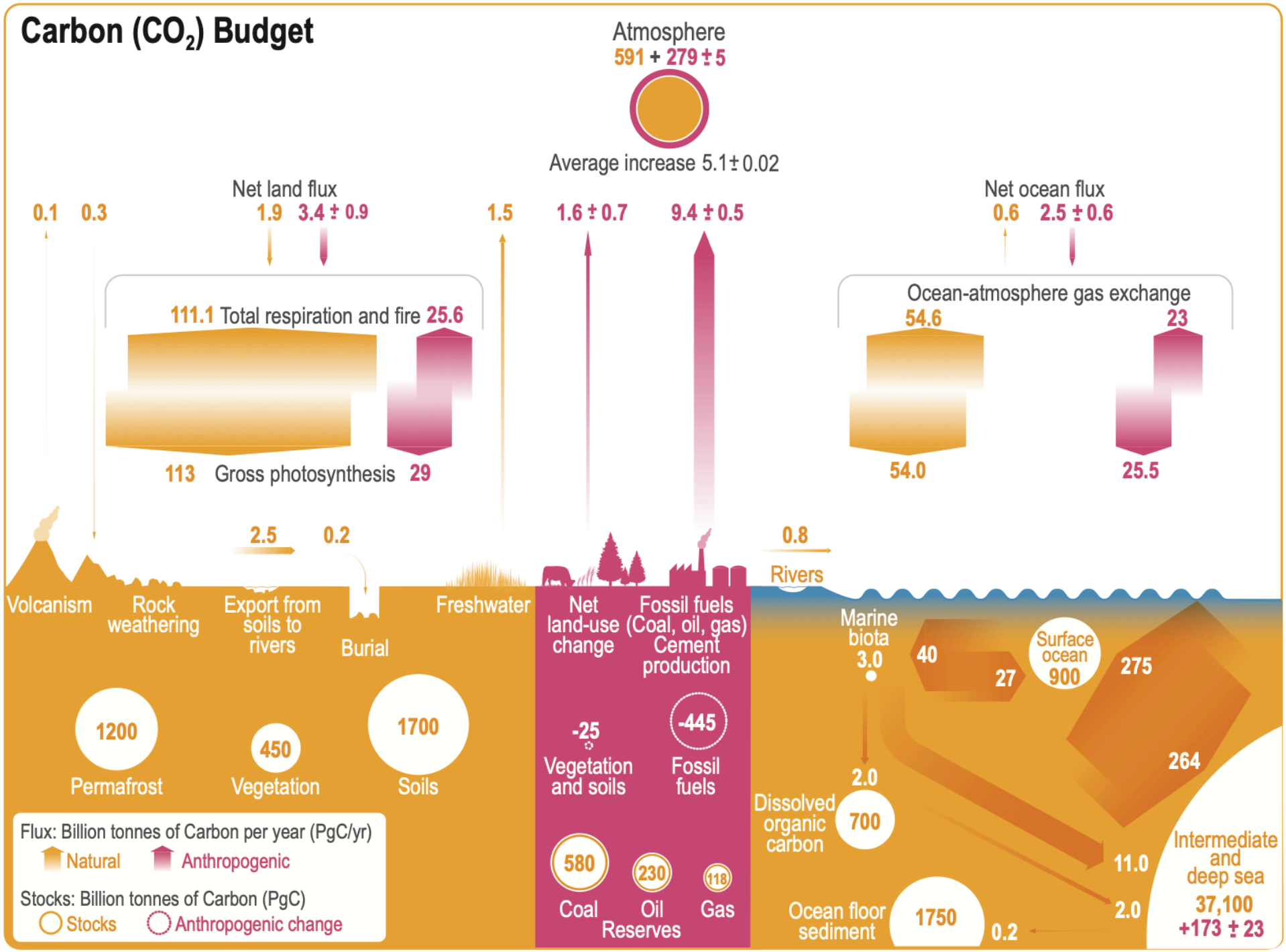
Модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ (TerM): разработка и приложения в автономном режиме и в модели Земной системы

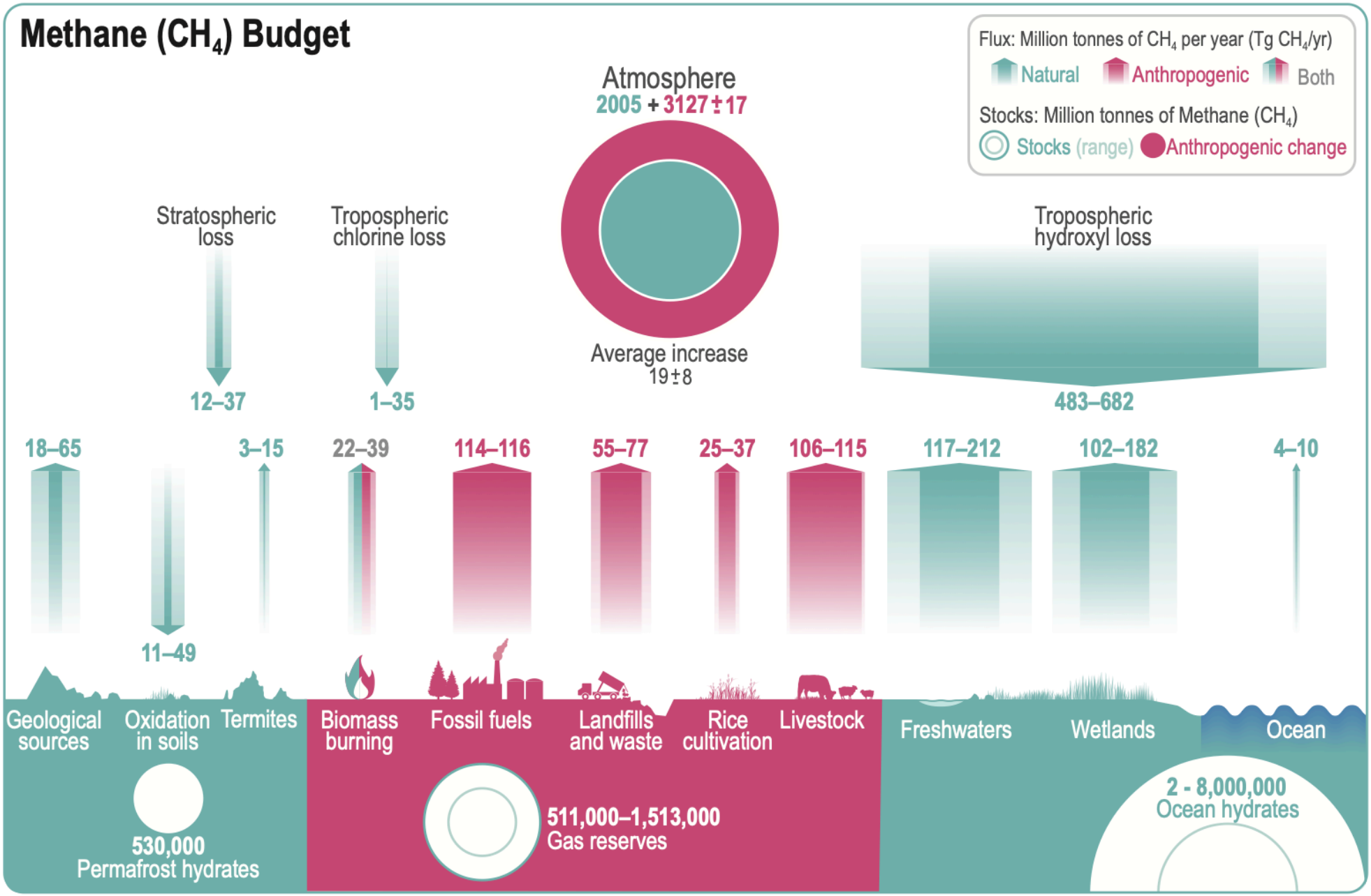
Степаненко В.М.[1,2], А.И.Медведев[1], В.Ю.Богомолов[3,1], А.А.Рязанова[3,1], В.А.Ломов[1,2], А.Ю.Черненков[4], Г.М.Файкин[1], С.К.Шангареева[5,1], М.И.Варенцов[1], М.А. Тарасова[8,1], В.И.Суязова[1], В.А.Романенко[6,1], А.Л.Энтин[2,1], И.М.Рыжова[7]

«Национальная модель Земной системы: теория, технологии и результаты», Сириус, 20 февраля 2024 г.

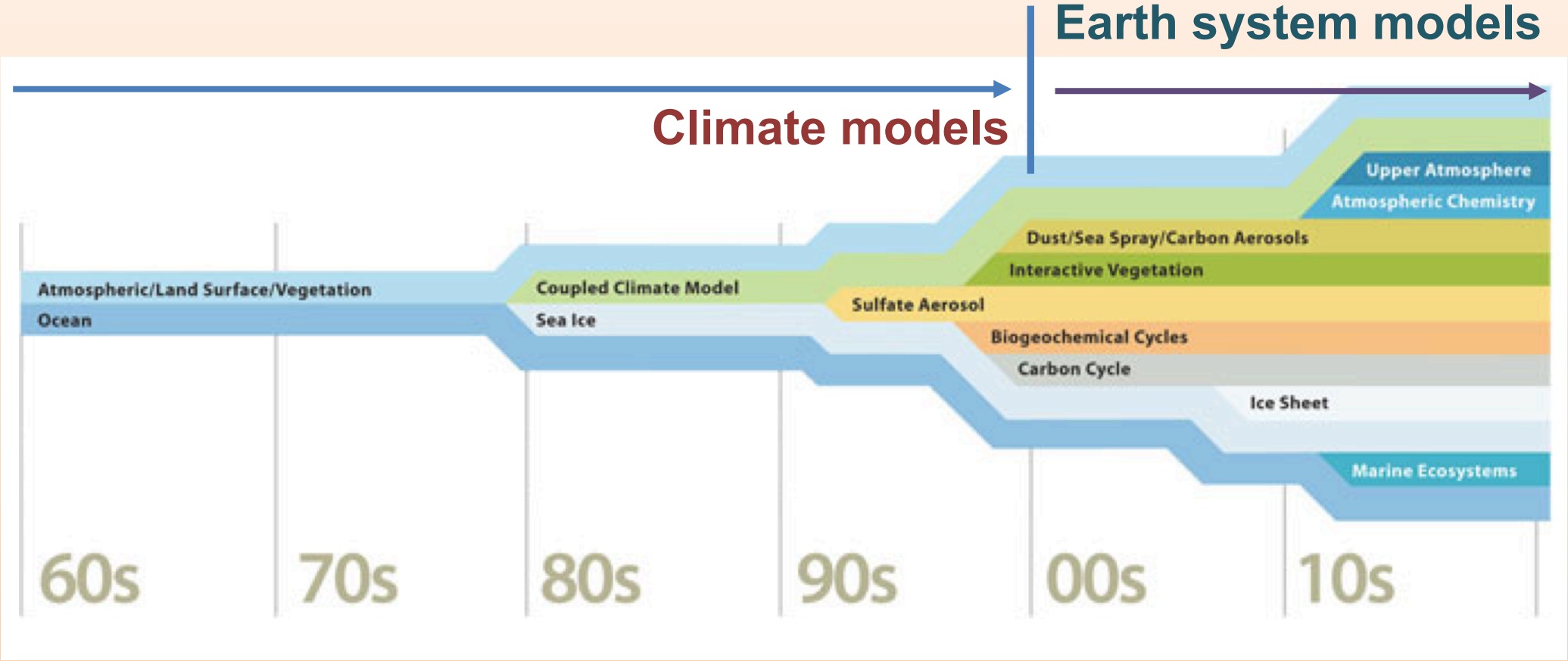
Задачи в рамках ВИП ГЗ

- 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**


Carbon (CO_2) Budget
Atmosphere
591 + 279 ± 5
Average increase 5.1 ± 0.02
Net land flux
0.1
0.3
1.9
3.4 ± 0.9
1.5
1.6 ± 0.7
9.4 ± 0.5
Net ocean flux
0.6
2.5 ± 0.6
111.1 Total respiration and fire 25.6
113 Gross photosynthesis 29
Ocean-atmosphere gas exchange
54.6
23
54.0
25.5
2.5
0.2
0.8
Rivers
Volcanism
Rock weathering
Export from soils to rivers
Burial
Freshwater
Net land-use change
Fossil fuels (Coal, oil, gas) Cement production
Marine biota 3.0
40
27
Surface ocean 900
275
264
1200
Permafrost
450
Vegetation
1700
Soils
-25
Vegetation and soils
-445
Fossil fuels
2.0
Dissolved organic carbon
700
11.0
2.0
Intermediate and deep sea
37,100
+173 ± 23
580
Coal
230
Oil
118
Gas
Reserves
Ocean floor sediment
1750
0.2
Flux: Billion tonnes of Carbon per year (PgC/yr)
Natural
Anthropogenic
Stocks: Billion tonnes of Carbon (PgC)
Stocks
Anthropogenic change

