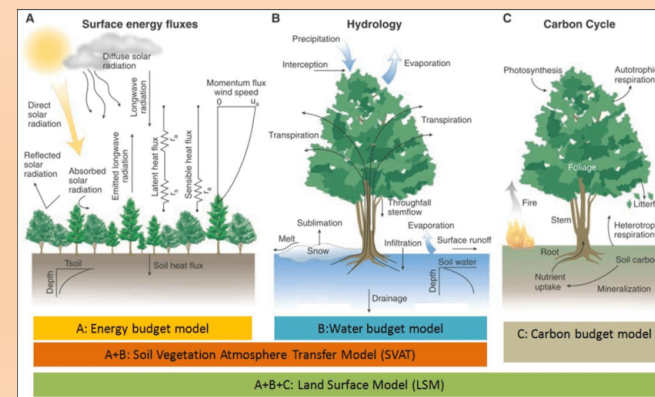


Математическая модель деятельного слоя суши TerM (ИВМ РАН-МГУ): численное исследование гидрологического и углеродного циклов суши в условиях изменения климата

Степаненко В.М., Медведев А.И., Богомоллов В.Ю., Шангареева С.К.,
Рязанова А.А., Файкин Г.М., Рыжова И.М., Суязова В.И., Дебольский
А.В., Черненко А.Ю., Павинский С.В.

У Всероссийская конференция с международным
участием «Турбулентность, динамика
атмосферы и климата», памяти академика
А.М.Обухова 19–21 ноября 2024 г. Москва



19 ноября 2024 г., Москва

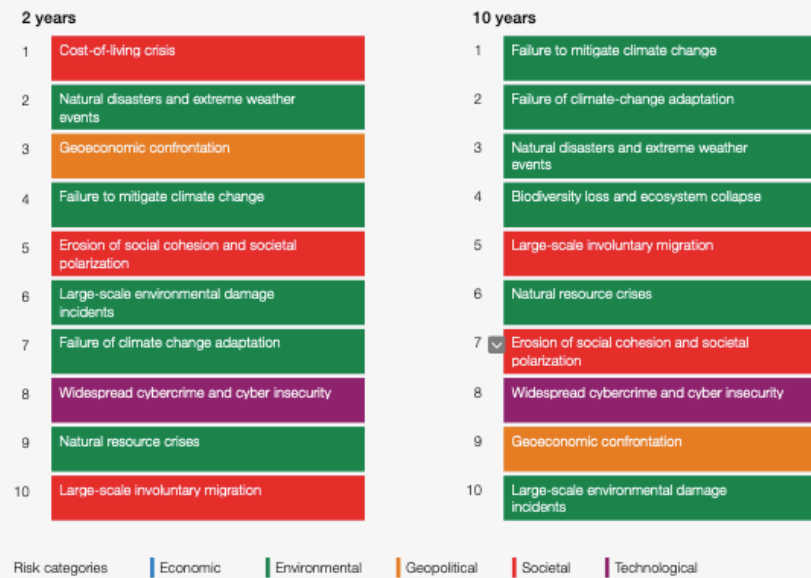
The need for multisectoral impacts assessment and tools ...

Global Risk Report (Davos Forum)

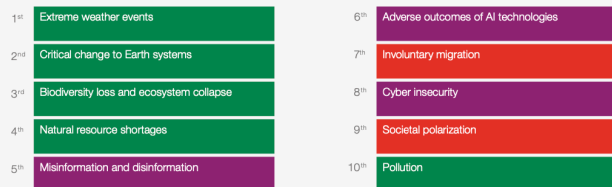
Global risks ranked by severity over the short and long term

"Please estimate the likely impact (severity) of the following risks over a 2-year and 10-year period"

2023

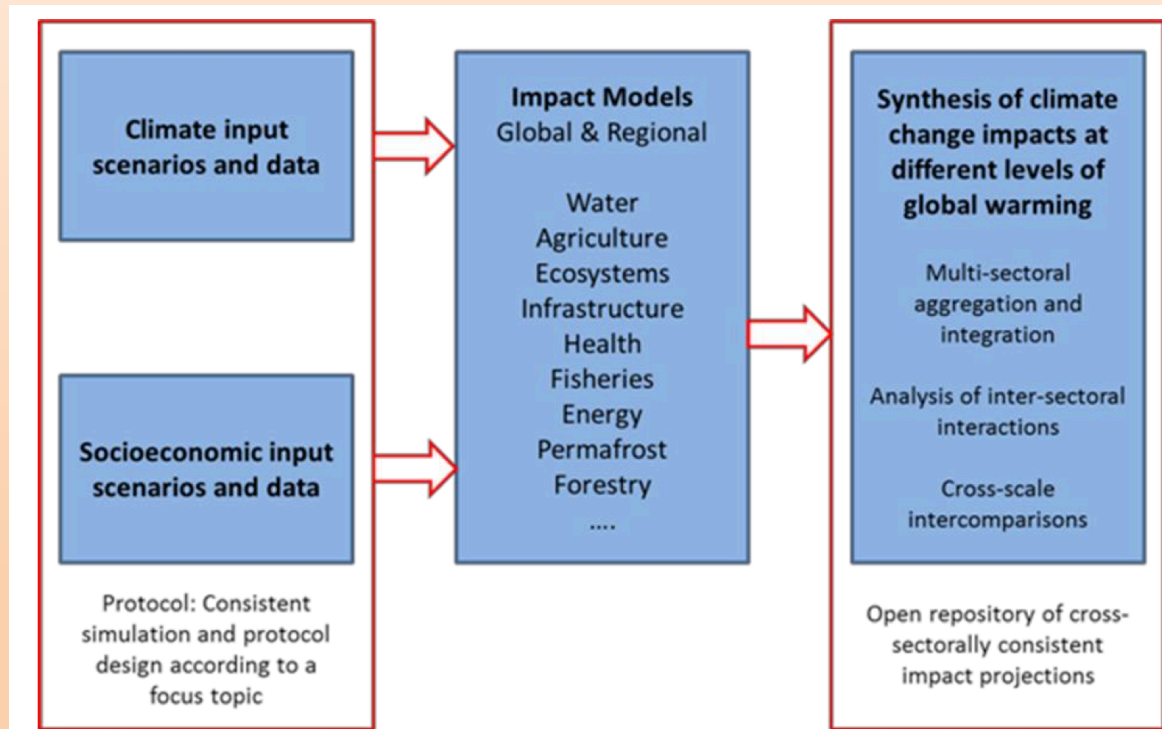


2024



Source
World Economic Forum Global Risks
Perception Survey 2023-2024.

ISIMIP project example

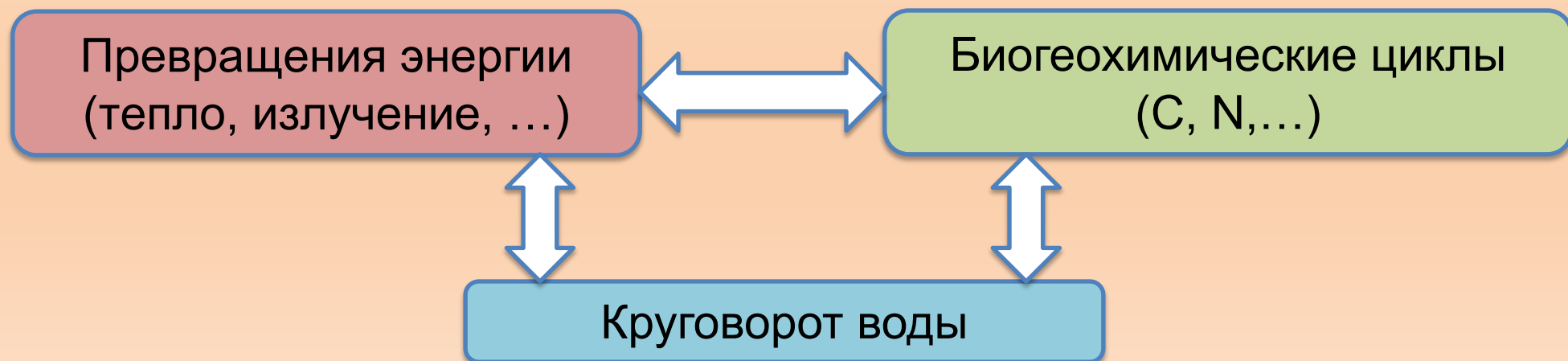


<https://www.isimip.org>

The models for land “sectors”
are a major tool ...

Задачи

- Разработка параметризаций физических и биогеохимических процессов и систем для интерактивных моделей погоды и климата (INMCM, ПЛАВ, модель НИВЦ МГУ-ИВМ)
- Диагностика, прогноз, ретроспективные («палео») и сценарные оценки водного баланса суши, криосферы и углеродного цикла



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



Перспективы и вызовы развития моделей суши (Fisher and Coven, 2020)

- “We identify three “grand challenges” in the development and use of LSMs, based around these issues: **managing process complexity**, representing **land surface heterogeneity**, and **understanding parametric dynamics** across the broad set of problems asked of LSMs in a changing world.”

JAMES | Journal of Advances in
Modeling Earth Systems*

Commissioned Manuscript |  **Open Access** |  

**Perspectives on the Future of Land Surface Models and
the Challenges of Representing Complex Terrestrial
Systems**

Rosie A. Fisher, Charles D. Koven 

First published: 10 March 2020 | <https://doi.org/10.1029/2018MS001453> | Citations: 250

Terrestrial Model (TerM) (Land surface INM RAS-MSU model)



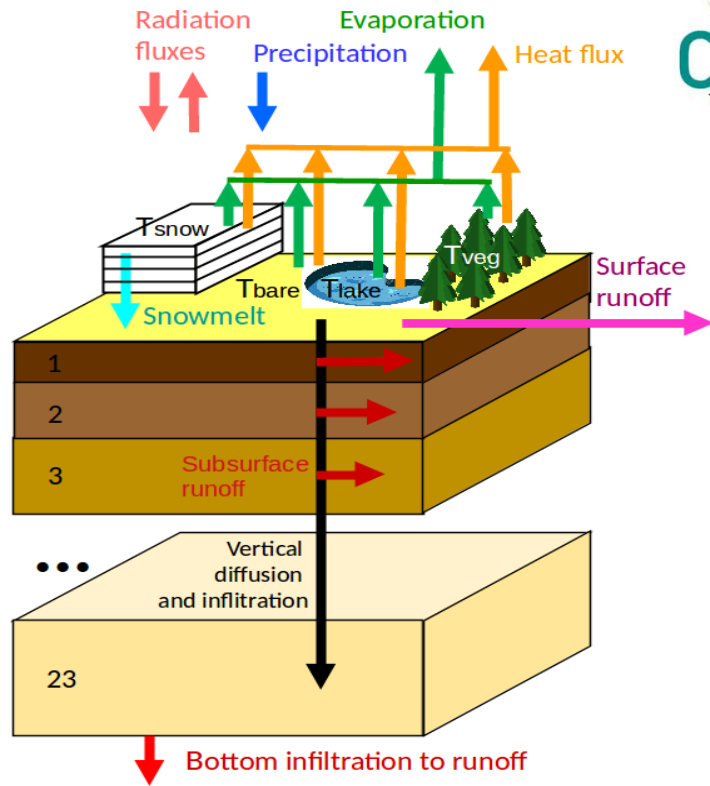
Corr. member RAS V.N. Lykosov –
founder of research direction



INM RAS-MSU land
surface scheme

Climate model
of Institute of
Numerical
Mathematics
(INMCM)

Global
numerical
weather
prediction SL-
AV model



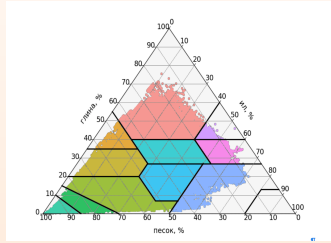
Heat and moisture exchange in a cell
of INM RAS-MSU land surface model

- ☐ 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
- ☒ **Fires**
- ☐ LAKE model
- ☐ River routing scheme

MPI+OpenMP
implementation,
CUDA tests

**Model implemented in a standalone model (baseline spacing 0.5°x0.5°):
(i) global, (ii) regional and (iii) local configurations.**

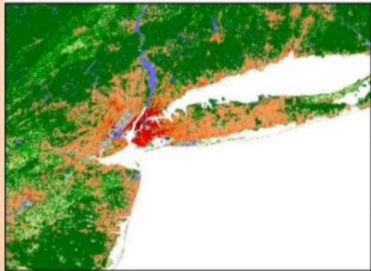
Granulometric composition
in the global soil database
(Dai et al., JAMES, 2019)



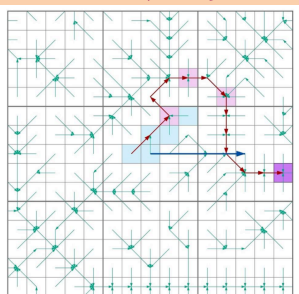
An updated map
vegetation of Russia
IKI RAS
(Egorov et al., 2018)



Maps of urban
local climate zones
(Demuzere et al., 2021)



Streamflow tracing
(Reed, 2003)+ HydroSheds



Architecture of the land surface data preprocessing system TerMPS

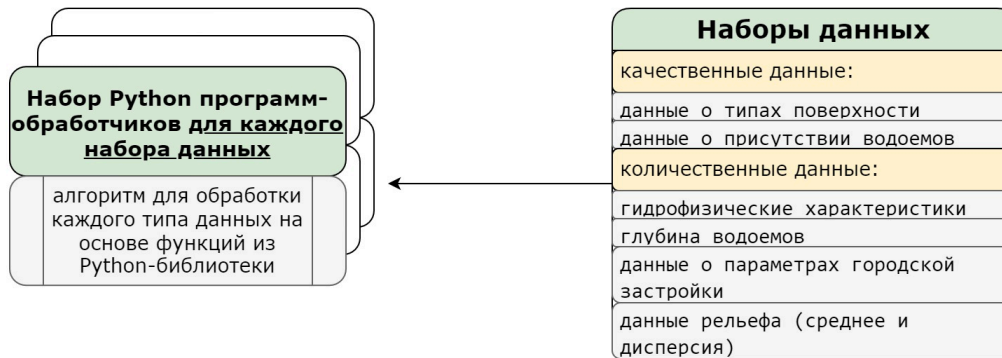
Level 0: elementary data aggregation functions

