

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ СУШИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА УГЛЕРОДНОГО И МЕТАНОВОГО ЦИКЛОВ ВЫСОКОЙ ДЕТАЛИЗАЦИИ

Степаненко В.М., В.Ю.Богомоллов,
А.И.Медведев, А.А.Рязанова, В.А.Ломов, А.Ю.Черненко,
Г.М.Файкин, С.К.Шангареева, М.И.Варенцов,
В.И.Бычкова, В.А.Романенко, А.Л.Энтин

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**
- **Внедрение усовершенствованных блоков в МЗС ИВМ РАН**

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



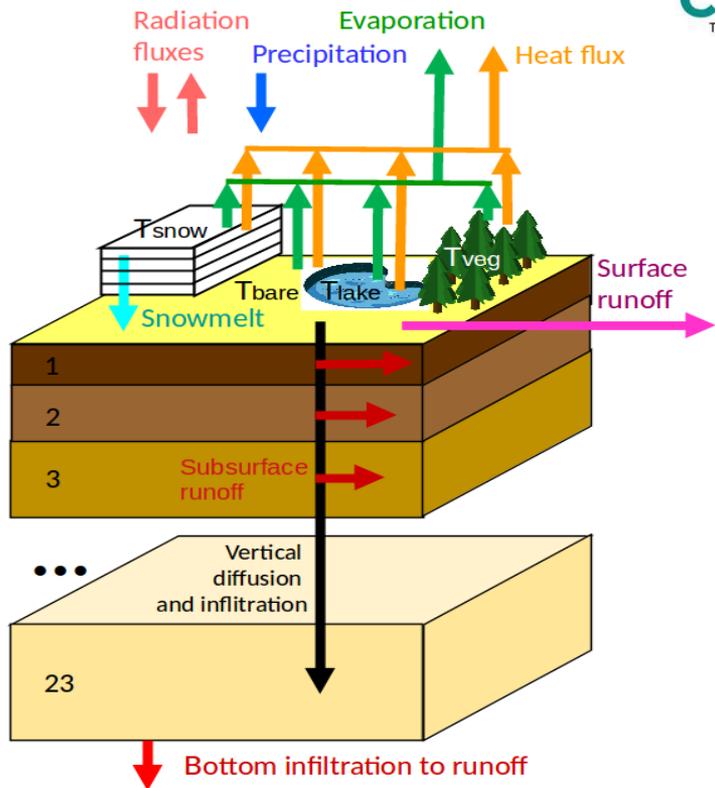
Чл.-корр. РАН В.Н.Лыкосов –
основатель направления



INM RAS-MSU land
surface scheme

Climate model
of Institute of
Numerical
Mathematics
(INMCM)

Global
numerical
weather
prediction SL-
AV model



Heat and moisture exchange in a cell
of INM RAS-MSU land surface 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 CH₄ model
- LAKE model
- River routing scheme

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



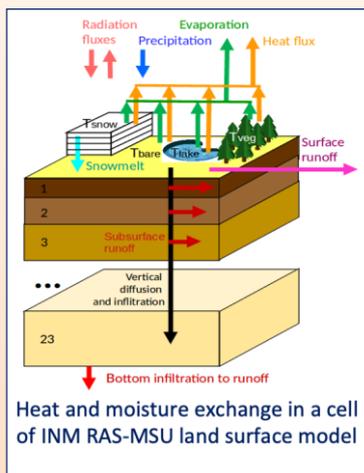
Передача новых
блоков/параметризаций
(2024 г. и 2030 г.)

Модель
деятельного слоя
суши TerM

Реанализ, данные
метеонаблюдений или
климатических моделей



Применение модели TerM для диагноза углеродного цикла



Диагноз пулов и потоков углерода на суше

Национальная отчётность (3 уровень Кадастра, ...)

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

Модель деятельного слоя суши TerM

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

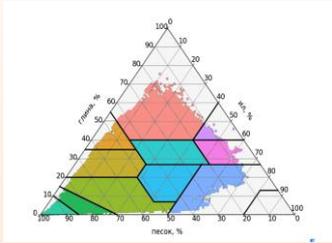
Обеспечение внешних данных о подстилающей поверхности

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)



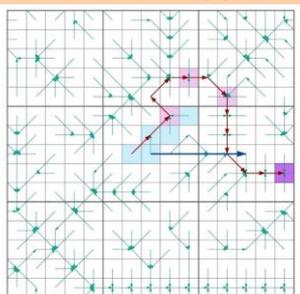
Уточнённая карта
растительности России
ИКИ РАН
(Егоров и др., 2018)



