



MSU
MOSCOW
STATE UNIVERSITY
RESEARCH
COMPUTING CENTER



Математическое моделирование природно-климатических процессов: роль вычислительных ресурсов

Степаненко В.М., Е.В.Мортиков,
Дебольский А.В, Медведев А.И., Воеводин Вад.В.

*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*

«Математика в созвездии наук»,
Москва, МГУ, 2 апреля 2024 г.

«Суперзадача для суперкомпьютеров» в СССР и России



Г.И.Марчук

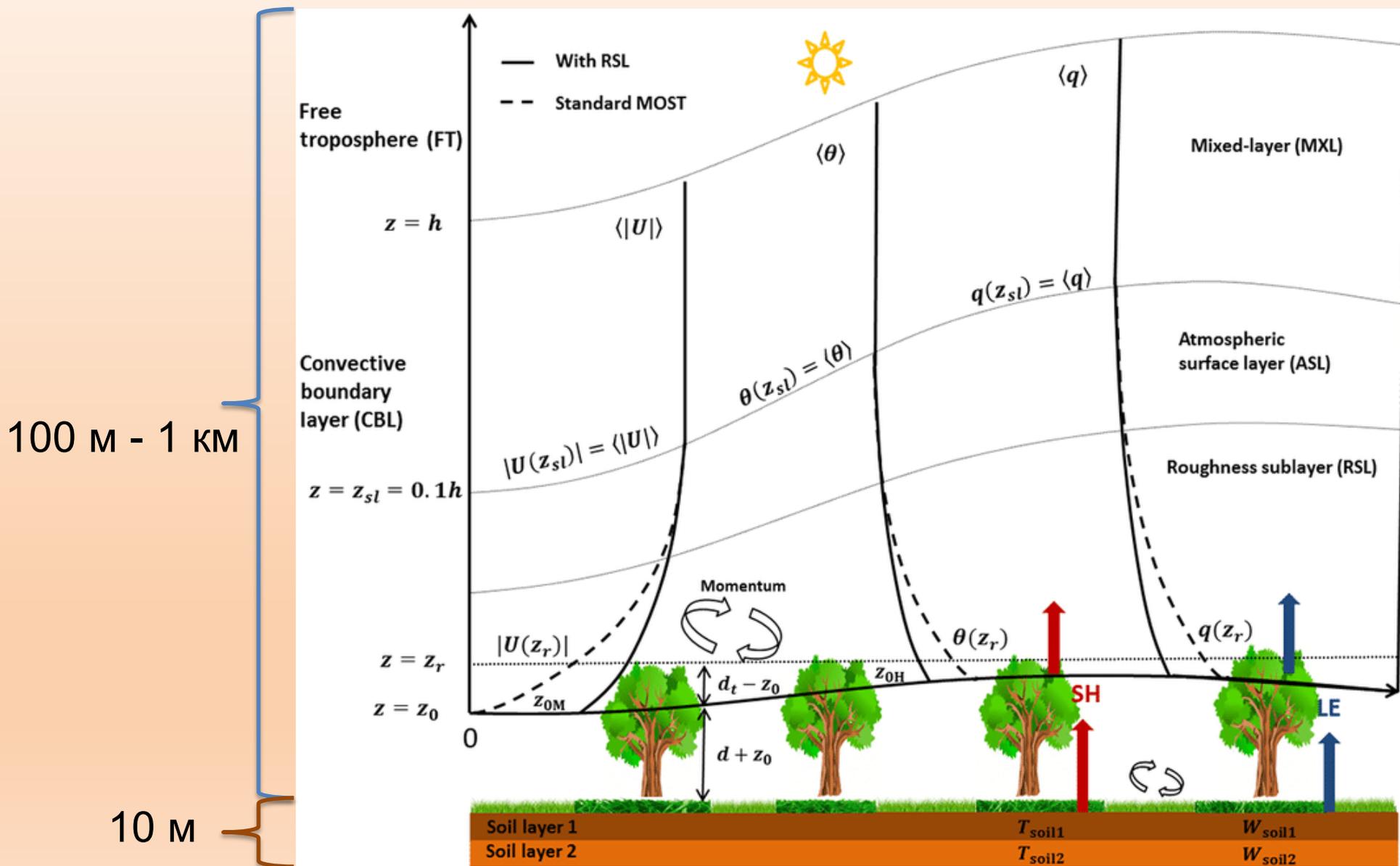
- В Советском Союзе математические модели климата разрабатываются с 1970-х гг. под руководством Г.И. Марчука
- В настоящее время модель климата Земной системы ИВМ РАН (INM-CM5) активно развивается консорциумом организаций, включая Московский университет
- Большое значение применение моделей климата имеет 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



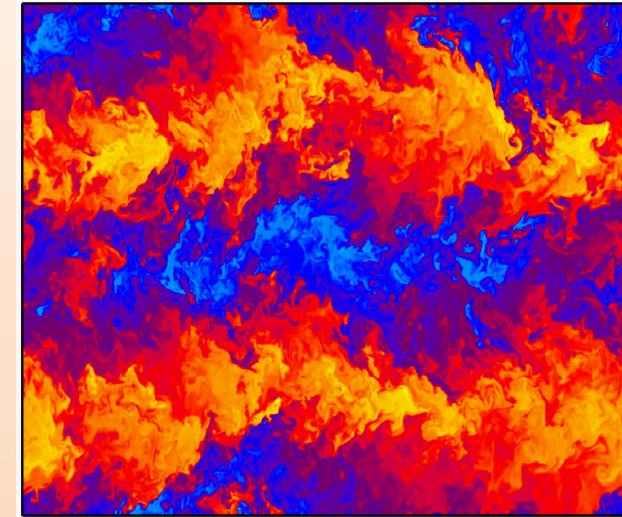
Пограничный слой атмосферы и деятельный слой суши



