbon per year (PgC/yr)

▲ Natural ▲ Anthropogenic

Stocks: Billion tonnes of Carbon (PgC)

○ Stocks ○ Anthropogenic change

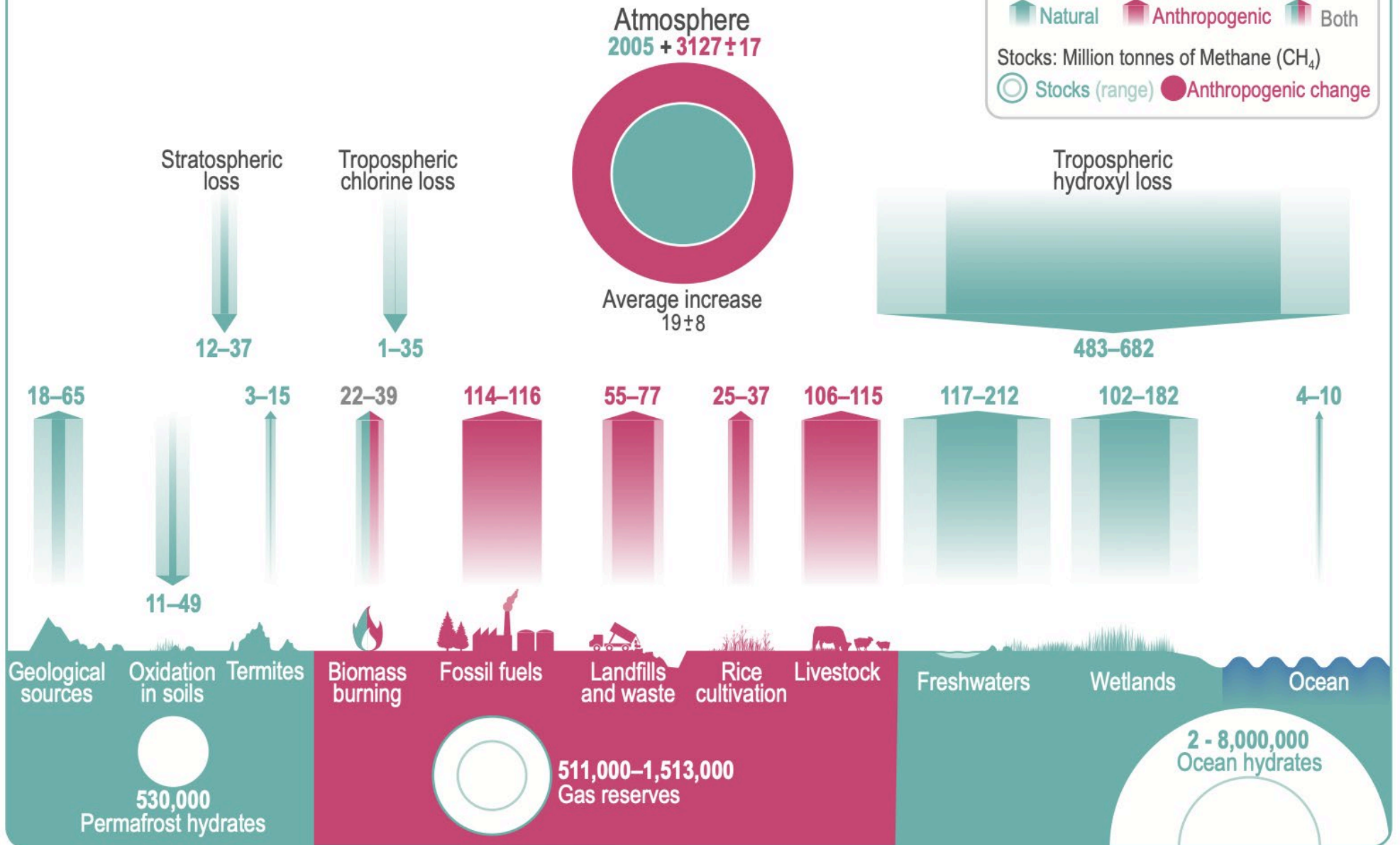


# Methane (CH<sub>4</sub>) Budget

Flux: Million tonnes of CH<sub>4</sub> per year (Tg CH<sub>4</sub>/yr)  
 Stocks: Million tonnes of Methane (CH<sub>4</sub>)

▮ Natural   
 ▮ Anthropogenic   
 ▮ Both

○ Stocks (range)   
 ● Anthropogenic change

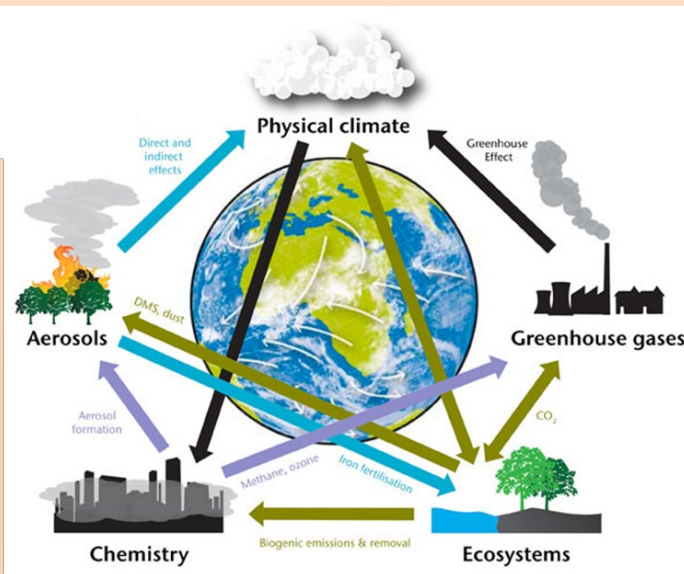


ФНТП в области экологического развития РФ и климатических изменений (2021-2030 гг.)

ВИПГЗ для создания единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ (2022-2024 гг.)

Центр моделирования и прогнозирования глобального климата

Разработка российской глобальной модели Земной системы мирового уровня



- Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН
- МГУ имени М.В. Ломоносова (НИВЦ)
- Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова
- Гидрометцентр России
- Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
- Институт прикладной физики РАН
- Карельский научный центр РАН
- Российский государственный гидрометеорологический университет

# Разработка модели TerM

## для прогноза климата и углеродного цикла

Сценарные расчёты изменений **глобального климата с учётом обратных связей** в системе атмосфера-океан-криосфера-суша

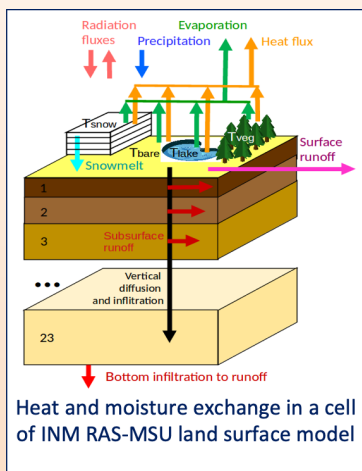
- **Одноколоночные, региональные, глобальные расчёты**
- **Возможность использования высокого разрешения**
- **Возможность массовых расчётов для тестирования новых блоков/параметризаций**



↑  
Передача новых блоков/параметризаций (2024 г. и 2030 г.)



# Применение модели TerM для диагноза углеродного цикла



Диагноз пулов и потоков углерода на суше

Национальная отчётность (3 уровень Кадастра, ...)

Модель деятельного слоя суши TerM

- + Законы сохранения
- + Расчёт пулов и потоков
- + Разрешение до 1-10 км
- «Модель есть модель»

Валидация, калибровка

Дистанционное зондирование Земли

Наземные локальные измерения

- + Полное покрытие с разрешением до 10-100 метров
- + Высокая точность получения ряда параметров
- Ограниченная возможность оценки пулов в почве, потоков углерода

Обратное моделирование переноса климатически активных газов

- + Высокая точность получения потоков и пулов углерода
- Низкая степень покрытия больших территорий

→ отсутствует



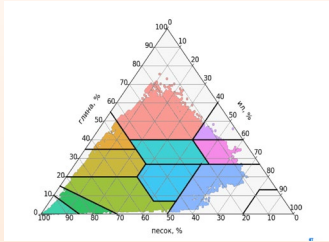
# Обеспечение внешних данных о подстилающей поверхности (доклад А.А.Рязановой)

Задача — обеспечение блока деятельного слоя суши и модели климата данными о параметрах подстилающей поверхности.

Технические требования:

- Интерполяция на произвольную регулярную широтно-долготную сетку с сохранением инвариантов
- Скалярные поля-1: площадь типов поверхности — типы растительности, водоёмы, урбанизированные территории, ледники, маска «океан-суша». ...
- Скалярные поля-2: параметры растительности (листовой индекс и пр.), параметры почвы, глубина водоёмов, гипсометрические кривые, уклон речного дна, тип городской поверхности, ...
- Векторное поле: поле направлений речного стока
- Согласование скалярных и векторных полей на целевой сетке

Гранулометрический состав  
в глобальной почвенной БД  
(Dai et al., JAMES, 2019)



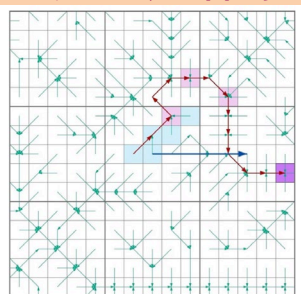
Уточнённая карта  
растительности России  
ИКИ РАН  
(Егоров и др., 2018)



Карты городских  
локальных климатических зон  
(Demuzere et al., 2021)



Трассировка речного потока  
(Reed, 2003)+ БД HydroSheds



# Архитектура системы подготовки данных о параметрах поверхности TerMPS

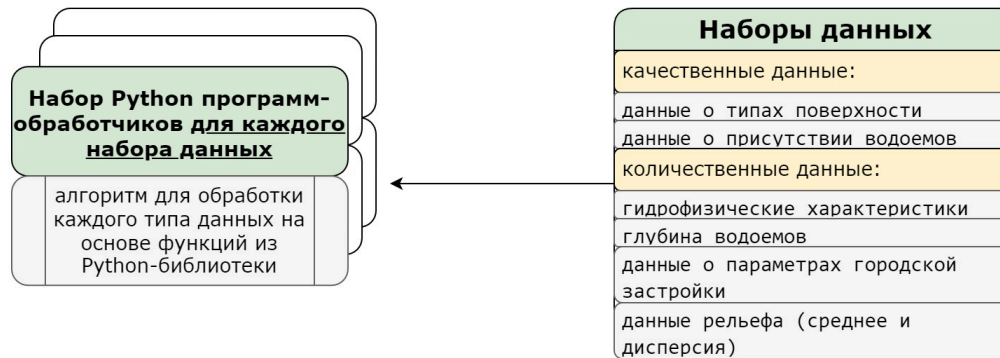
## Уровень 0: элементарные функции агрегирования данных

0 уровень



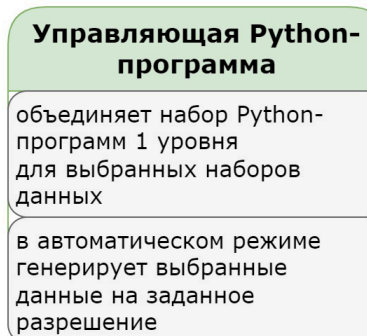
## Уровень 1: агрегирование частных типов данных