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



Трассировка речного потока
(Reed, 2003)+ БД HydroSheds



Архитектура системы подготовки данных о параметрах поверхности TerMPS

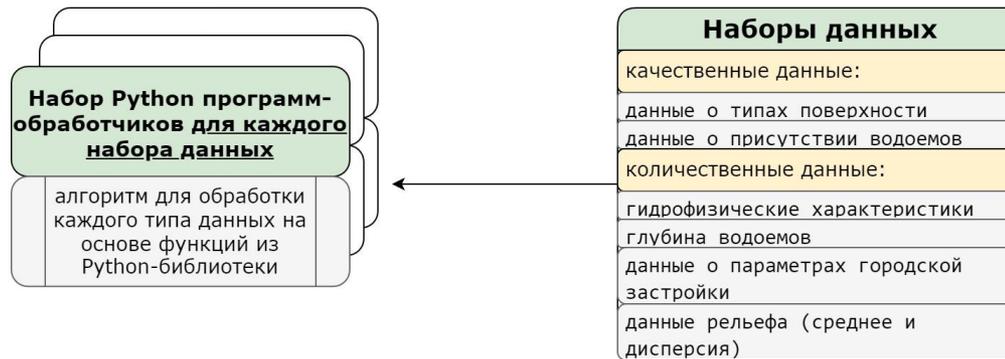
Уровень 0: элементарные функции агрегирования данных