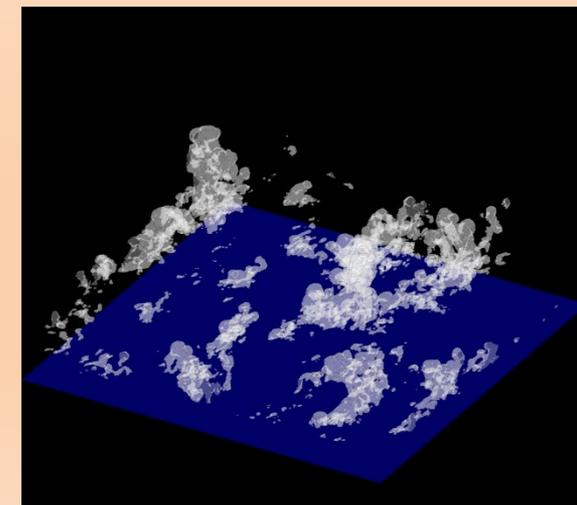
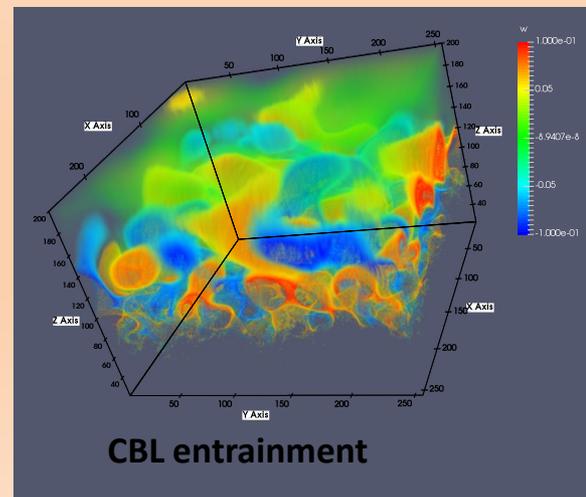
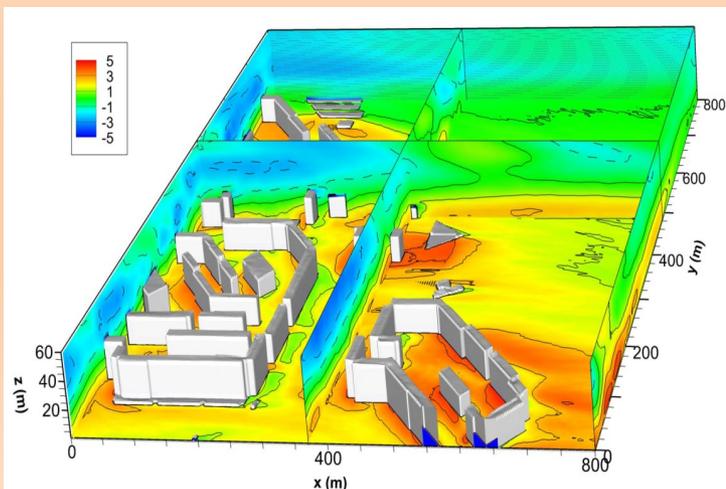
Модель атмосферного пограничного слоя

(НИВЦ, Лаборатория математического моделирования геофизических пограничных слоёв, руководитель работ – Е.В.Мортиков)

- 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

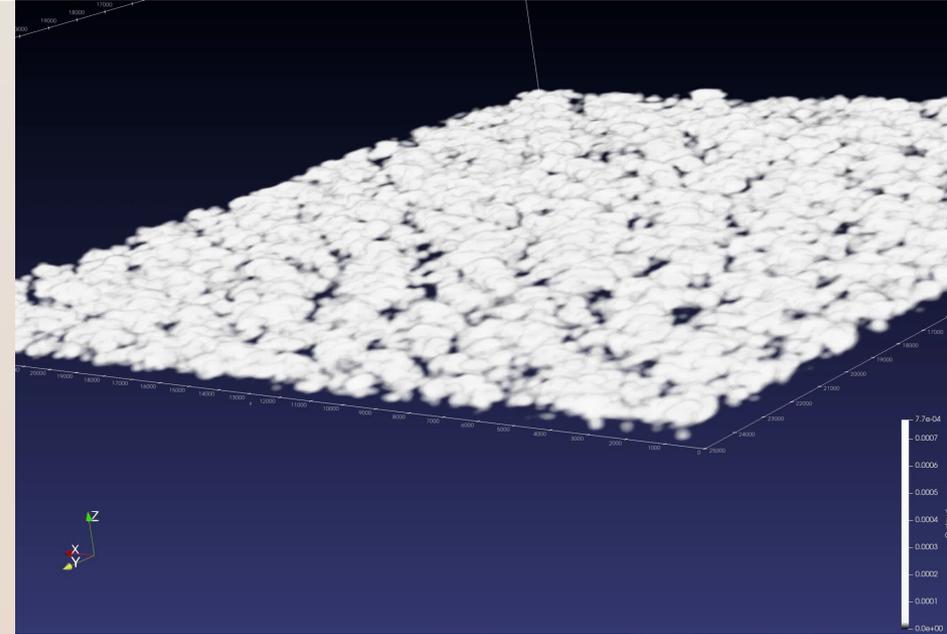
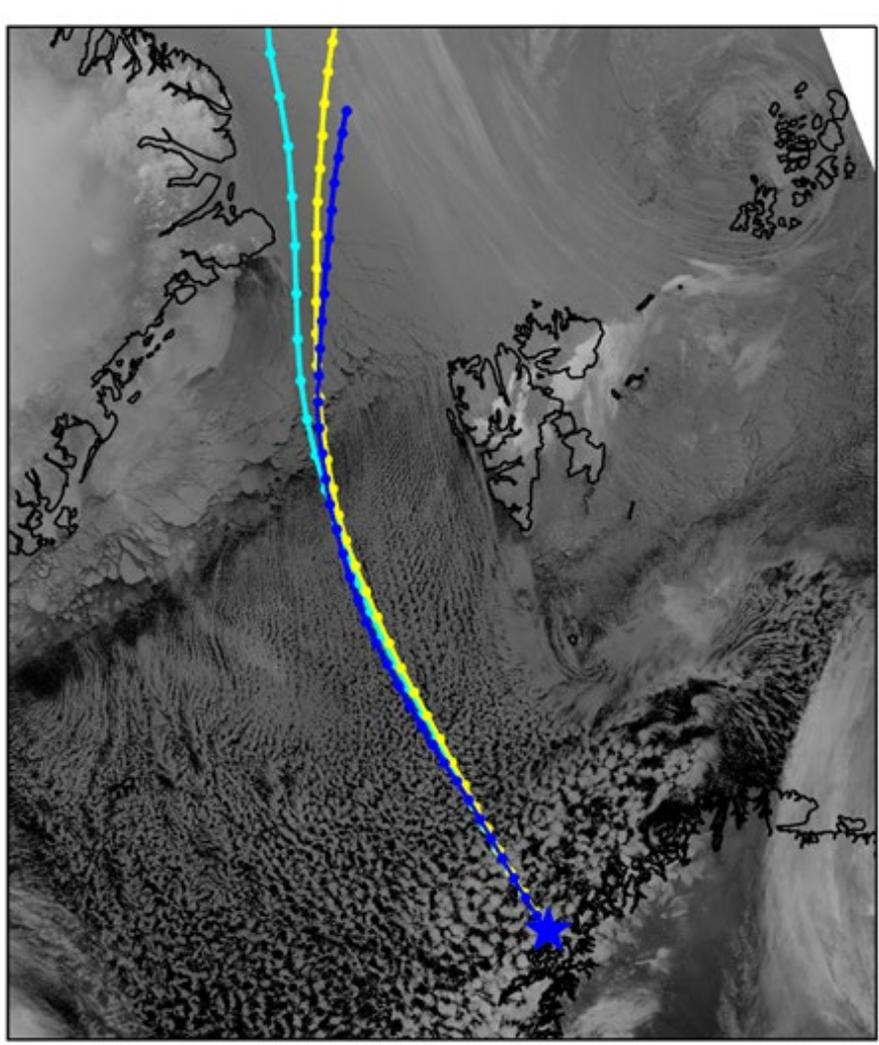