1 уровень



## Уровень 2: интерфейс пользователя

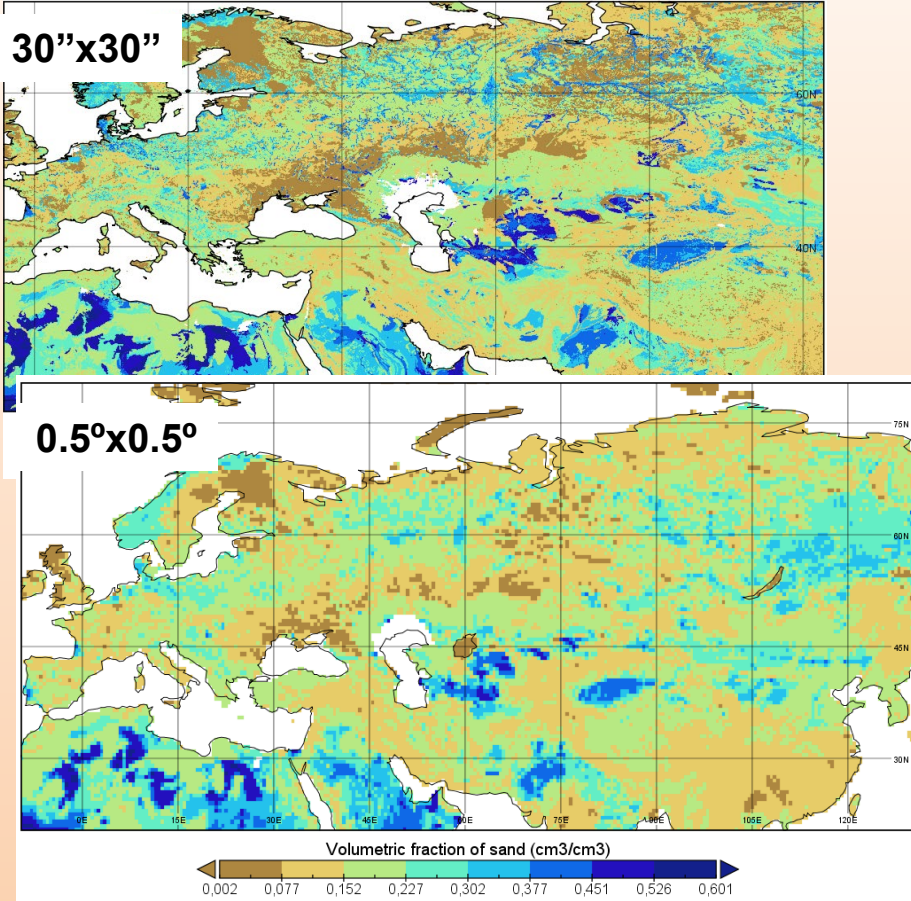
2 уровень





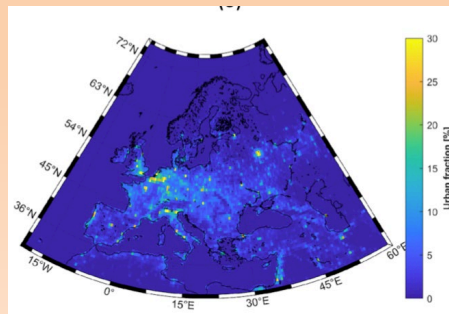
# Результаты работы TerMPS

## Объемное содержание глины

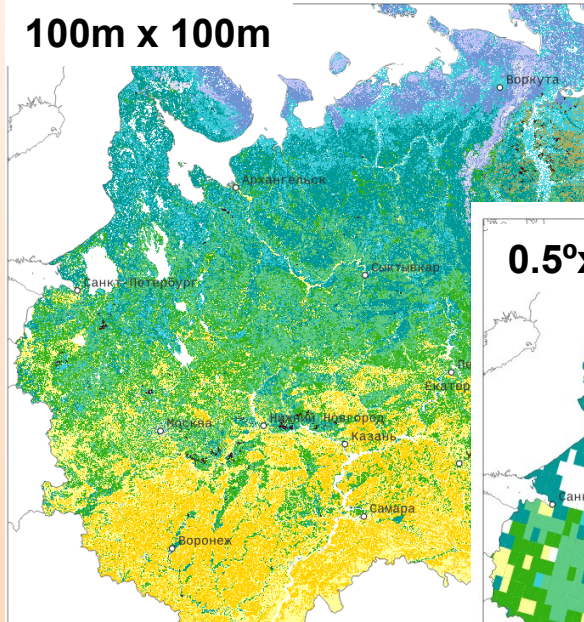


Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shanguan, W., Yuan, H., et al. (2019). A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2996– 3023. <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>

## Доля урбанизированной поверхности

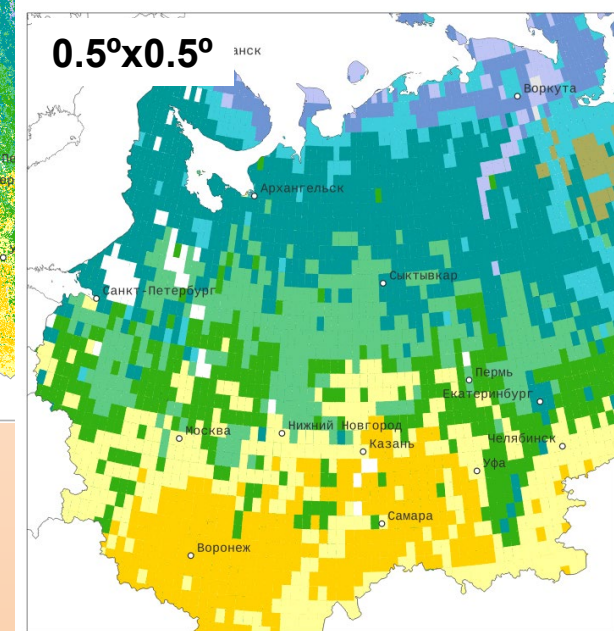


## Карта земного покрова России, составленная по данным спутника Proba-V.

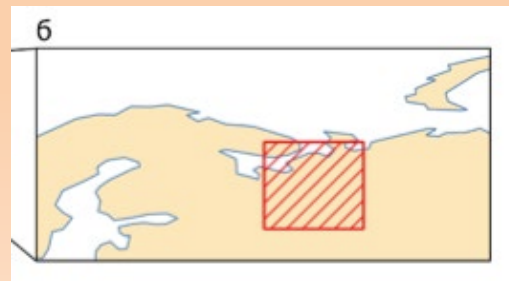


- тундра травянистая
- тундра кустарниковая
- редколесье / болота
- тайга лиственничная
- тайга вечнозеленая
- смешанные леса
- широколиственные леса
- травянистая растительность
- сельскохозяйственные угодья
- открытый грунт
- вода
- городская застройка / лесные пожары

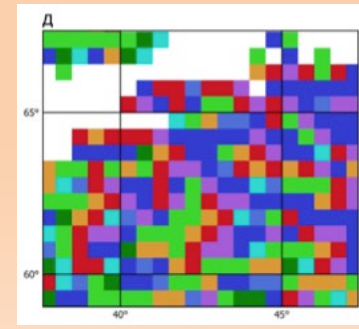
## Доминирующий класс растительного покрова в ячейке 0.5x0.5



V.A. Egorov, S.A. Bartalev, P.A. Kolbudaev, D.E. Plotnikov, S.A. Khvostikov, Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data, *Current problems in remote sensing of the earth from space*, 15(2), 2018

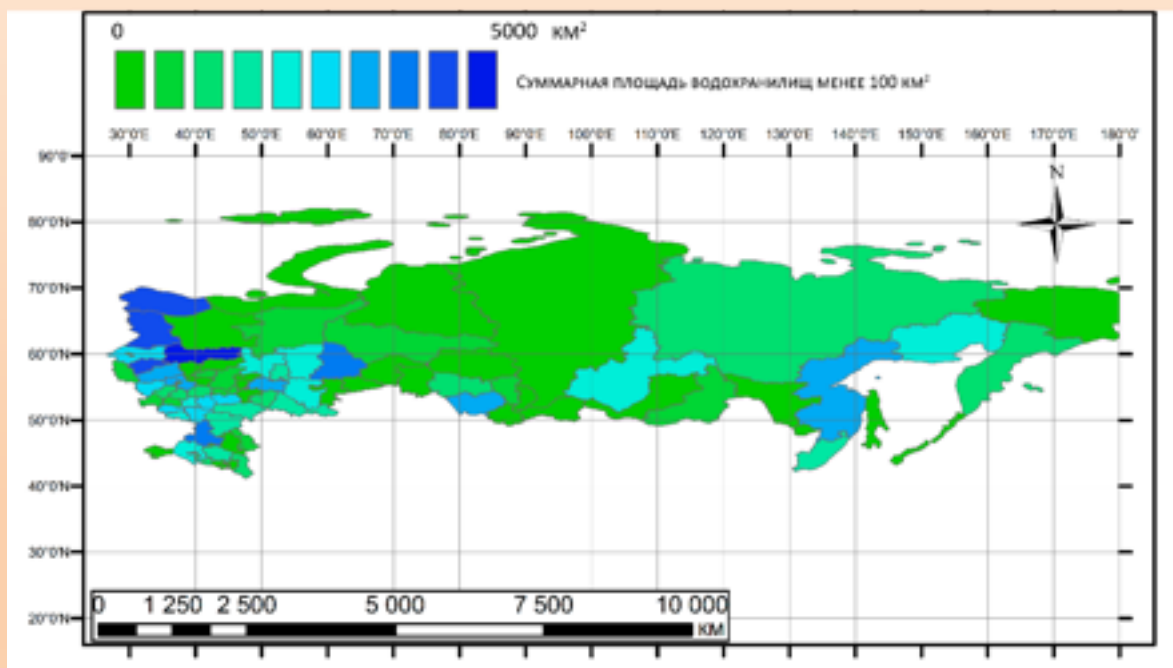


## Направления речного стока

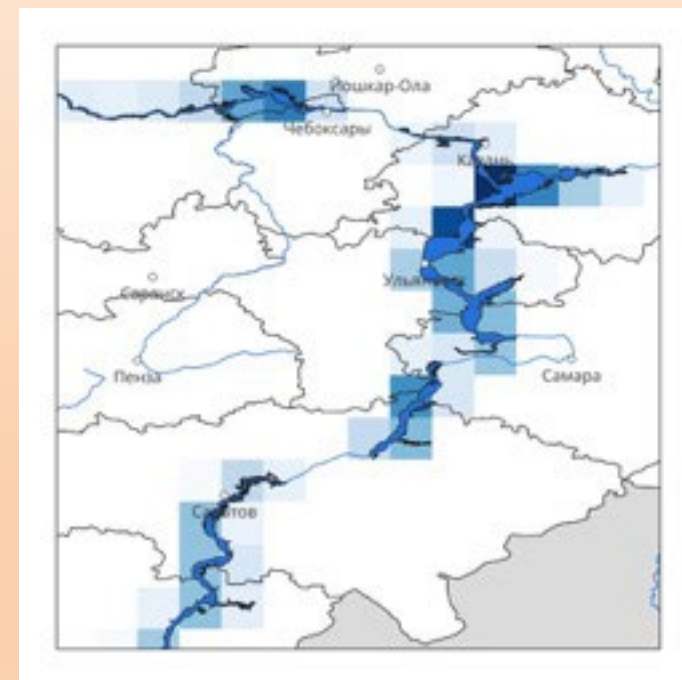


# Данные по площади водохранилищ

Распределение небольших водохранилищ площадью (менее 100 км<sup>2</sup>) по данным Росреестра по субъектам РФ (данные представлены для 2016 года)



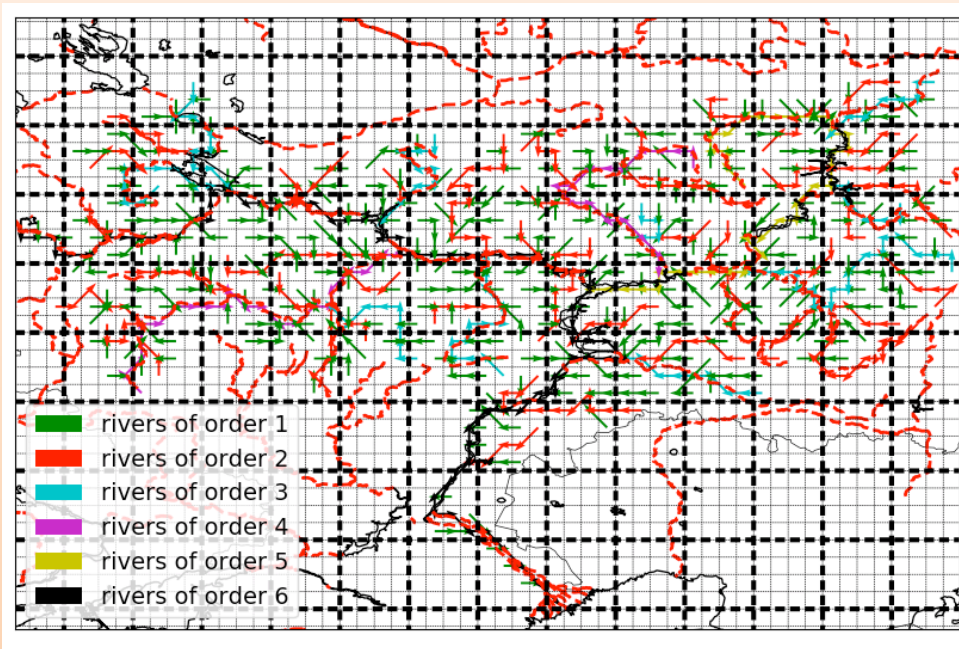
Распределение площади крупных Волжских водохранилищ на регулярную сетку модели деятельного слоя суши





# Процедуры оценки эмиссии и поглощения парниковых газов водохранилищами

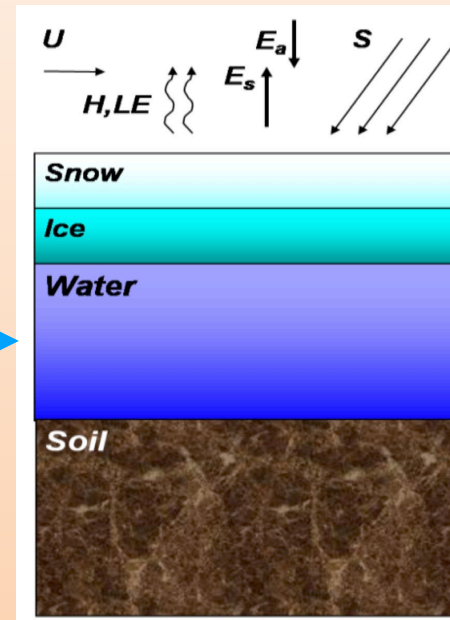
## Модель термогидродинамики рек



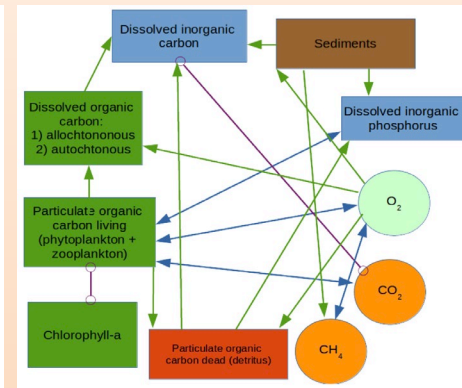
- Модель диффузионной волны для гидродинамики
- Расчёт термического режима

## Модель водоёма LAKE3.x

### Термогидродинамика



### Биогеохимия



- $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  – концентрации и потоки
- Продукция, дыхание, разложение ...