0 уровень



Уровень 1: агрегирование частных типов данных

1 уровень



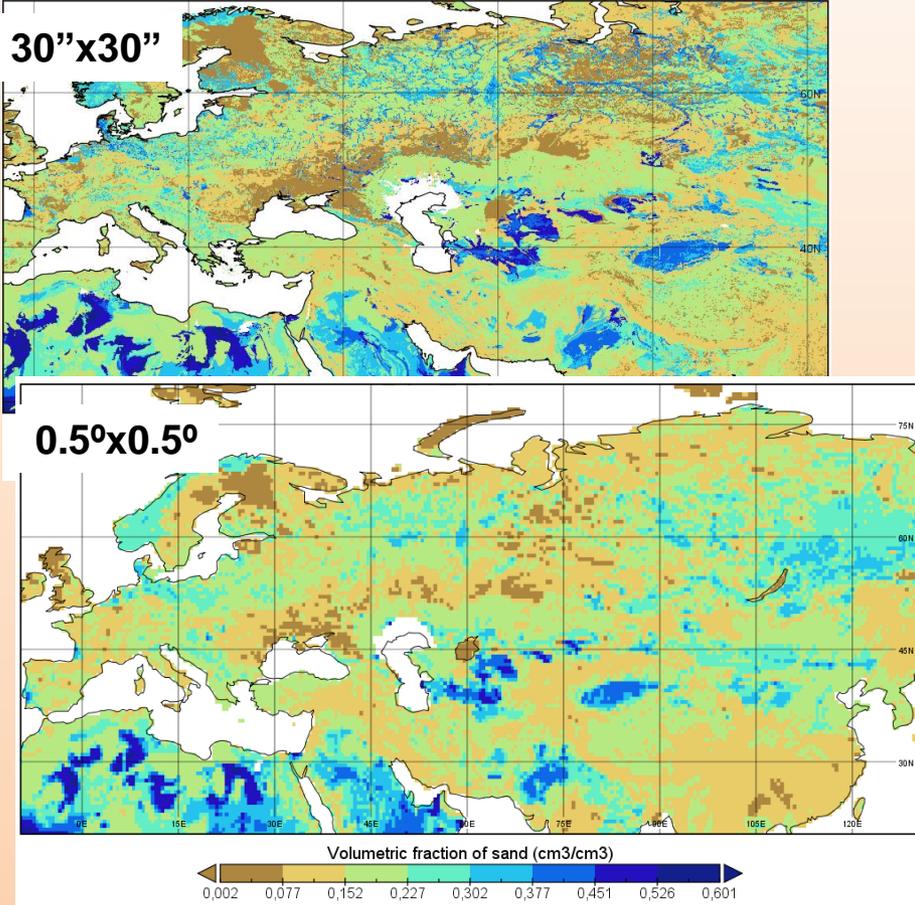
Уровень 2: интерфейс пользователя

2 уровень



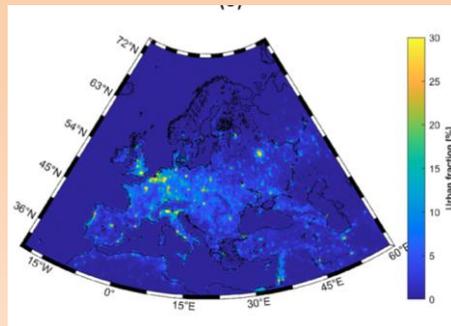
Результаты работы TerMPS

Объемное содержание глины

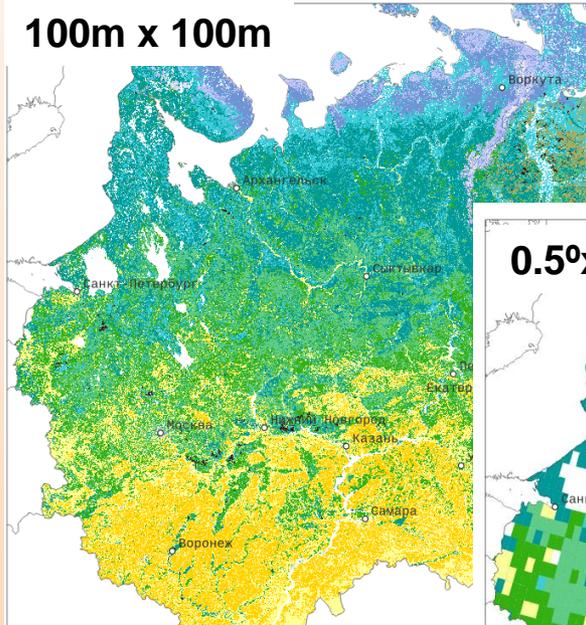


Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shanguan, W., Yuan, H., et al. (2019). A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2996– 3023. <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>

Доля урбанизированной поверхности

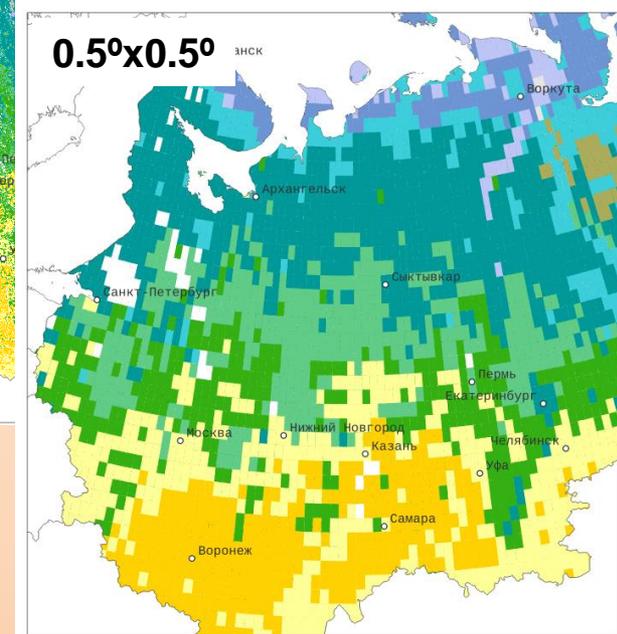


Карта земного покрова России, составленная по данным спутника Proba-V.

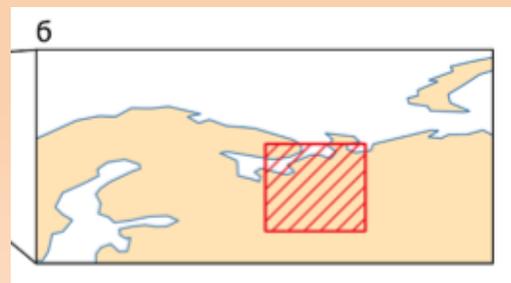


- тундра травянистая
- тундра кустарниковая
- редколесье / болота
- тайга лиственничная
- тайга вечнозеленая
- смешанные леса
- широколиственные леса
- травянистая растительность
- сельскохозяйственные угодья
- открытый грунт
- вода
- городская застройка / лесные пожары

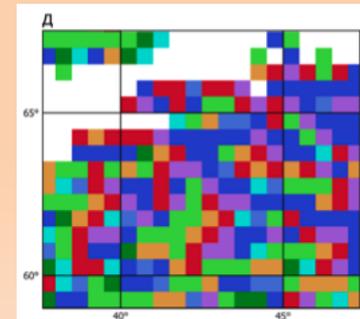
Доминирующий класс растительного покрова в ячейке 0.5x0.5