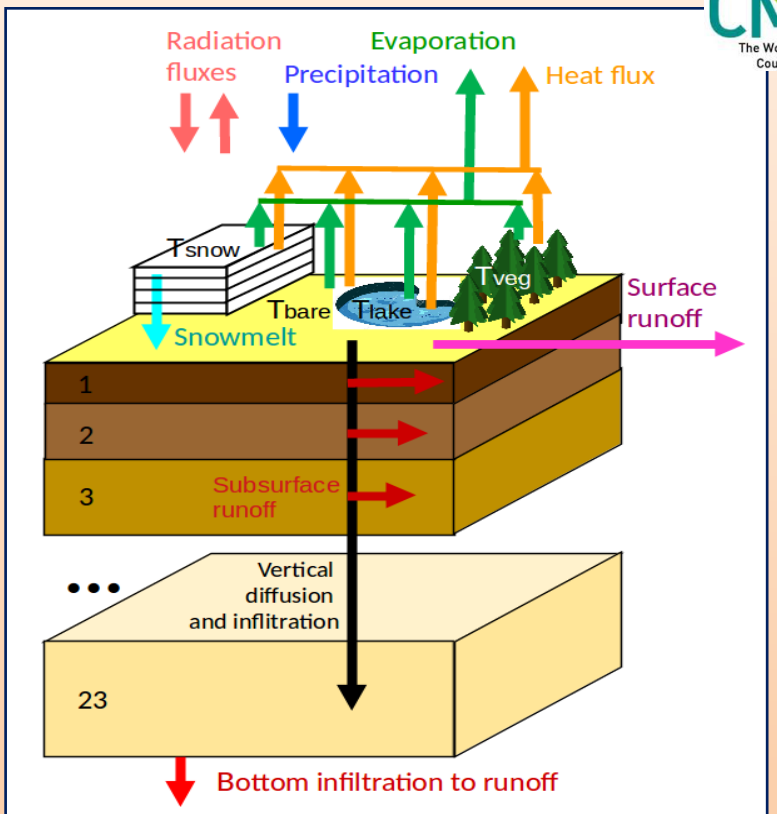

Methane (CH_4) Budget
Flux: Million tonnes of CH_4 per year (Tg CH_4/yr)
Natural
Anthropogenic
Both
Stocks: Million tonnes of Methane (CH_4)
Stocks (range)
Anthropogenic change
Atmosphere
2005 + 3127 ± 17
Average increase
19 ± 8
Stratospheric loss
12–37
Tropospheric chlorine loss
1–35
Tropospheric hydroxyl loss
483–682
18–65
11–49
3–15
22–39
114–116
55–77
25–37
106–115
117–212
102–182
4–10
Geological sources
Oxidation in soils
Termites
Biomass burning
Fossil fuels
Landfills and waste
Rice cultivation
Livestock
Freshwaters
Wetlands
Ocean
530,000
Permafrost hydrates
511,000–1,513,000
Gas reserves
2 - 8,000,000
Ocean hydrates

Land surface in the Earth system models



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

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



Heat and moisture exchange in a cell of INM RAS-MSU land surface model

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_4 model
- ❑ LAKE model
- ❑ River routing scheme

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

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

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**

Модель Земной системы ИВМ РАН

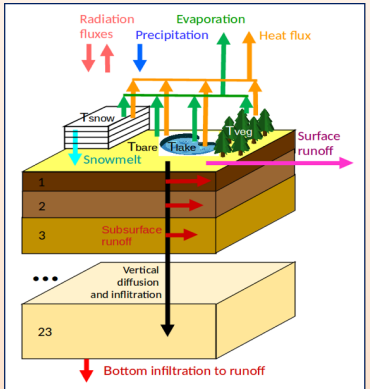
Модель деятельного слоя суши TerM

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

Модель деятельного слоя суши TerM

Реанализ, данные метеонаблюдений или климатических моделей

Применение модели TerM для диагноза углеродного цикла



Heat and moisture exchange in a cell of INM RAS-MSU land surface model

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

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

Наземные локальные измерения

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

Обратное моделирование переноса климатически активных газов → отсутствует

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

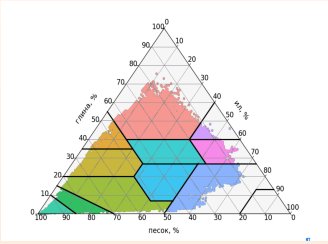
Задача — обеспечение блока деятельного слоя суши и модели климата данными о параметрах подстилающей поверхности.

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**

Архитектура системы подготовки данных о параметрах поверхности TerMPS

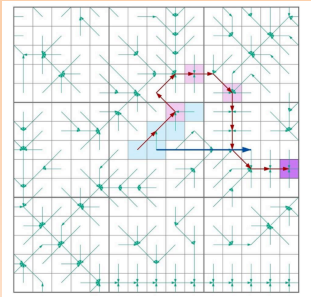
Гранулометрический состав в глобальной почвенной БД (Dai et al., JAMES, 2019)



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*



Уровень 0: элементарные функции агрегирования данных

0 уровень

Python-библиотека

- блок функций для агрегирования данных на произвольную широтно-долготную сетку:
  - расчет среднего взвешенного
  - расчет % содержания
- блок функций для агрегирования данных на произвольную вертикальную сетку (глубина)
- дополнительные функции (чтение/запись данных)

Количественные данные → расчет среднего взвешенного; расчет % содержания

Качественные данные → расчет % содержания

Данные, имеющие вертикальное разрешение (глубина) → блок функций для агрегирования данных на произвольную вертикальную сетку (глубина)

Данные о параметрах поверхности → Количественные данные; Качественные данные; Данные, имеющие вертикальное разрешение (глубина)

Уровень 1: агрегирование частных типов данных

1 уровень

Набор Python программ-обработчиков для каждого набора данных

- алгоритм для обработки каждого типа данных на основе функций из Python-библиотеки

Наборы данных

- качественные данные:
  - данные о типах поверхности
  - данные о присутствии водоемов
- количественные данные:
  - гидрофизические характеристики
  - глубина водоемов
  - данные о параметрах городской застройки
  - данные рельефа (среднее и дисперсия)

Уровень 2: интерфейс пользователя

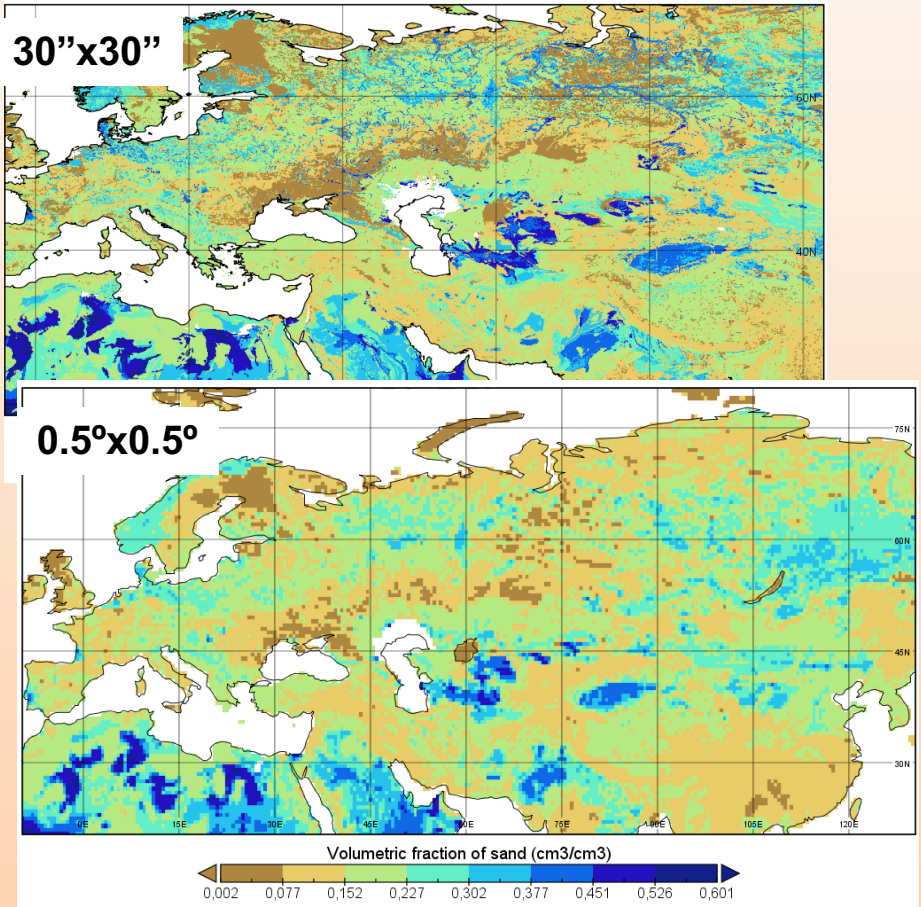
2 уровень

Управляющая Python-программа

- объединяет набор Python-программ 1 уровня для выбранных наборов данных
- в автоматическом режиме генерирует выбранные данные на заданное разрешение

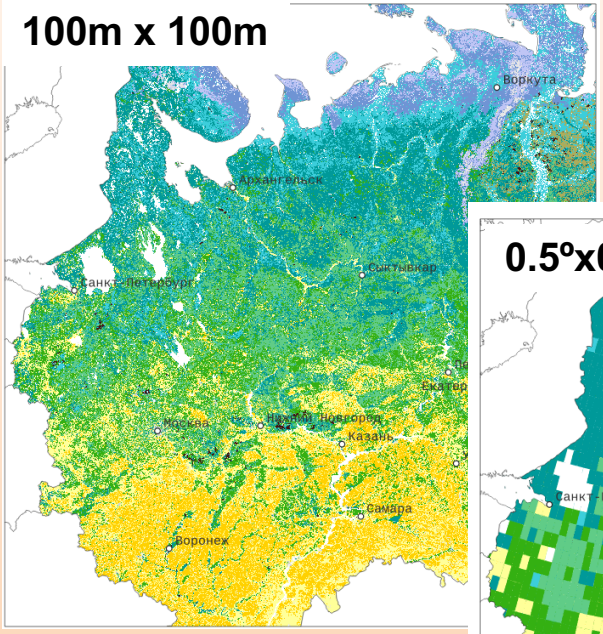
Результаты работы TerMPS

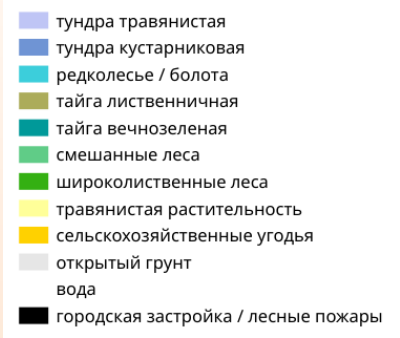
Объемное содержание глины

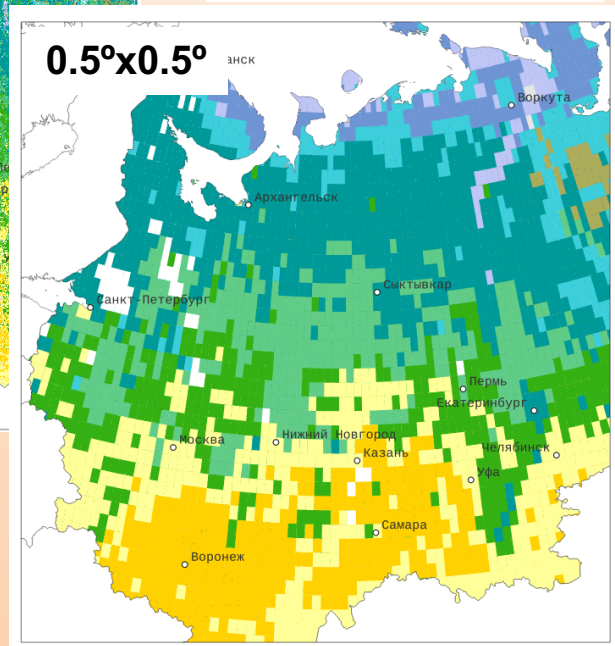


Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shangguan, W., Yuan, H., et al. (2019). A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2996– 3023. https://doi.org/10.1029/2019MS001784

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



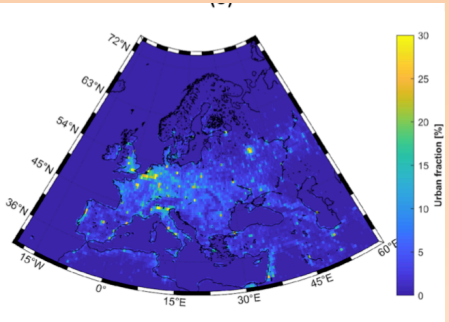


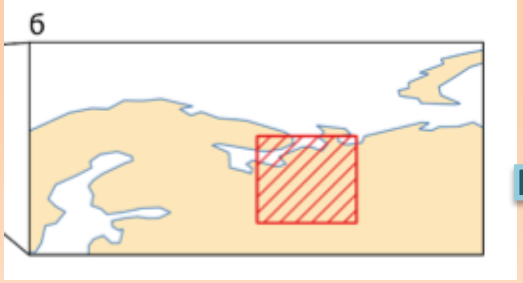


Доминирующий класс растительного покрова в ячейке 0.5x0.5

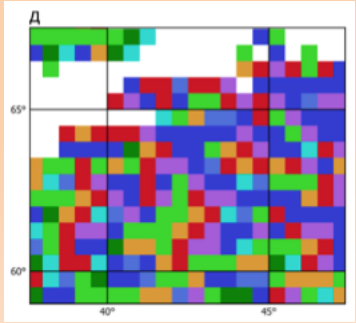
V.A. Egorov, S.A. Bartalev, P.A. Kolbudaev, D.E. Plotnikov, S.A. Khvostikov, Land cover map of Russia derived from Proba-V satellite data, Current problems in remote sensing of the earth from space, 15(2), 2018