## Пузырьковый поток метана:

Рыбинское вдхр.

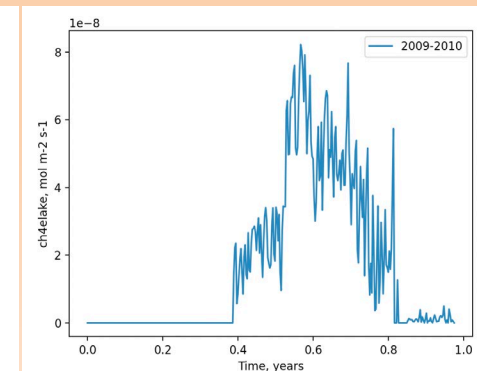
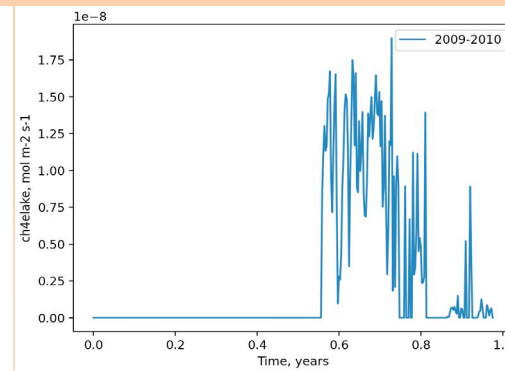
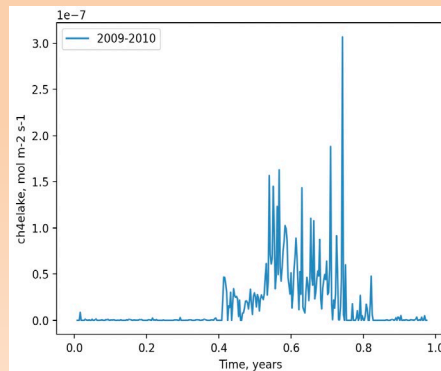
Куйбышевское вдхр.

Волгоградское вдхр.

## Калибровка модели

**SP**  **TRU**

(Методы оптимизации Монте-Карло, ROPE, ...)



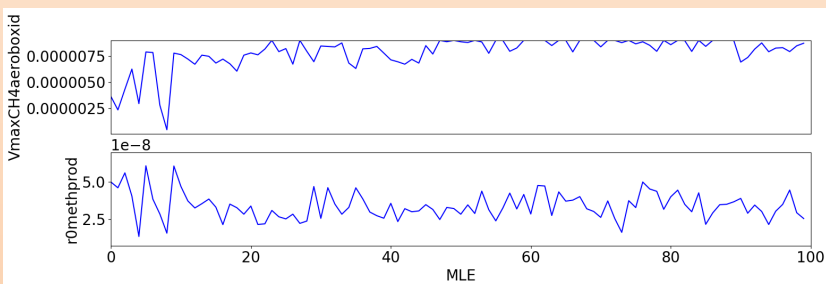
# Калибровка модели водохранилищ

**Этапы:** 1. Оптимизация температуры 2. Оптимизация кислорода 3. Оптимизация метана

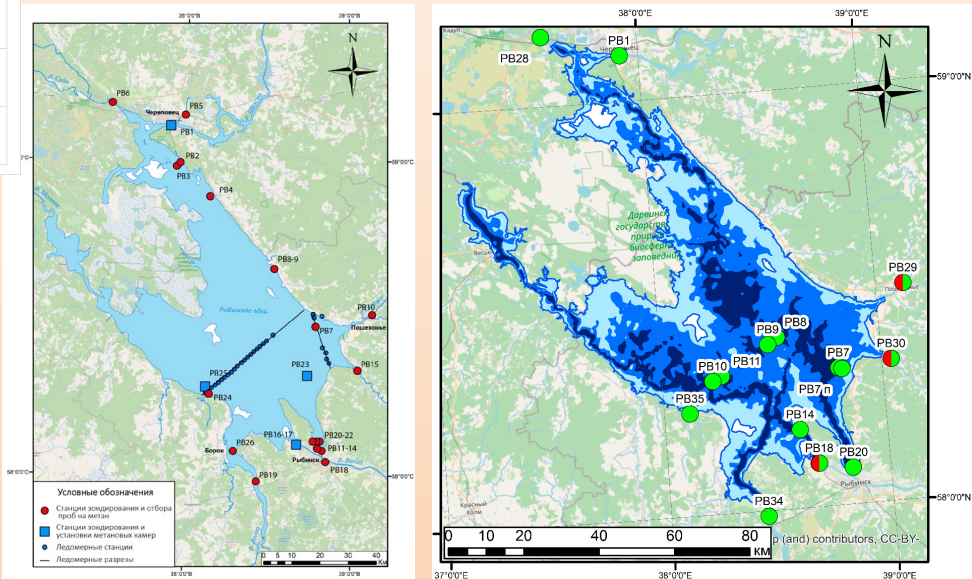


- 1 – наблюдения ---
- 2 – до калибровки и подбора правильного форсинга ---
- 3 – после калибровки ---

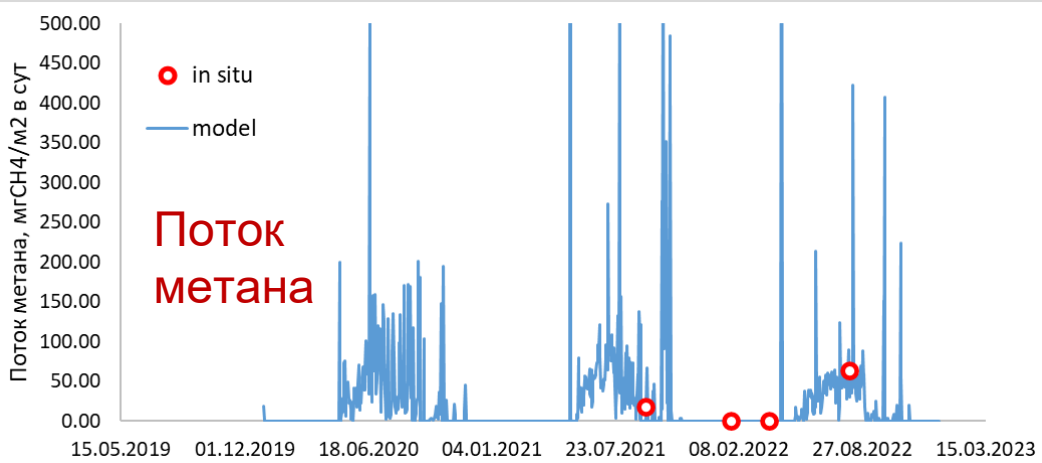
Ход калибровки параметров метановой модели



Примеры распределения станций натуральных наблюдений в разные сезоны на Рыбинском водохранилище



Калибровка на данных 9 вдхр. (2024 г.)



# Углеродный цикл суши

## Уравнения углеродного цикла:

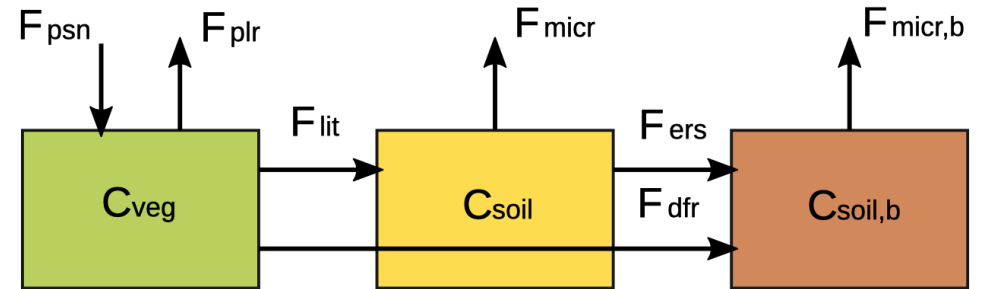
$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = F_{psn} - F_{plr} - \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - F_{dfr,a} - F_{dfr,b}$$

$$\frac{\partial C_{soil}}{\partial t} = \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - \frac{C_{soil}}{\tau_{soil}} - F_{ers}$$

$$\frac{\partial C_{soil,b}}{\partial t} = F_{dfr,a} + F_{dfr,b} + F_{ers} - \frac{C_{soil,b}}{\tau_{soil,b}}$$

Пул растительного углерода рассчитывается в каждой ячейке для каждого типа растительности:

- 1 лес сомкнутый лиственный вечнозеленый (тропические леса)
- 2 лес сомкнутый лиственный листопадный (широколиственные леса)
- 3 лес сомкнутый смешанный (смешанные леса)
- 4 лес сомкнутый хвойный вечнозеленый (тайга)
- 5 лес сомкнутый хвойный листопадный (лиственница)
- 6 лес разреженный (саванна, также мб болота)
- 7 травянистые сообщества (степь, луга)
- 8 кустарники сомкнутые (напр., средиземноморский кустарник)
- 9 кустарники разреженные (напр., полупустынный кустарник)
- 10 тундра — мхи и лишайники
- 11 тундра — кустарники и кустарнички
- 12 сельхозугодья — травянистые (пашня)
- 13 сельхозугодья — древесные (плодовые деревья)



## Пулы:

$C_{veg}$  — углерод в растительности

$C_{soil}$  — углерод в почве

$C_{soil,b}$  — еще один углерод в почве («быстрый»)

## Генерация:

$F_{psn}$  — фотосинтез

## Сток (поток в атмосферу\*):

$F_{plr}$  — дыхание растительности

$F_{micr}$  — микробное дыхание

$F_{micr,b}$  — микробное дыхание 2

## Переходы между пулами:

$F_{lit}$  — отмирание и опад растительности

$F_{dfr}$  — вырубка (двух типов: А и Б)

$F_{ers}$  — распашка почвы



# Photosynthesis scheme: interpolation between limiting cases (CLM, INMCM, JULES, CABLE)

(Clark et al., 2011)

- GPP rate is a minimum of rates of three photosynthesis stages: (Farquhar model)

Michaelis-Menten expr.

Rubisco-limitation

$$W_c = \begin{cases} V_{cmax} \left( \frac{c_i - \Gamma}{c_i + K_c(1 + O_a/K_o)} \right) & \text{for } C_3 \text{ plants} \\ V_{cmax} & \text{for } C_4 \text{ plants} \end{cases}$$

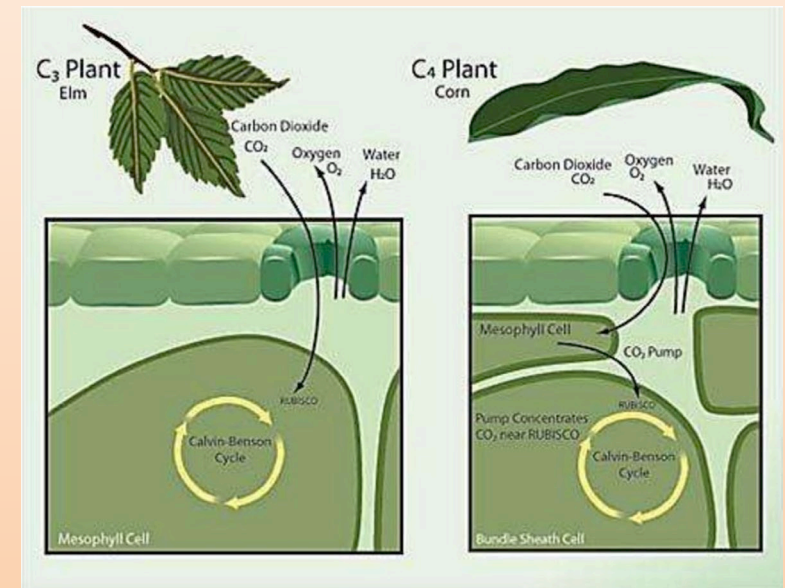
light-limitation

$$W_l = \begin{cases} \alpha(1 - \omega) I_{par} \left( \frac{c_i - \Gamma}{c_i + 2\Gamma} \right) & \text{for } C_3 \text{ plants} \\ \alpha(1 - \omega) I_{par} & \text{for } C_4 \text{ plants} \end{cases}$$

transport of photosynthetic products

$$W_e = \begin{cases} 0.5 V_{cmax} & \text{for } C_3 \text{ plants} \\ 2 \times 10^4 V_{cmax} \frac{c_i}{P_*} & \text{for } C_4 \text{ plants} \end{cases}$$