Shallow cumulus convection

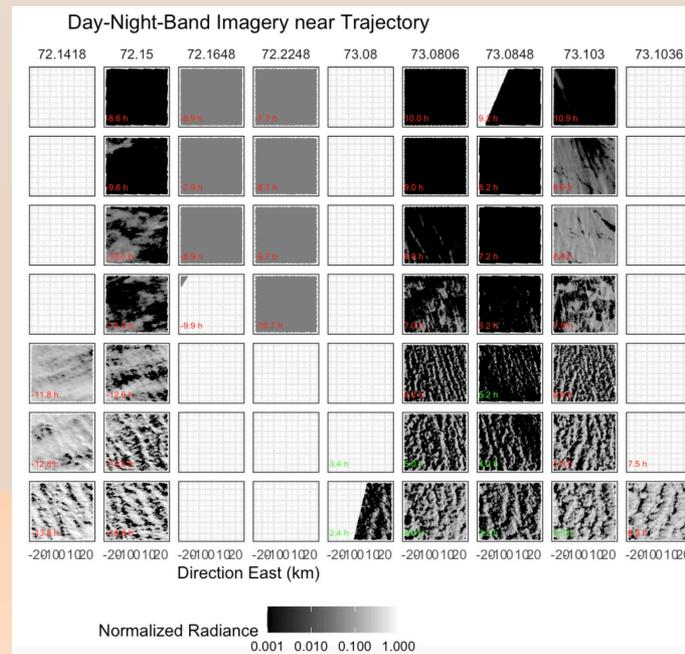
Моделирование облачных полей при холодных вторжениях