Доля урбанизированной поверхности





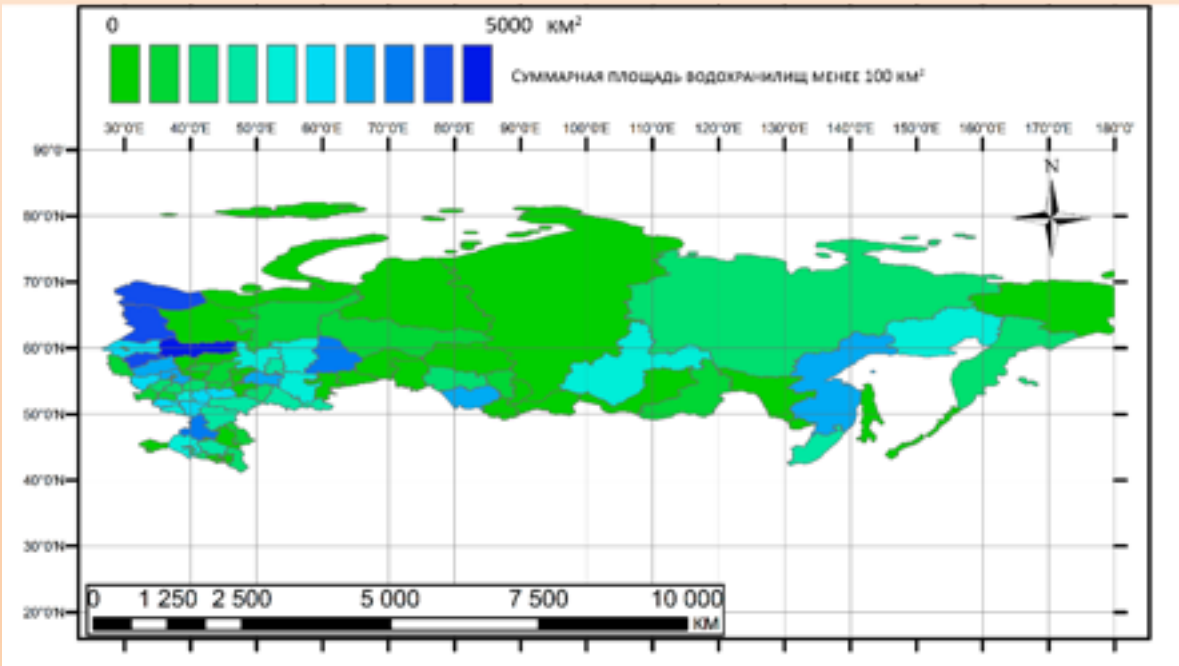
Направления речного стока



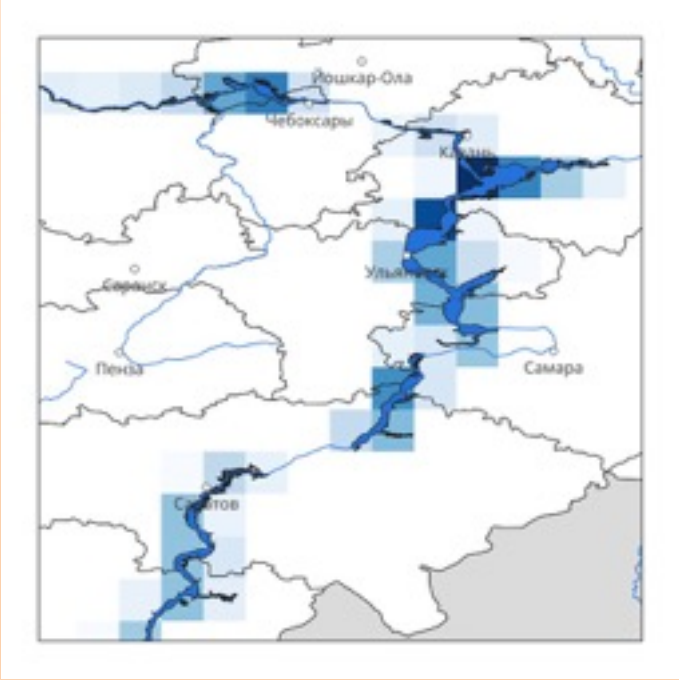
Направления стока: В ЮВ Ю ЮЗ З СЗ С СВ

Данные по площади водохранилищ

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

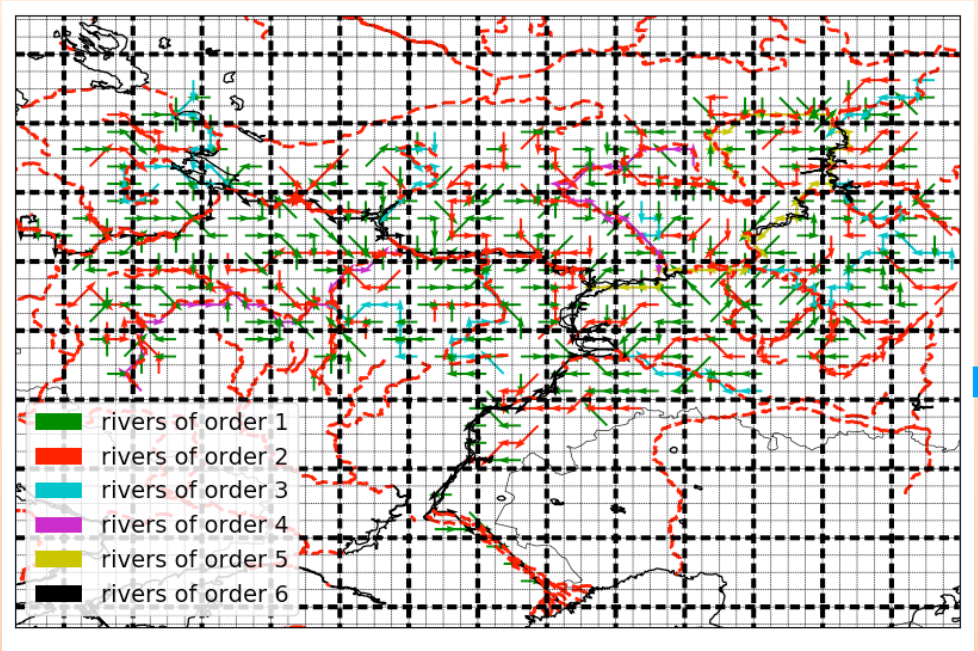


Распределение площади крупных Волжских водохранилищ на регулярную сетку модели деятельного слоя суши



Процедуры оценки эмиссии и поглощения парниковых газов водохранилищами

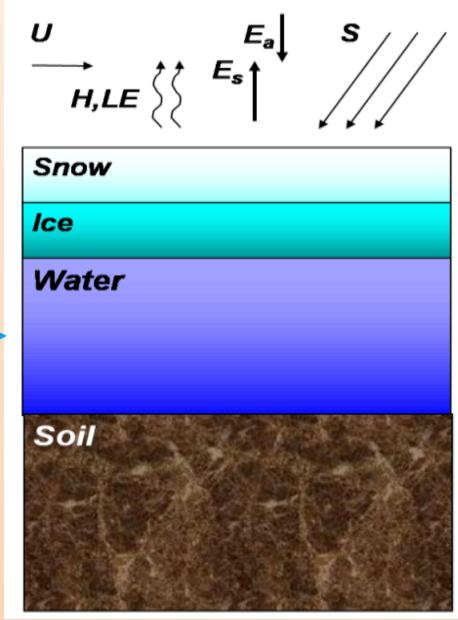
Модель термогидродинамики рек



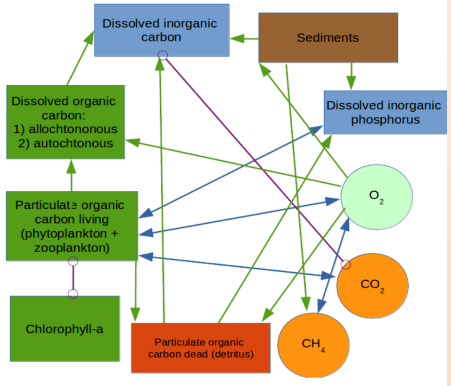
- Модель диффузионной волны для гидродинамики
- Расчёт термического режима

Модель водоёма LAKE3.x

Термогидродинамика



Биогеохимия



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

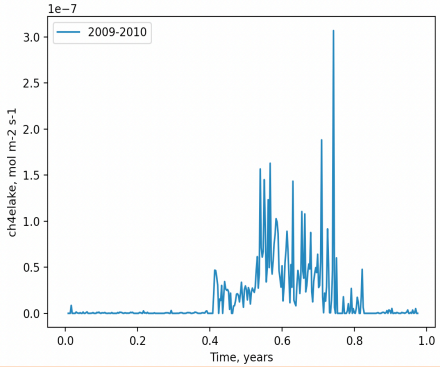
Калибровка модели

SPOTPY

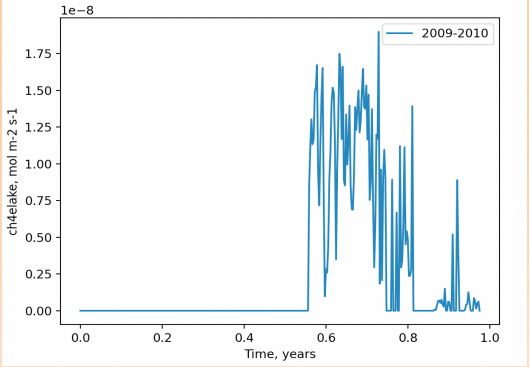
(Методы оптимизации Монте-Карло, ROPE, …)

Пузырьковый поток метана:

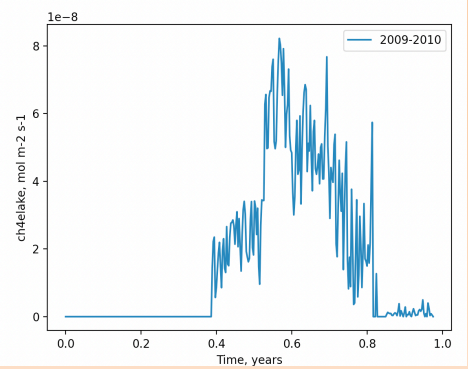
Рыбинское вдхр.



Куйбышевское вдхр.



Волгоградское вдхр.



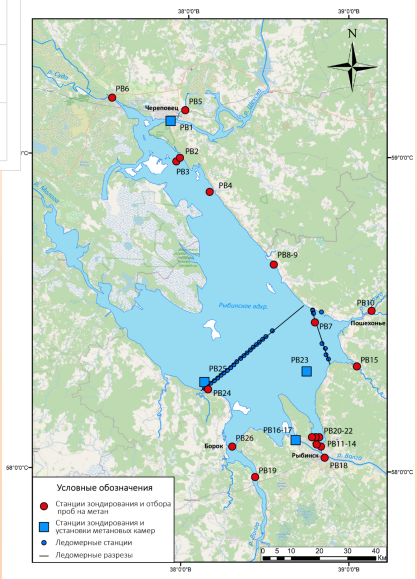
Калибровка модели водохранилищ

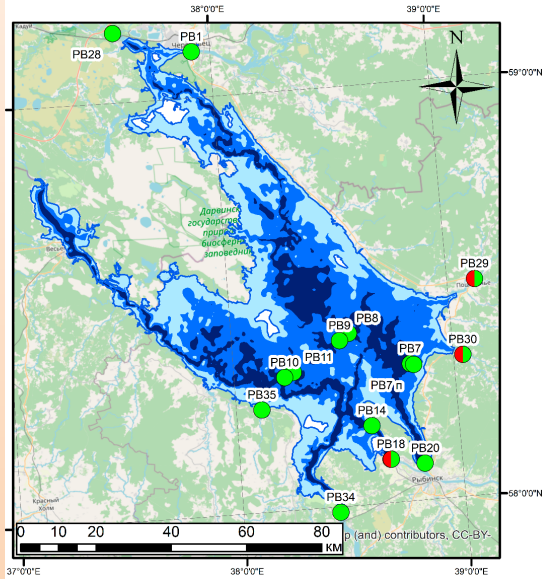
Этапы: 1. Оптимизация температуры 2. Оптимизация кислорода 3.Оптимизация метана

Вертикальный профиль температуры

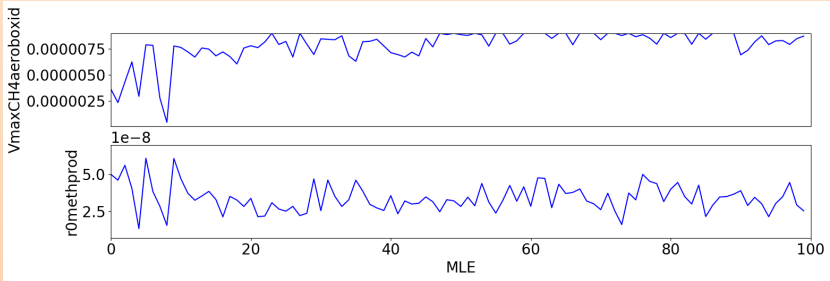
1 – наблюдения ---
2 – до калибровки и подбора правильного форсинга ---
3 – после калибровки ---