0 уровень



Level 1: aggregation of specific data types

1 уровень



Level 2: User Interface

2 уровень

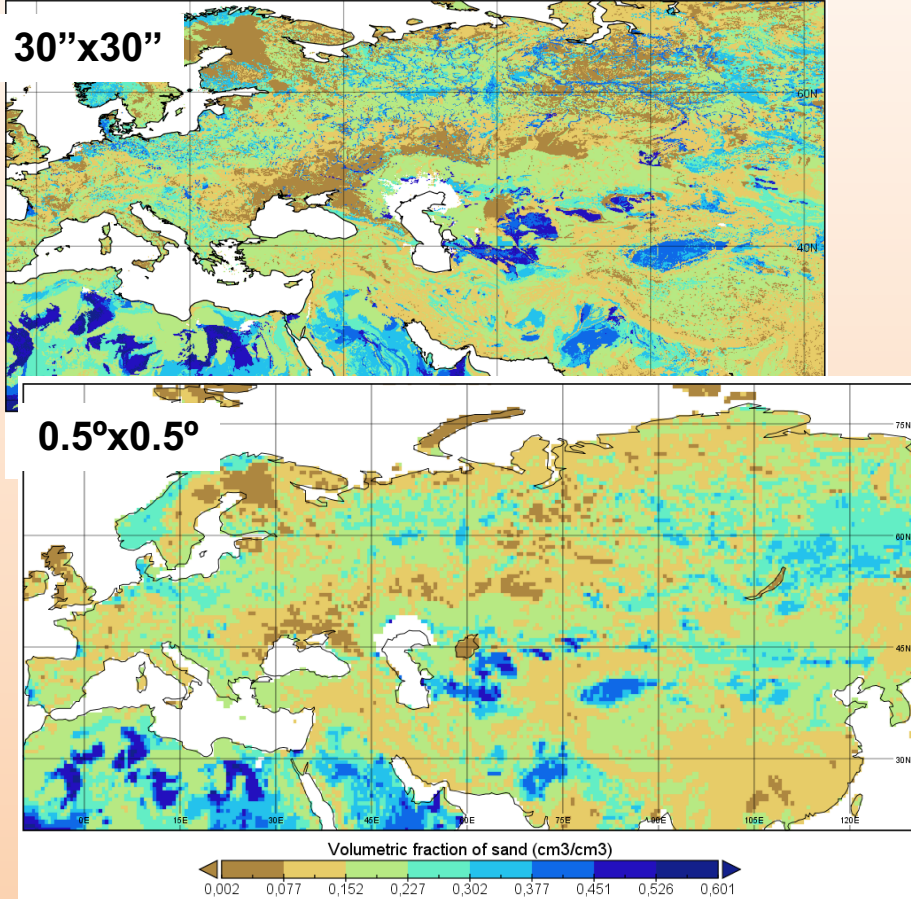
Управляющая Python-программа

объединяет набор Python-программ 1 уровня для выбранных наборов данных

в автоматическом режиме генерирует выбранные данные на заданное разрешение

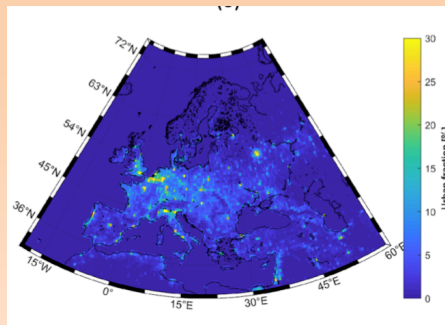
Maps produced by TerMPS

Volumetric clay content

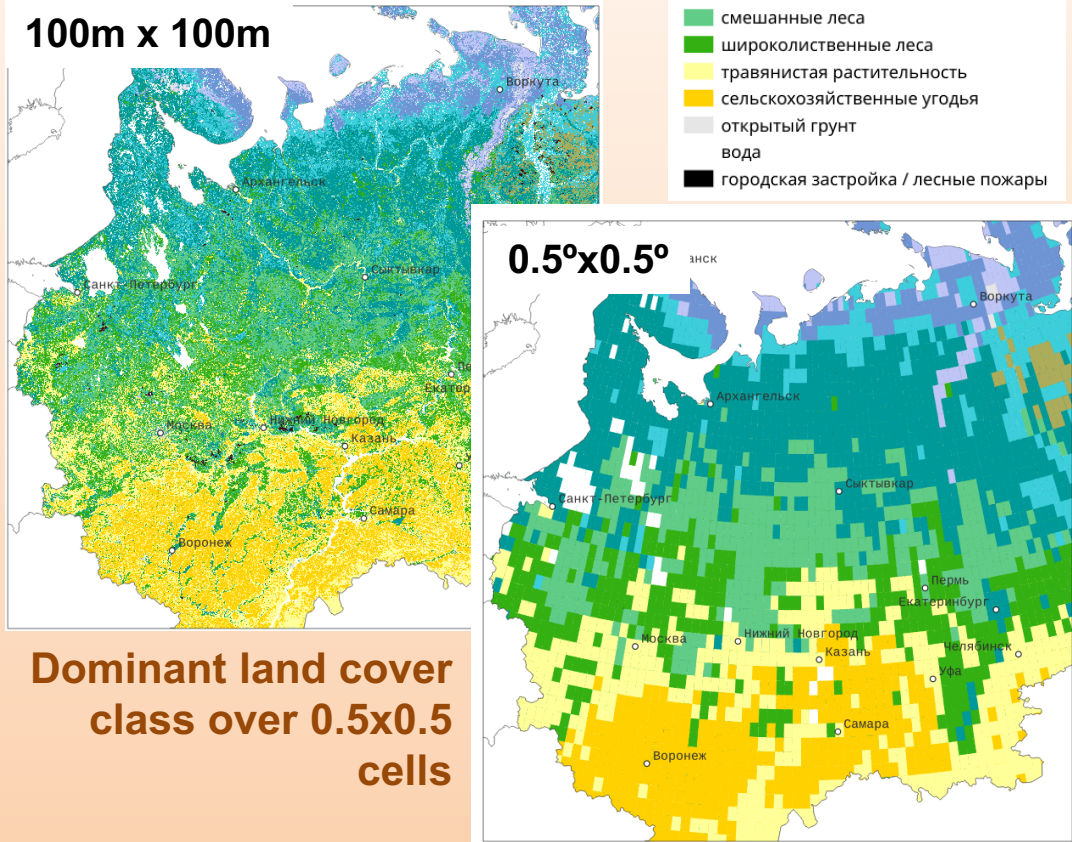


Dai, Y., Xin, Q., Wei, N., Zhang, Y., Shangguan, W., Yuan, H., et al. (2019). A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2996–3023. <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>

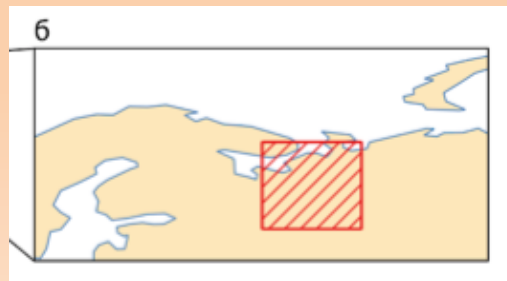
Urban surface fraction



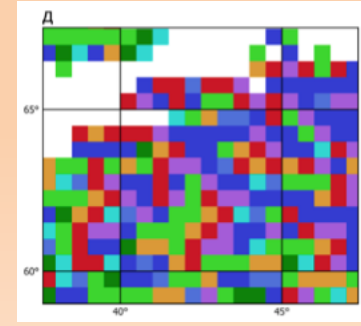
Map of Russia's land cover based on Proba-V satellite data.



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

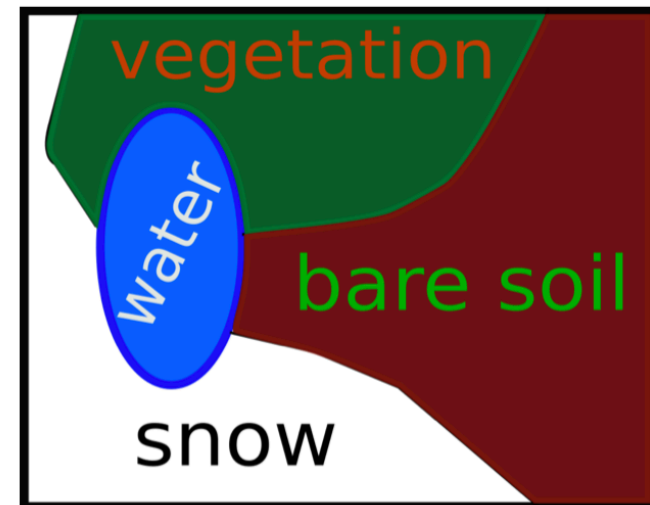


Riverflow directions



Подсеточное распределение типов поверхности

- 4 tiles in each cell: bare soil, vegetation, snow and inland waters
- in winter, snow tile occupies entire cell
- each tile has its own surface temperature $T_{s,i}$, all sharing single soil column
- Sensible heat flux is calculated using cell-mean surface temperature $\bar{T} = \sum_{i=1}^4 \alpha_i T_{s,i}$ (α_i – i -th tile fraction)
- Latent heat flux is aggregated from individual fluxes over each tile, $\overline{LE} = \sum_{i=1}^4 \alpha_i LE_i$
- Momentum and scalar roughness lengths are taken as single values in each cell



Радиационная схема для растительности

Уравнение переноса (Dickinson, 1983) внутри растительного полога:

$$\begin{aligned} -\bar{\mu} \frac{dI \uparrow}{d(L+S)} + (1 - (1 - \beta)\omega)I \uparrow - \omega\beta I \downarrow &= \omega \bar{\mu} k \beta_0 e^{-k(L+S)} \\ \bar{\mu} \frac{dI \downarrow}{d(L+S)} + (1 - (1 - \beta)\omega)I \downarrow - \omega\beta I \uparrow &= \omega \bar{\mu} k (1 - \beta_0) e^{-k(L+S)} \end{aligned}$$

$k = \frac{G(\mu')}{\mu'}$, μ' – косинус зенитного угла нисходящего из атмосферы излучения $\bar{\mu} = \int_0^1 \mu / G(\mu) d\mu$, а μ – косинус зенитного угла излучения I , β, β_0 – параметры рассеяния вверх, L, S – листовой индекс и аналогичная величина для стеблей, I нормирована на нисходящее излучение
 $\mu, \mu' \geq 0$

Усовершенствования:

- Уравнение переноса ранее решалось для видимого и ближнего ИК диапазона
- Введено задание произвольного количество диапазонов длины волны
- Уточнение спектрального распределения оптических параметров по (Noda et al., 2014)

Проверка блока радиационного переноса в растительности (карбоновый полигон «Мухрино»)



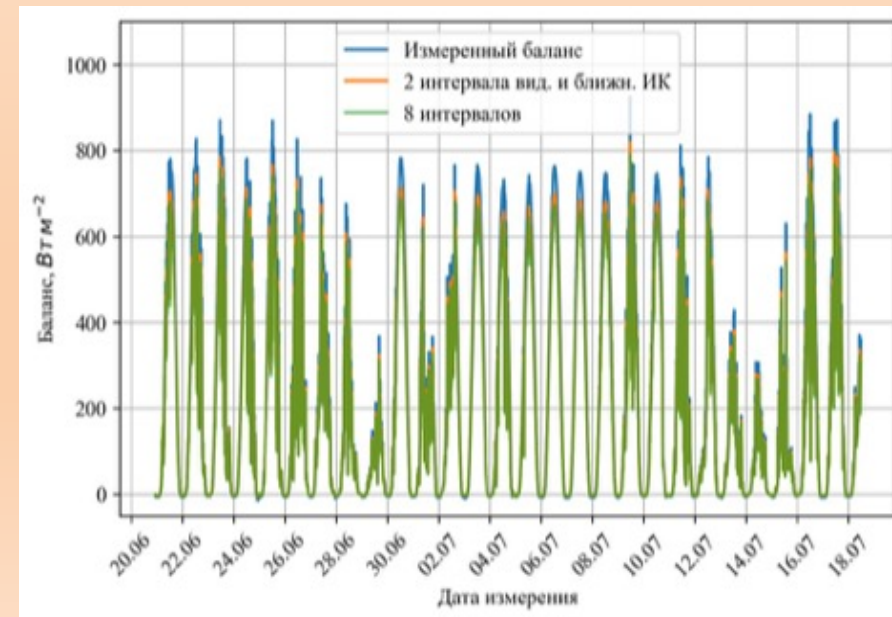
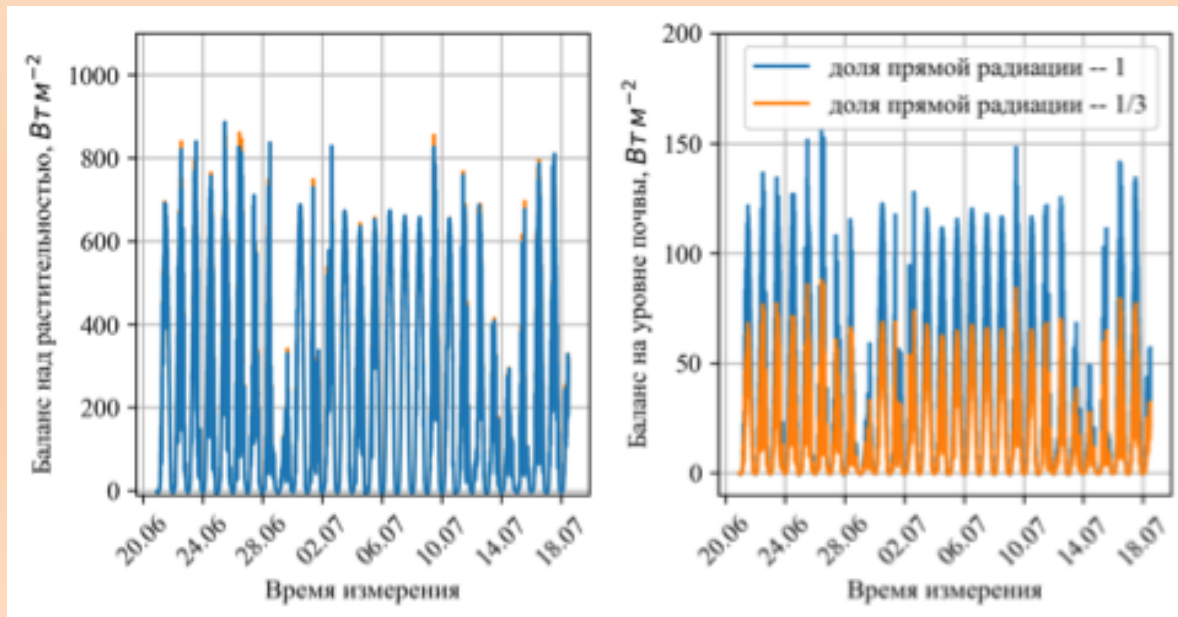
- 20 июня — 18 июля 2024 года
- 2 интервала длин волн (видимый и БИК) и 8 интервалов
- разное отношение прямой радиации к рассеянной

Коротковолновый баланс

Над лесом

У почвы

Над лесом



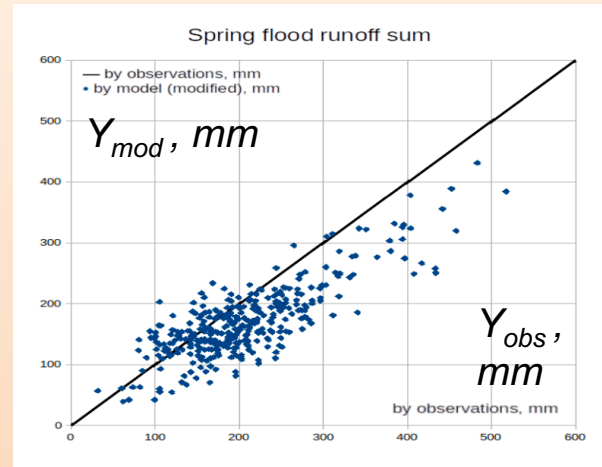
Воспроизведение речного стока:

Северная Двина и Печора (А.И.Медведев)

Усовершенствования модели:

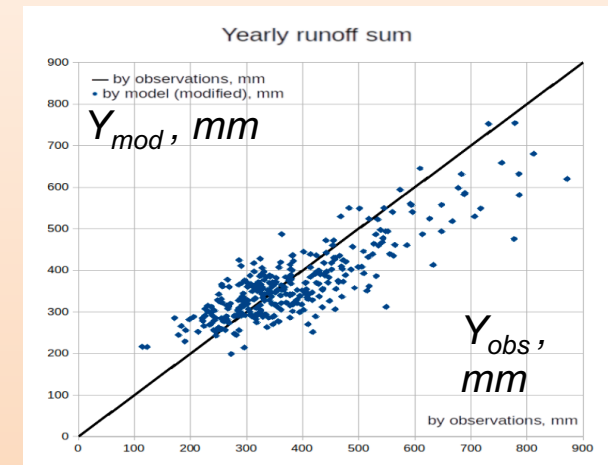
- Содержание **жидкой воды в снежном покрове** (Степаненко и др., 2019)
- Подсеточное гамма-распределение **высоты снежного покрова** (Корень, 1991)
- Уточнённые **зависимости гидрофизических хар-к от льдистости** (Кулик, 1978)
- Обновление **баз данных почвенных параметров** (Wilson & Henderson-Sellers, 1985 -> Dai et al., 2019)

Средний слой весеннего паводка

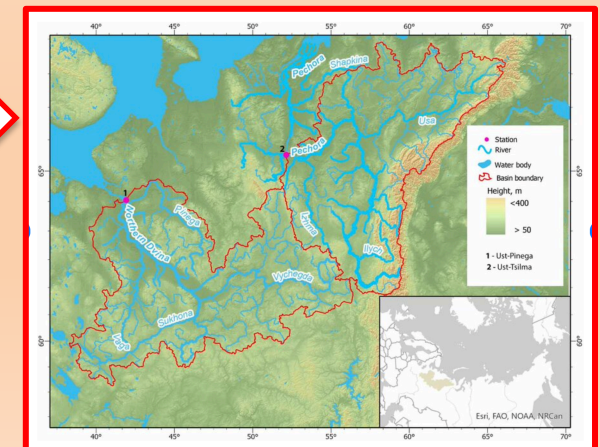


■ Наблюдения
■ модель, усоверш.