COMBLE

Cold-Air Outbreaks in the Marine Boundary

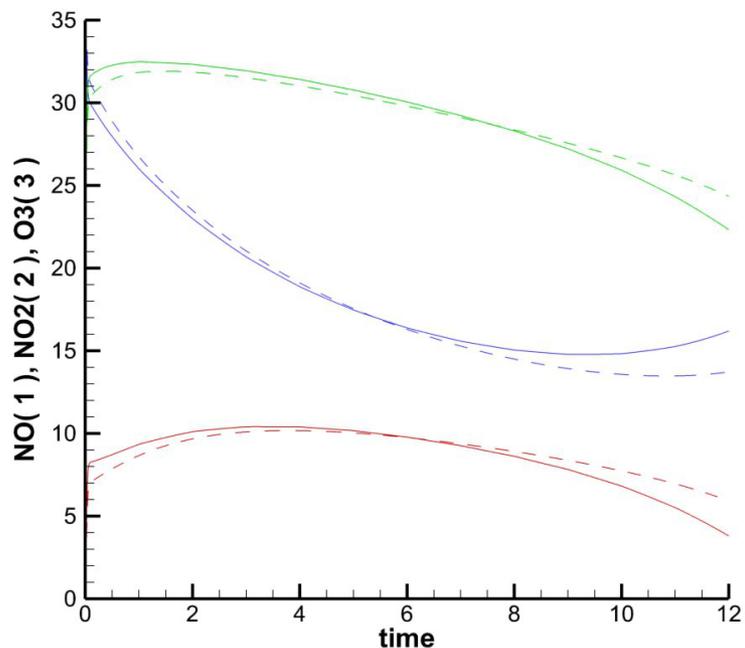


COMBLE 6-7h, LES coarse resolution

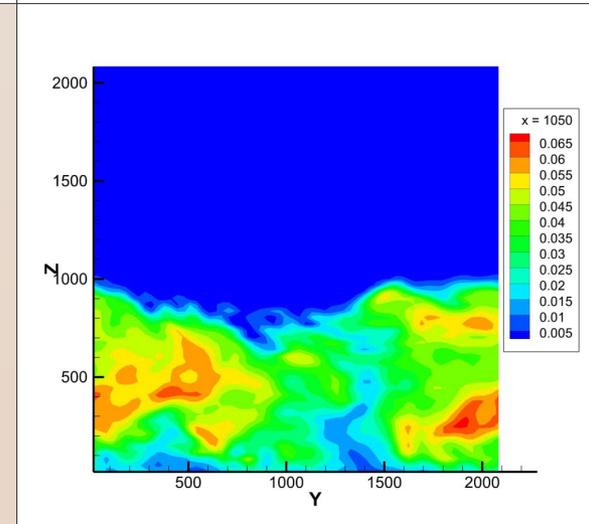
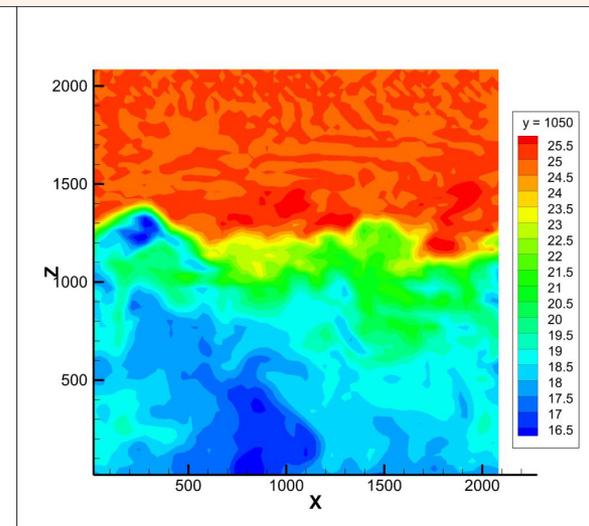
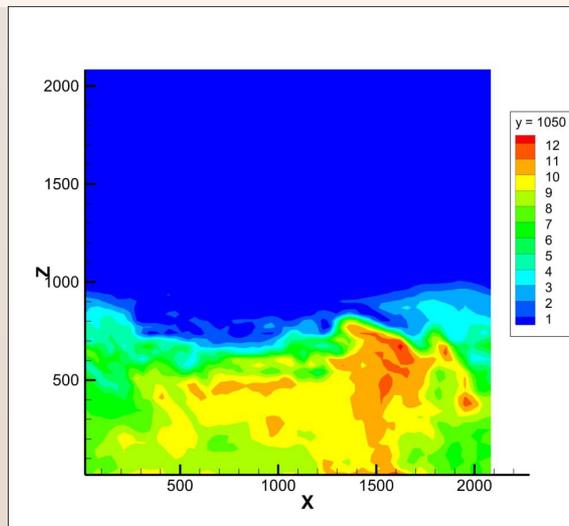
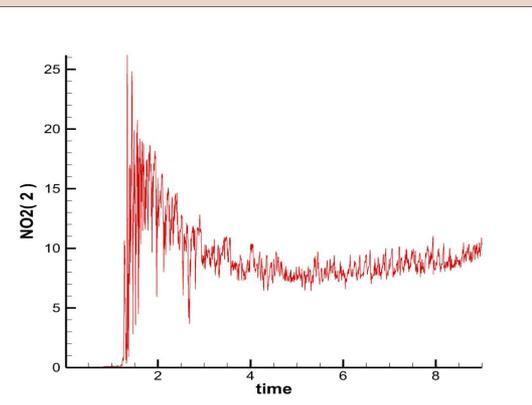


Атмосферная химия

- Редуцированная химия тропосферы
 - 40 реакций
 - Фотолиз Saunders 2003
 - реакции 2го порядка RACM-Arrhenius
 - реакции 3го порядка RACM-Arrhenius
 - Falloff RACM-Troe
- Быстрый цикл
- Взаимодействие с аэрозолями (in development)



мгновенные поля
NO₂, O₃, N₂O₅
в тестовых экспериментах
по воспроизведению
наблюдений на
Останкинской телебашне
2007г.



Существующие и перспективные потребности в вычислительных ресурсах

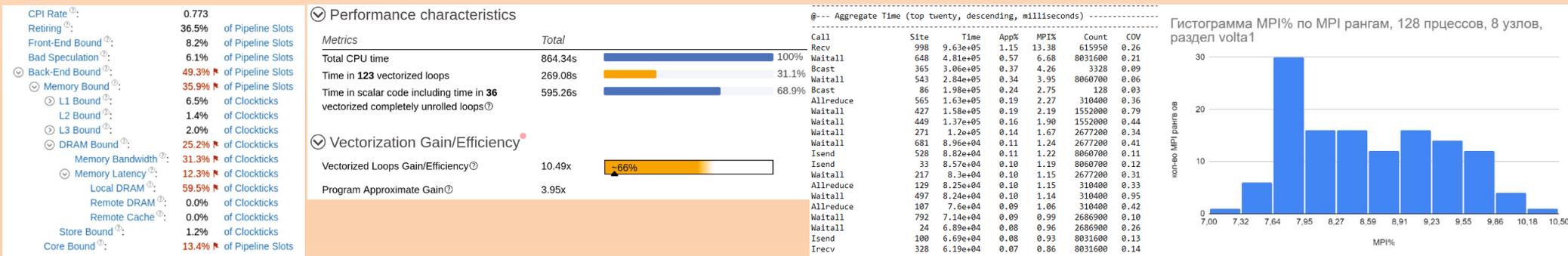
Параметры модели пограничного слоя атмосферы

Параметры модели	Текущие	Перспективные
Размер ячейки	1-100 м	1-100 м
Размер расчетной сетки, ед.	10^8	10^{11}
Размер расчетной области	2 км	30 км
Временной шаг исследования	1-10 с	1-10 с
Количество шагов по времени, ед.	10^4	10^6
Общая длительность исследуемого процесса	1 ч – 24 ч	24 ч – 1 неделя
Общее количество выч. экспериментов, ед.	10	10^3
Затраты машинного времени на 1 эксп.	1 сут.	0.01-1 сут.
Общая длительность выполнения вычислительной задачи	90 сут.	90 сут.

Изучение производительности программной реализации модели пограничного слоя атмосферы

Запуск на 128 процессах, раздел volta1 Ломоносова-2

- Основное узкое место – **невысокая эффективность работы с памятью.**
- Стоит также рассмотреть улучшение векторизации, однако выигрыш будет небольшим (**невекторизованные циклы занимают 15% времени выполнения**).
- В некоторых вычислительно-затратных фрагментах много ошибок предсказания (branch misprediction) – до 30% времени выполнения этих фрагментов теряется из-за них. Однако сами фрагменты не так велики.
- **Несмотря на большое число процессов и активную работу с MPI, потери производительности в этом аспекте не было обнаружено.**
- **Существенного дисбаланса между процессами не обнаружено.**
- В целом программа показывает высокую эффективность.