Примеры распределения станций натурных наблюдений в разные сезоны на Рыбинском водохранилище

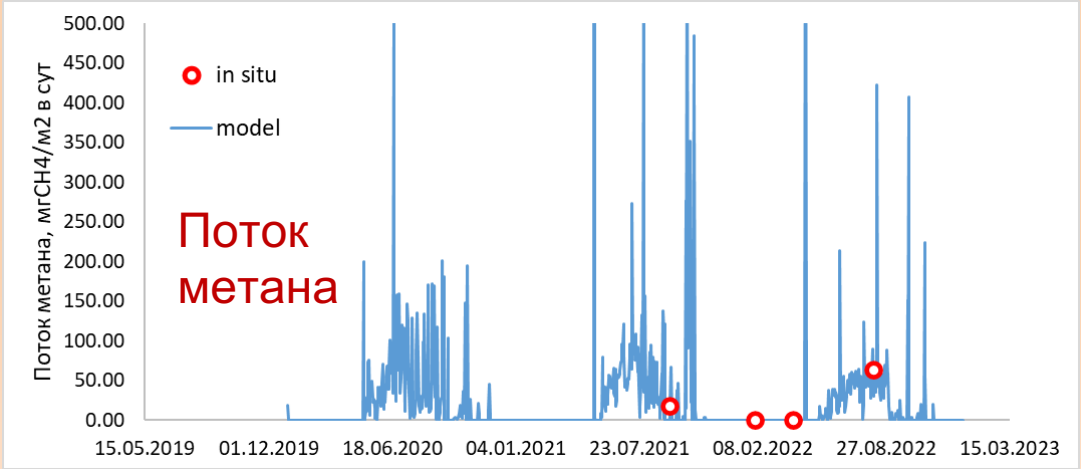




Ход калибровки параметров метановой модели



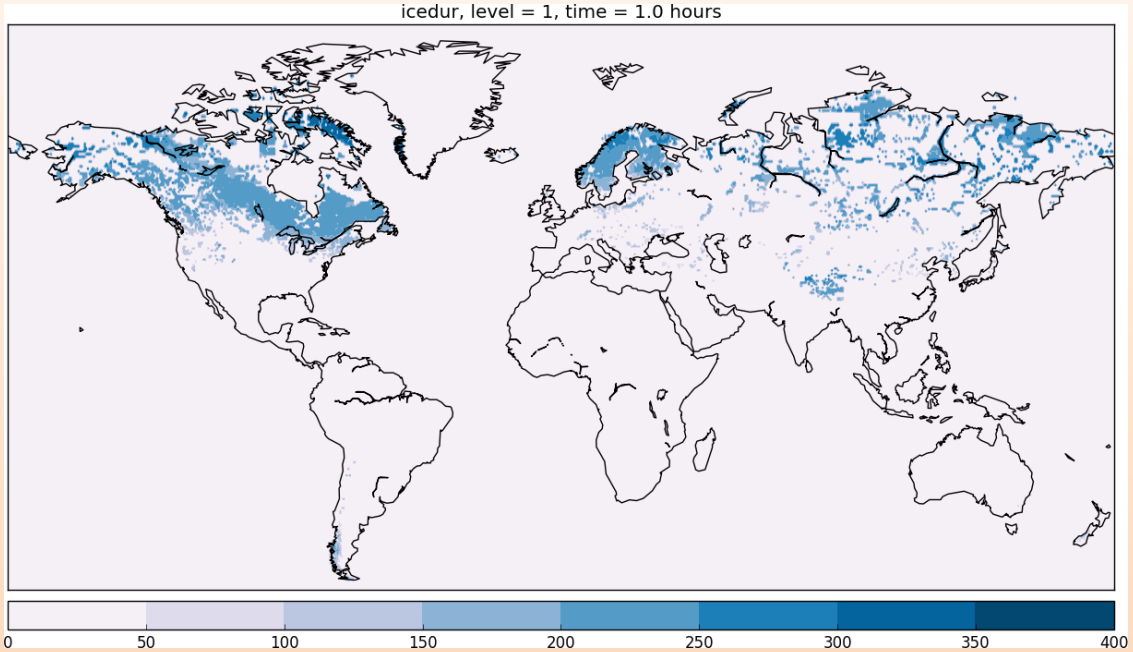
Калибровка на данных 9 вдхр. (2024 г.)



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

Global Heat Uptake by Inland Waters

I. Vanderkelen, N. P. M. van Lipzig, D. M. Lawrence, B. Droppers, M. Golub ... See all authors

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


nature COMMUNICATIONS

ARTICLE

Check for updates

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

Phenological shifts in lake stratification under climate change

R. Iestyn Woolway[1,2], Sapna Sharma[3], Gesa A. Weyhenmeyer[4], Andrey Debolskiy[5,6,7],

Углеродный цикл суши

Уравнения углеродного цикла:

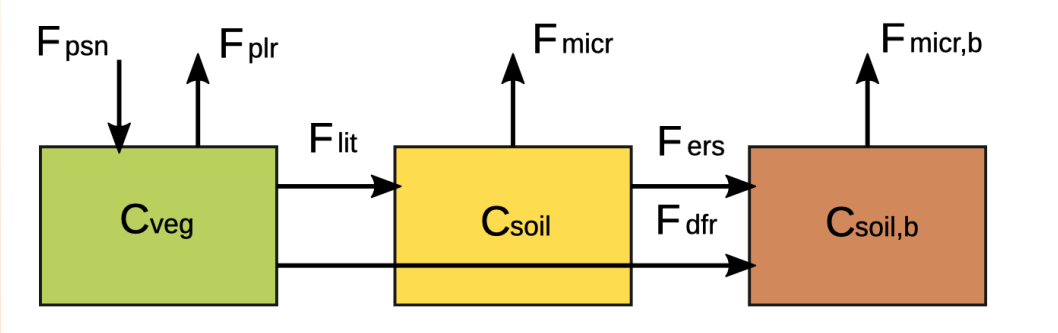
$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = F_{psn} - F_{plr} - \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - F_{dfr,a} - F_{dfr,b}$$

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

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

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:

Cveg — углерод в растительности

Csoil — углерод в почве

Csoil,b — еще один углерод в почве («быстрый»

Генерация:

Fpsn — фотосинтез

Сток (поток в атмосферу*):

Fpln — дыхание растительности

Fmicr — микробное дыхание

Fmicr,b — микробное дыхание 2

Переходы между пулами:

Flit — отмирание и опад растительности

Fdfr — вырубка (двух типов: А и Б)

Fers — 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-Menthen expr.

Rubisco-limitation

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

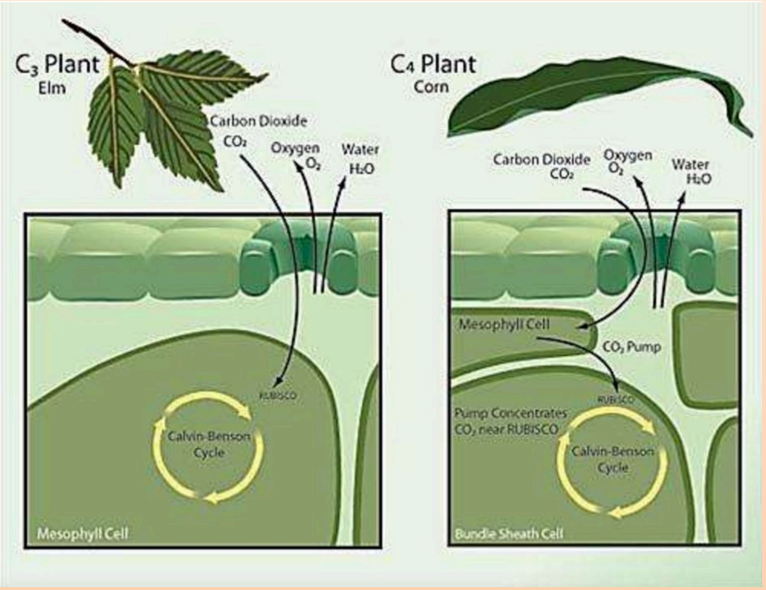
radiation

light-limitation

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

transport of photosynthetic products

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



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

or smoothed modification of min functio

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

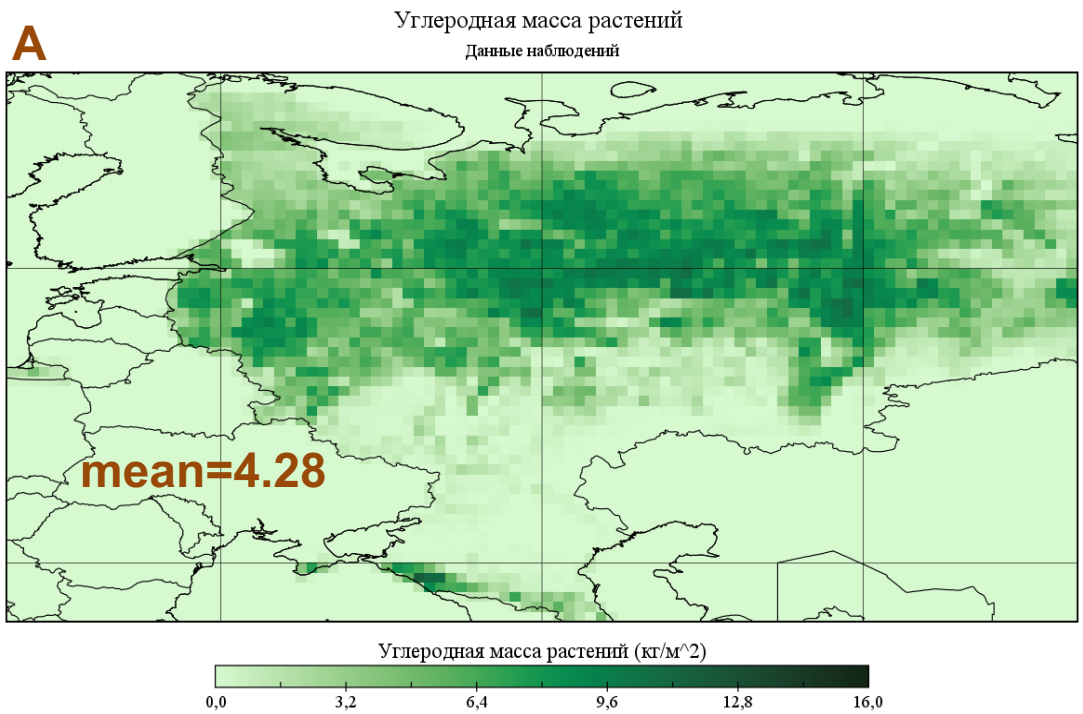
$$\beta_2 W^2 - W(W_p + W_e) + W_p W_e = 0$$

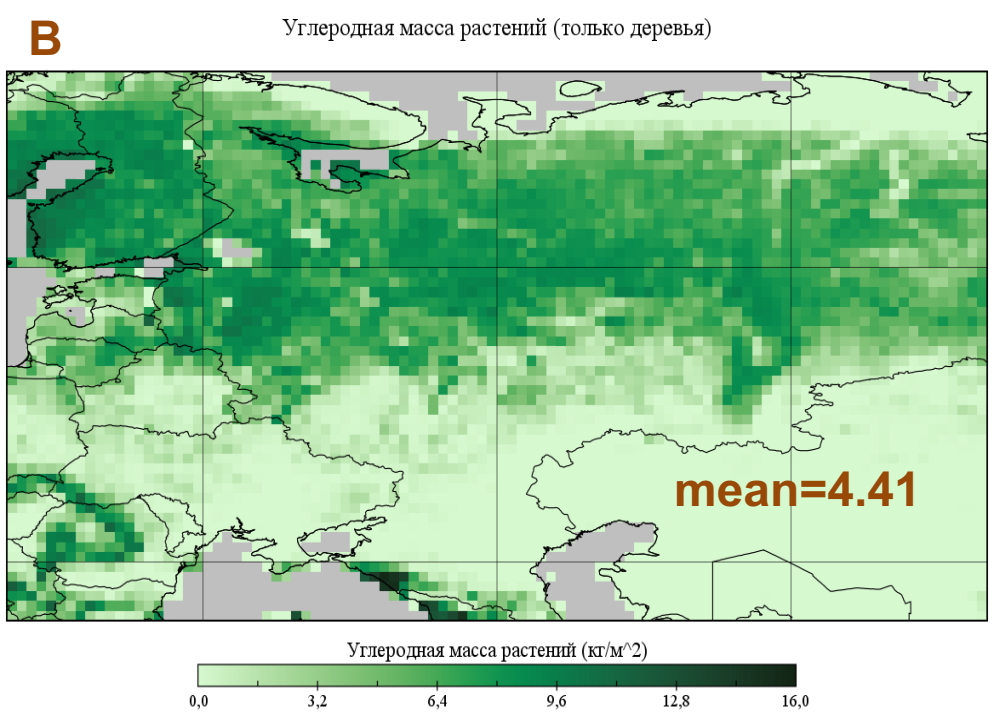
Углерод лесов

(Европейская территория России)

Данные дистанционного зондирования ИКИ РАН (MODIS), углерод древостоя, кг/м²

Результаты модели TerM, кг/м², 2020 г.