radiation



$$W = \min(W_c, W_l, W_e)$$

or smoothed modification of min function

$$\beta_1 W_p^2 - W_p(W_c + W_l) + W_c W_l = 0$$

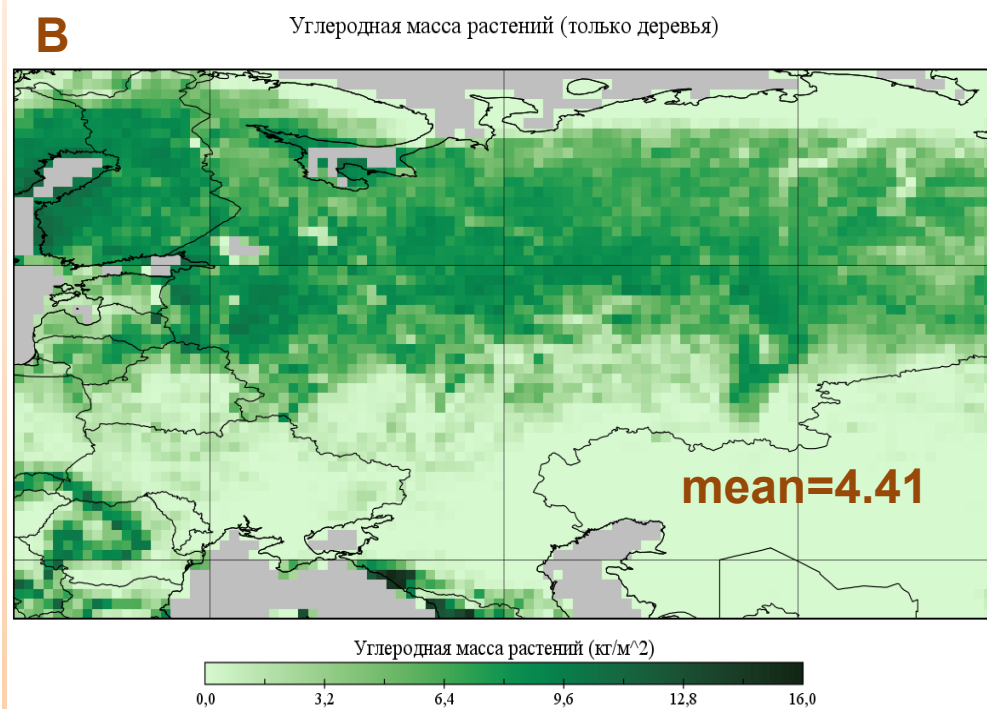
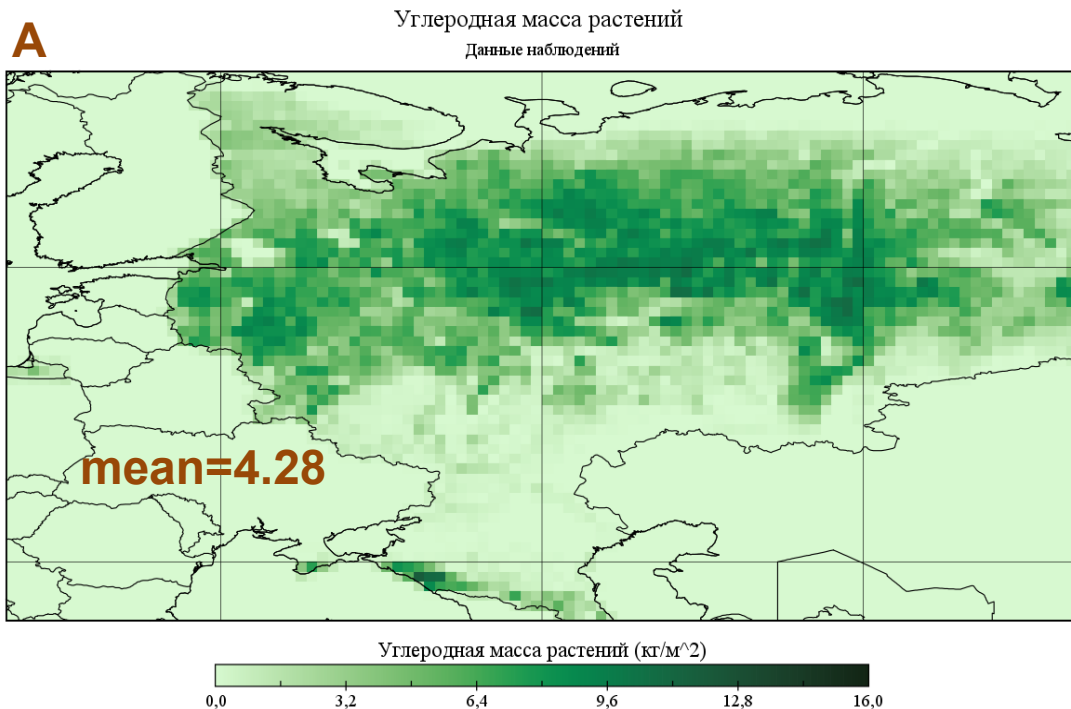
$$\beta_2 W^2 - W(W_p + W_e) + W_p W_e = 0$$



# Углерод лесов (Европейская территория России)

Данные дистанционного зондирования ИКИ РАН (MODIS),  
углерод древостоя, кг/м<sup>2</sup>

Результаты модели  
TerM, кг/м<sup>2</sup>, 2020 г.



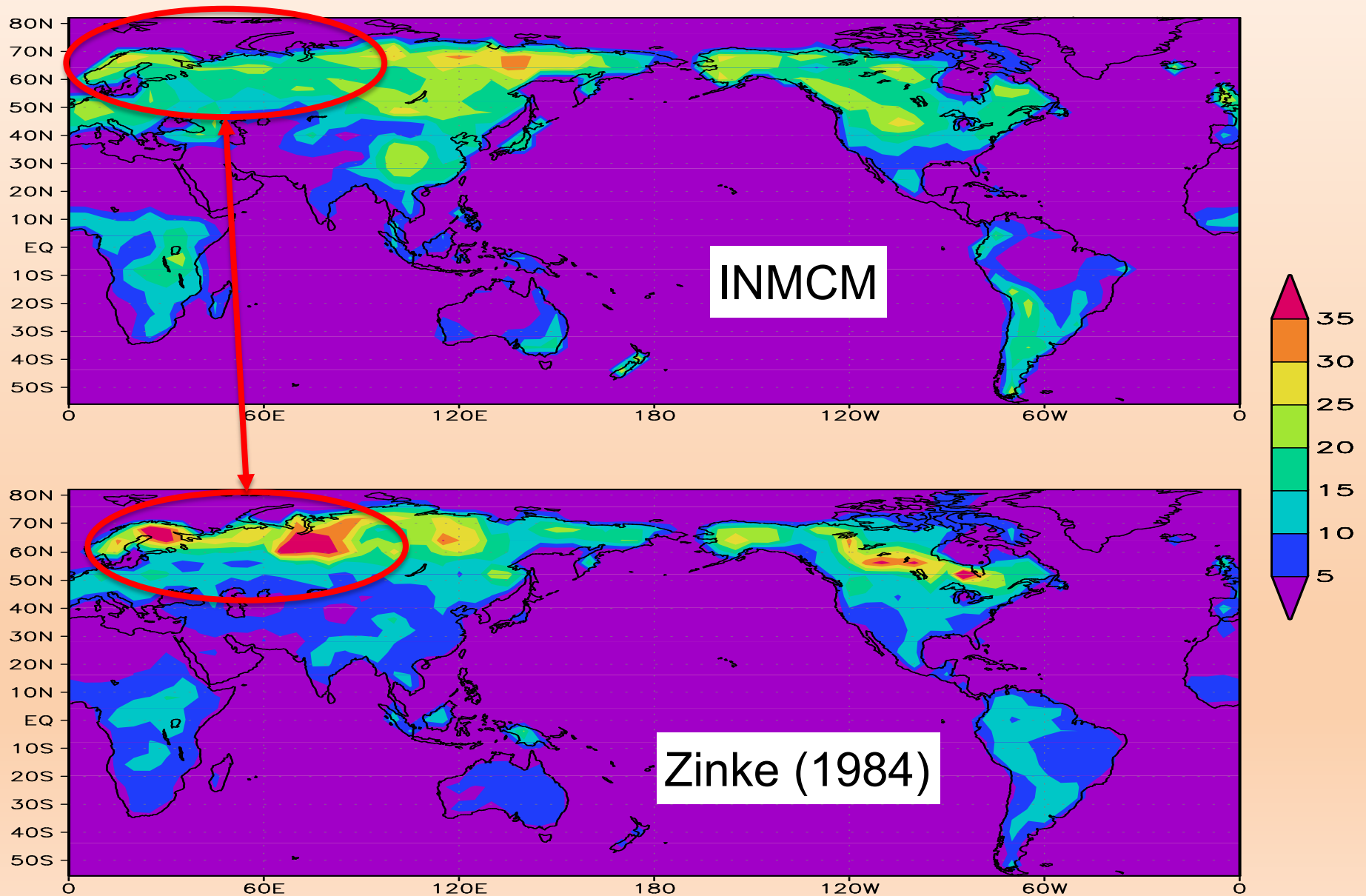
## Параметры расчета:

- 1991-2020 гг.;
- атмосферное воздействие – ERA5;
- данные ДЗЗ по объёму древесины переводились в С учётом плотности древесины 600 кг/м<sup>3</sup>;
- результаты TerM – сумма по всем «высоким» типам растительности.

Козф. простр. корреляции

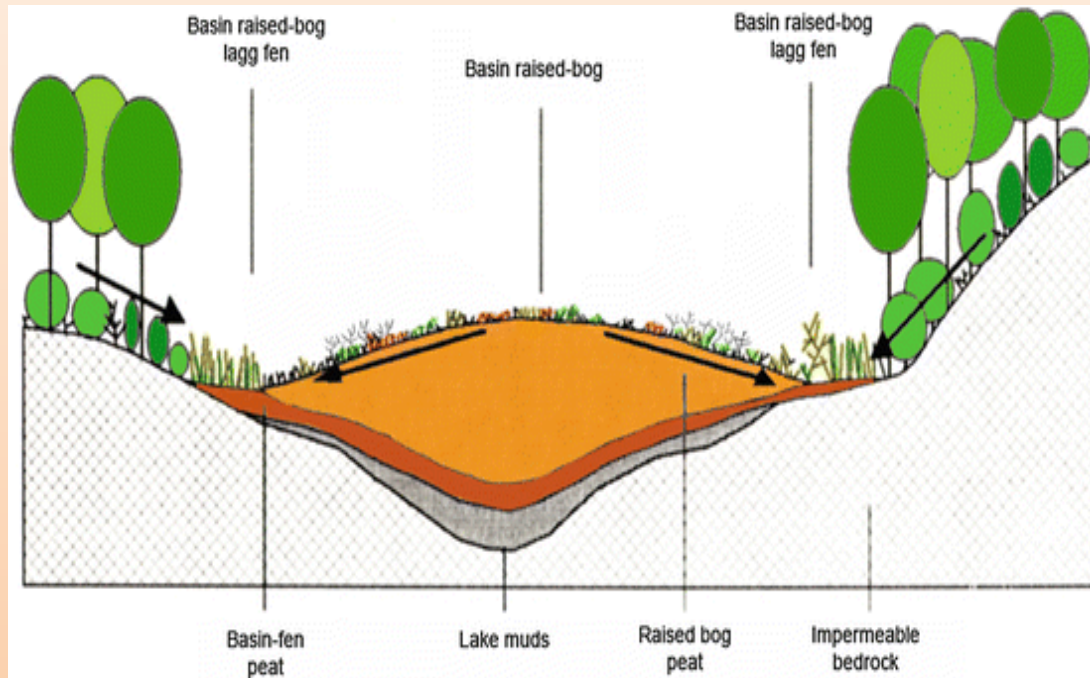
$$r_{A-B} = 0.83$$

# Углерод почвы (кг/м<sup>2</sup>) по данным модели INMCM и Zinke (1984)



# Модель баланса углерода в болотах (Г.А.Александров, А.В.Елисеев, С.Н.Денисов)

## Олиготрофное болото



Уровень грунтовых вод определяется высотой, шириной болота и годовой суммой «осадкам минус испарение»:

$$z_{GWL,i} = \min \left[ \sqrt{\frac{rL_{peat}^2 \beta_i}{\gamma_{sat}}}, z_{peat,i} \right]$$

Тенденция C = опад минус дыхание:

$$\frac{\partial C_{peat,i}}{\partial t} = F_{lit} - F_{mcr,i}$$

Дыхание = сумма дыхания в аэробной и анаэробной зонах:

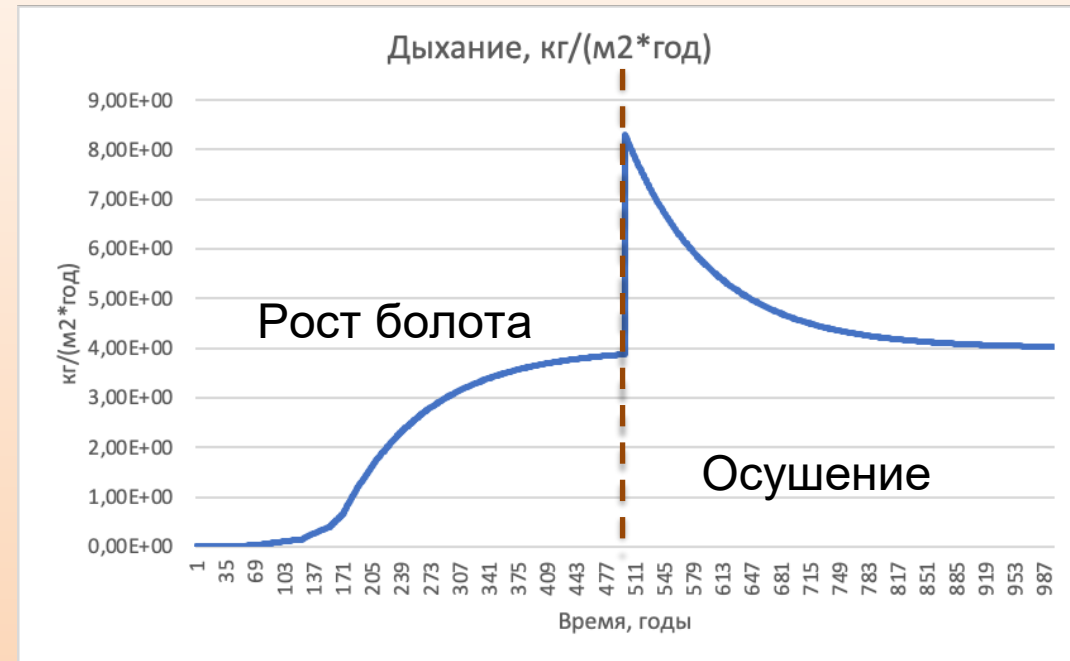
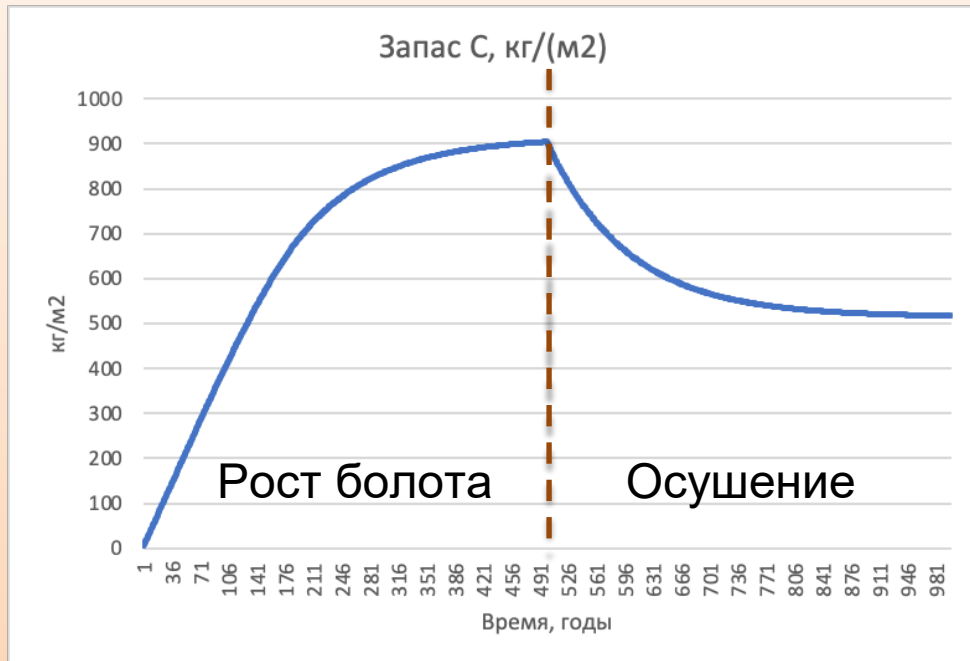
$$F_{mcr,i} = C_{peat,i} * \frac{(z_{peat,i} - z_{GWL,i})R_a + (z_{GWL,i} - z_{MS})R_c}{(z_{peat,i} - z_{MS})}$$

Высота центра болота пропорциональна запасам C:

$$z_{peat,i} = \frac{C_{peat,i}}{\rho_{C,peat}} + z_{MS}$$

Шаг модели по времени – 1 год

# Простой пример: «осушение болота»



- расчёт 1000 лет с шагом 1 год
- опад  $10 \text{ мкмоль С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- «осадки минус испарение» принималась 400 мм/год в первые 500 лет эксперимента, и 100 мм/год во вторые 500 лет

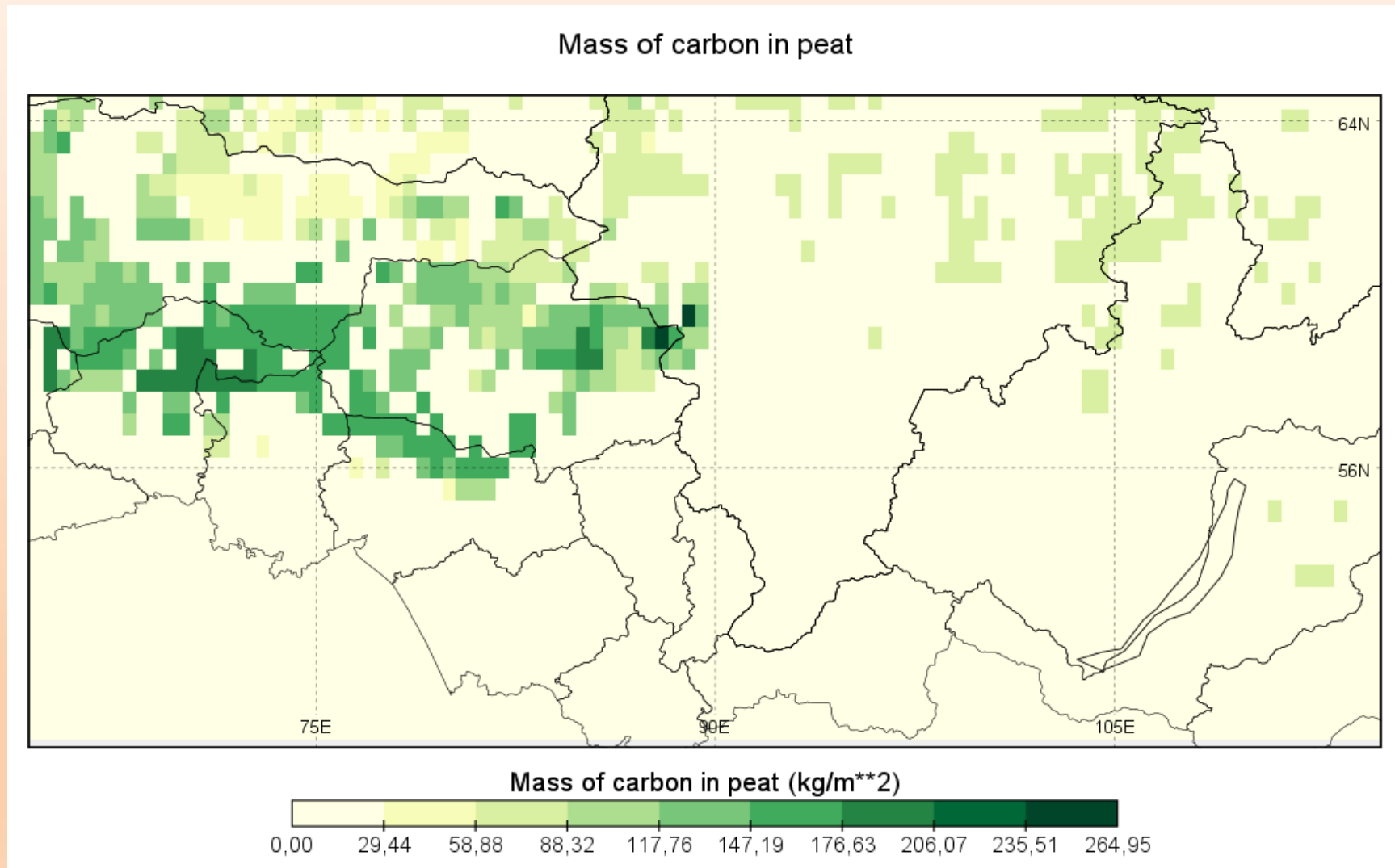


# Эффект осушения болота на эмиссию метана в модели ИВМ РАН-МГУ



- Метеорологические данные с 6.05.2022 по 06.09.2022, полученные на полигоне «Мухрино» Югорского государственного университета,
- **Эксперимент 1:** уровень болотных вод рассчитывался по уравнениям влагопереноса модели и составил 0 – ~10см,
- **Эксперимент 2:** уровень болотных вод задавался 2 м – типичное значение для осушенных болот Западной Сибири.

# Углерод в болотах юга Сибири по модели углерода болот ИФА РАН (доклад В.Ю.Богомолова и соавт.)



- Разрешение  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

- Атмосферное воздействие – реанализ ERA5

# Сельское хозяйство

Уравнения углеродного цикла:

$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = F_{psn} - F_{plr} - \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - F_{dfr,a} - F_{dfr,b}$$

$$\frac{\partial C_{soil}}{\partial t} = \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - \frac{C_{soil}}{\tau_{soil}} - F_{ers}$$

$$\frac{\partial C_{soil,b}}{\partial t} = F_{dfr,a} + F_{dfr,b} + F_{ers} - \frac{C_{soil,b}}{\tau_{soil,b}}$$

Пул растительного углерода рассчитывается в каждой ячейке для каждого типа растительности:

- 1 лес сомкнутый лиственный вечнозеленый (тропические леса)
- 2 лес сомкнутый лиственный листопадный (широколиственные леса)
- 3 лес сомкнутый смешанный (смешанные леса)
- 4 лес сомкнутый хвойный вечнозеленый (тайга)
- 5 лес сомкнутый хвойный листопадный (лиственница)
- 6 лес разреженный (саванна, также мб болота)
- 7 травянистые сообщества (степь, луга)
- 8 кустарники сомкнутые (напр., средиземноморский кустарник)
- 9 кустарники разреженные (напр., полупустынный кустарник)
- 10 тундра — мхи и лишайники
- 11 тундра — кустарники и кустарнички
- 12 сельхозугодья — травянистые (пашня)
- 13 сельхозугодья — древесные (плодовые деревья)

- В существующей схеме углеродного цикла есть тип растительности «с/х», однако его качество не тестировалось
- Тип «с/х» должен иметь параметры, индивидуальные для ключевых с/х культур
- Не хватает дат посева и сборки урожая
- Не хватает схем севооборота
- Нужна карта с/х культур

# Модель SOCS (Soil Organic Carbon Saturation)

(Рыжова И.М. 2020-2022)

**Дополнительный постулат – существование состояния насыщения гумифицированного органического углерода**

$$\frac{dC_1}{dt} = I - (1 - r)kC_1 - rkC_1 \left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) + k_d C_2$$

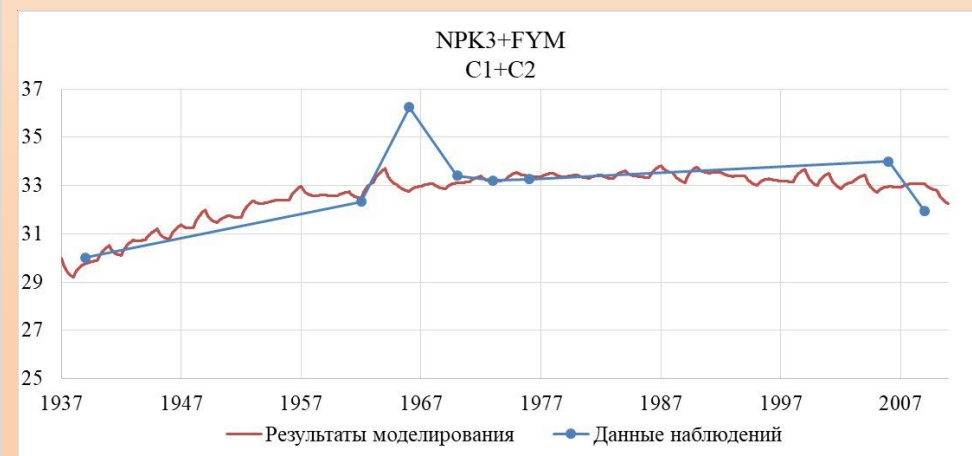
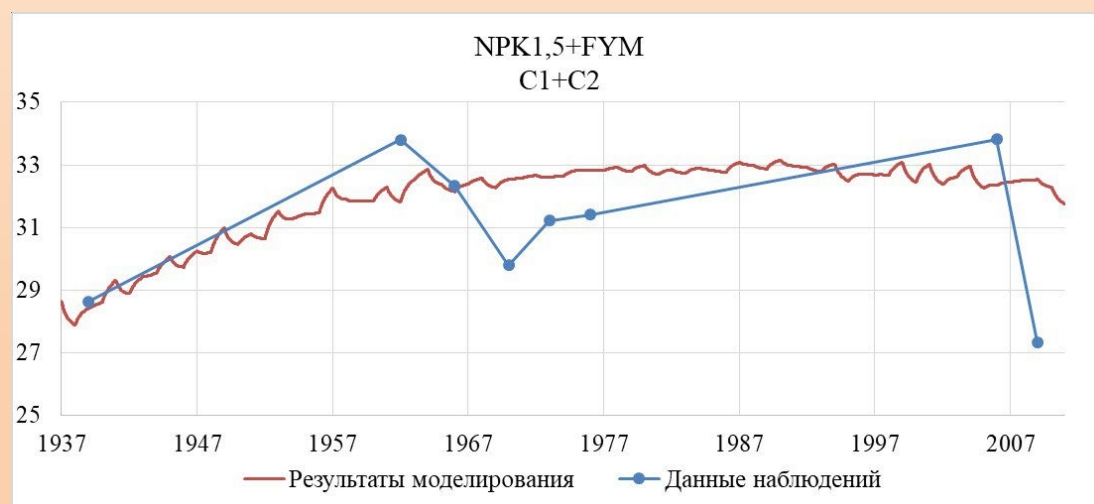
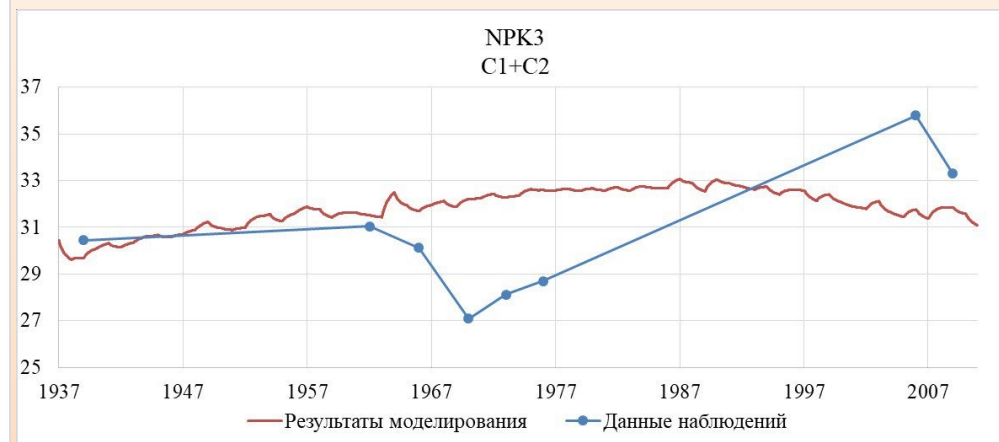
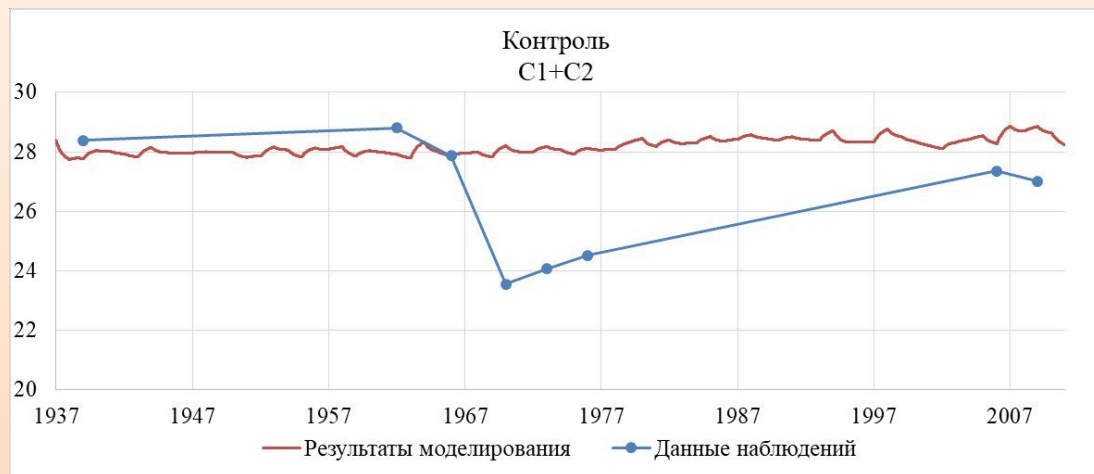
$$\frac{dC_2}{dt} = rkC_1 \left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) - k_d C_2$$