★ 2023 Facilitating the Process of Performance Analysis of HPC Applications

Voevodin V.V., Debolskiy A.V., Mortikov E.V.

в журнале *Lobachevskii Journal of Mathematics*, издательство *Kazanskii Gosudarstvennyi Universitet/Kazan State University (Russian Federation)*, том 44, № 8, с. 3177-3189 DOI

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



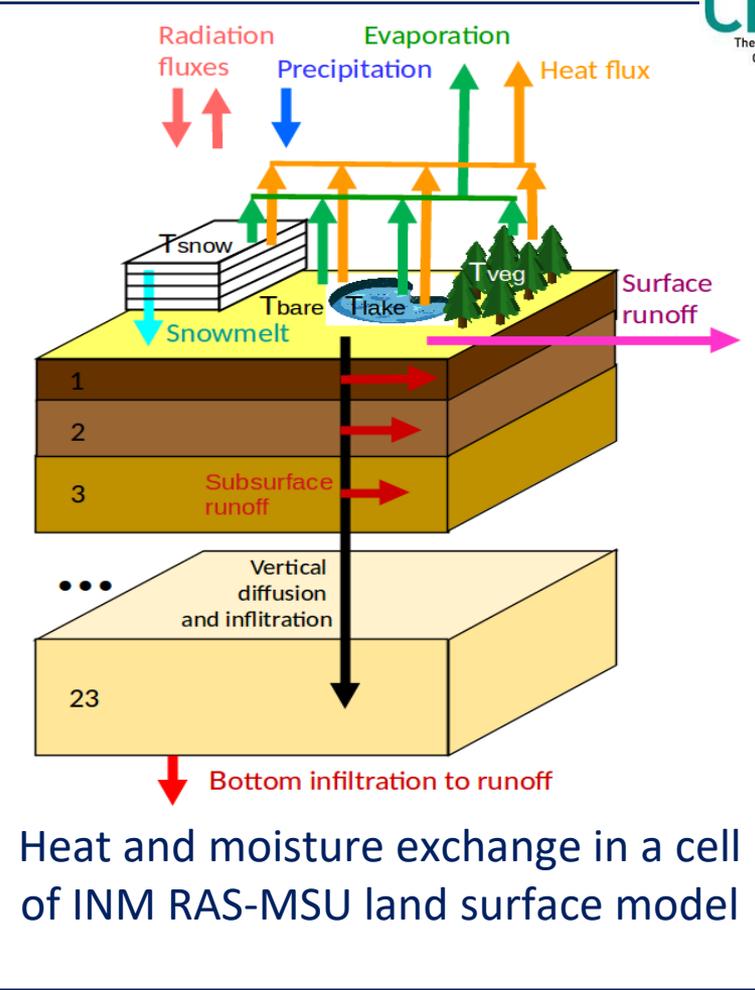
Чл.-корр. РАН В.Н.Лыкосов –
основатель направления



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 CH₄ 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 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** Ψ и гидравлической проводимости γ 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

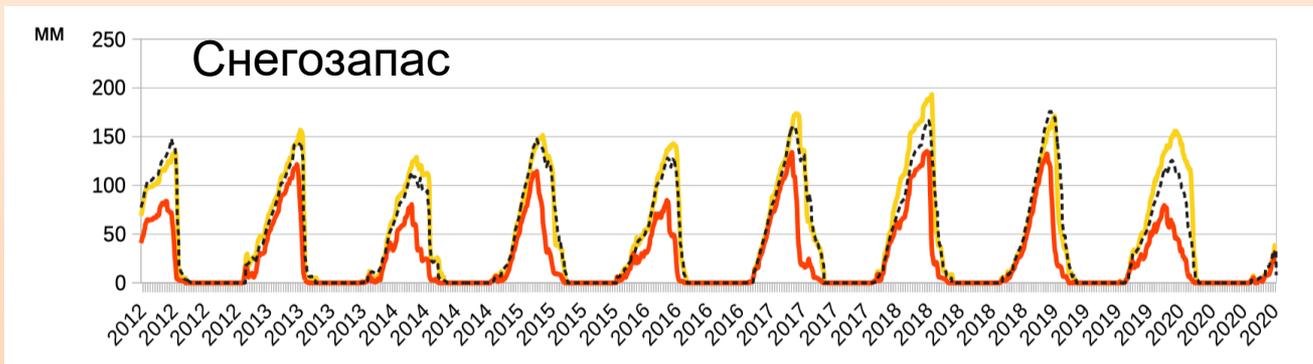
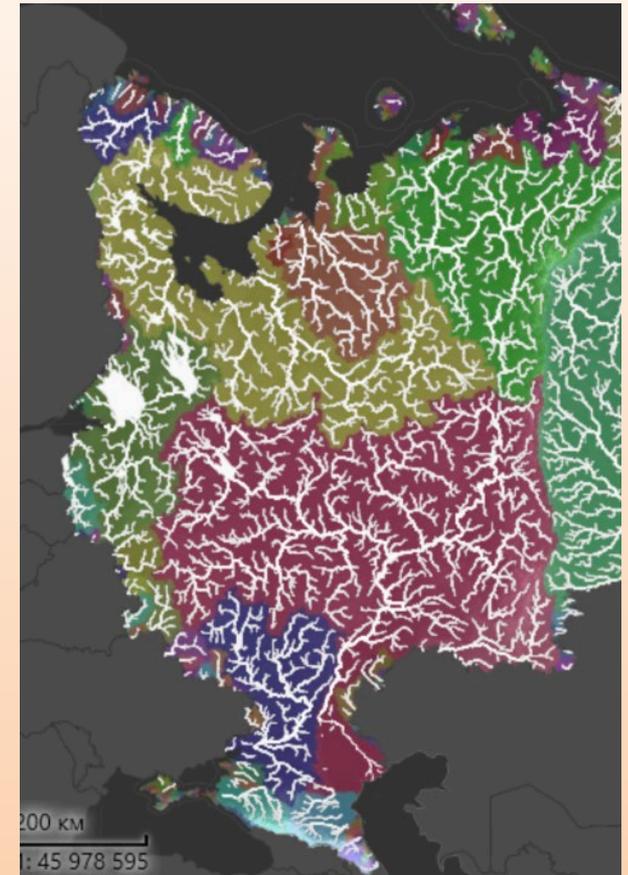
Воспроизведение речного стока

Период расчета: 2002-2020 гг.