Средний слой годового стока



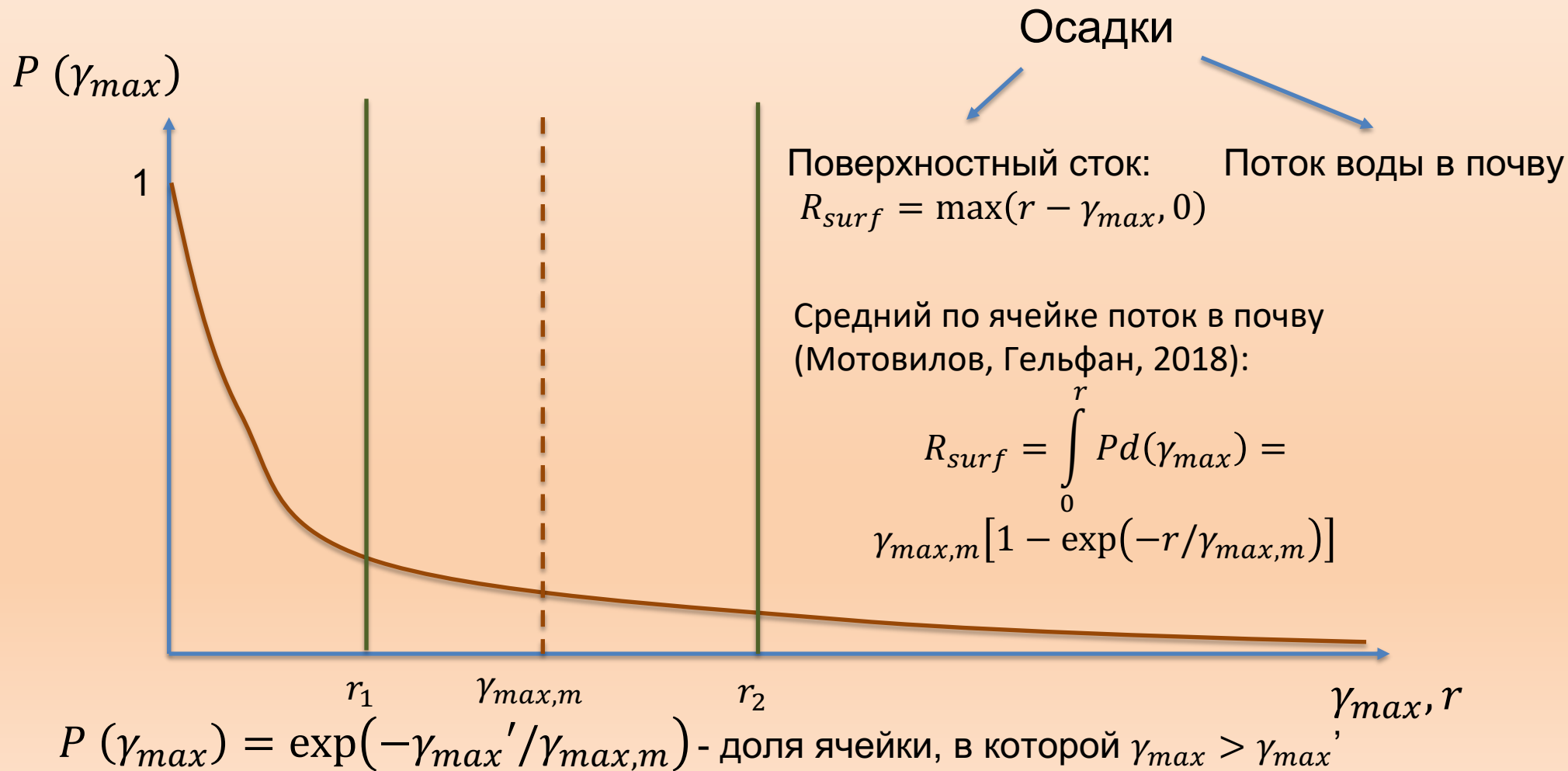
■ Наблюдения
(снегомерные съёмки)
■ модель, усоверш.



(Георгиади и Гройсман, 2022)

Поверхностный сток по превышению фильтрационной способности

- Максимальный поток жидкой воды в почву: $-\lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} + \gamma \approx \gamma_{max}$
- Верхний конечный слой быстро насыщается, так что при осадках $\frac{\partial W}{\partial z} = 0$



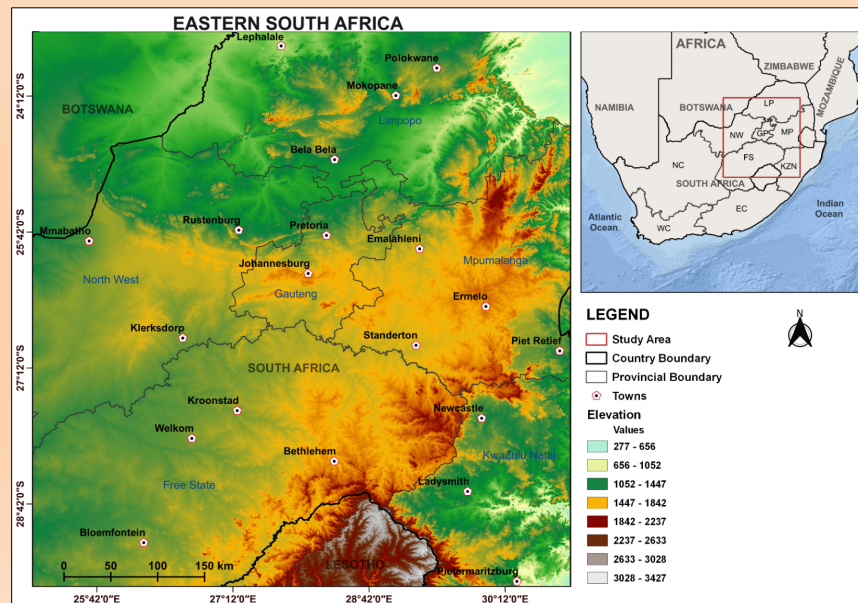
Simulation of South Africa streamflows over natural and urban landscapes using the TerM land surface model

Objectives:

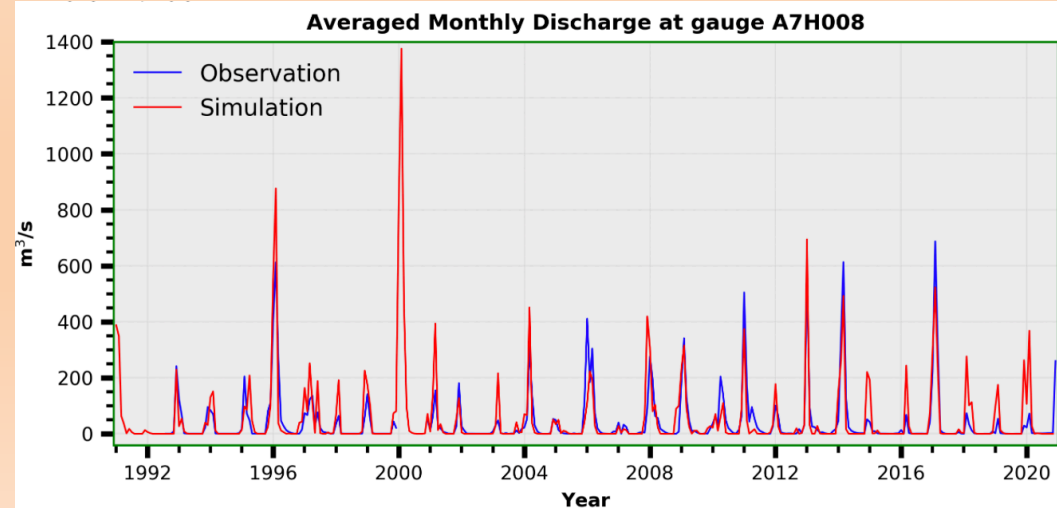
- Evaluation of the TerM performance for South Africa rivers.
- Sensitivity of the TerM to spatial resolution.
- To investigate climate change impacts on future river flows in South Africa.
- **To develop an urban scheme** within the TerM and simulate urban effects on hydrological processes in Gauteng.

Modifications of the TerM runoff scheme:

- dependence of soil infiltration capacity on rainfall duration,
- sub-grid heterogeneity of infiltration capacity,
- **evaporation from river surface**,
- reduced response of stomatal resistance to soil moisture deficit.



TerM model performance for the Limpopo river

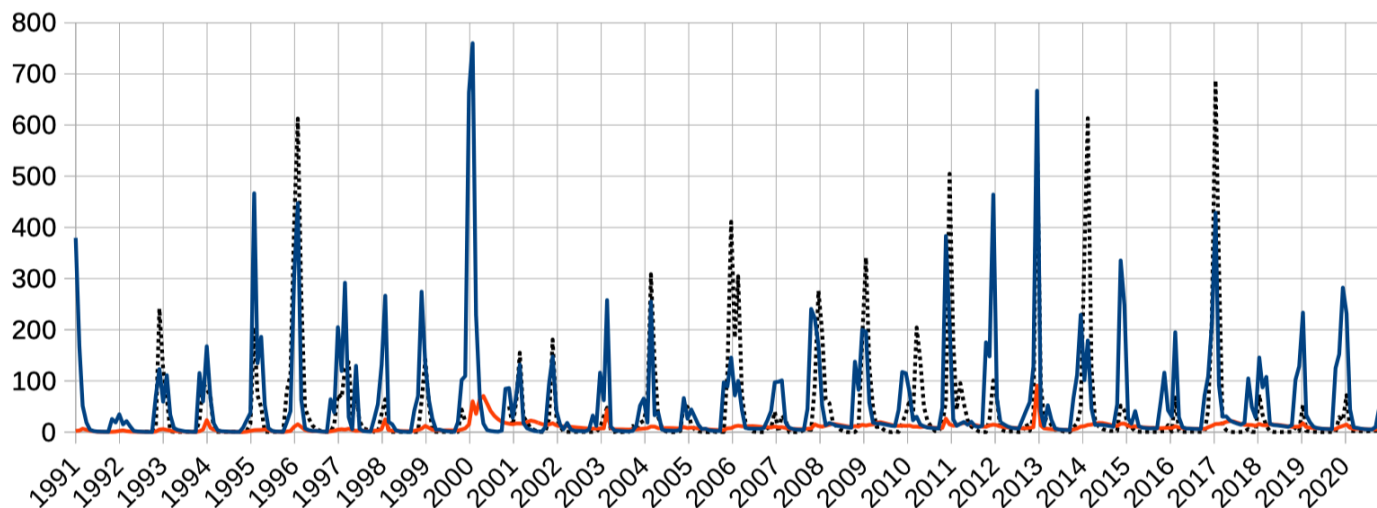


Эффект суточного цикла осадков (численный эксперимент)

2) Effect of use of daily-averaged ERA5 atmosphere forcing

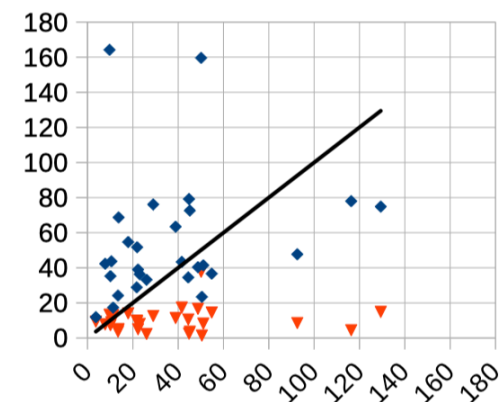
Results of model calculation for **A5H008** gauge with two types of forcing:

discharge time series (m^3/s):



- observation
- model, timestep = 1 hour, ERA5 timestep = 1 day
- model, timestep = 1 hour, ERA5 timestep = 1 hour

year-averaged
discharge (m^3/s):



Mean monthly discharge:

- 41.3 m^3/s
- 9.7 m^3/s (bias = -77%)
- 57.2 m^3/s (bias = +39%)

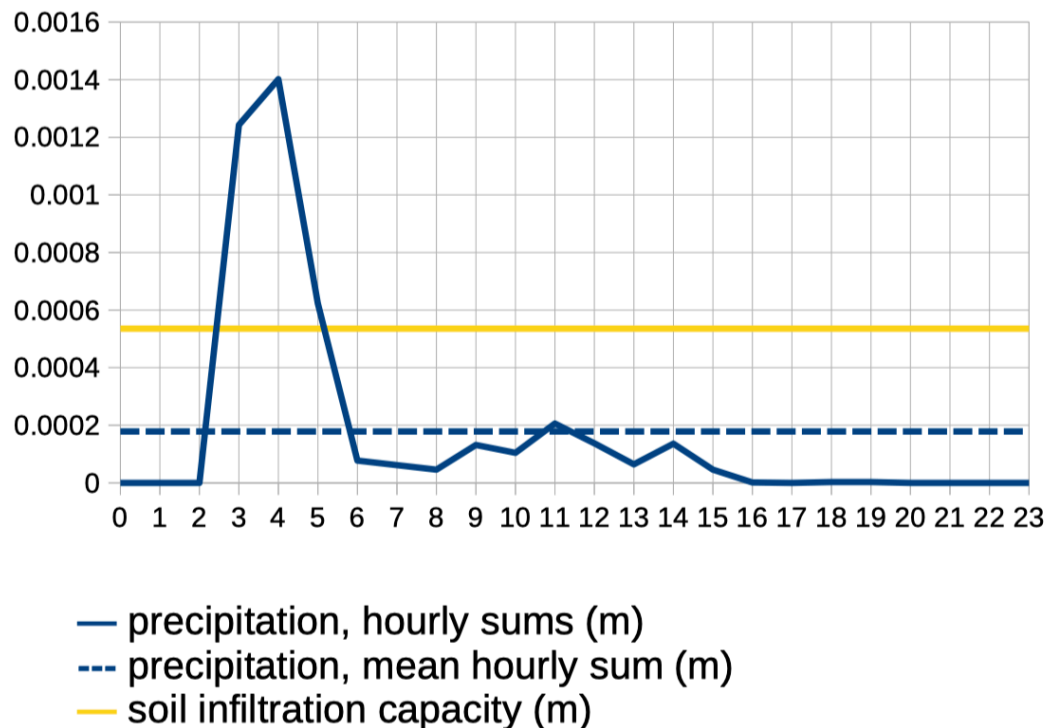
It is important to use less than daily ERA5 timestep

Эффект суточного цикла осадков (объяснение)

2) Effect of use of daily-averaged ERA5 atmosphere forcing

Physical justification:

example of daily precipitation distribution:



Runoff occurs when hourly precipitation sum is larger than soil infiltration capacity

Калибровка модели по стоку Лимпопо

Automatic calibration of river runoff at LSM TerM: first results

calibrated value: mean monthly river discharge

river: Limpopo, gauge A7H008 (Beit Bridge), catchment area 202 985 km²

time period: 1992–2019

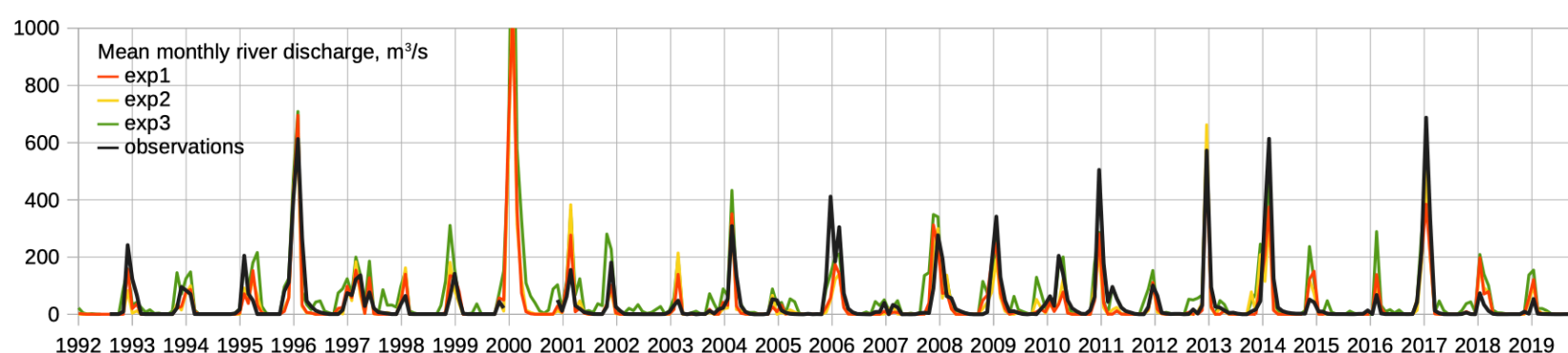
model resolution: spatial 0.5×0.5°, temporal 1 hour

calibration method: ROPE

objective function: NSE

calibration experiments:

- 1) exp1 – “alternative” formulation of runoff, hourly ERA5 forcing (3 parameters, 50 iterations)
- 2) exp2 – “alternative” formulation of runoff, daily ERA5 forcing (3 parameters, 50 iterations)
- 3) exp3 – original formulation of runoff, daily ERA5 forcing (4 parameters, 100 iterations)



Quality metrics:

	NSE	bias
exp1	0.71	−21.4 %
exp2	0.66	−22.9 %
exp3	0.58	+40.0 %

Углеродный цикл в модели TerM

Основные уравнения:

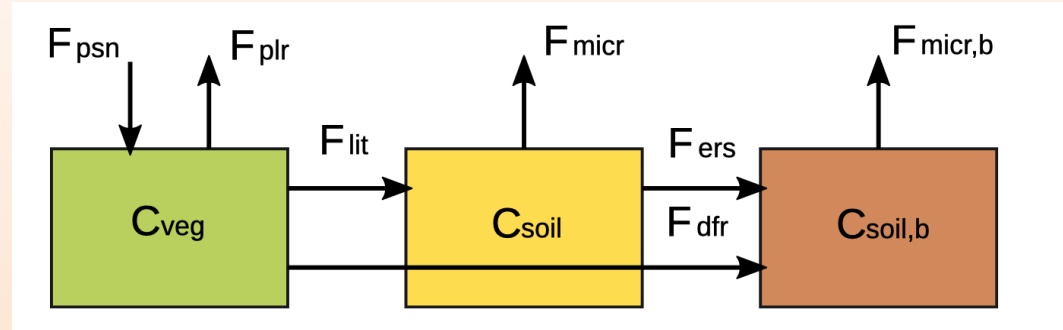
$$\frac{\partial C_{veg}}{\partial t} = F_{psn} - F_{plr} - \frac{C_{veg}}{\tau_{veg}} - F_{dfr,a} - F_{dfr,b}$$

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

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

Запасы углерода в почве и растительности рассчитываются для каждой ячейки и каждого ФТР:

- needleleaf evergreen tree
- needleleaf deciduous tree
- broadleaf evergreen tree
- broadleaf deciduous tree
- tropical seasonal tree
- cool grass (c3)
- evergreen shrub
- deciduous shrub
- arctic deciduous shrub
- arctic grass
- crop
- irrigated crop
- warm grass (c4)
- not vegetated



Запасы (пулы):

C_{veg} – пул растительности

C_{soil} – пул в почве

$C_{soil,b}$ – антропогенный пул

Продукция:

F_{psn} – фотосинтез (модель Фаркухара)

Дыхание:

F_{plr} – дыхание растительности

F_{micr} – дыхание почвы

$F_{micr,b}$ – разложение антропогенного пула

Переходы между пулами:

F_{lit} – опад

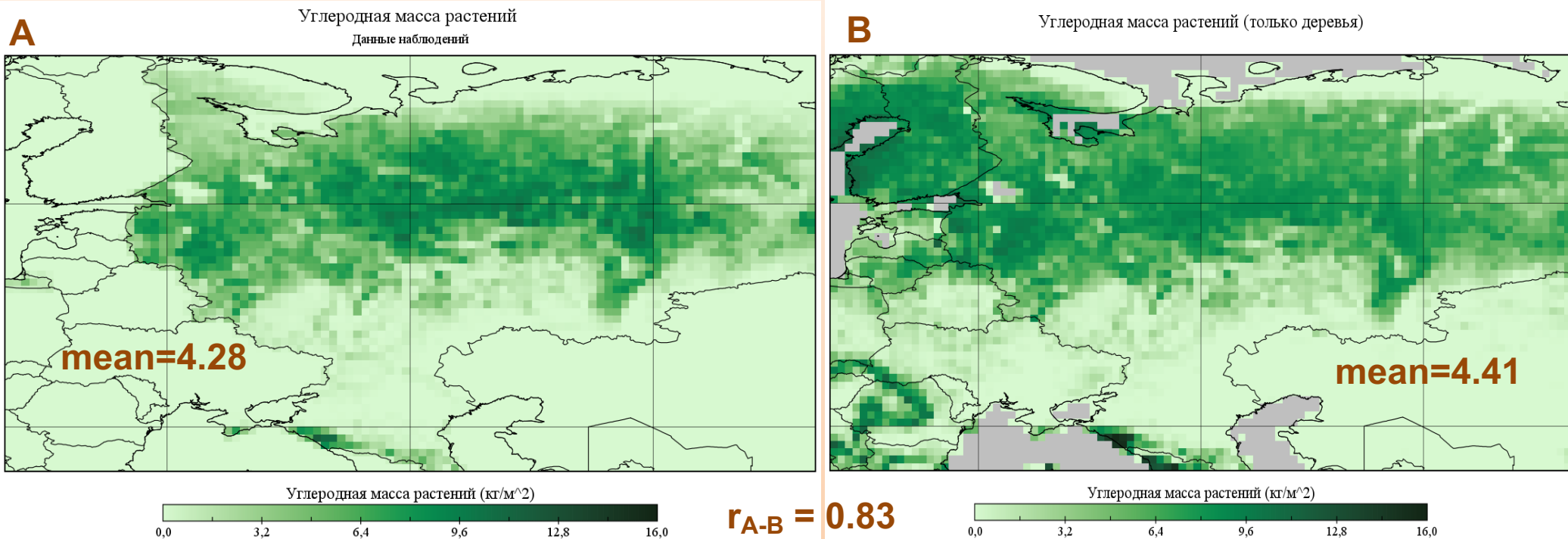
F_{dfr} – обезлесение

F_{ers} – эрозия почвы

Запас углерода в растительности (ETP)

Спутниковые данные, ИКИ РАН/MODIS
углерода в стволовой древесине, кг/м²

Модель TerM, кг/м², 2020 г.



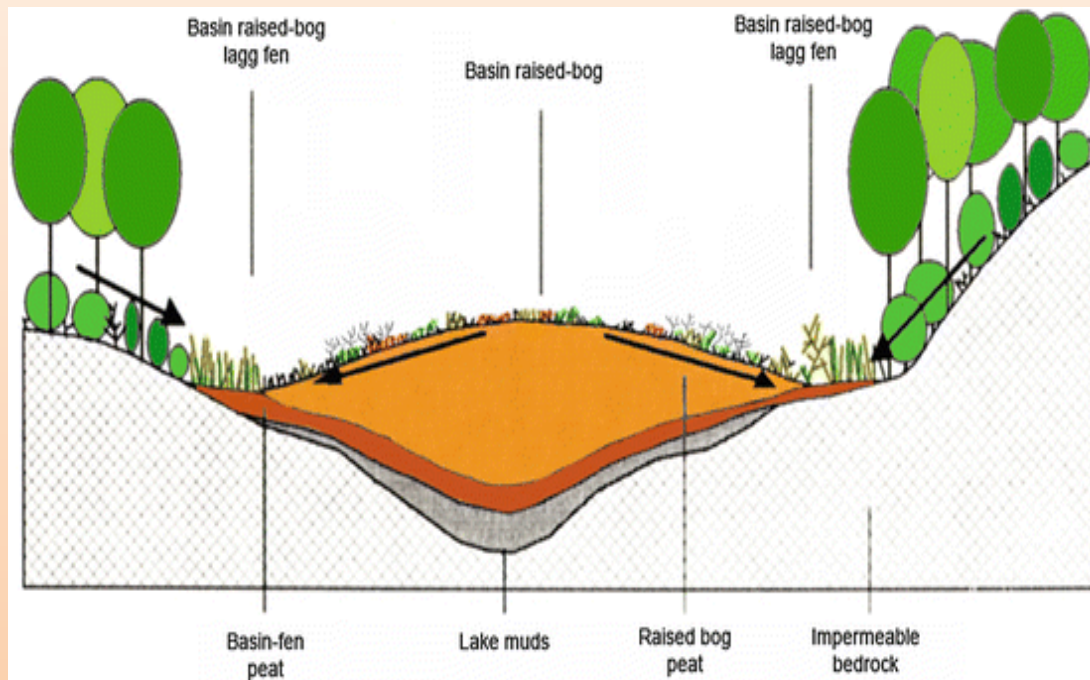
Постановка численного эксперимента:

- Период 1991-2020 гг.;
- Атмосферное воздействие – ERA5;
- Данные по объёму древесины переведены в запасы углерода в предположении плотности древесины 600 кг/м³;
- Плотность углерода в TerM просуммирована по классам высокой растительности.

Модель баланса углерода в болотах

(Г.А.Александров, А.В.Елисеев, С.Н.Денисов, В.Ю.Богомолов)

Олиготрофное болото



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

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

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:

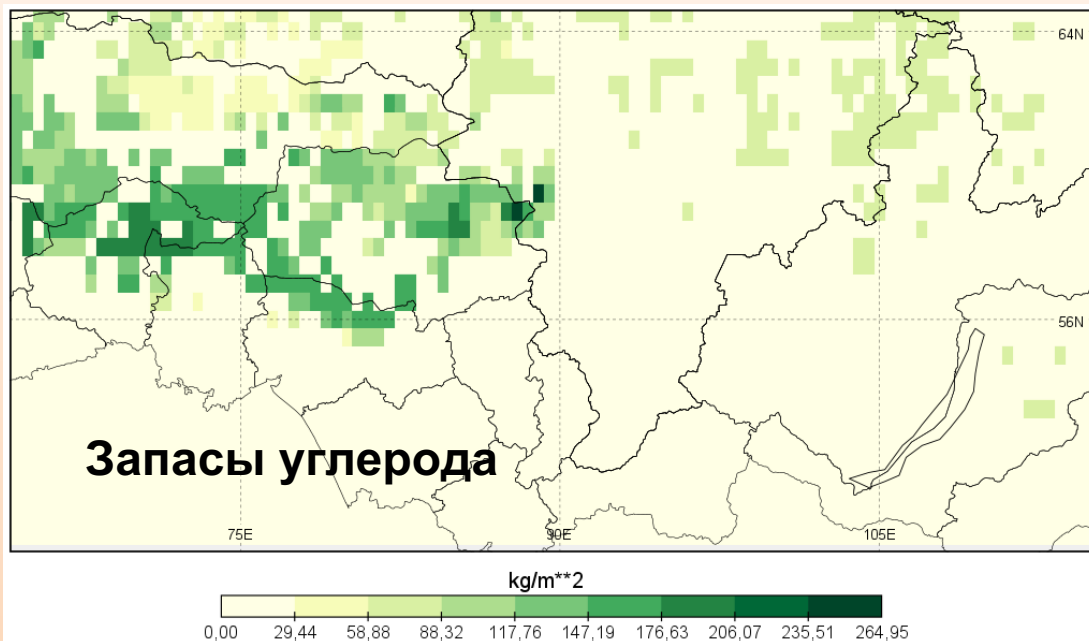
$$F_{mcr,i} = C_{peat,i} * \frac{(z_{peat,i} - z_{GWL,i})R_a + (z_{GWL,i} - z_{MS})R_c}{(z_{peat,i} - z_{MS})}$$

Высота центра болота пропорциональна запасам C:

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

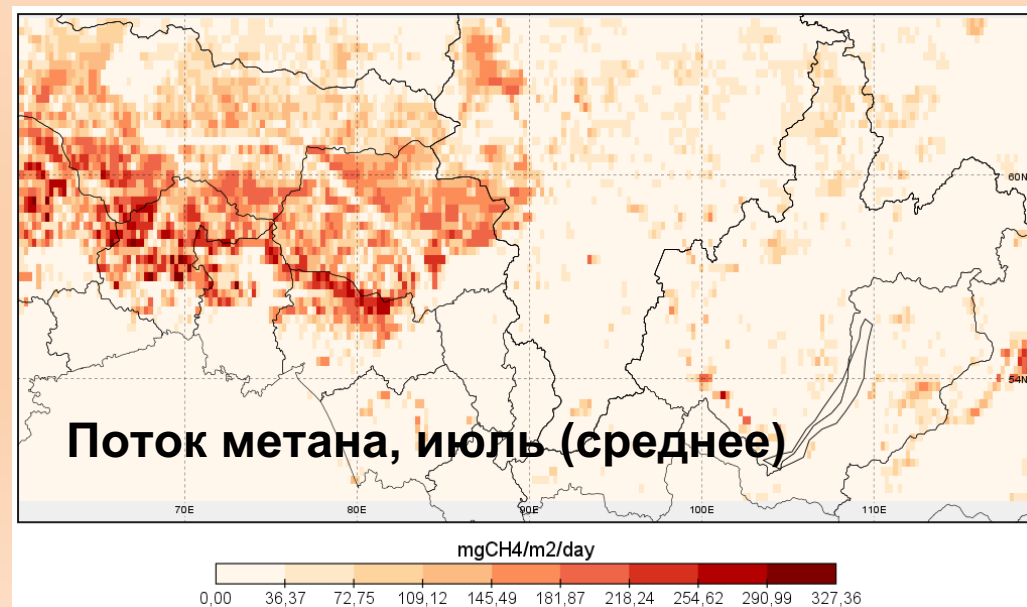
Шаг модели по времени – 1 год

Применение модели болот (C и CH₄)



- атмосферное воздействие ERA5, 0.5°x0.5°
- 1990-2020 гг.
- карта растительного покрова GLCC,
- параметры почвы –GSDE,
- для распределения болотных массивов – маска на основе GPM v.2.0

Элемент болота	Модель (среднее), мг CH ₄ /м ² /сут	Измерения мг CH ₄ /м ² /сут (Sabrekov, et al., 2014)
Топь	218.4	133-792
Рям	28.8	1.6-40



К гибкой структуре моделей углеродного цикла ...