- $C_1$  – углерод свободного (незащищенного) вещества почвы;
- $C_2$  – углерод защищенного вещества почвы;
- $C_m$  – максимальное количество органического углерода;
- $I$  – поступление органического углерода в почву;
- $r$  – доля углерода, переходящая в защищенное вещество;
- $k$  – коэффициент скорости разложения  $C_1$ ;
- $k_d$  – коэффициент перехода углерода из  $C_2$  в  $C_1$  в результате десорбции и разрушения агрегатов.

**Калибрована для сельскохозяйственных почв!**



# Многолетняя динамика углерода в пахотных землях (опытная станция ДАОСЗ, Подмосковье)



- Поступление органики – измеренные растительные остатки и органические удобрения

# Конструктор модели углеродного цикла (доклад А.И.Медведева)

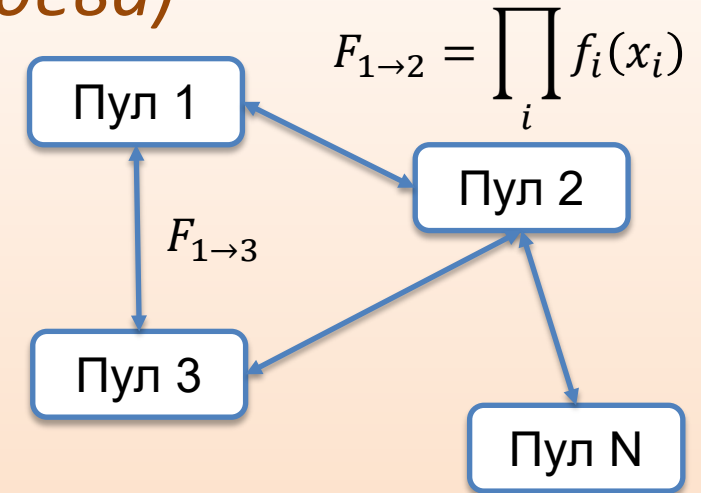
## Функциональность:

- задаётся произвольное число пулов углерода в почве и растительности с атрибутами и графом переходов,
- переходы – произведение функций из набора стандартных типов: линейные, Михаэлис-Ментен, и т.д.,
- возможность введения переходов нестандартного вида,
- модель должна воспроизводить интегральные и вертикально-распределённые пулы в почве.

## Обобщённая система уравнений конструктора:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial(wC_i)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{j \rightarrow i} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{i \rightarrow j},$$

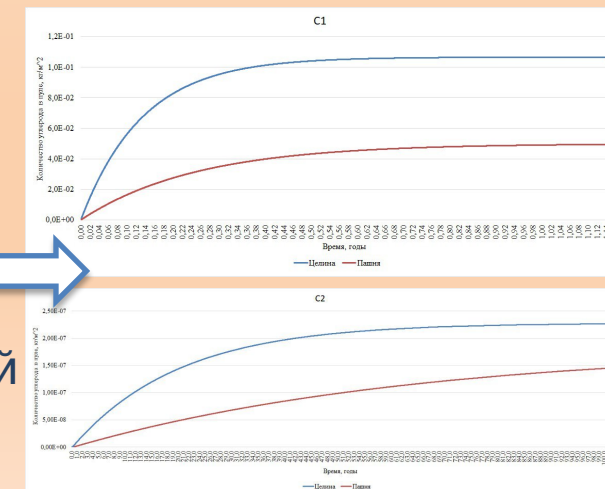
$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{j \rightarrow i} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{i \rightarrow j}.$$



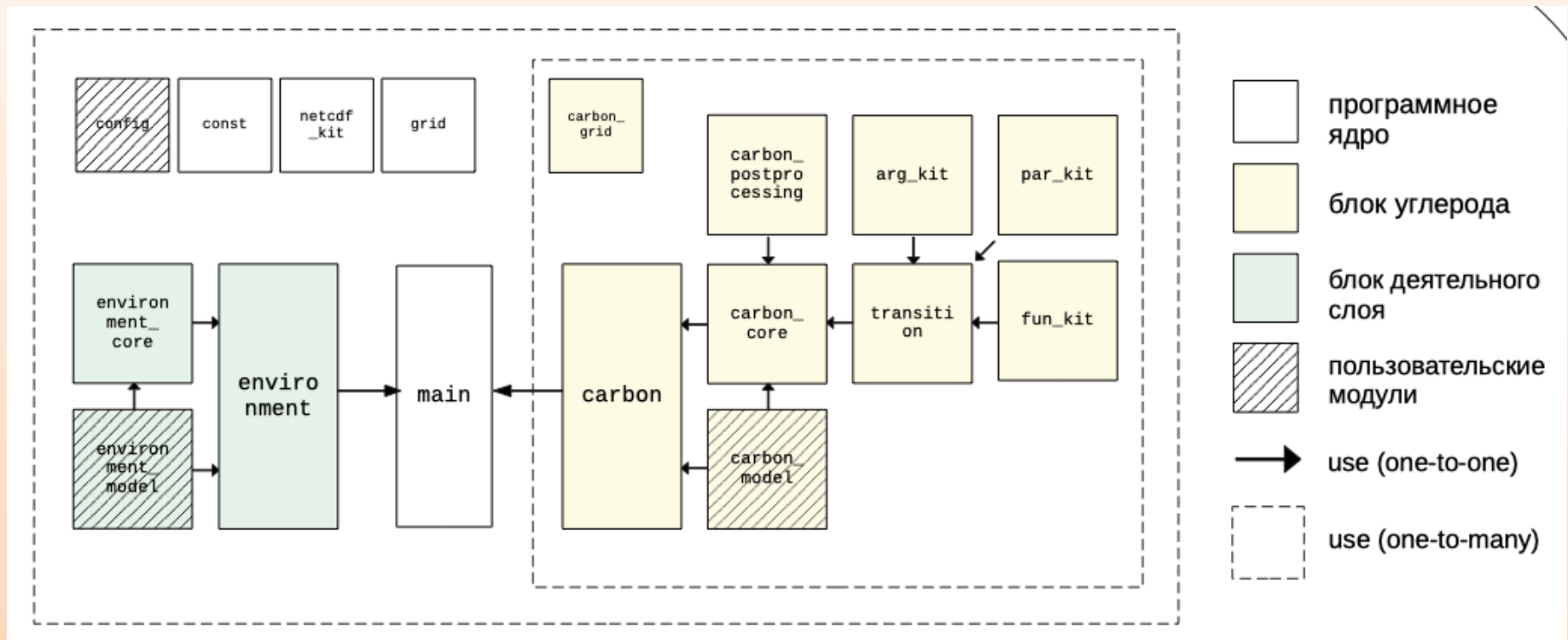
Модели, протестированные в рамках рабочего прототипа конструктора:

- ✓ Линейная модель ИВМ РАН (SiB)
- ✓ Модель с квадратичной нелинейностью (И.М.Рыжова)

Расчёты по модели И.М.Рыжовой



# Программная реализация конструктора



Конструктор реализован в виде самостоятельной программы на языке Fortran 2008. Реализованы:

- модульная структура, в т. ч. разделены решатель и конфигурации модели;
- объектный подход к пулам, потокам и множителям;
- полиморфизм множителей относительно вида функциональной зависимости;
- возможность решения системы уравнений с параметрами, различающимися на широтно-долготной сетке и по типам пулов;
- система автоматического отслеживания технических ошибок.

# Модель пожаров

- Формулировка модели лесных пожаров модели CLM4.0 (Thornton et al., 2010)

- Площадь пожаров = число пожаров \* средняя площадь пожара
- Число пожаров (число возгораний \* факторы):

$$N_f = N_i f_b f_m f_{se}$$

- Частота возгораний = молнии + «человеческий фактор»:

$$N_i = (I_n + I_a)$$

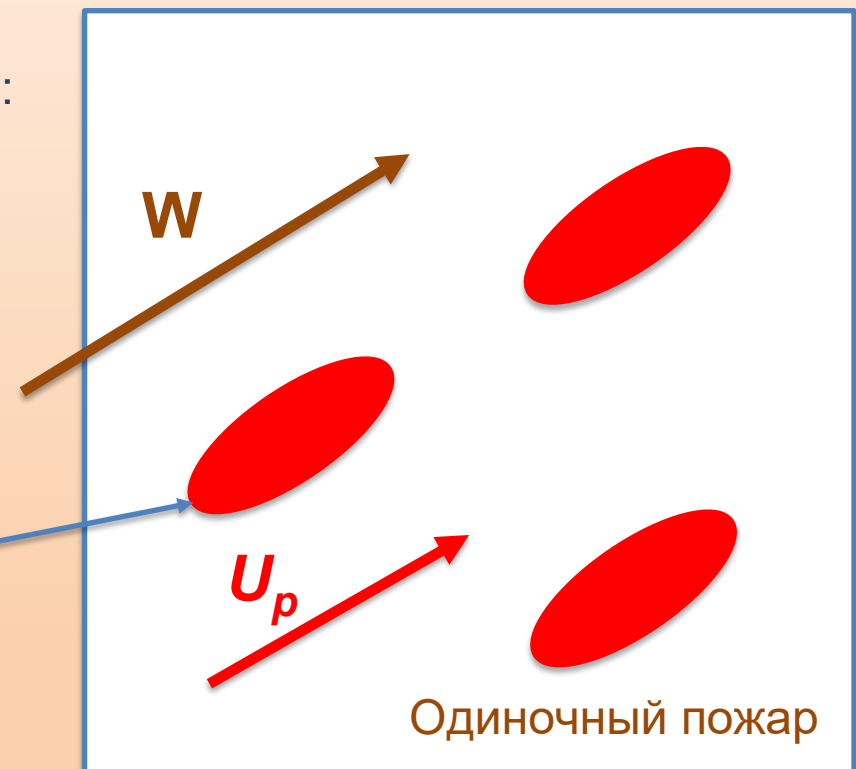
- Площадь среднего пожара:

$$a^* = \frac{\pi u_p^2 \tau^2}{4L_B} \left(1 + \frac{1}{H_B}\right)^2$$

- Скорость распространения пожара определяется скоростью ветра, количеством и горючестью органики:

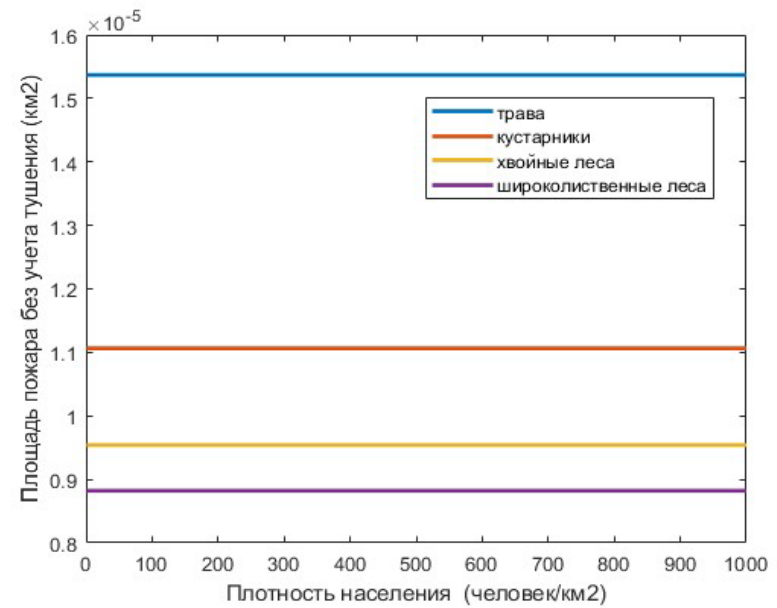
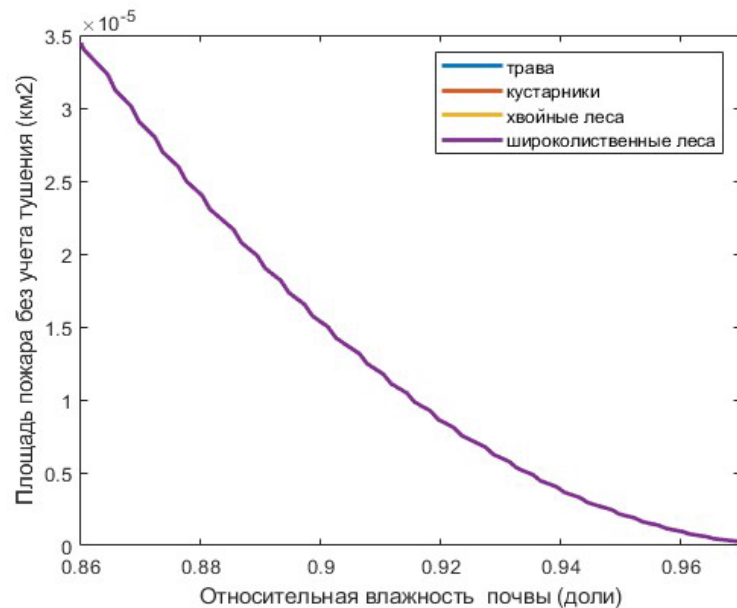
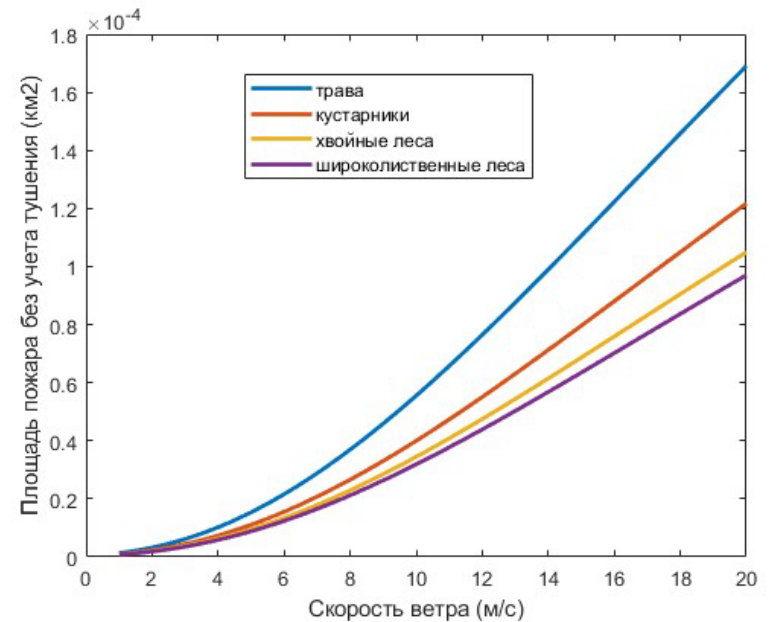
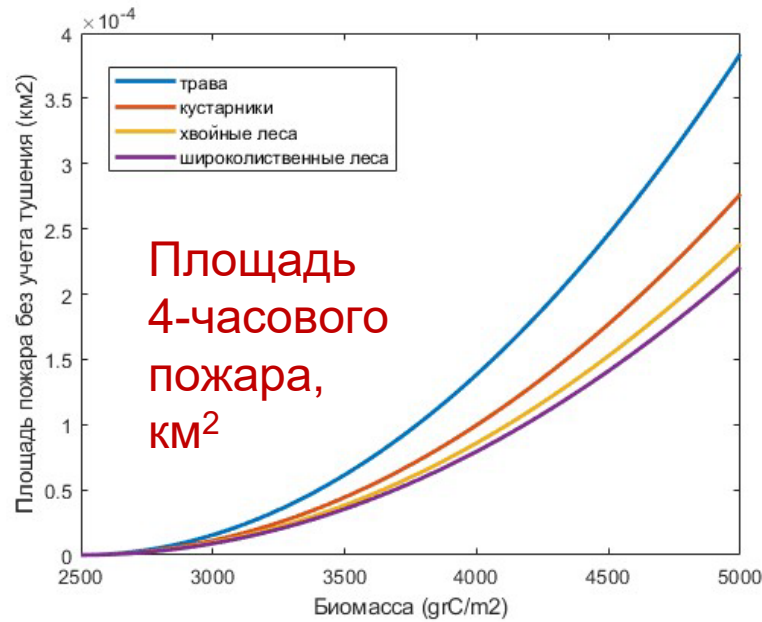
$$u_p = u_{max} C_m g(W)$$

Ячейка модели





# Эксперименты на чувствительность автономной модели пожаров к входным переменным



Модель включается в блок деятельного слоя ИВМ РАН-МГУ ...

# Существующие и перспективные потребности в вычислительных ресурсах

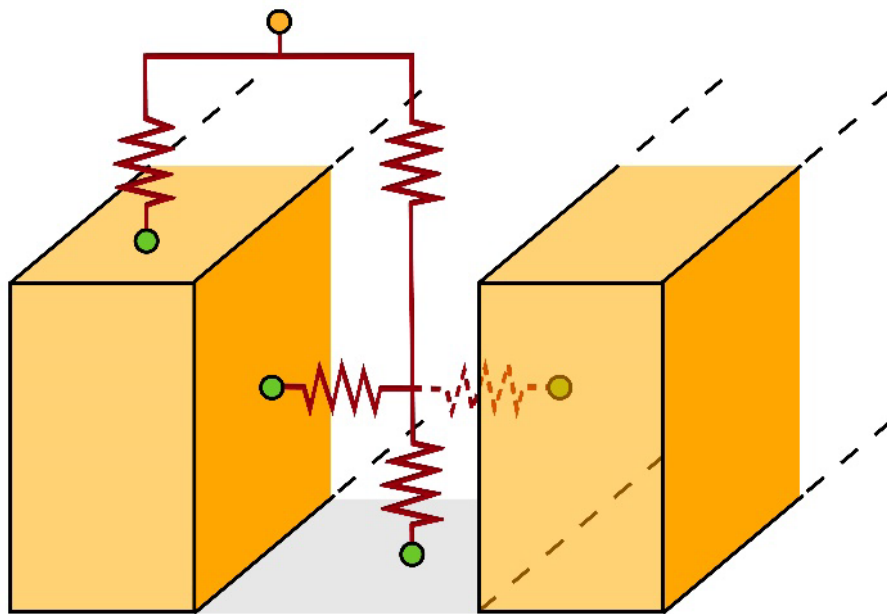
## Параметры модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ

Параметры модели	Текущие	Перспективные
Размер ячейки, км.	50	1
Размер расчетной сетки (количество ячеек в расчетной сетке), ед.	$10^6$	$10^9$
Временной шаг исследования, ч.	1	1
Количество временных шагов исследования, ед.	$10-10^6$	$10-10^8$
Общая длительность исследуемого процесса, с.	1 сут – 100 лет	1 сут – 10 000 лет
Количество одновременно исследуемых процессов, ед.	-	-
Общее количество вычислительных экспериментов, ед.	100	100
Затраты машинного времени на 1 эксперимент, сут.	1	1
Общая длительность выполнения вычислительной задачи, сут.	90	90

**Спасибо за внимание!**

# Модели городского полога

(доклад М.И.Варенцова)

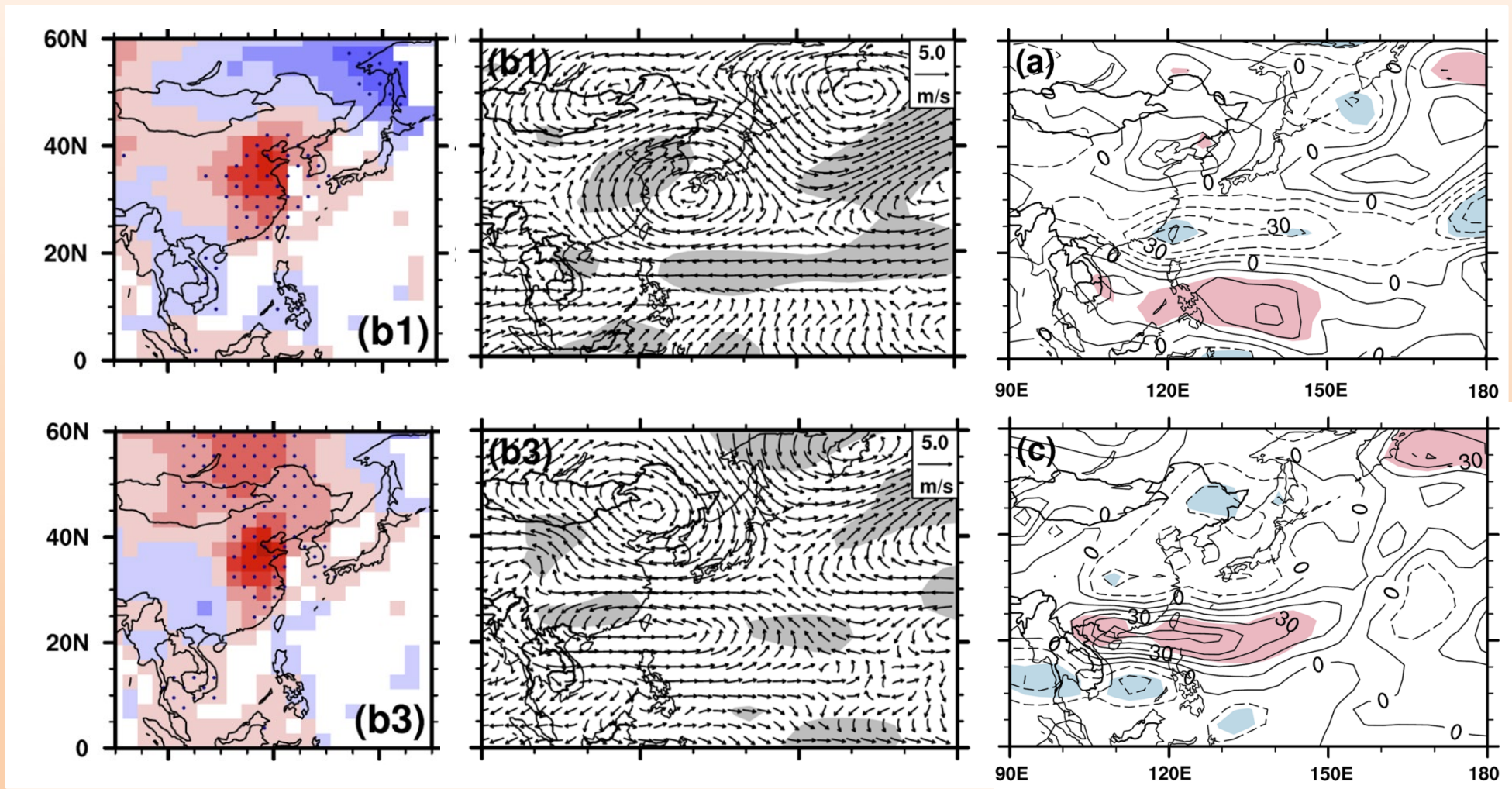


Town Energy Balance (TEB)  
[Masson, 2000]

- Физические процессы моделируются внутри городского каньона;
- Уравнения теплового баланса решаются отдельно для поверхности крыши, дороги и стены;
- Позволяют учитывать антропогенные потоки тепла, городскую растительность, «зеленые крыши» и др.
- Могут применяться для оценки метеорологической комфортности внутри города



# Влияние урбанизации на общую циркуляцию атмосферы



Chen et al. (2016).