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



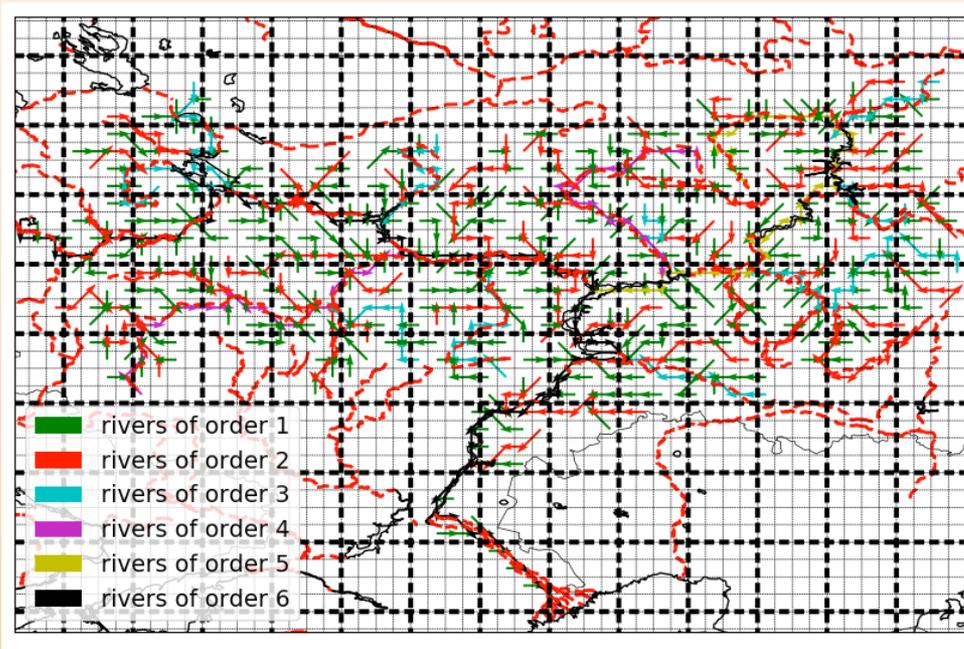
Направления речного стока



Направления стока: ■ В ■ ЮВ ■ Ю ■ ЮЗ ■ З ■ СЗ ■ С ■ СВ

Процедуры оценки эмиссии и поглощения парниковых газов водохранилищами

Модель термогидродинамики рек



- Модель диффузионной волны для гидродинамики
- Расчёт термического режима

Калибровка модели

СП ТРУ

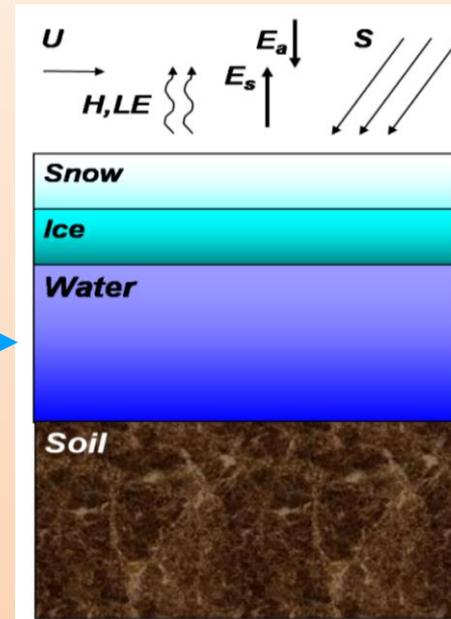
(Методы оптимизации Монте-Карло, ROPE, ...)

LAKE

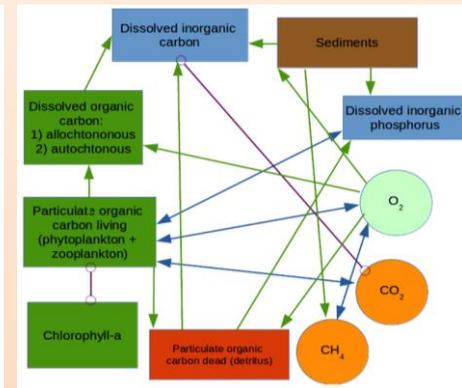
Данные измерений CH₄ на российских водохранилищах

Модель водоёма LAKE3.x

Термогидродинамика

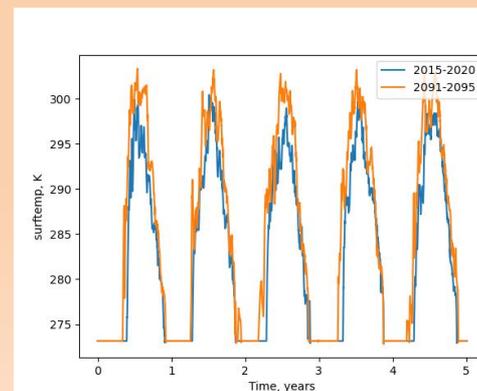


Биогеохимия

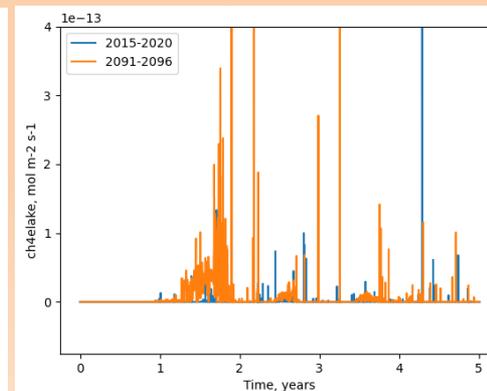


- O₂, CH₄, CO₂ — концентрации и потоки
- Продукция, дыхание, разложение ...