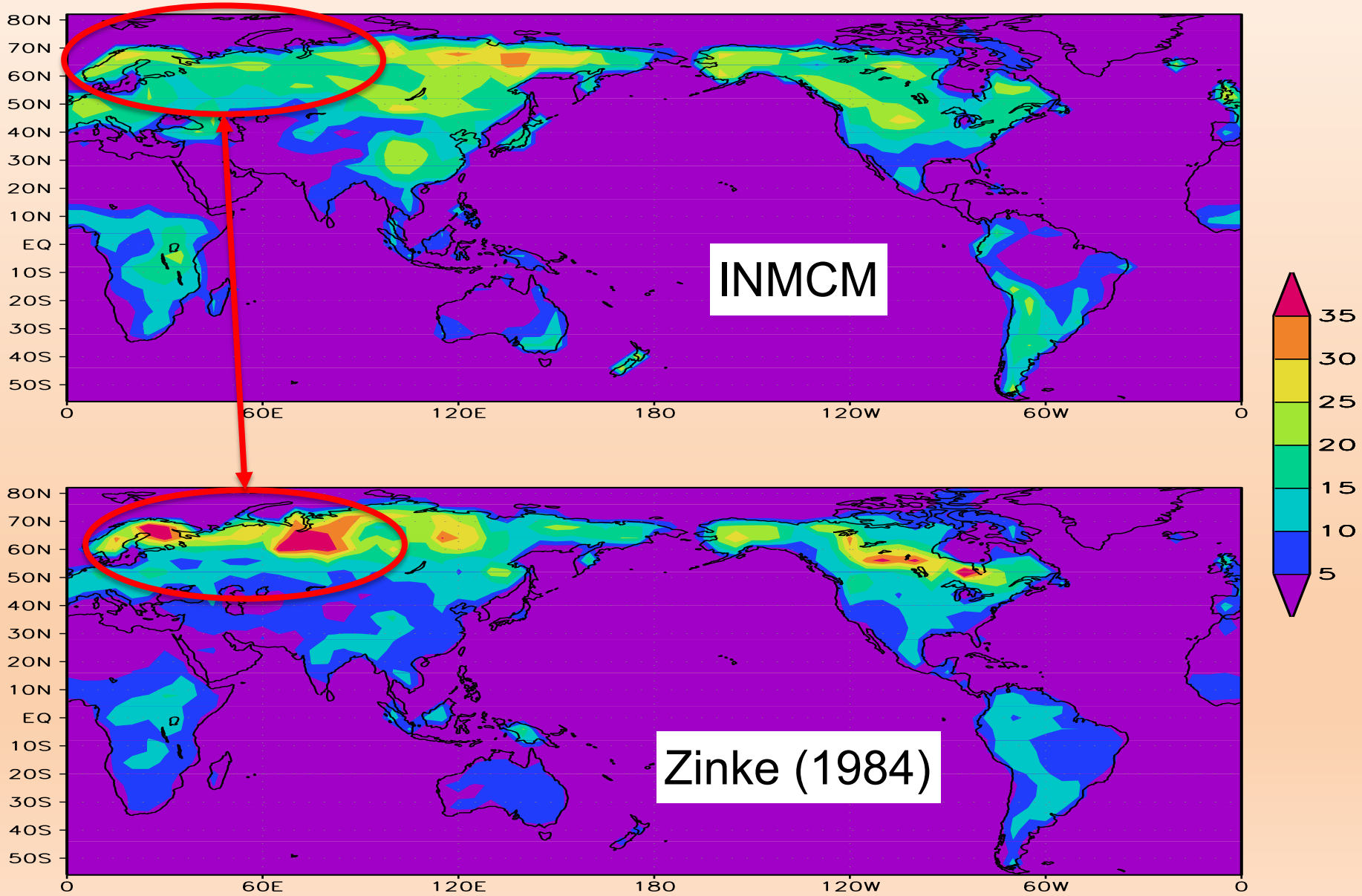


Коэф. простр. корреляции
$r_{A\text{-}B}$ = 0.83

Параметры расчета:

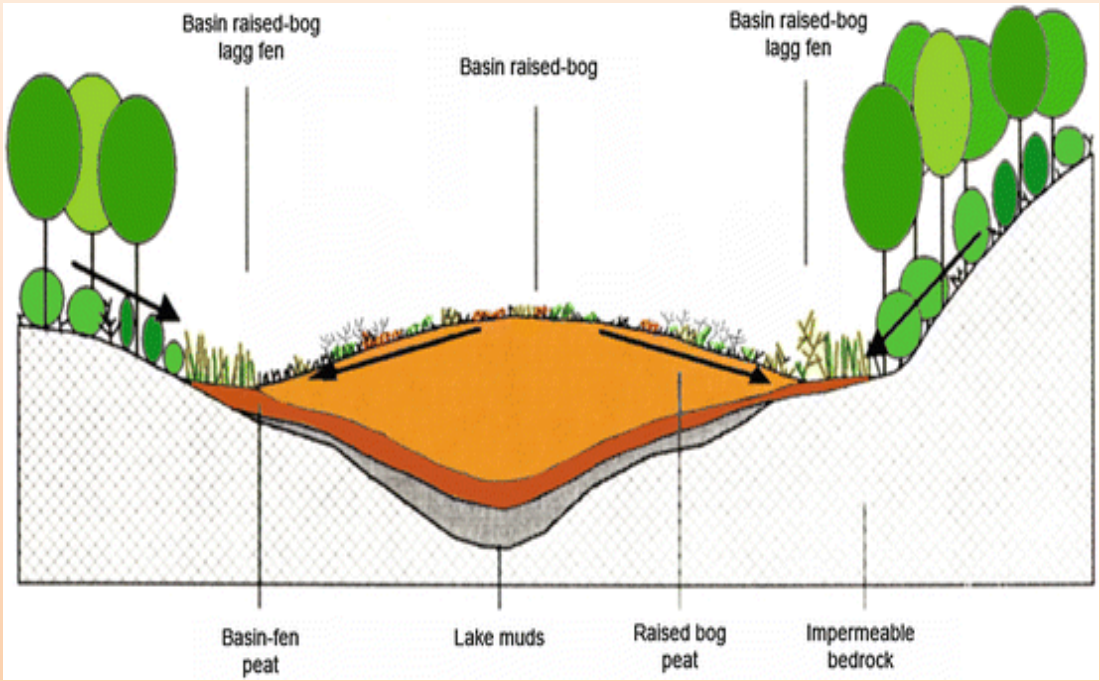
- 1991-2020 гг.;
- атмосферное воздействие – ERA5;
- данные ДЗЗ по объёму древесины переводились в С учётом плотности древесины 600 кг/м³;
- результаты TerM – сумма по всем «высоким» типам растительности.

Углерод почвы (кг/м2) 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 С = опад минус дыхание:

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

Дыхание = сумма дыхания в аэробной и анаэробной зонах:

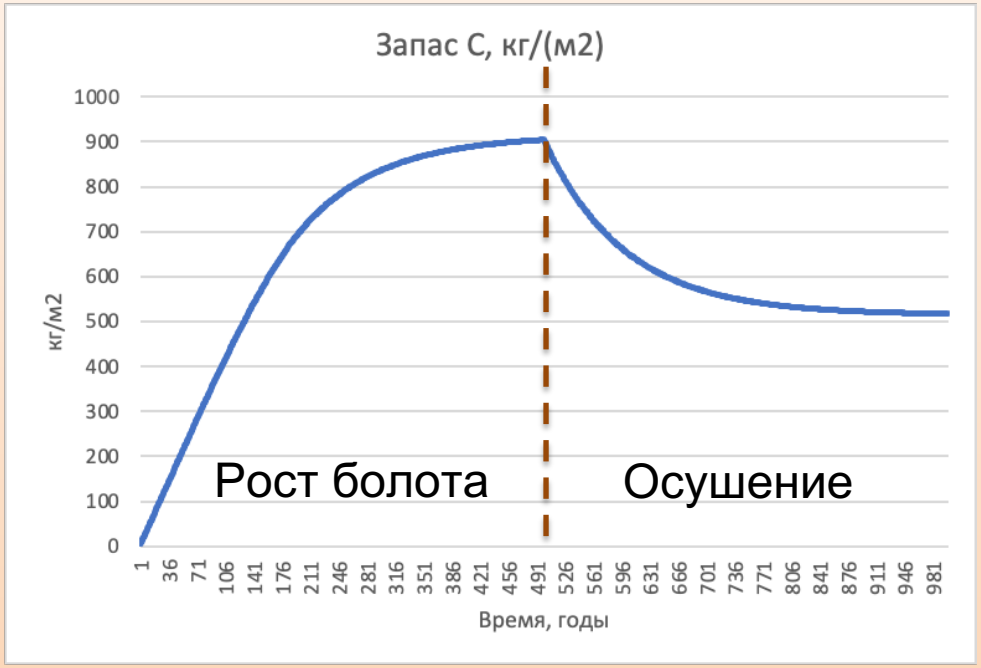
$$F_{mcr,i} = C_{peat,i} * \frac{(z_{peat,i} - z_{GWL,i})R_a + (z_{GWL,i} - z_{MS})R_c}{(z_{peat,i} - z_{MS})}$$

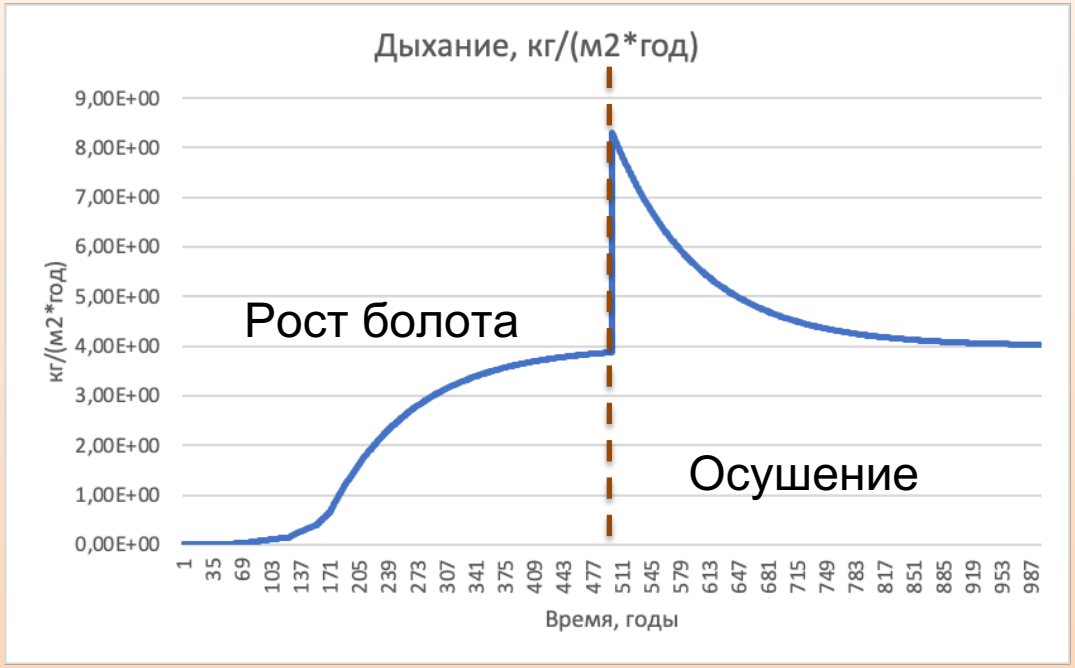
Высота центра болота пропорциональна запасам С:

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

Шаг модели по времени – 1 год

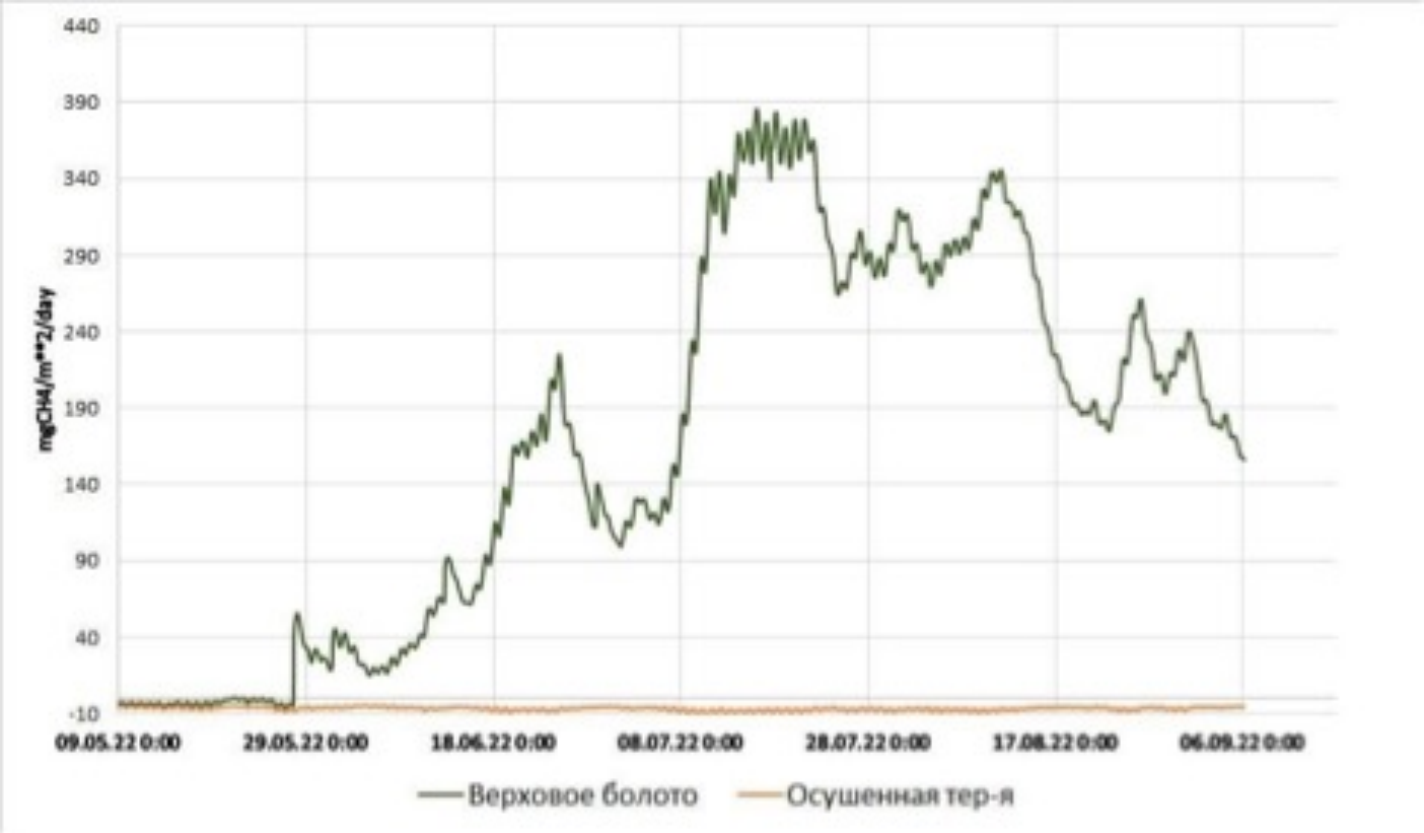
Простой пример: «осушение болота»





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

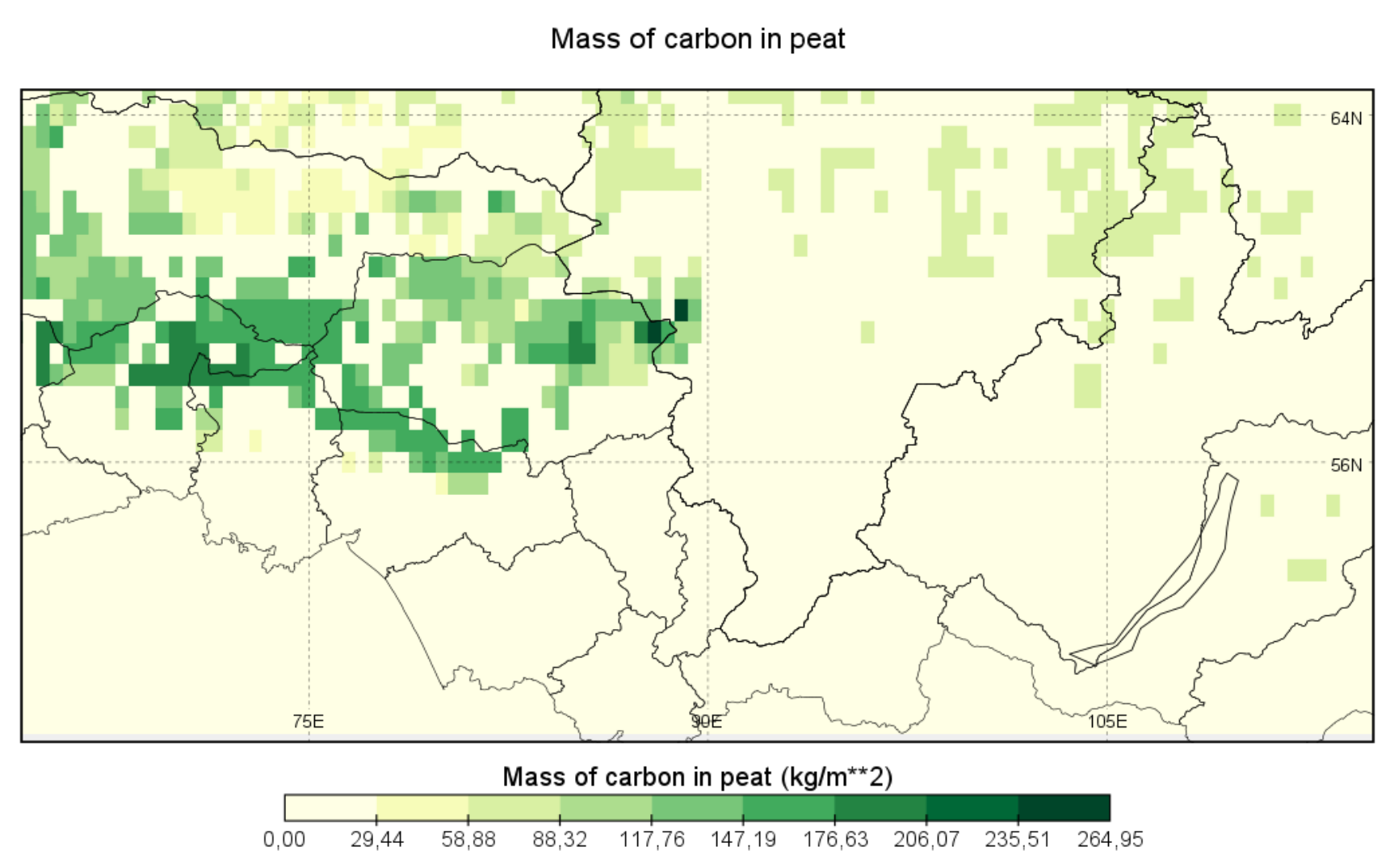
Эффект осушения болота на эмиссию метана в модели ИВМ РАН-МГУ



- 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 0.5ºx0.5º
- 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

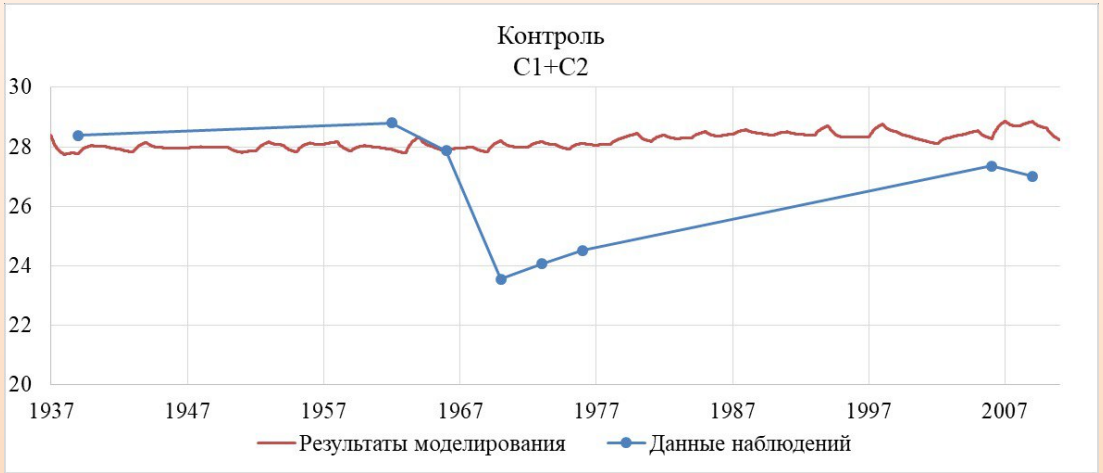
$$\frac{dC_1}{dt} = I - (1-r)kC_1 - rkC_1\left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) + k_d C_2$$

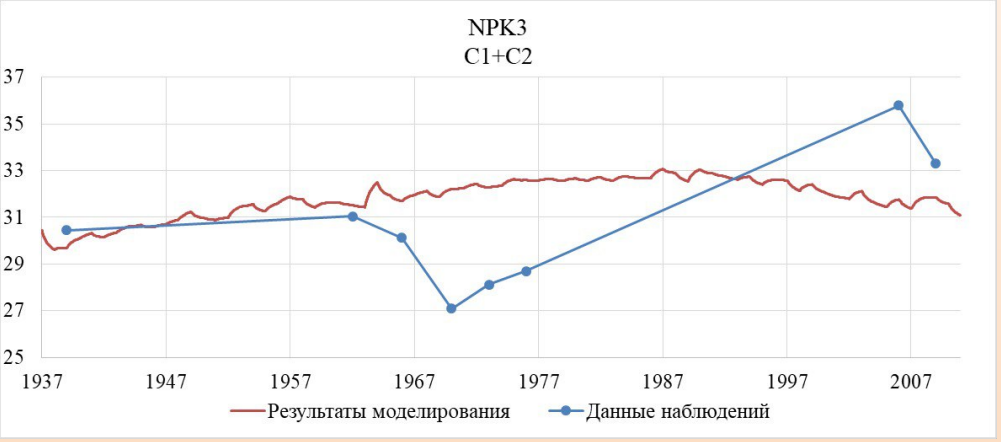
$$\frac{dC_2}{dt} = rkC_1\left(1 - \frac{C_2}{C_m}\right) - k_d C_2$$

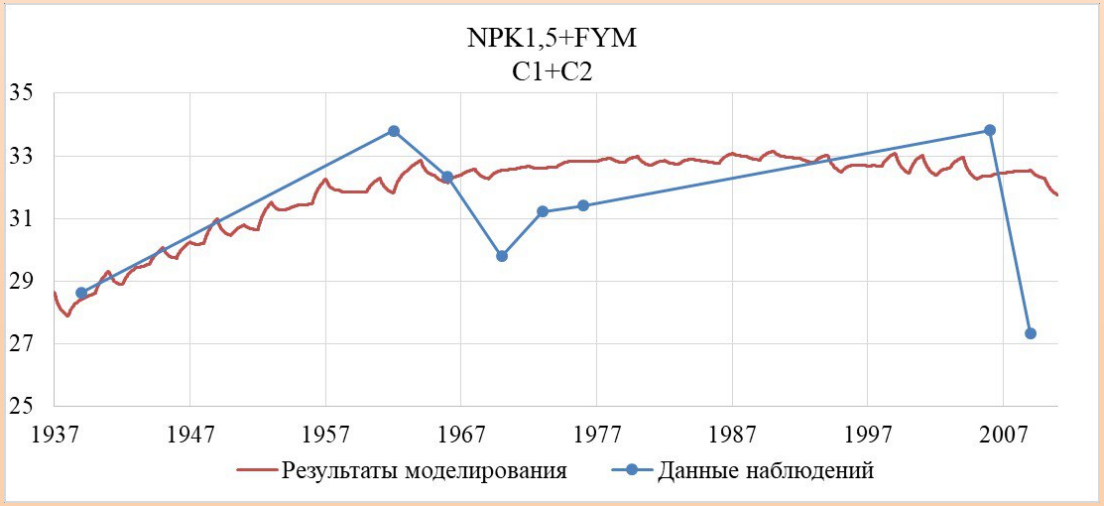
- C_1 – углерод свободного (незащищенного) вещества почвы;
- C_2 – углерод защищенного вещества почвы;
- C_m – максимальное количество органического углерода;
- I – поступление органического углерода в почву;
- r – доля углерода, переходящая в защищенное вещество;
- k- коэффициент скорости разложения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

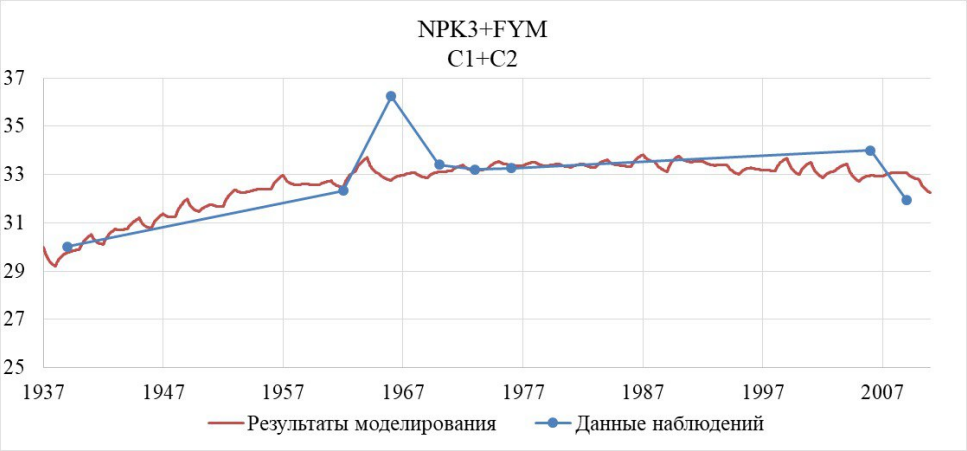
Калибрована для сельскохозяйственных почв!