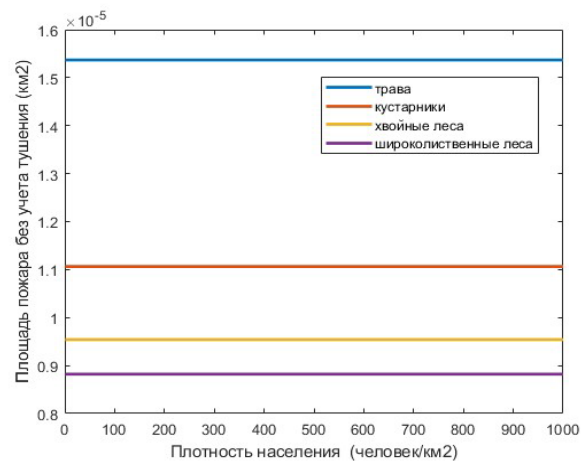
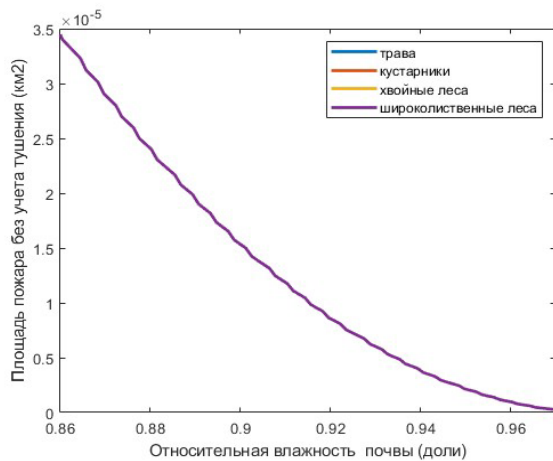
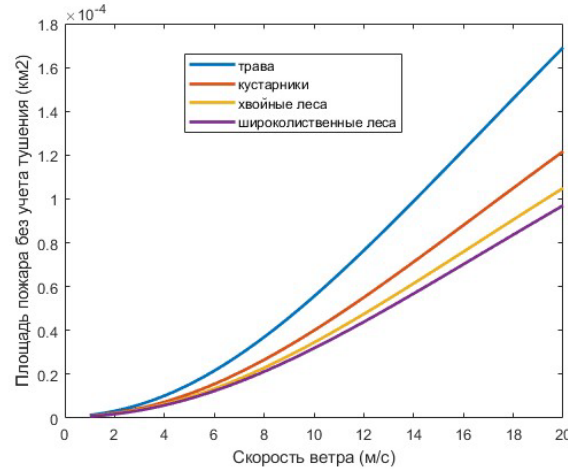
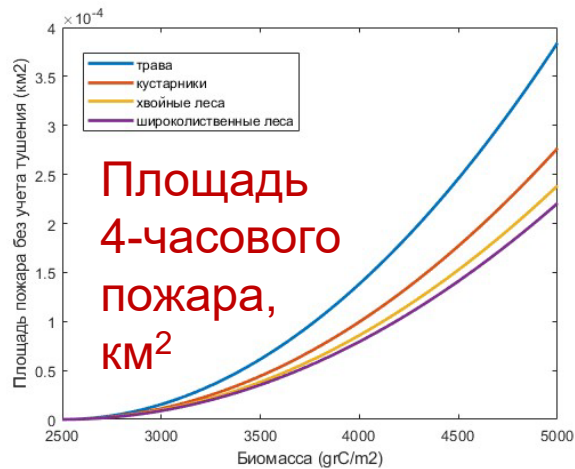
Large-scale urbanization effects on eastern Asian summer monsoon circulation and climate

# Текущие работы (до конца 2023 г.)

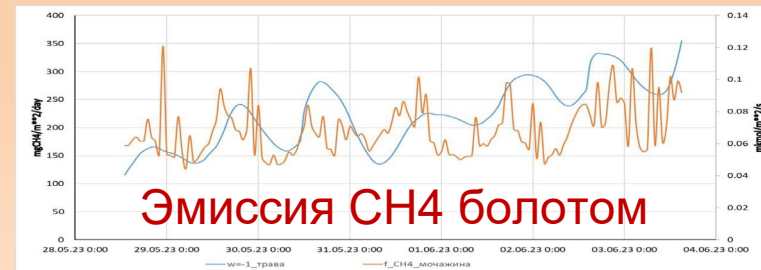
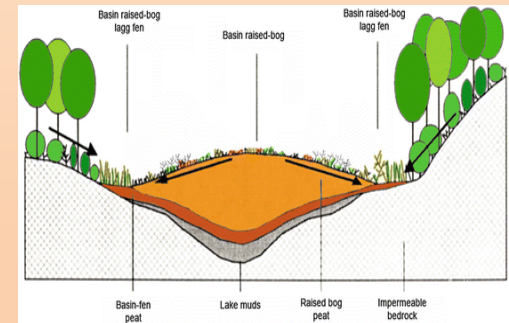
- Модель пожаров (из модели CLM)
- Модель торфонакопления в болотах ИФА РАН
- Рабочий прототип модели азотного цикла

## Эксперименты на чувствительность автономной модели пожаров к входным переменным

- Использование вырубок по данным Рослесхоза в углеродной модели
- Введение площадей управляемых и резервных лесов



Василий Богомолов и соавт.  
«Моделирование теплообмена и потоков метана в болотных экосистемах». Секция Консорциума 4.



# Статус внедрений компонент в TerM и INMCM

	Разработка/тесты в автономном режиме	Внедрение и тесты в TerM	Внедрение и тесты в INMCM
Система препроцессинга TerMPS	+	+	
Модель озера LAKE	+	+	+/-
Модель водохранилищ LAKE-C	+		
Модель пожаров	+		
Модель С болот ИФА РАН	+	+/-	
Модель С сельского хозяйства	+/-		
Модель городского полога ТЕВ	+		

# Команда

- Статистика
- Фото

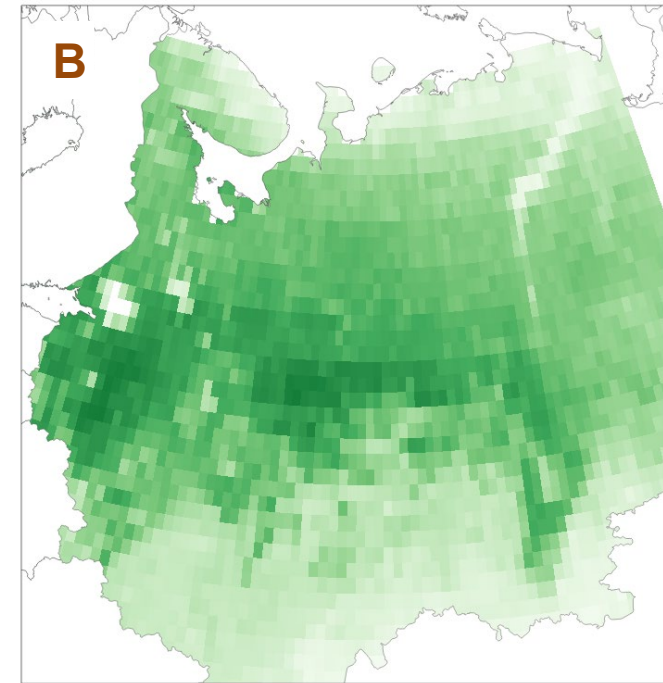
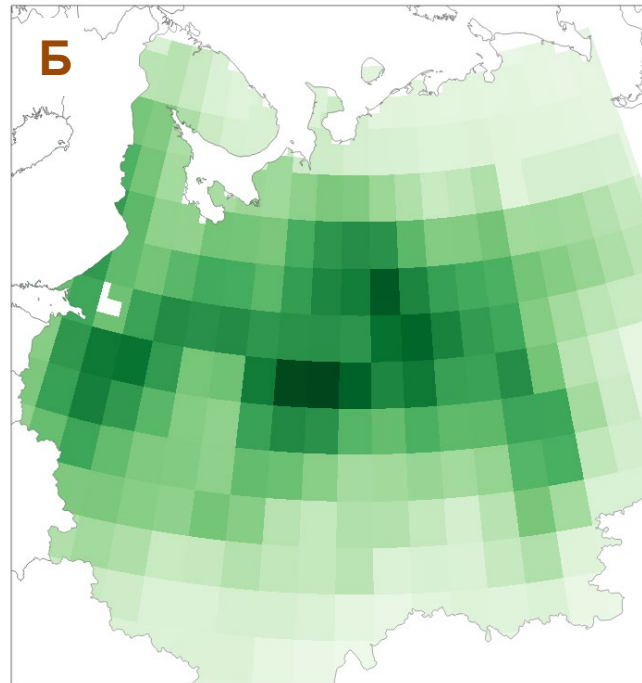
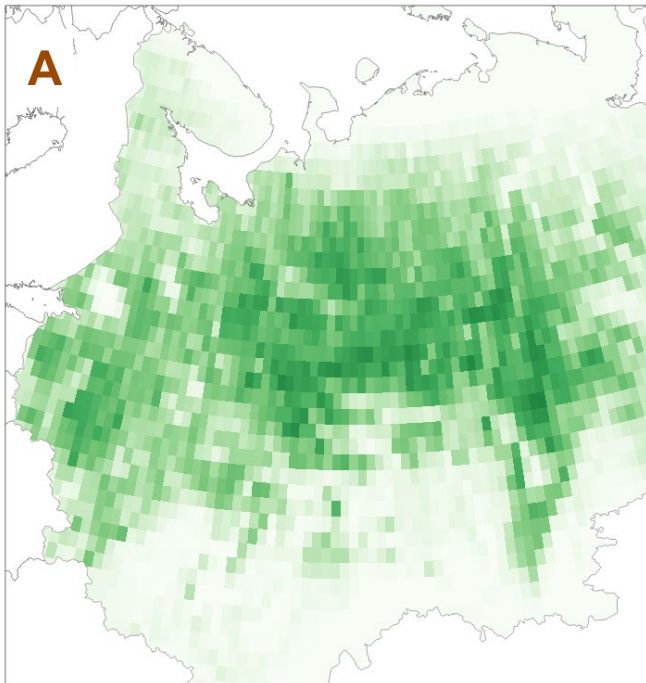


# Углерод в растительности

Данные ДЗЗ ИКИ РАН по запасу  
стволовой древесины  
(mean = 4.28 кг/м<sup>2</sup>)

TerM: начальное условие –  
контрольная точка  
климатической модели  
(mean = 4.61 кг/м<sup>2</sup>)

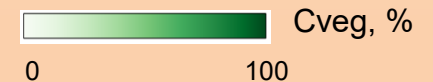
TerM: распределение к 2020 г.  
(mean = 6.30 кг/м<sup>2</sup>)



## Параметры расчета:

- 1991-2020 гг.;
- атмосферное воздействие -- ERA5;
- Данные ДЗЗ по объёму древесины переводились в С учётом плотности древесины 600 кг/м<sup>3</sup>;
- Данные TerM – сумма по всем типам растительности;

$$r_{A-B} = 0.83$$



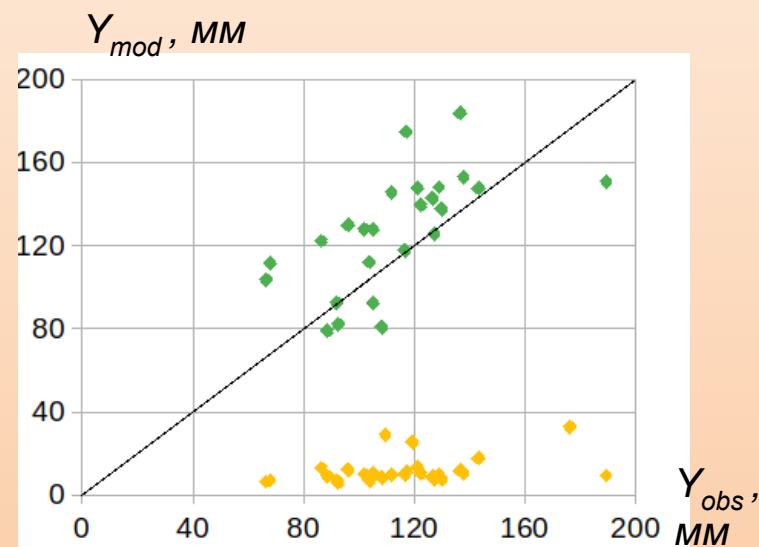
# Задачи в рамках ВИП ГЗ

- Переработка программного кода к **модульной архитектуре**
- Профилировка и оптимизация **вычислительной эффективности**
- Программное обеспечение для подготовки **входных данных о параметрах подстилающей поверхности**
- Процедуры расчёта **эмиссии углекислого газа и метана** (1) управляемыми лесами, (2) искусственно-обводнёнными и искусственно осушенными территориями, (3) сельскохозяйственными территориями
- Усовершенствованная схема **углеродного и азотного цикла суши** (доклад А.Ю.Черненкова)
- **Внедрение усовершенствованных блоков в МЗС ИВМ РАН**

# Совершенствование описания гидрологических процессов в модели ИВМ РАН-МГУ

*инфильтрация воды в мерзлую почву*

- добавлен учет зависимости гидрофизических характеристик почвы от льдистости (Кулик, 1978)
- обновление данных о географии гидрофизических свойств почвы (Wilson & Henderson-Sellers, 1985 -> SoilGrids, 2021)



Средний слой стока половодья, мм  
(реки бассейнов Сев. Двины, Печоры):

- наблюдения
- модель, исходная
- модель, усовершенствованная

- Слайды про «энерг фокус ЗС»
- Нац модель Земной системы и консорциум ИВМ РАН
- Слайды по речном стоку
- Слайд о лаборатории Швядаса
- Статус по распараллеливанию TerM
- Слайд по статье Вадима
- Слайд с таблицей Фатеева
- Опыты с машинным обучением (Криницкий)
- Конструктор углеродного цикла