Обобщённая система для биогеохим. пулов:

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

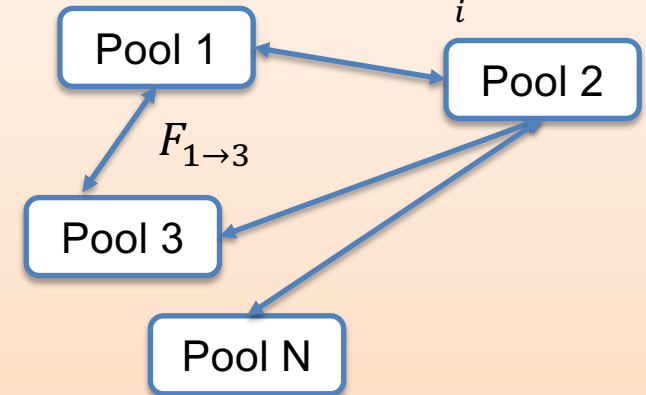
$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{j \rightarrow i} - \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{soil} + N_{veg}} F_{i \rightarrow j}. \quad (2)$$



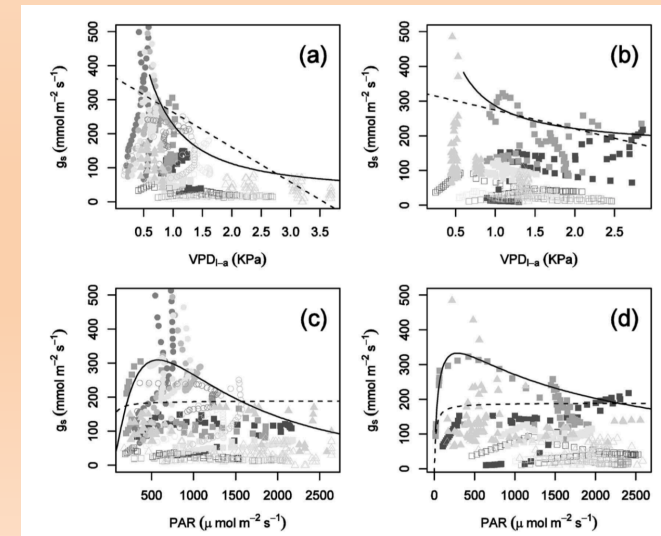
“Конструктор моделей
углеродного цикла”

Цель: реализация возможности выбора структуры модели углеродного цикла в рамках единого программного кода. В частности, это позволит выбирать модель оптимальную для данной экосистемы/функционального типа растительности.

$$F_{1 \rightarrow 2} = f(x_1, \dots, x_n) = \prod_i f_i(x_i)$$



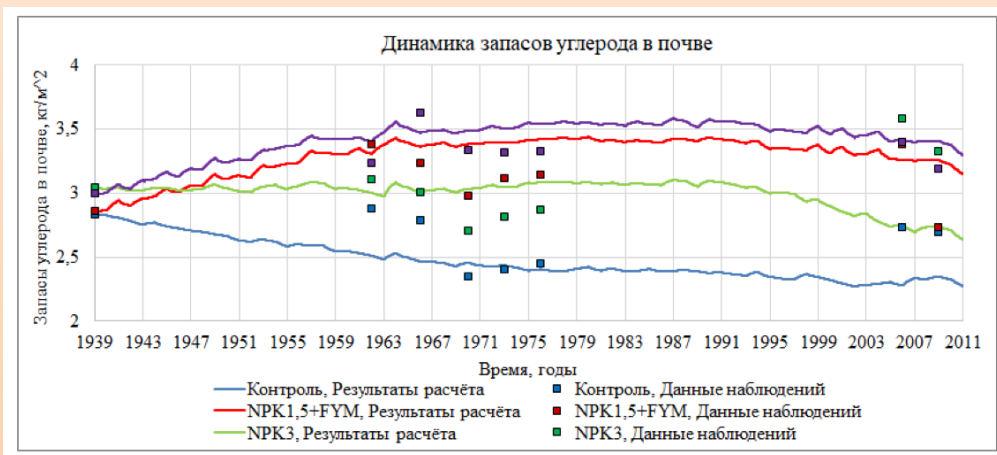
Экспериментальное
определение $f_i(x_i)$



Результаты углеродных моделей почвы (углеродный конструктор)

SOCS model (Ryzhova, 2022):

- 2 пула в почве
- квадратично нелинейная
- концепция насыщения C в почве

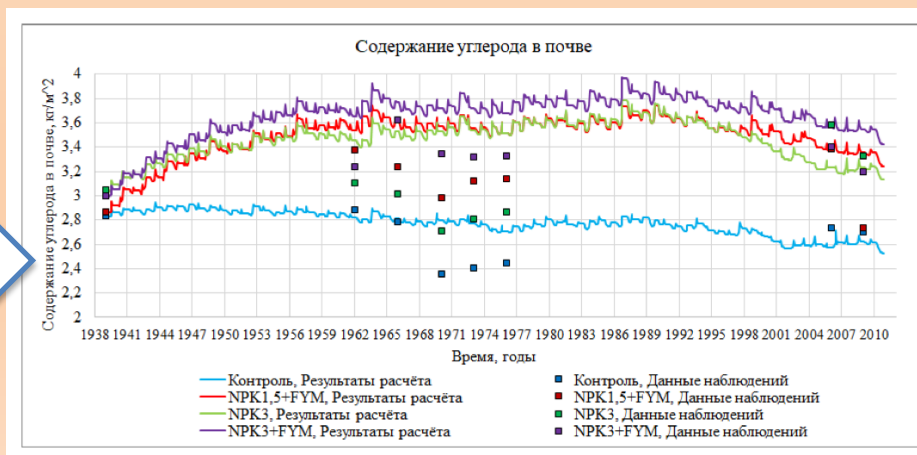
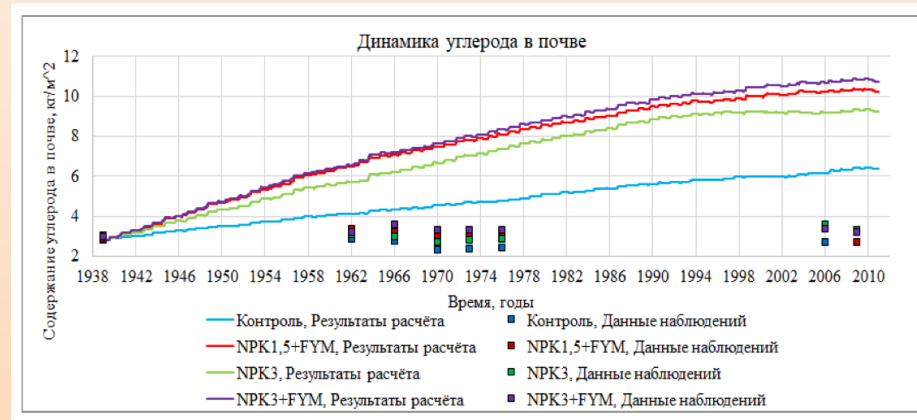


RothC model

- 4 пула в почве
- линейная
- калиброванная на большом числе типов почвы

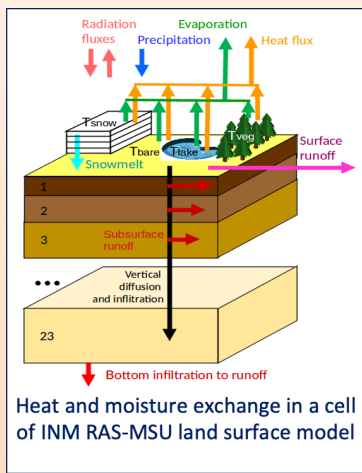


TerM standalone model



Вместо Заключения ...

Модель TerM для диагноза и прогноза углеродного и водного циклов суши



Диагноз пулов и потоков
углерода/воды 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»

Дистанционное
зондирование Земли

Валидация, калибровка

Наземные измерения
(карбон. полигоны)

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

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



Репозиторий модели TerM

http://tesla.parallel.ru/vbogomolov/INMCM37B_lake

T

TerM - INM RAS-MSU land surface scheme

Project ID: 14 [Leave project](#)

489 Commits

35 Branches

1 Tag

173.4 MiB Project Storage

1.Bug fixed in LAKE 2.Lake variables added to output in TM

Victor Stepanenko authored 9 hours ago

c70e1960

master

INMCM37B_lake /

+

History

Find file

Edit

↓

Clone

Add README

Add LICENSE

Add CHANGELOG

Add CONTRIBUTING

Add Kubernetes cluster

Set up CI/CD

Add Wiki

Configure Integrations

Name	Last commit	Last update
INMCM37B	1.Bug fixed in LAKE 2.Lake variables added to ou...	9 hours ago
doxygen	1. .f90 source files duplicating .f removed from /l...	7 years ago

Техническая документация: TerMPS

Last edited by [Anna Ryazanova](#) 3 minutes ago

TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в модели деятельного слоя суши.

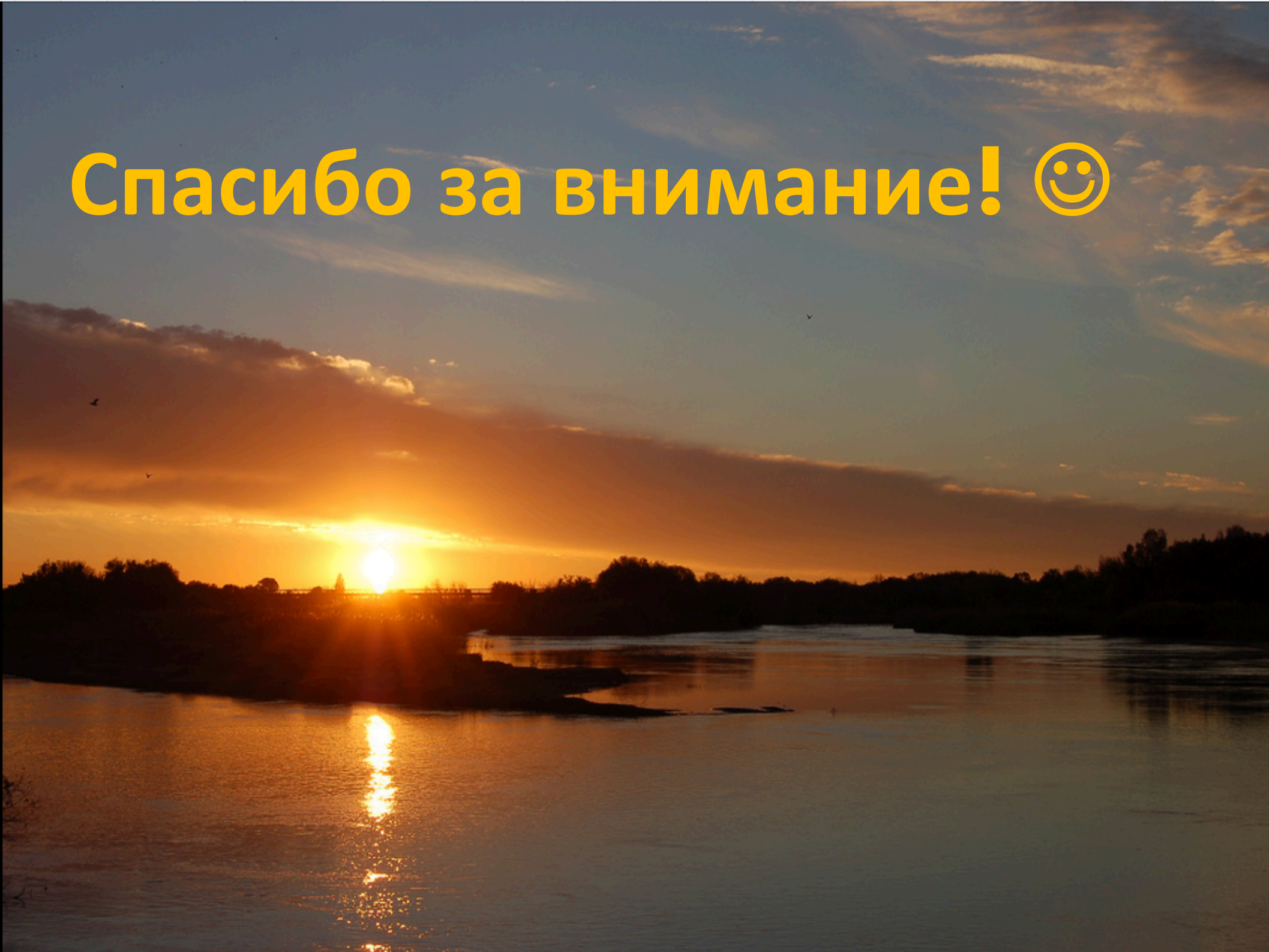
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
Научно-исследовательский вычислительный центр

Модель деятельного слоя суши
ИВМ РАН – МГУ (TerM)

Техническая документация

Москва, 2024

Спасибо за внимание! 😊



Подсеточная неоднородность снежного покрова

Для расчета покрытости водосбора снегом использована кривая распределения снежного покрова в виде гамма-распределения [4]:

$$f_c = 1 - \left[a_c^{\alpha_c} / \Gamma(\alpha_c) \right] \int_0^{K_c} x^{\alpha_c - 1} \exp(-a_c x) dx, \quad (2.27)$$

где α_c — параметр распределения, равный $1/C_{vc}^2$, C_{vc} — коэффициент вариации запаса воды в снеге по площади; K_c — относительный слой талой воды к моменту расчета t :

$$K_c = \frac{1}{s_{нач}} \int_{t_0}^t h_c(\tau) d\tau, \quad (2.28)$$

где $s_{нач}$ — осредненный по водосбору запас воды в снеге на дату начала снеготаяния t_0 .

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»:

$$N_i = (I_n + I_a)$$

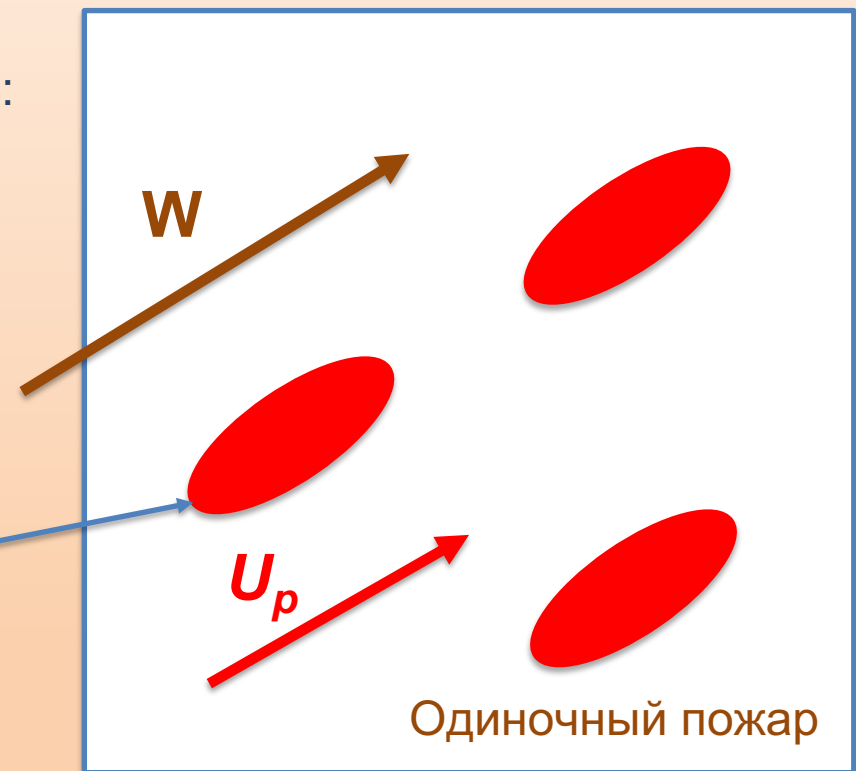
- Площадь среднего пожара:

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

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

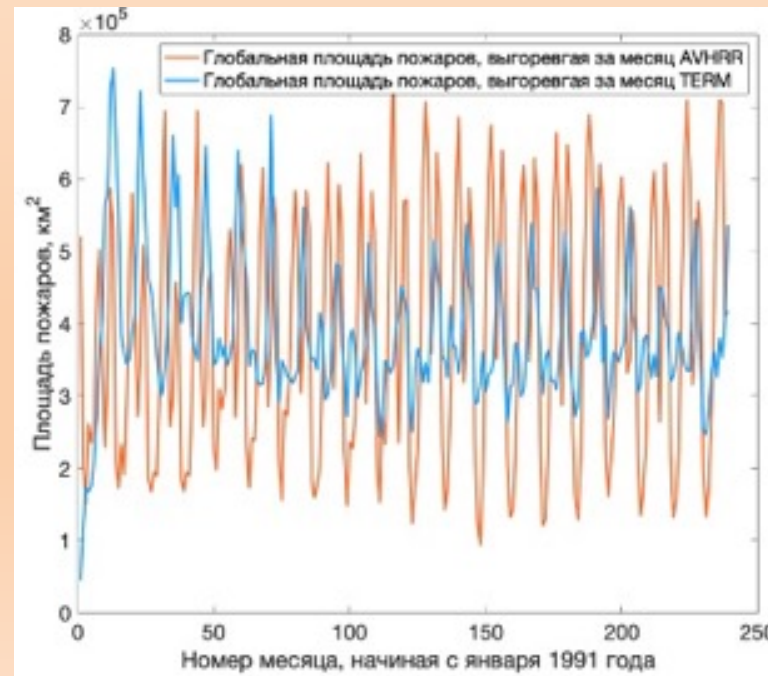
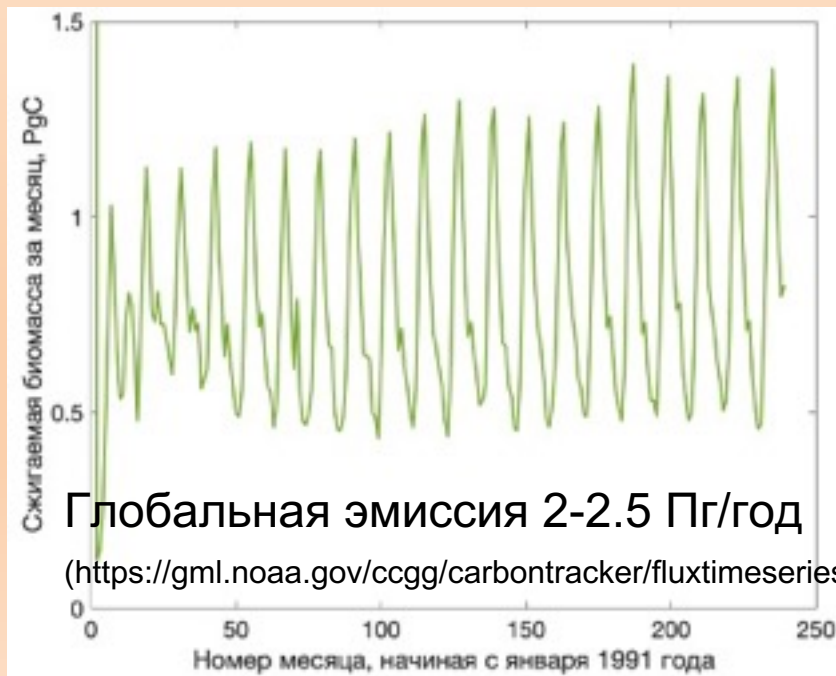
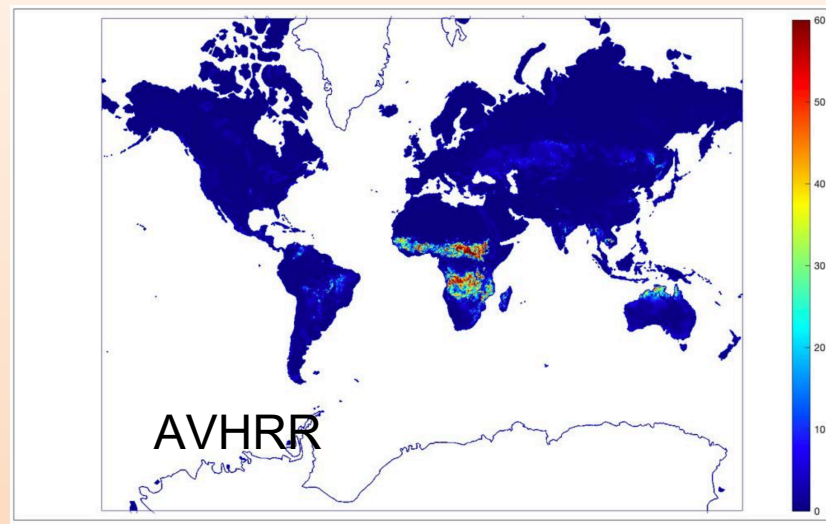
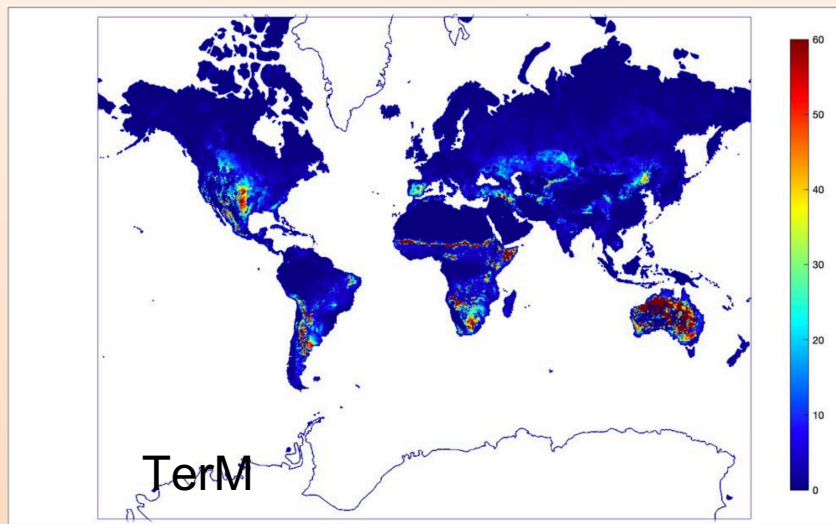
$$u_p = u_{max} C_m g(W)$$

Ячейка модели



Проверка модели пожаров

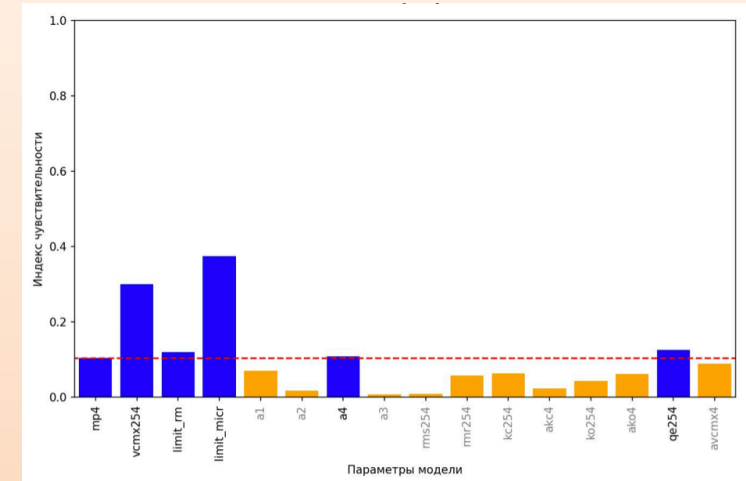
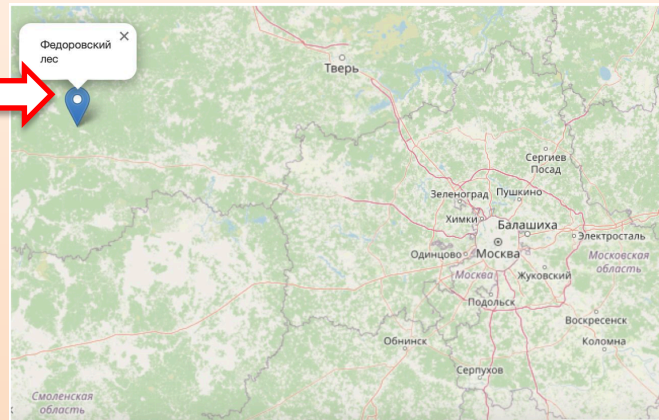
- атмосферное воздействие ERA5, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$
- 1996-2011 гг. Средние площади пожаров за 15 лет



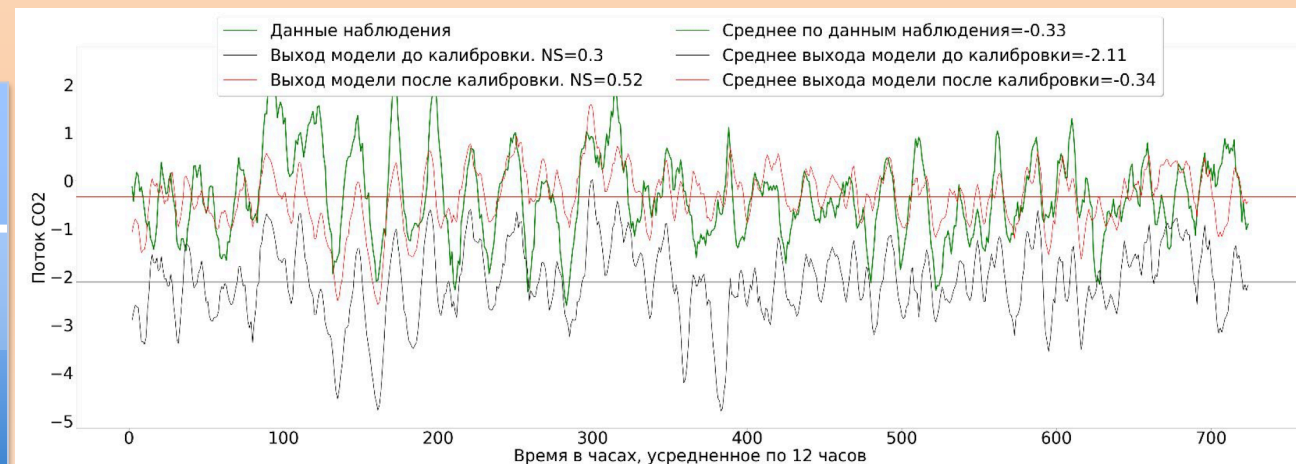
Калибровка модели на локальных данных (Фёдоровское)

Данные пульсационных измерений над еловым лесом (Тверская область)

Чувствительность модели:
FAST (Saltelli et al., 1999)

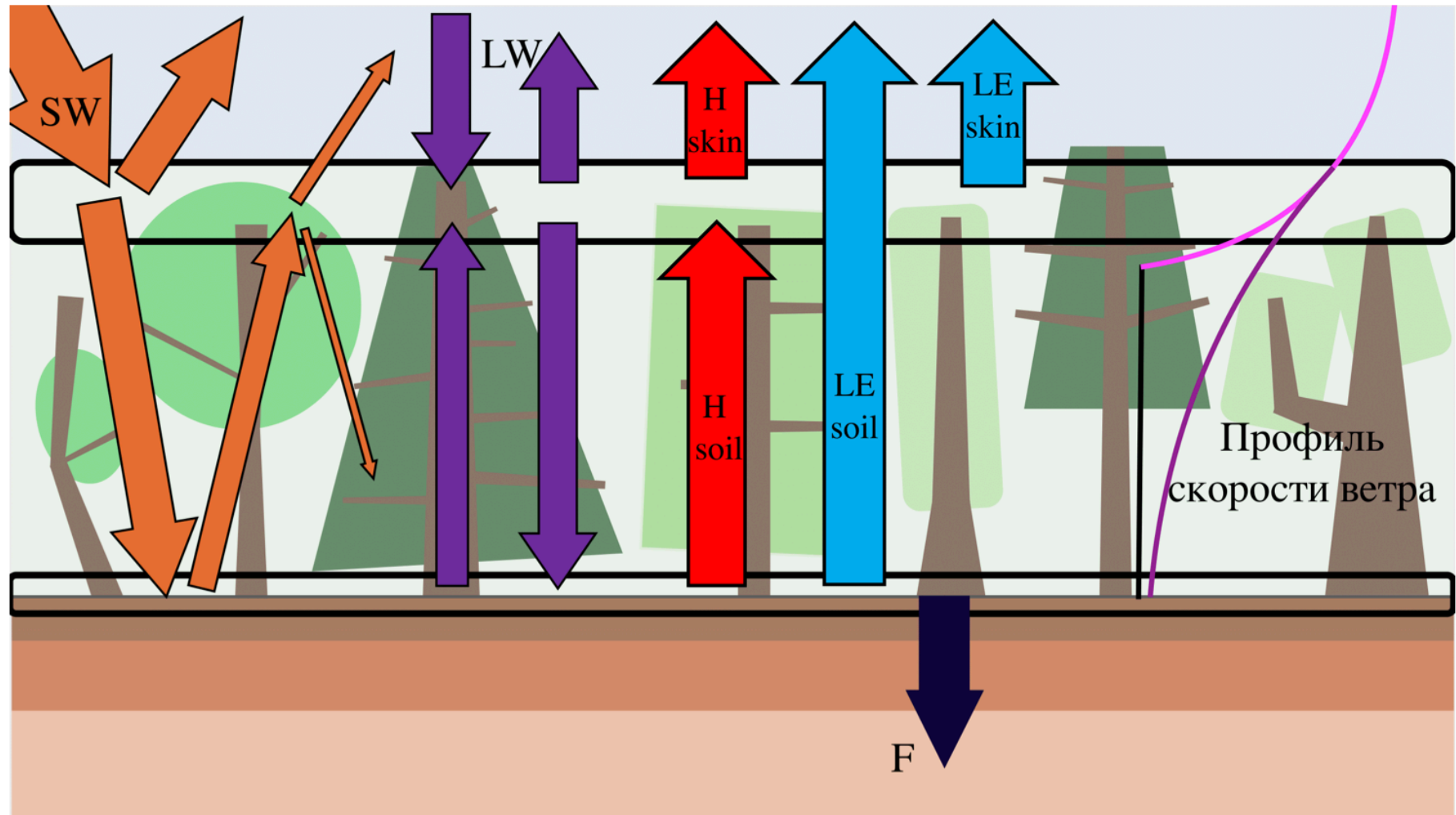


Оптимизация модели: ROPE
(Bárdossy and Singh, 2008)



	Mean error	Nash-Satcliffe coeff.
Default params	-1.78	0.30
Calibrated params	-0.18	0.53

Интегральная модель теплового баланса слоя растительности



Неизвестные:

T_{skin} и T_{soil}

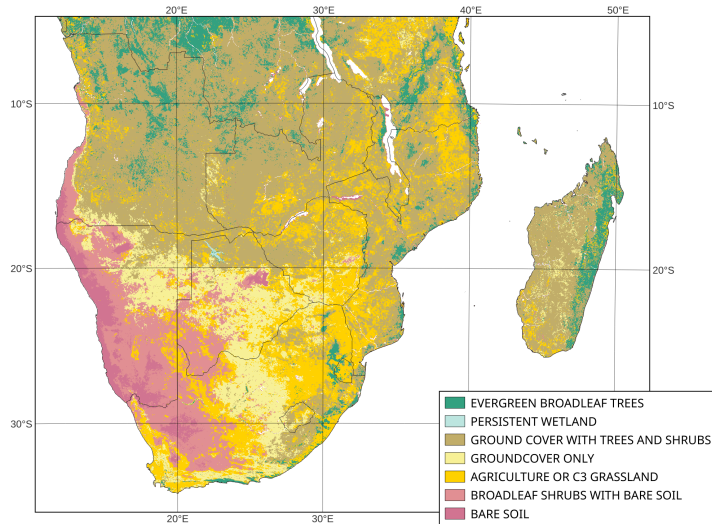
$$\begin{cases} SW_{net,soil} + LW_{net,soil} - H_{soil} - LE_{soil} - F = 0 \\ SW_{net,skin} + LW_{net,skin} - H_{skin} - LE_{t skin} + H_{soil} = 0 \end{cases}$$

Land cover and soil maps for South Africa (TerMPS)

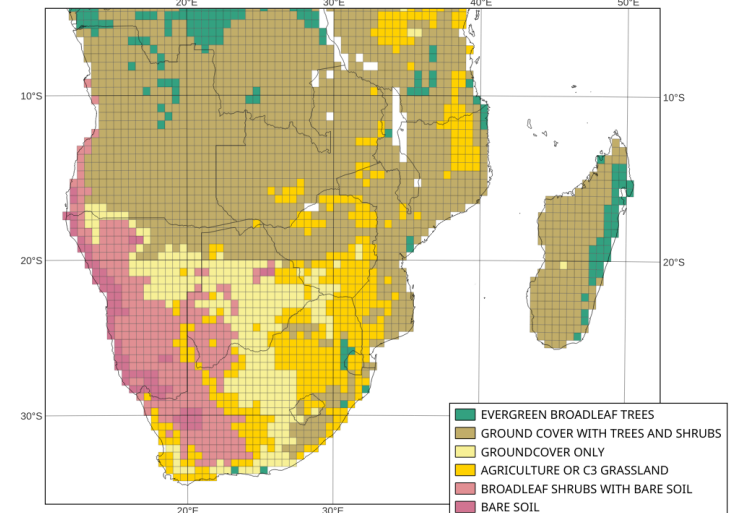
1km-resolution source database GLCCv2

Land cover at 0.5x0.5 model grid

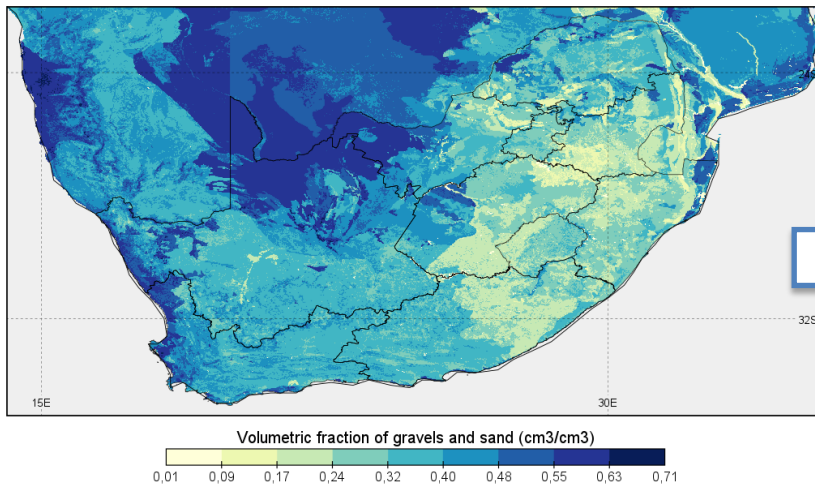
GLCCv2 land cover database at SiB1 classification