Температура поверхности Куйбышевского водохранилища

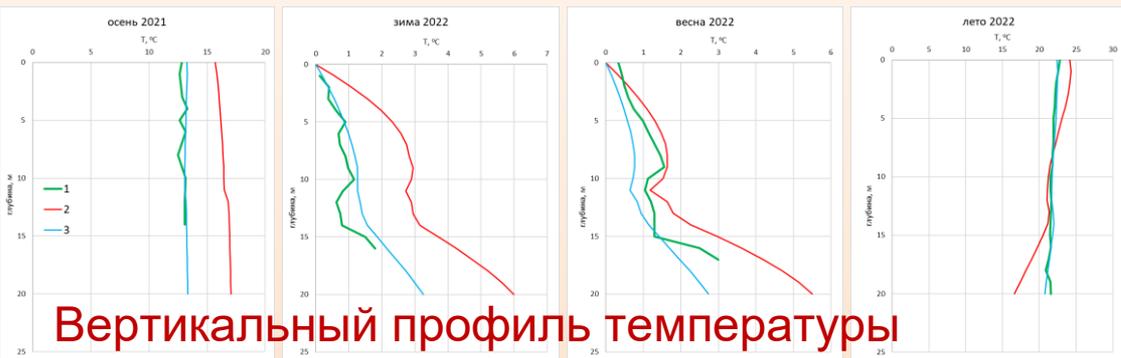


Поток CH₄, Куйбышевское водохранилище



Калибровка модели водохранилищ

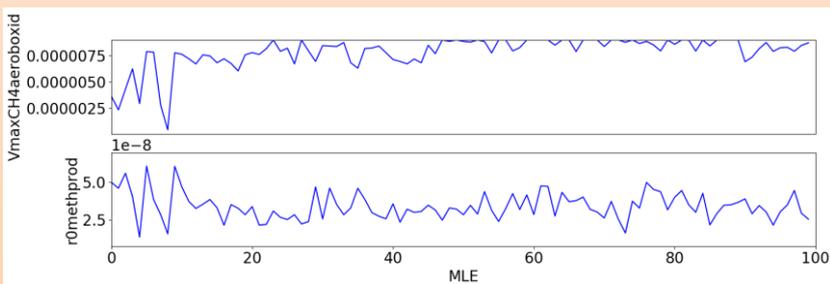
Этапы: 1. Оптимизация температуры 2. Оптимизация кислорода 3. Оптимизация метана