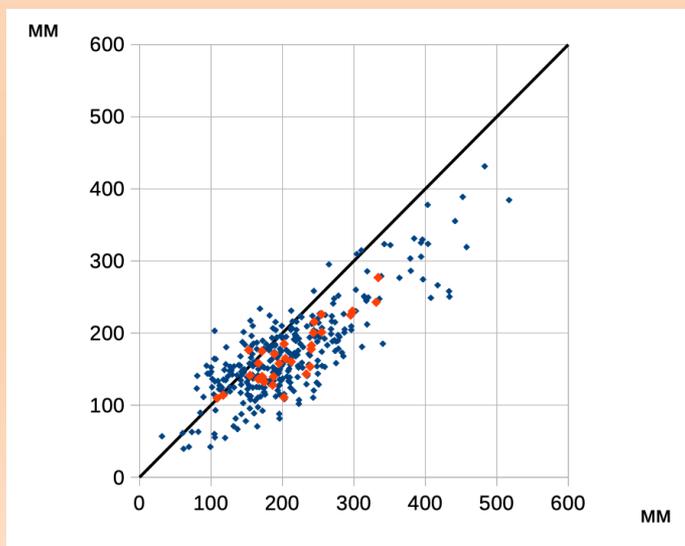
Данные наблюдений:

- 50 снегомерных станций в бассейнах Сев. Двины, Печоры, Мезени, Онеги
- гидрометрические посты на 30 реках

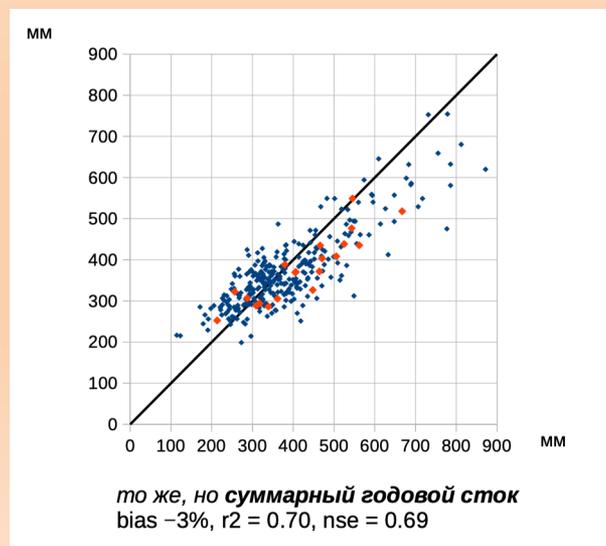
Речная сеть ЕТР



Сток весеннего половодья



Годовой сток



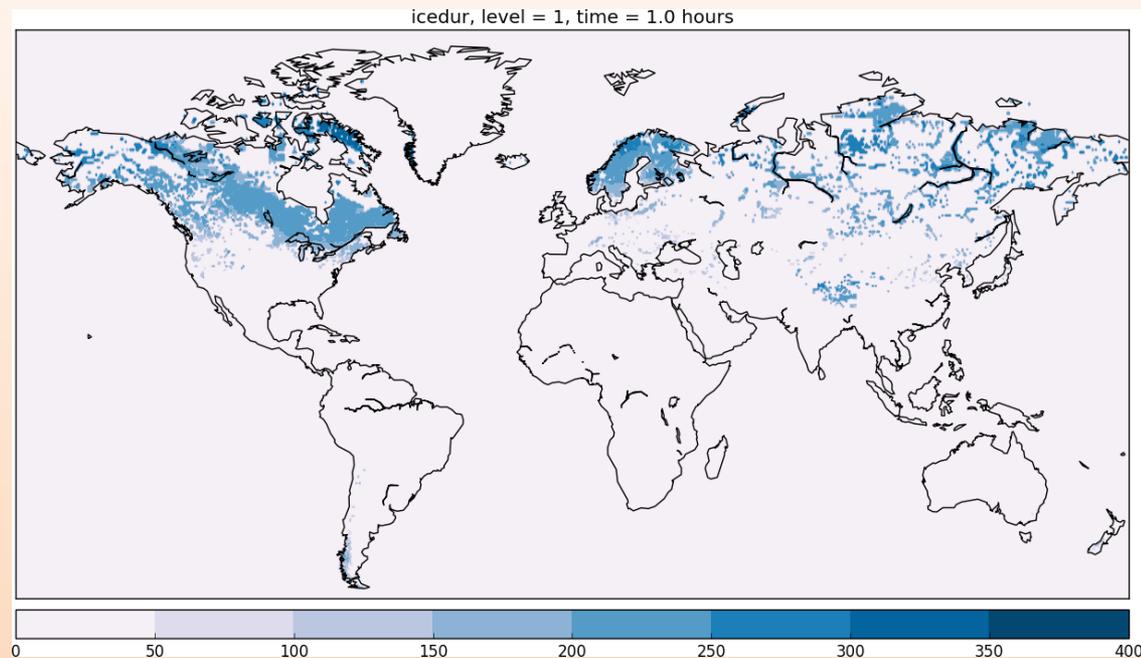
Усовершенствования:

- параметризация жидкой воды в снежном покрове;
- зависимость гидрофизических свойств почвы от льдистости;
- обновление базы данных почвенных параметров

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: piconrol, 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