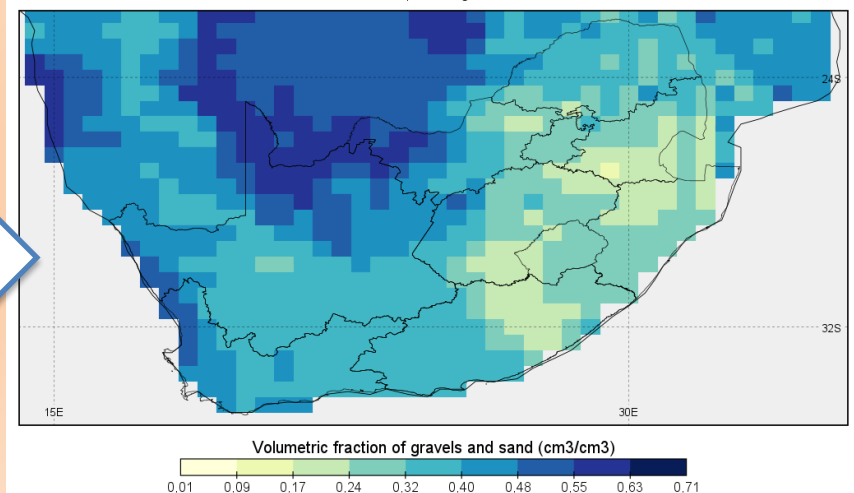
GLCCv2 database: dominant land cover class at 0.5° cells (SiB1 classification)



Volumetric fraction of gravels and sand
depth average



Volumetric fraction of gravels and sand
depth average



Параметризация суточного цикла коротковолновой радиации

Задача: расчёт углеродного цикла до конца XXI в с суточными атмосферными данными

Проблема: среднесуточный фотосинтез меньше фотосинтеза от среднесуточного «форсинга».

$$[F_{psn}(Q)]^d < F_{psn}([Q]^d)$$

1. «Подгоночный» путь решения:

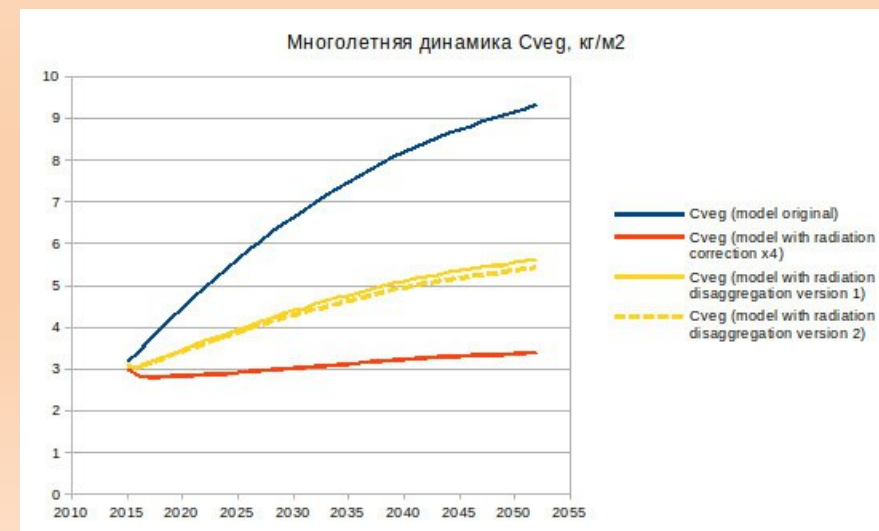
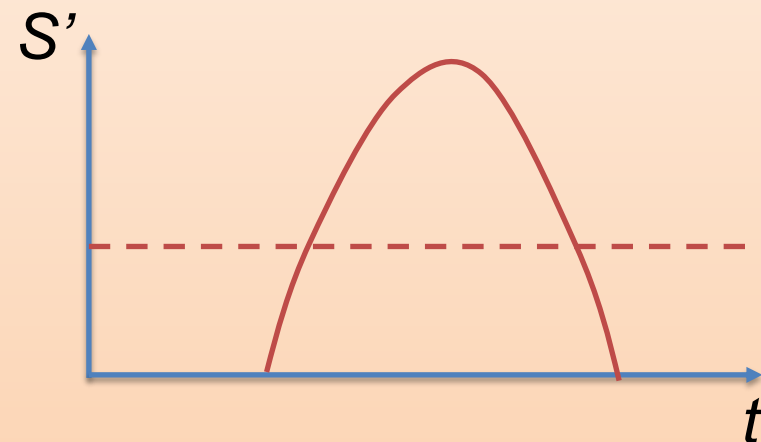
$$[F_{psn}(Q)]^d \approx \frac{F_{psn}(a \cdot [Q]^d)}{a}, a \approx 2 - 4$$

2. Восстановление суточного хода коротковолновой радиации:

$$S'(t) = S_0 \sin h_{\odot}$$

$$\sin h_{\odot} = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t_{\odot}$$

$$S_0 = [S']^d \frac{T_d}{t_3 - t_B} t_{\odot} \left[\frac{t_{\odot} \sin \delta \sin \varphi +}{+ \cos \delta \cos \varphi \sqrt{1 - \tan^2 \varphi \tan^2 \delta}} \right]$$



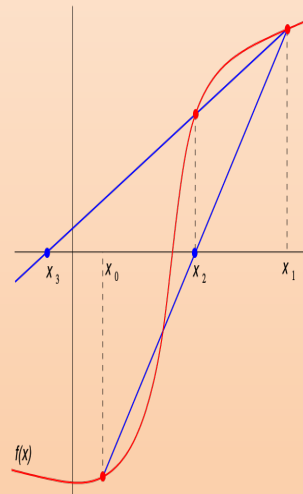
Validation and extension of the model for the BRICS use cases

Code / Use case	Use case Russia	Use case South Africa	Use case Brazil	Use case India	Use case China
TerM (water sector)	Config, open code, input/output/validation data, tech.docs, and user guides ...	In progress ...			
TerM (carbon sector)	In progress ...				
...					

Модифицированная схема расчёта ПОТОКОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ

Operational algorithm Secant method for T_s :

- Update soil profile
given $T_{s,k}$, find B
- Compute H_s , LE_s , E_{sr}
- Compute heat
balance residual
 $r(T_{s,k})$
 - Find $T_{s,k+1}$



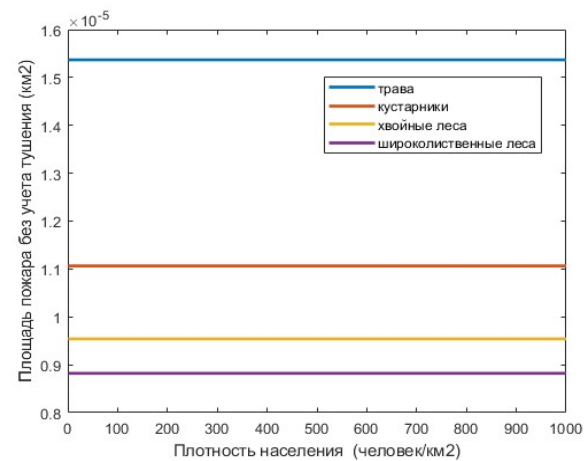
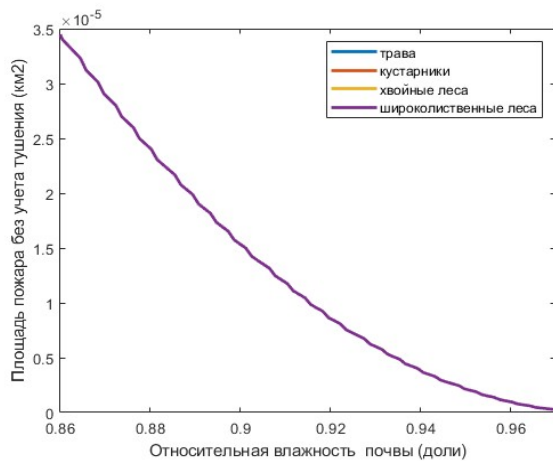
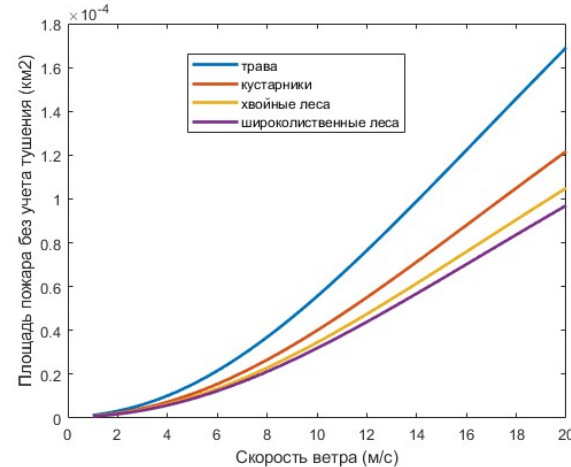
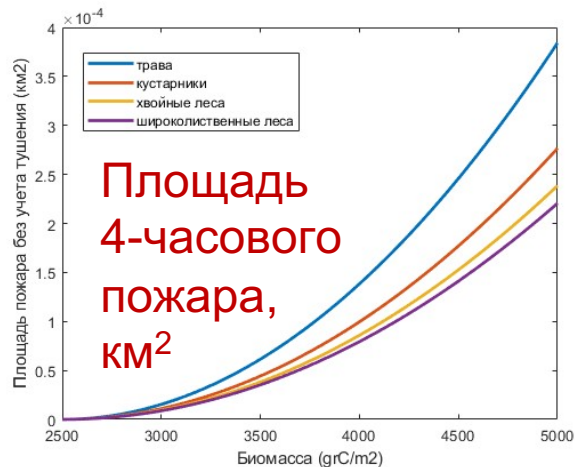
Algorithm with T_{skin} Secant method for T_s :

- Update soil profile
given $T_{s,k}$, find B
 - **Update $T_{skin,k}$**
- Compute H_s , LE_s , E_{sr}
- Compute heat
balance residual
 $r(T_{s,k})$
 - Find $T_{s,k+1}$

Текущие работы (до конца 2023 г.)

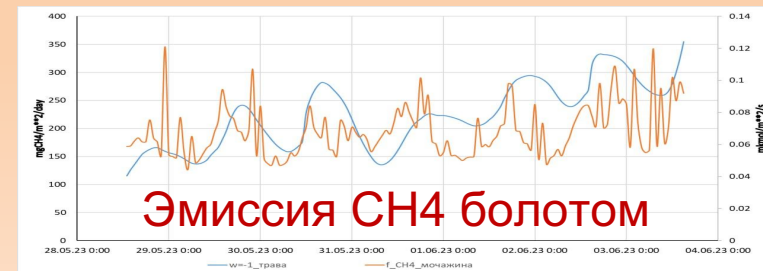
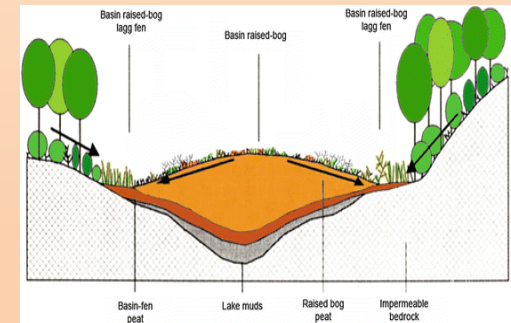
- Модель пожаров (из модели CLM)
- Модель торфонакопления в болотах ИФА РАН
- Рабочий прототип модели азотного цикла

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!

Обеспечение внешних данных о подстилающей поверхности

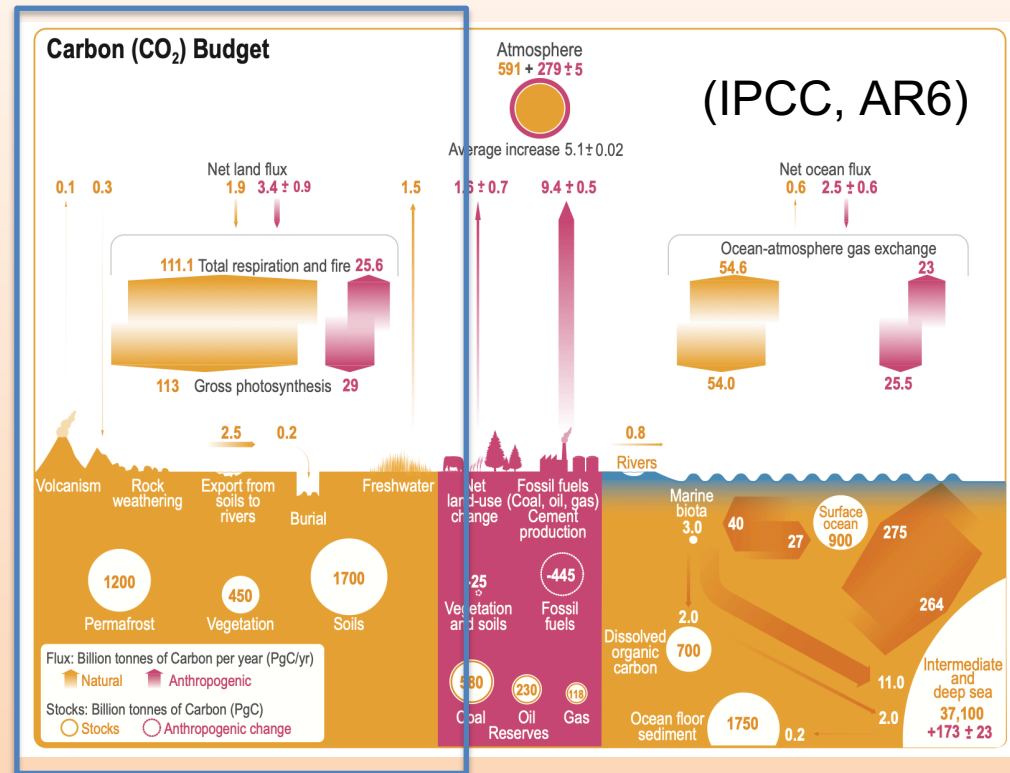
Задача — обеспечение блока деятельного слоя суши и модели климата данными о параметрах подстилающей поверхности.

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

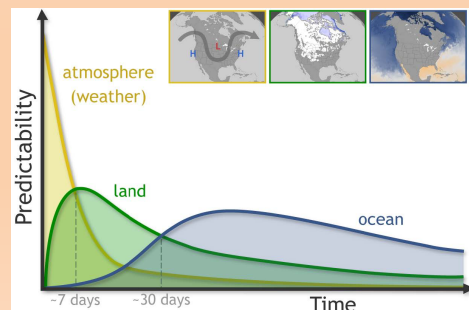
Main foci for land surface processes

- Carbon cycle (impacts on climate change)

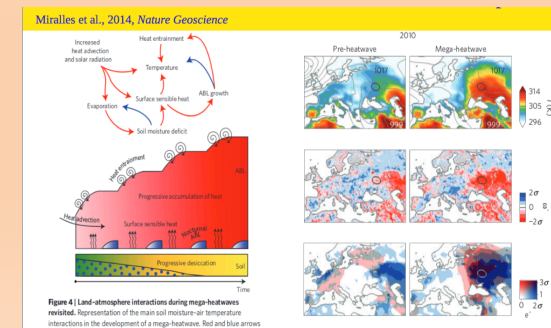


- Water cycle (extreme weather, floods, droughts, ...)