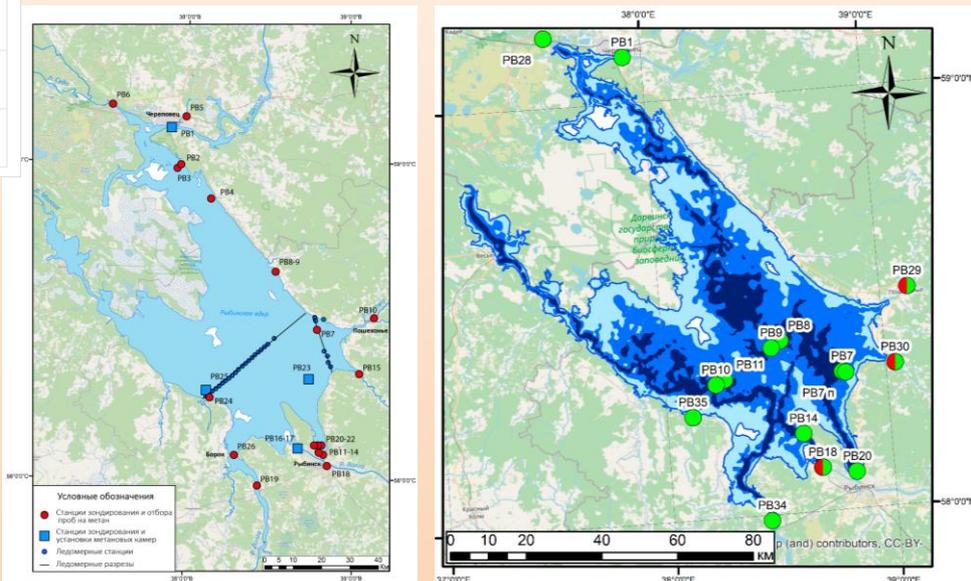
Вертикальный профиль температуры

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

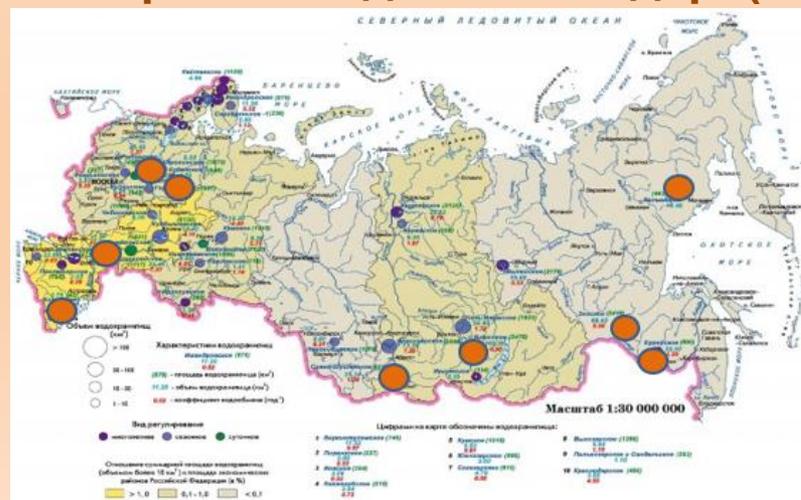
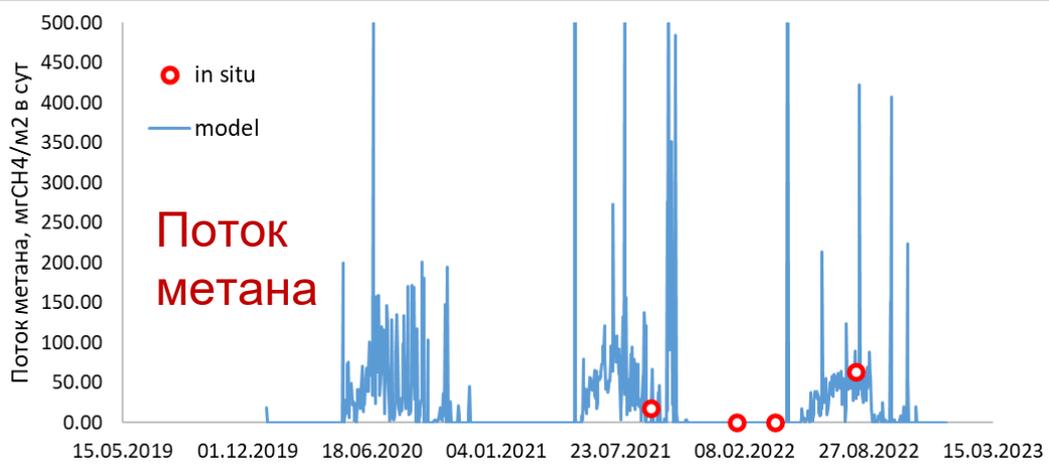
Ход калибровки параметров метановой модели



Примеры распределения станций натуральных наблюдений в разные сезоны на Рыбинском водохранилище



Калибровка на данных 9 вдхр. (2024 г.)



Углеродный цикл суши

Уравнения углеродного цикла:

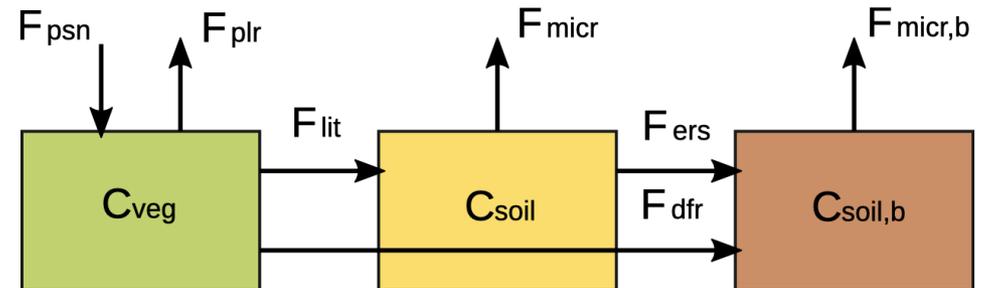
$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = F_{psn} - F_{plr} - \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - F_{dfr,a} - F_{dfr,b}$$

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

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

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:

Michaelis-Menten expr.

Rubisco-limitation

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

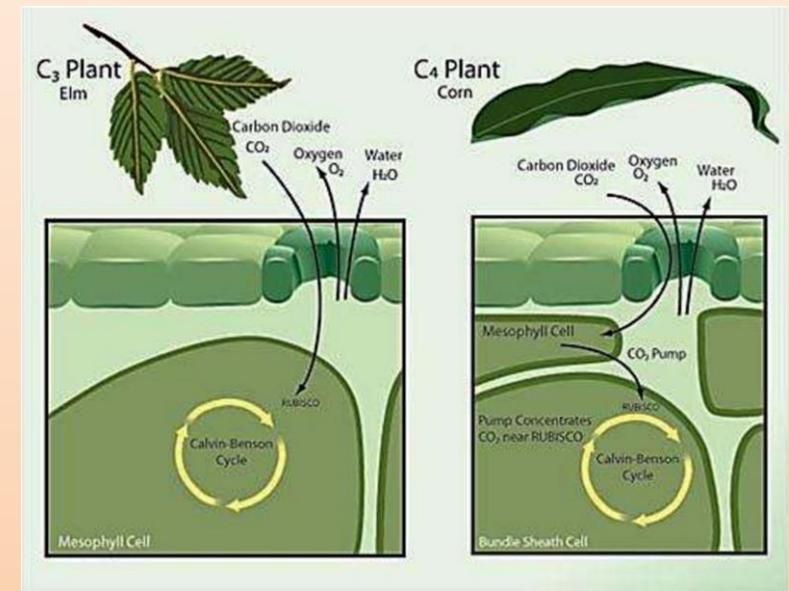
light-limitation

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

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:

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

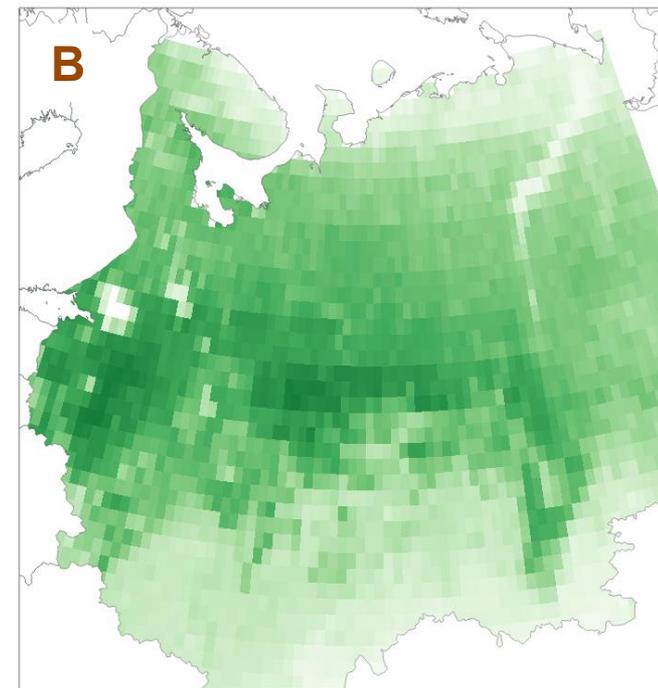
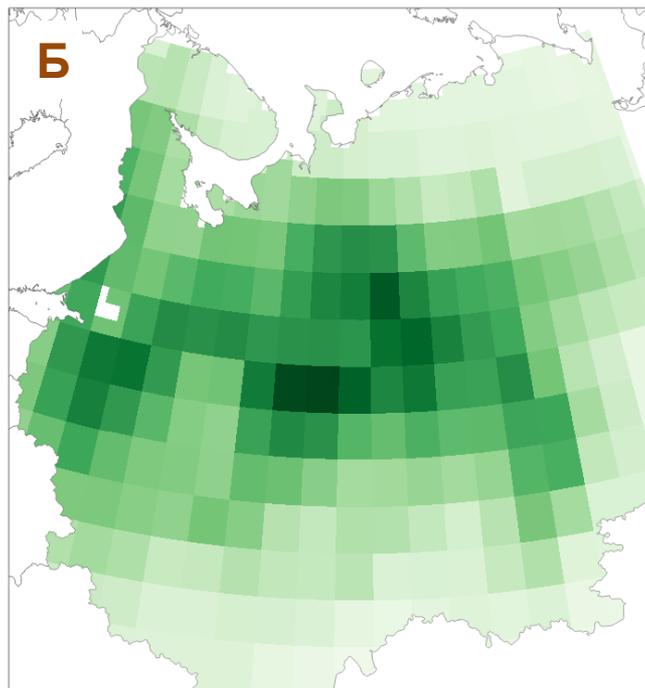
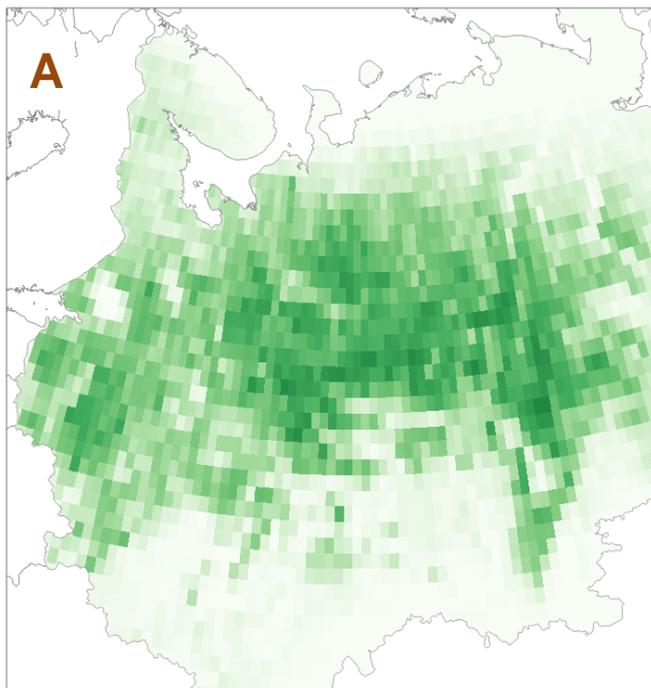
$$\beta_2 W^2 - W(W_p + W_e) + W_p W_e = 0$$

Углерод в растительности

Данные ДЗЗ ИКИ РАН по запасу
стволовой древесины
(mean = 4.28 кг/м²)

TerM: начальное условие –
контрольная точка
климатической модели
(mean = 4.61 кг/м²)

TerM: распределение к 2020 г.
(mean = 6.30 кг/м²)



Параметры расчета:

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

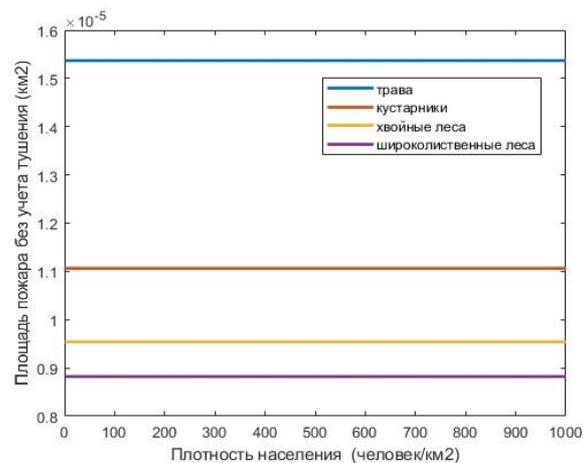
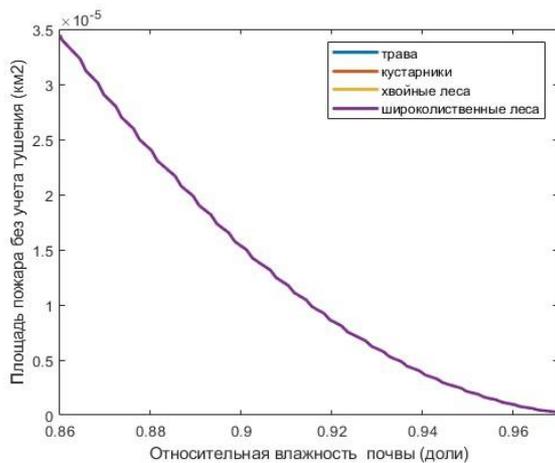
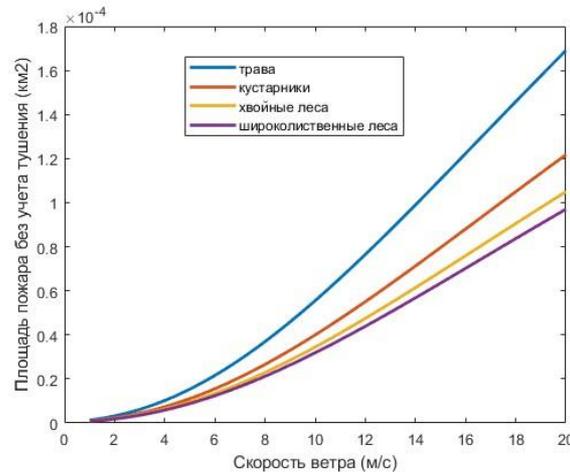
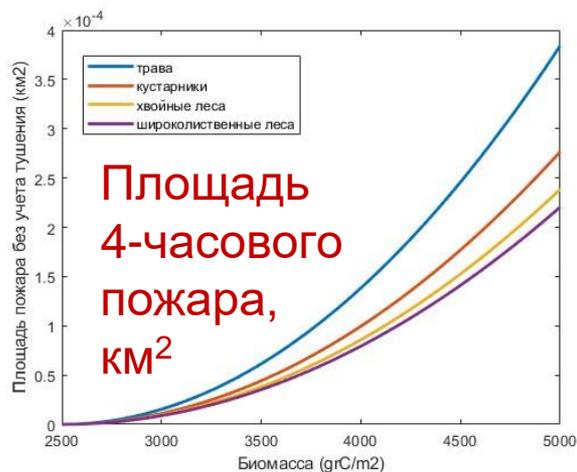
$$r_{A-B} = 0.83$$



Текущие работы (до конца 2023 г.)

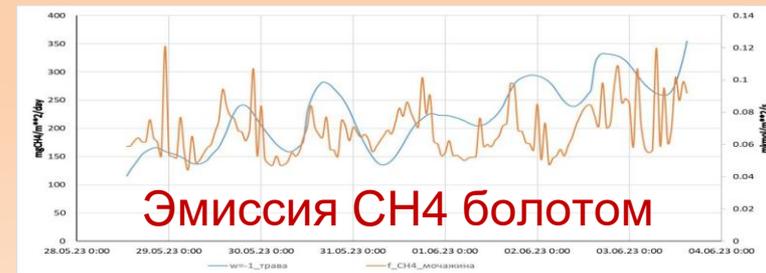
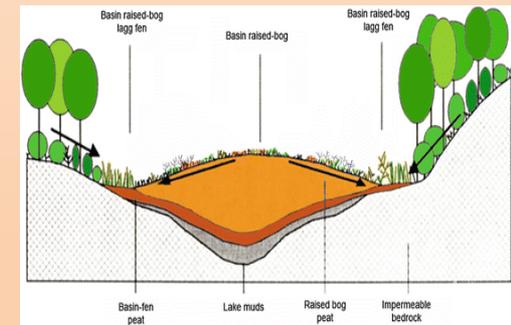
- Модель пожаров (из модели CLM)
- Модель торфонакопления в болотах ИФА РАН
- Рабочий прототип модели азотного цикла

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.



Спасибо за внимание!