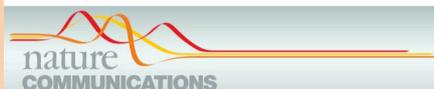
Geophysical Research Letters

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**

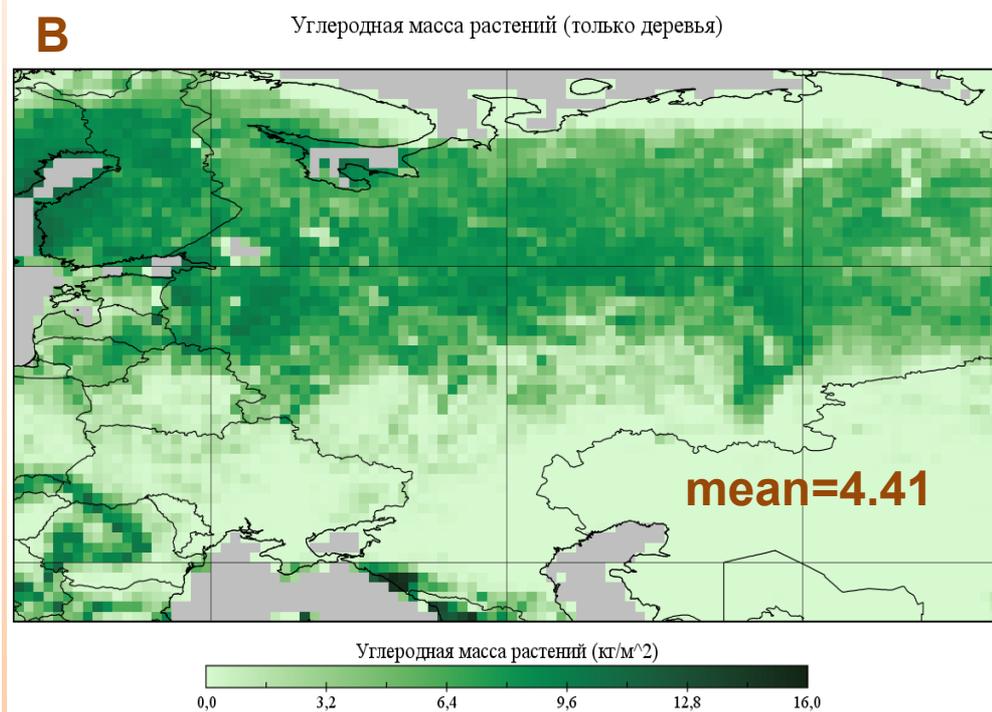
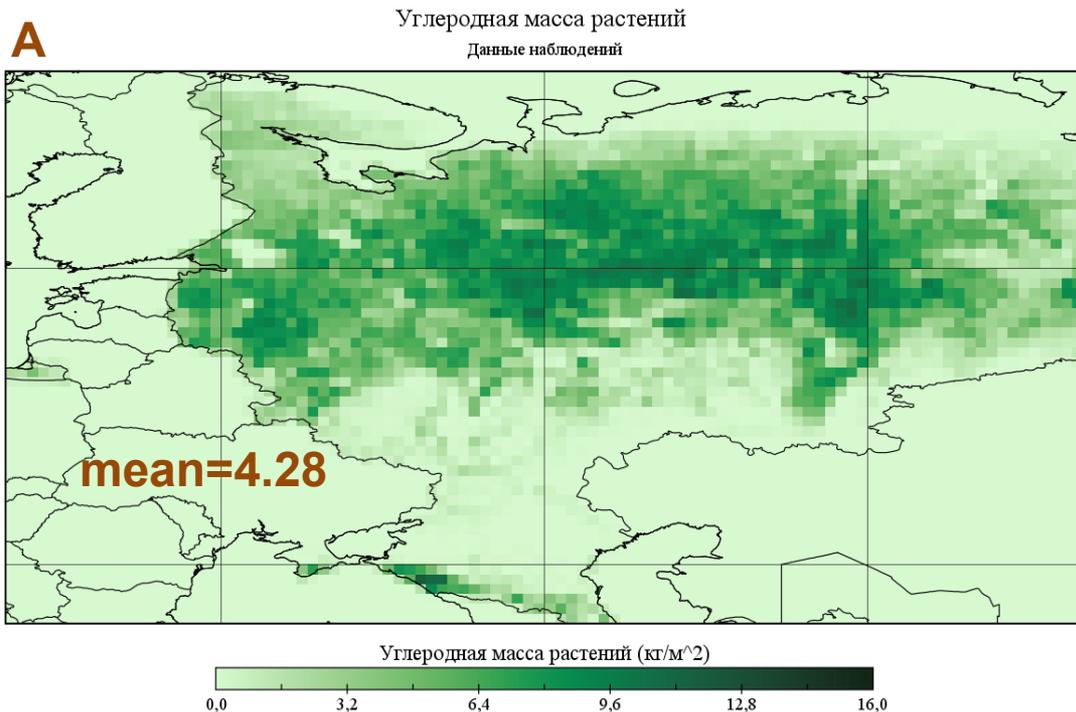
Phenological shifts in lake stratification under climate change

R. Iestyn Woolway [ORCID](#)^{1,2}, Sapna Sharma [ORCID](#)³, Gesa A. Weyhenmeyer [ORCID](#)⁴, Andrey Debolskiy^{5,6,7},

Углерод лесов (Европейская территория России)

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

Результаты модели
TerM, кг/м², 2020 г.



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.