Soil moisture is a source of atmospheric predictability beyond the inner atmospheric predictability timescale



Soil-atmospheric boundary layer feedbacks during heatwaves



Photosynthesis scheme: interpolation between limiting cases (CLM, **TerM**, JULES, CABLE)

(Clark et al., 2011)

- GPP rate is a minimum of rates of three photosynthesis stages:

Michaelis-Menten expr.

Rubisco-limitation

$$W_c = \begin{cases} V_{\text{cmax}} \left(\frac{c_i - \Gamma}{c_i + K_c(1 + O_a/K_o)} \right) & \text{for C}_3 \text{ plants} \\ V_{\text{cmax}} & \text{for C}_4 \text{ plants} \end{cases}$$

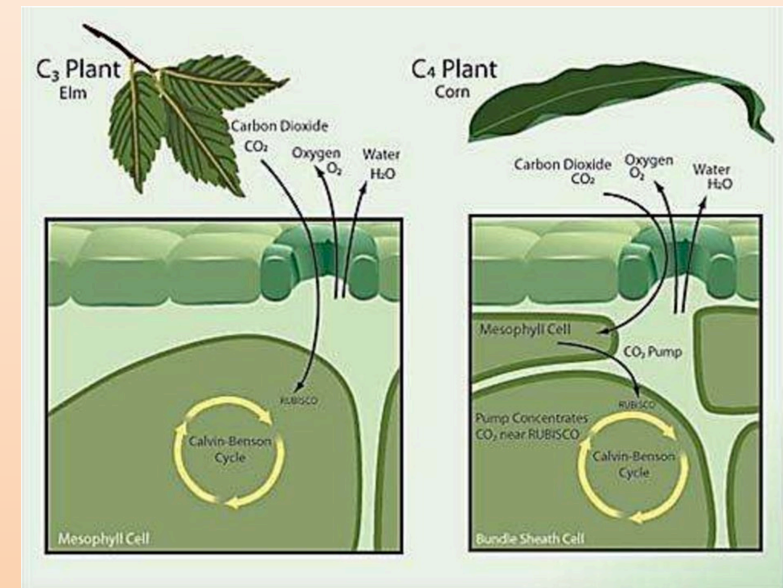
light-limitation

$$W_l = \begin{cases} \alpha(1 - \omega) I_{\text{par}} \left(\frac{c_i - \Gamma}{c_i + 2\Gamma} \right) & \text{for C}_3 \text{ plants} \\ \alpha(1 - \omega) I_{\text{par}} & \text{for C}_4 \text{ plants} \end{cases}$$

transport of photosynthetic products

$$W_e = \begin{cases} 0.5 V_{\text{cmax}} & \text{for C}_3 \text{ plants} \\ 2 \times 10^4 V_{\text{cmax}} \frac{c_i}{P_*} & \text{for C}_4 \text{ plants} \end{cases}$$

radiation



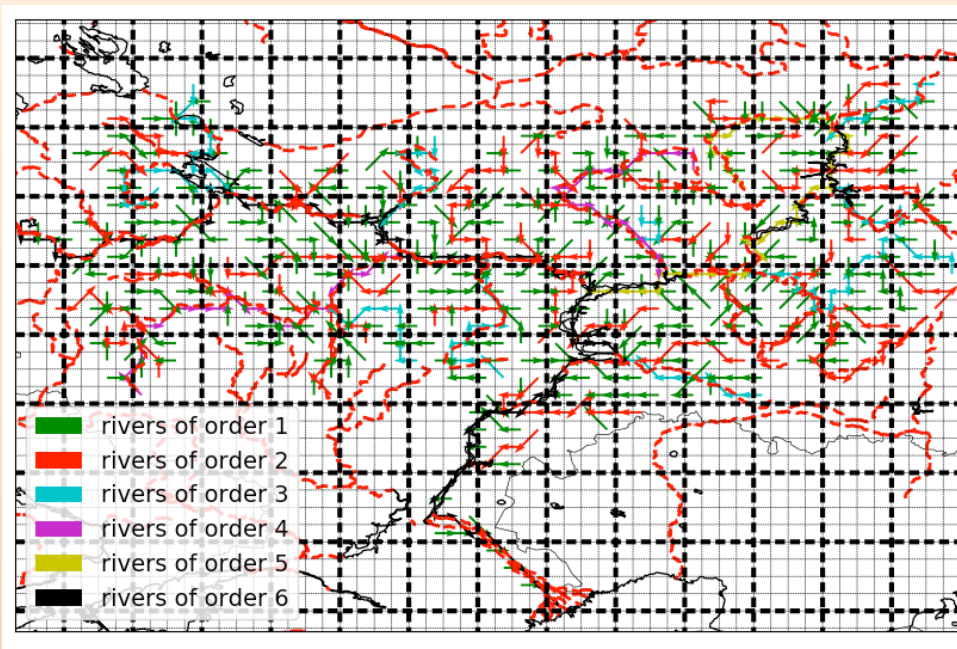
$W = \min(W_c, W_l, W_e)$
or smoothed modification of min function

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

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

Module for greenhouse gas emissions and uptake by reservoirs

Model of thermohydrodynamics of rivers



- Diffusion wave model for fluid dynamics
- Simulation of thermal regime

Model calibration

SP  **TPY**

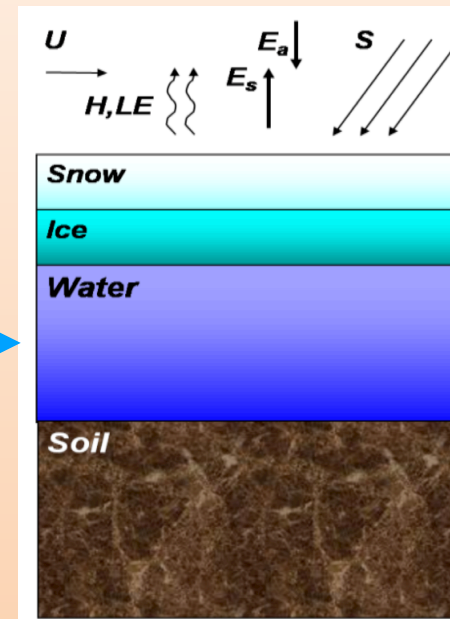
(Optimization methods
Monte-Carlo, ROPE, ...)

LAKE

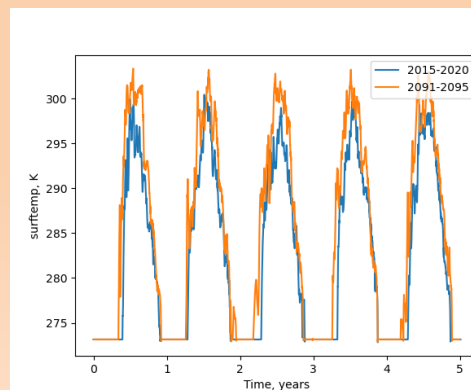
CH₄ measurement
data
collected at Russian
reservoirs

Lake model LAKE3.x

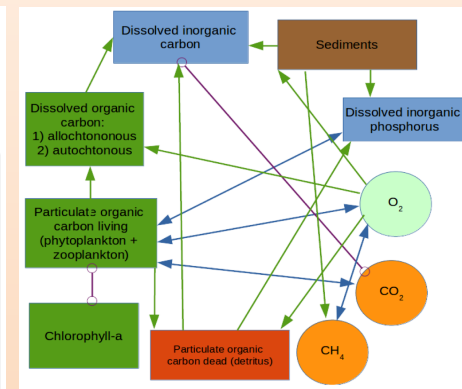
Thermo-, and hydrodynamics



Surface temperature of
Kuibyshev reservoir

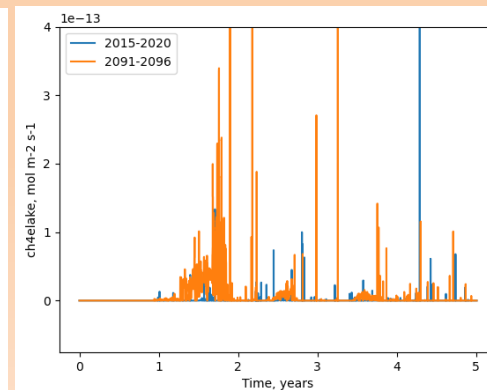


Biogeochemistry



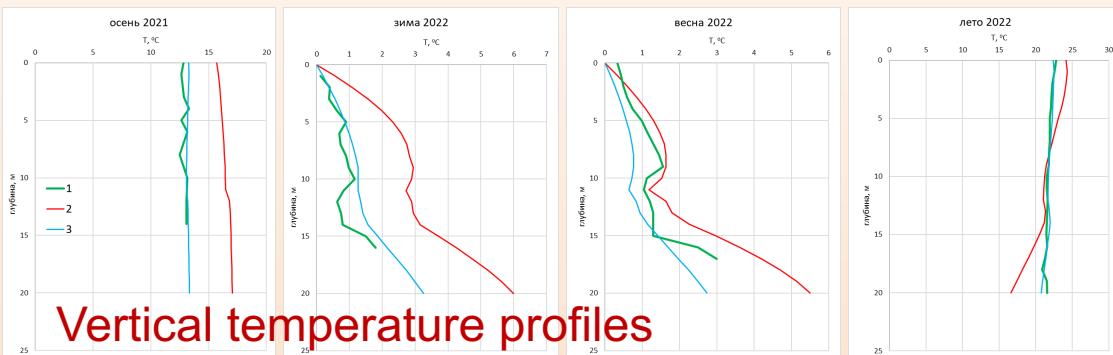
- O₂, CH₄, CO₂ – концентрации и потоки
- Продукция, дыхание, разложение ...

CH₄ flux,
Kuibyshev reservoir



Calibration of the reservoir model

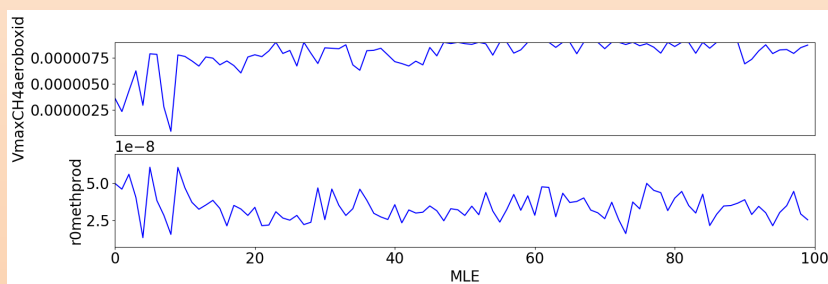
Stages: 1. Optimization of temperature 2. Oxygen optimization 3. Methane optimization



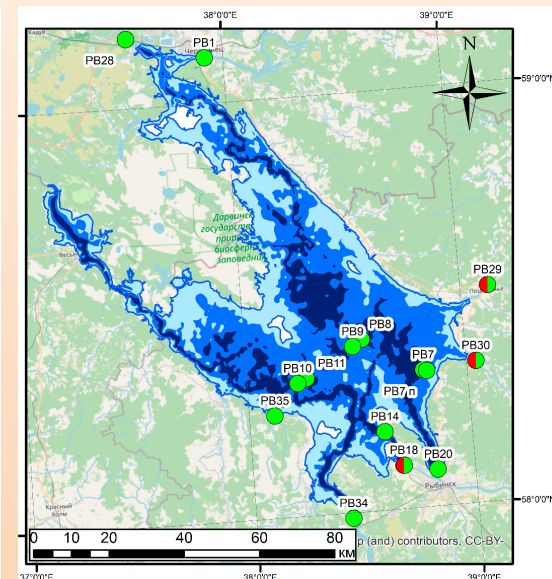
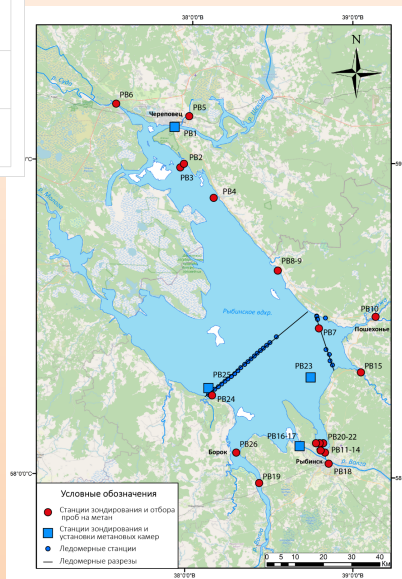
Vertical temperature profiles

- 1 - observations ---
- 2 - before calibration and selection of the correct forcing ---
- 3 - after calibration ---

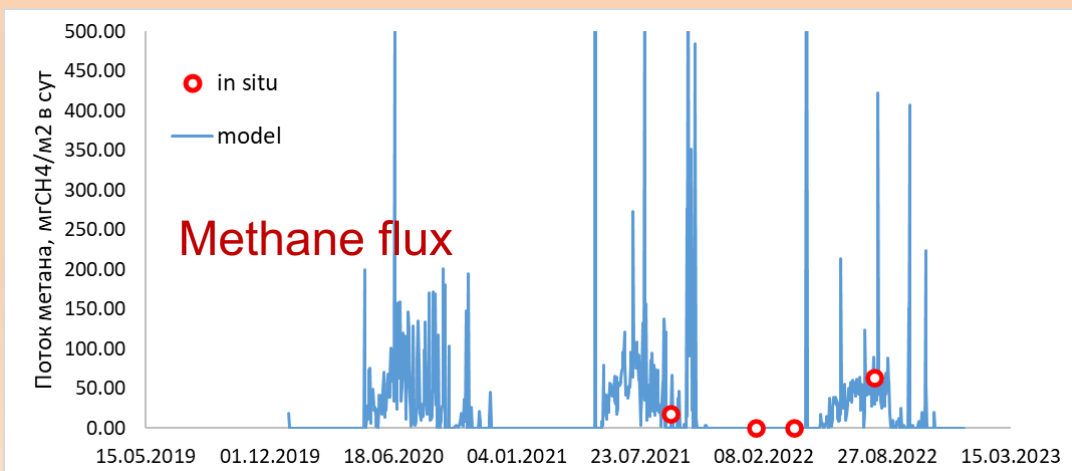
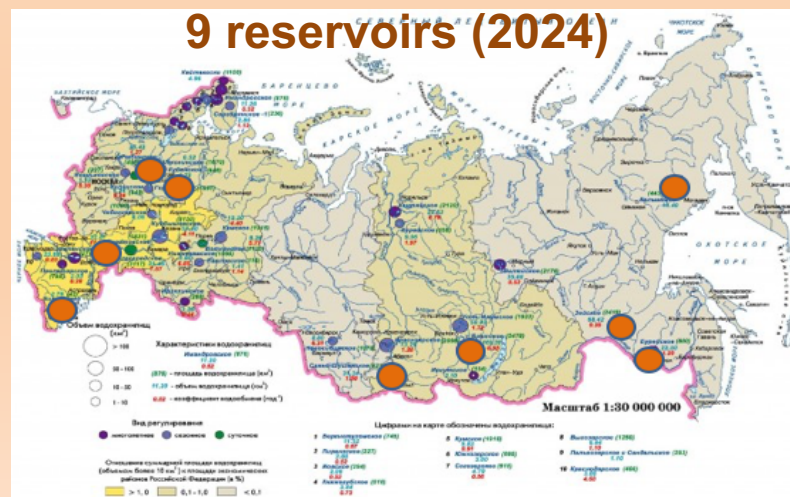
Tracking parameters calibration in methane model



Examples of distribution of field observation stations in different seasons on the Rybinsk Reservoir (Russia)



Calibration based on data from 9 reservoirs (2024)



Methane flux

Результаты с высоким разрешением (А.Рязанова)