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









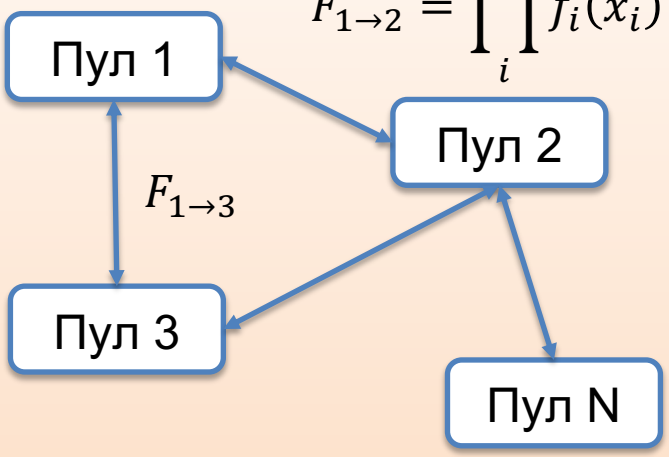
- Поступление органики – **измеренные растительные остатки и органические удобрения**

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.

$$F_{1\to 2} = \prod_i f_i(x_i)$$



Модели, протестированные в рамках рабочего прототипа конструктора:

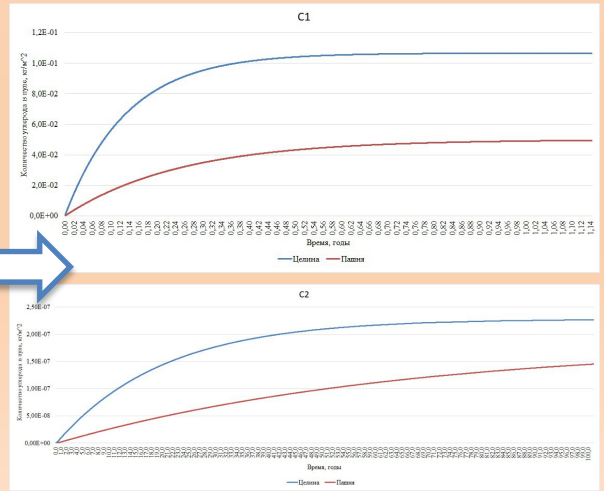
- ✓ Линейная модель ИВМ РАН (SiB)
- ✓ Модель с квадратичной нелинейностью (И.М.Рыжова)

Обобщённая система уравнений конструктора:

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

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

Расчёты по модели И.М.Рыжовой



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»:

$$N_i = (I_n + I_a)$$

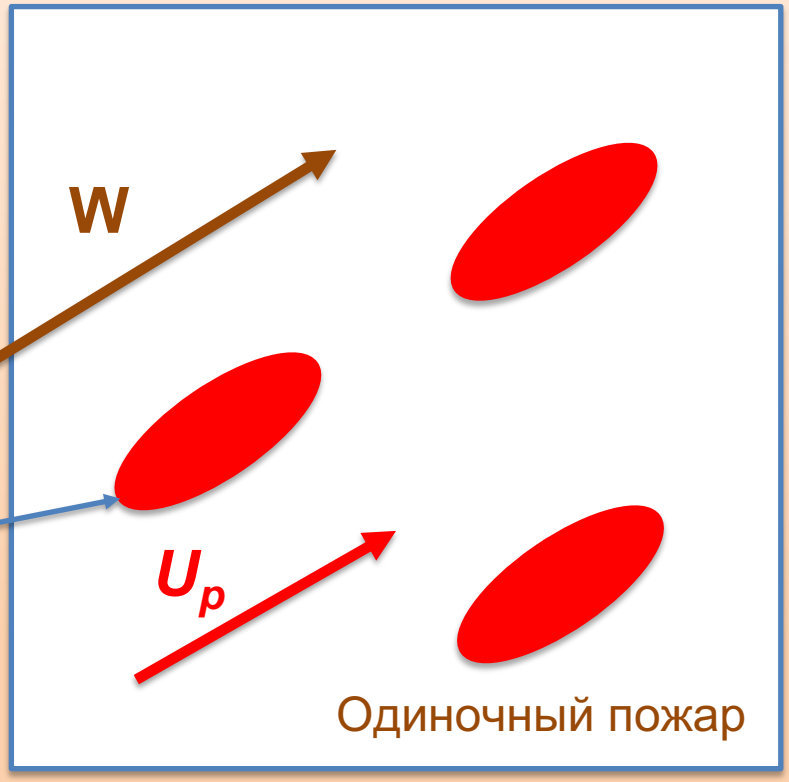
  - Площадь среднего пожара:

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

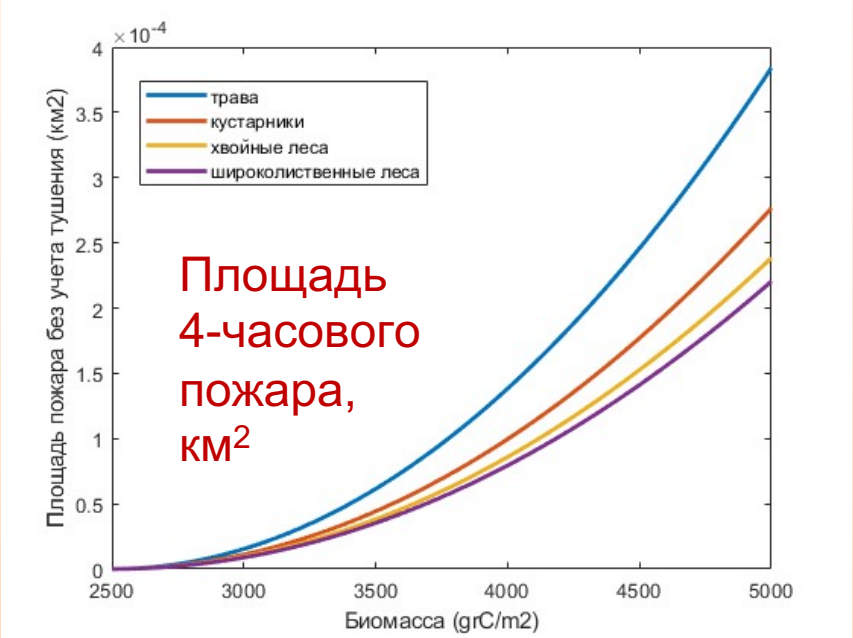
  - Скорость распространения пожара определяется скорость ветра, количеством и горючестью органики:

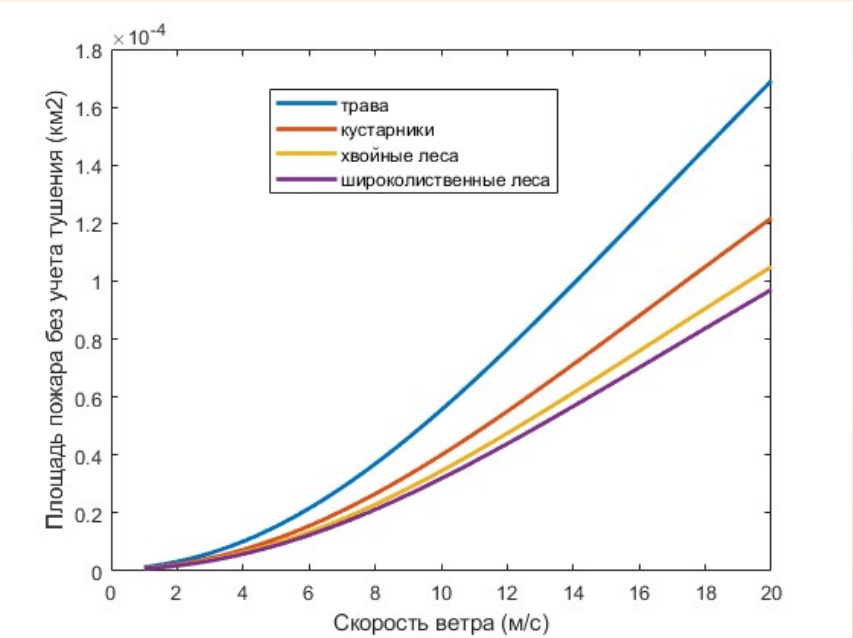
$$u_p = u_{max} C_m g(W)$$

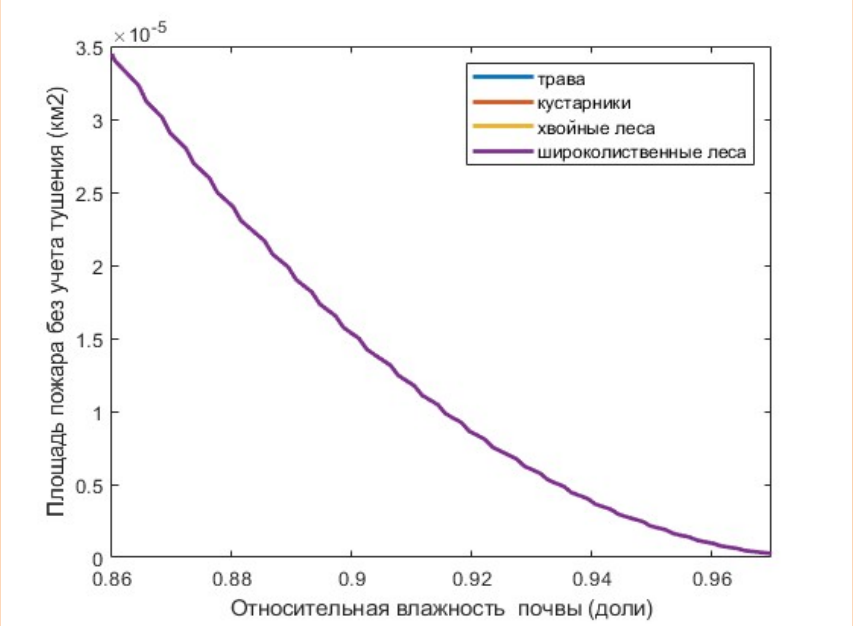
Ячейка модели

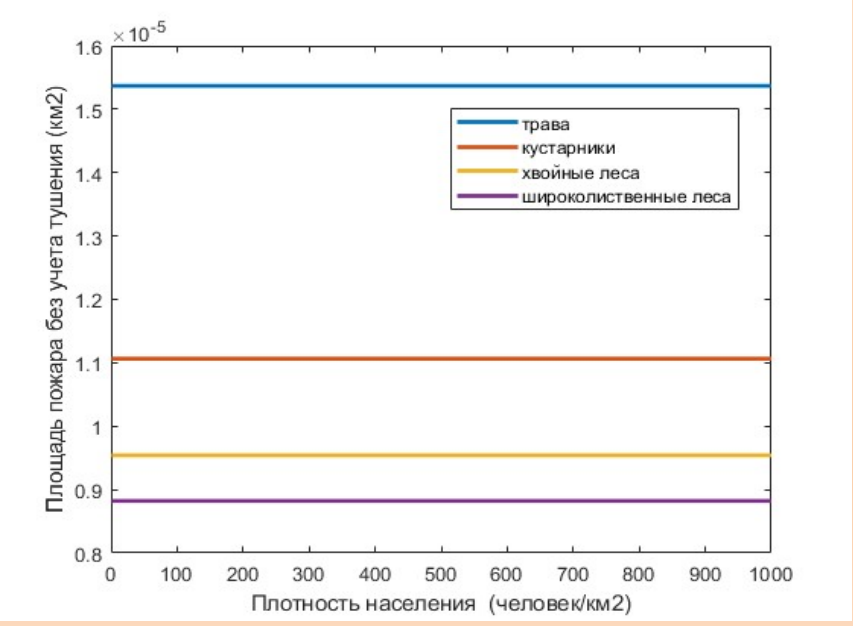


Эксперименты на чувствительность автономной модели пожаров к входным переменным



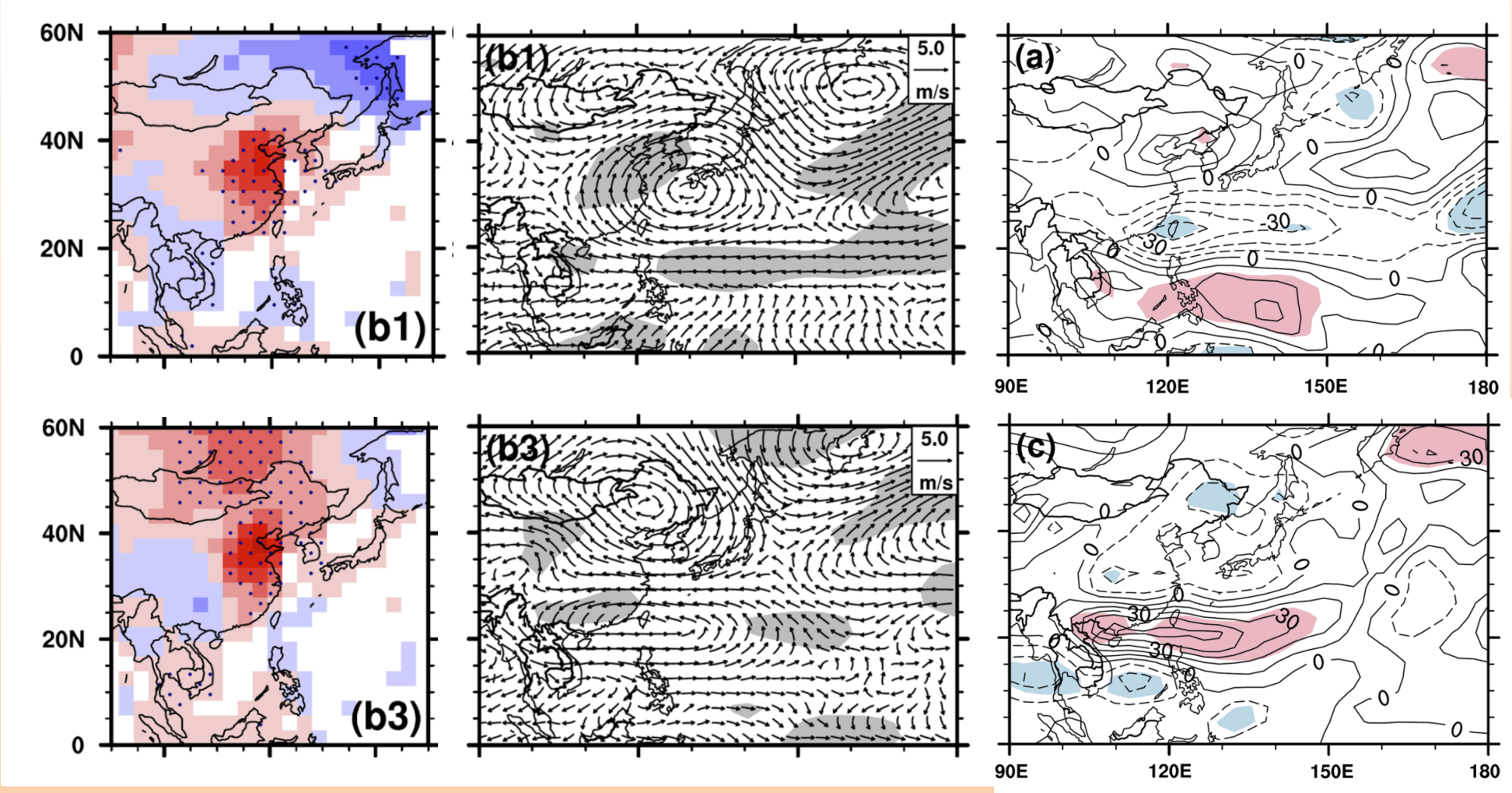






Модель включается в блок деятельного слоя ИВМ РАН-МГУ …

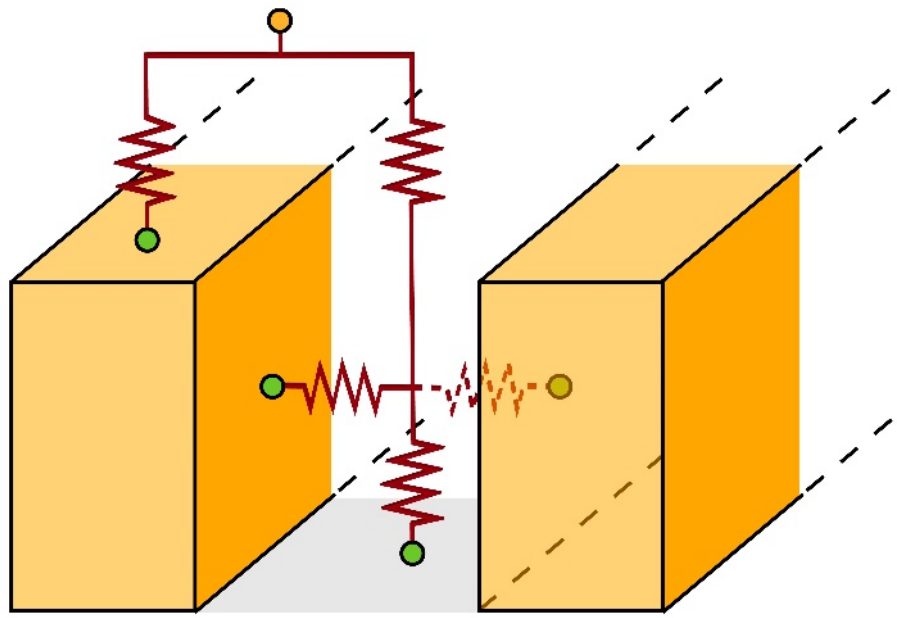
Влияние урбанизации на общую циркуляцию атмосферы



Chen et al. (2016).
Large-scale urbanization effects on eastern Asian summer monsoon circulation and climate

Модели городского полога

(доклад М.И.Варенцова)



Town Energy Balance (TEB)
[Masson, 2000]

- Физические процессы моделируются внутри **городского каньона**;
- **Уравнения теплового баланса** решается 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

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 C болот ИФА РАН	+	+/-	
Модель C сельского хозяйства	+/-		
Модель городского полога TEB	+		

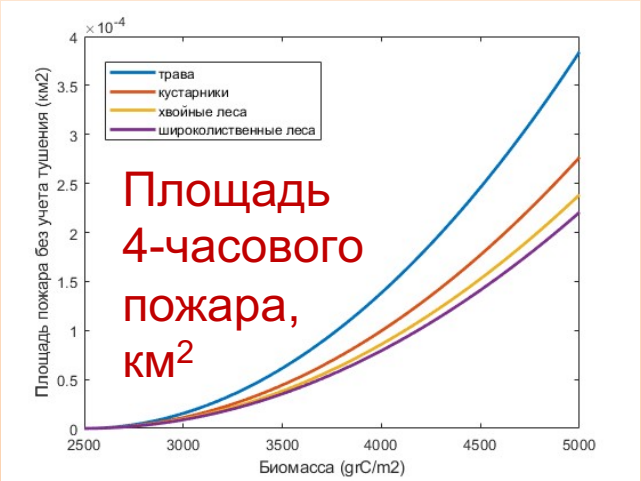
Спасибо за внимание!

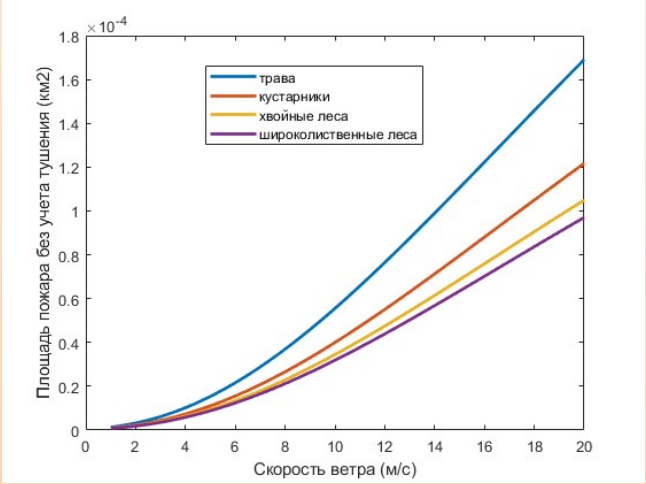
Текущие работы (до конца 2023 г.)

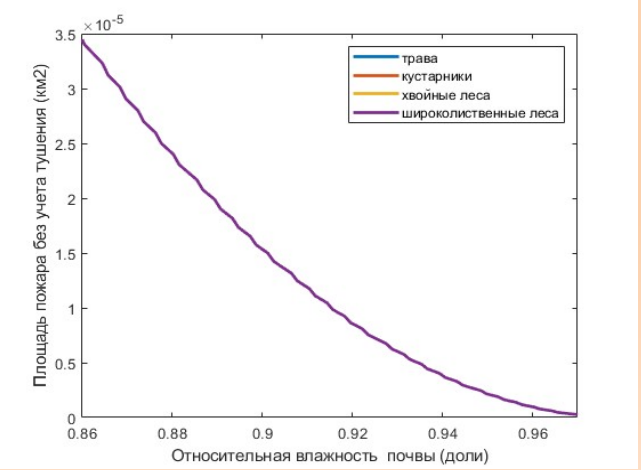
- Модель пожаров (из модели CLM)
- Модель торфонакопления в болотах ИФА РАН
- Рабочий прототип модели азотного цикла

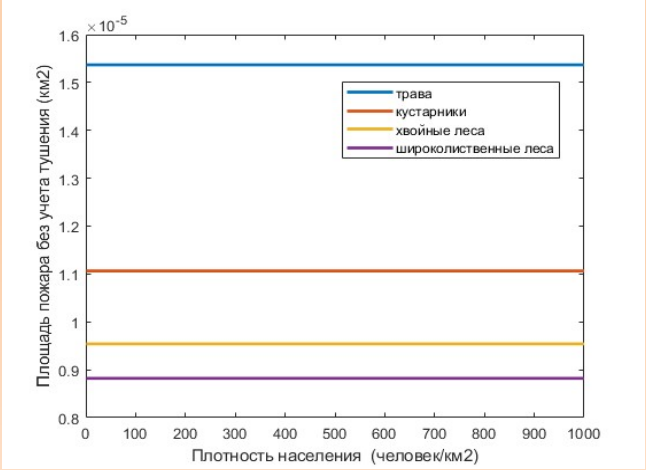
Эксперименты на чувствительность автономной модели пожаров к входным переменным

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

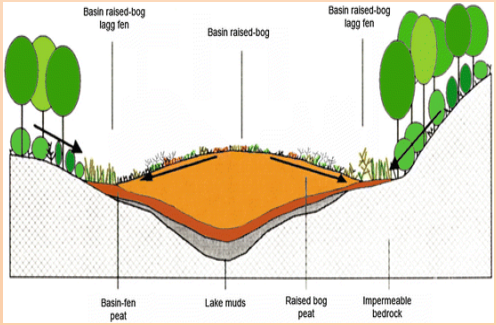


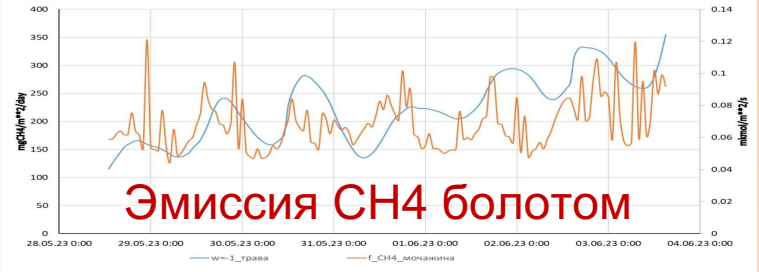






Василий Богомолов и соавт. «Моделирование тепломассообмена и потоков метана в болотных экосистемах». Секция Консорциума 4.





Команда

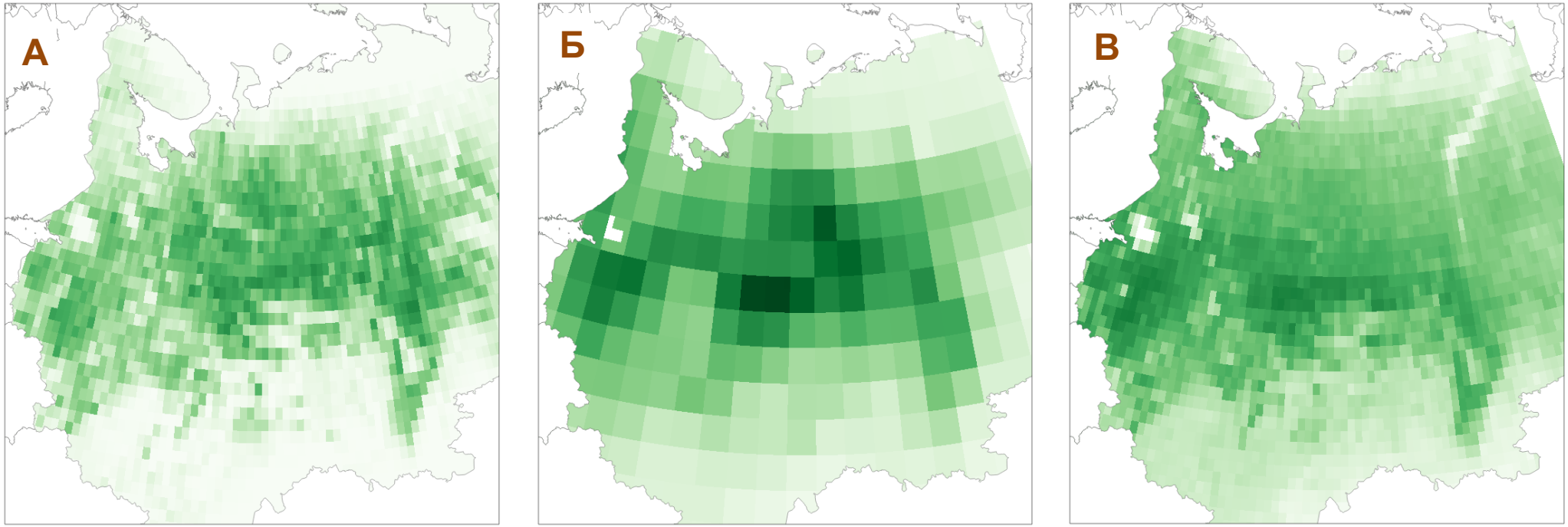
- Статистика
- Фото

Углерод в растительности

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

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

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



r_{A-B} = 0.83

Параметры расчета:

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