Козф. простр. корреляции

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

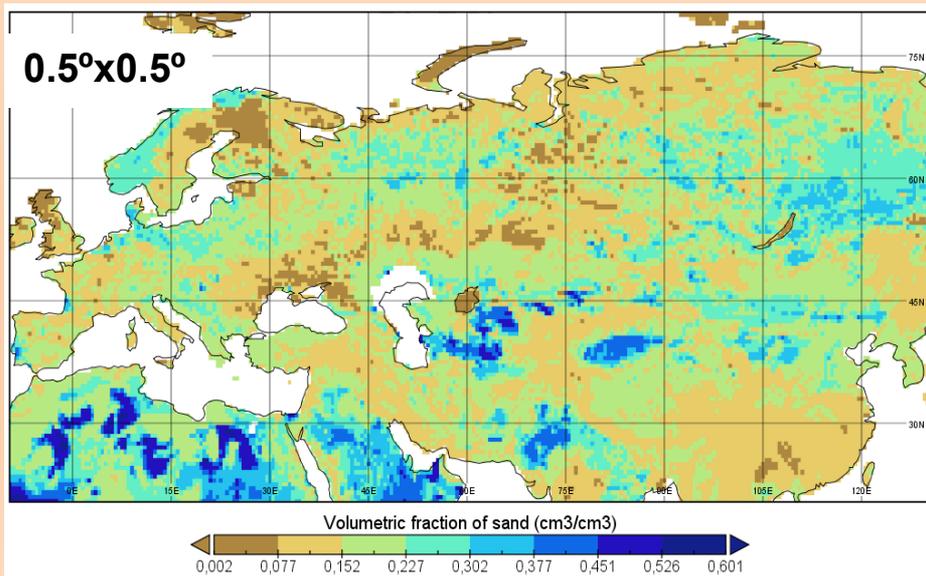
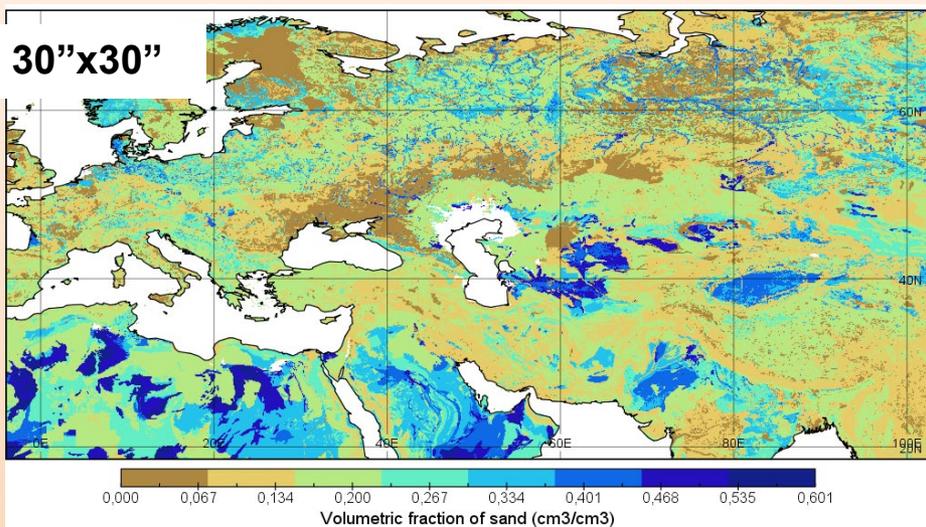
Существующие и перспективные потребности в вычислительных ресурсах

Параметры модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ		
Параметры модели	Текущие	Перспективные
Размер ячейки	50 км	1 км
Размер расчетной сетки, ед.	10^6	10^9
Временной шаг исследования	1 ч	1 ч
Количество временных шагов исследования, ед.	$10-10^6$	$10-10^8$
Общая длительность исследуемого процесса	1 сут – 100 лет	1 сут – 10 000 лет
Общее количество выч. экспериментов, ед.	100	100
Затраты машинного времени на 1 эксп.	1 сут	1 сут
Общая длительность выполнения вычислительной задачи	90 сут	90 сут

Карты внешних параметров на основной и перспективной сетках

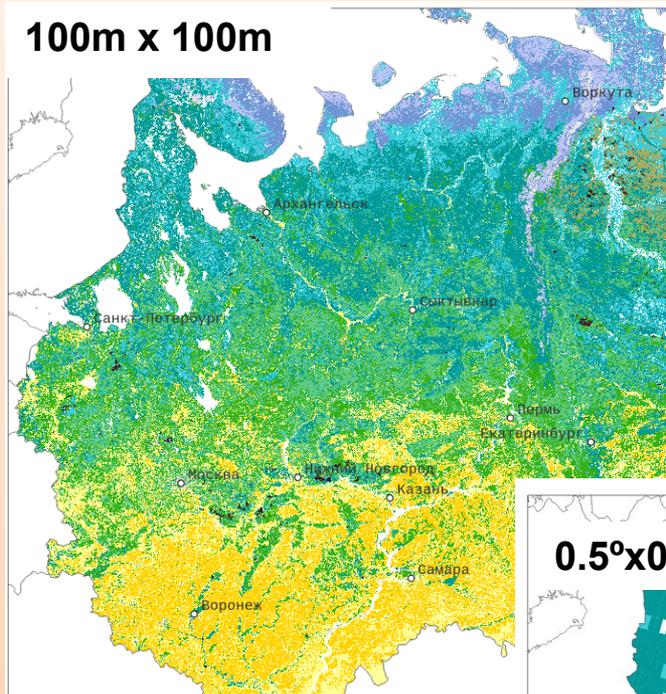
Объемное содержание глины

Dai, Y., et al. (2019). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2996–3023. <https://doi.org/10.1029/2019MS001784>



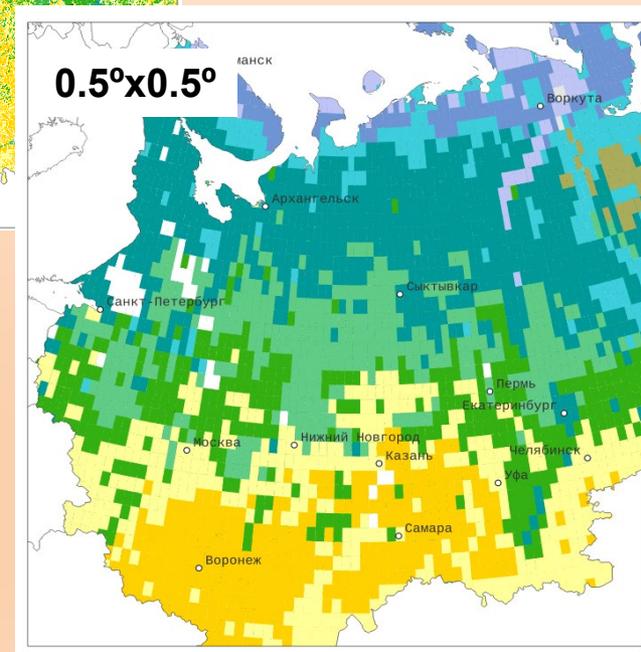
Карта типов земного покрова России, (спутника Proba-V)

100m x 100m



- 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, et al., Current problems in remote sensing of the earth from space, 15(2), 2018

Спасибо за внимание!