

# Кафедра вычислительных технологий и моделирования факультета ВМК МГУ

Магистерская программа:

«Суперкомпьютерные технологии моделирования  
Земной системы»

Руководитель:

проф. Толстых Михаил Андреевич

**Базовые организации:**

- Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН,
- Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ,

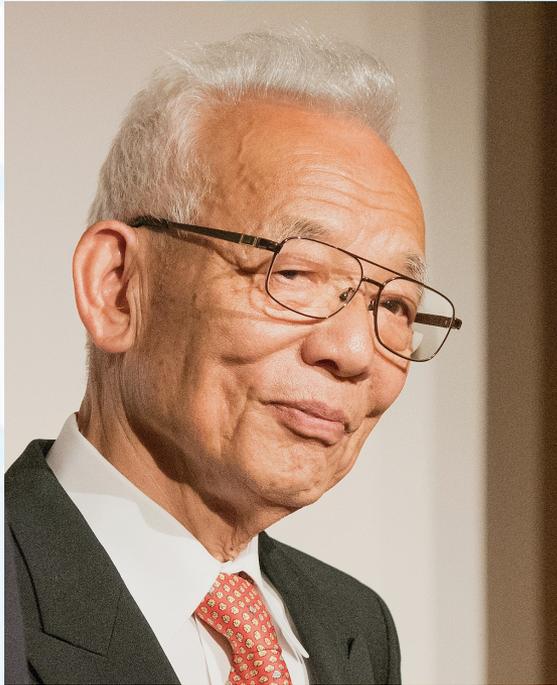
**... при участии:**

- физического факультета МГУ,
- географического факультета МГУ.



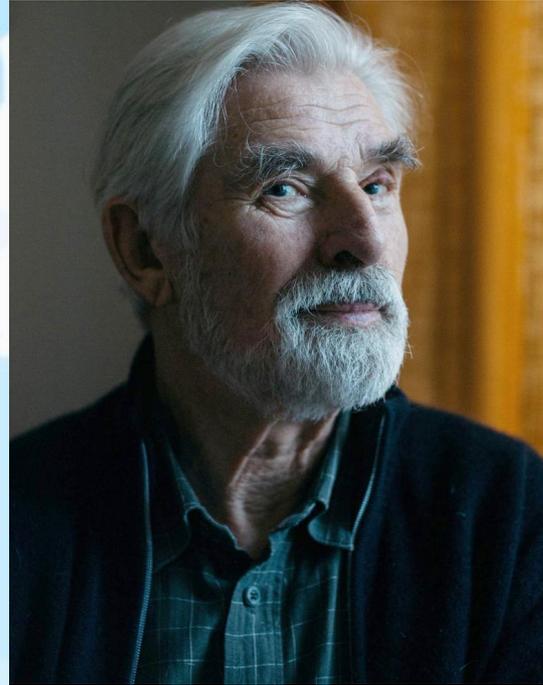


# Нобелевская премия по физике 2021 г.



**Сюкуро Манабе**

**«за физическое моделирование климата Земли,  
исследование изменчивости и надёжное  
предсказание глобального потепления»**



**Клаус Хассельман**



**Джорджо Паризи**

**«за открытие  
взаимодействия  
флуктуаций в системах  
от атомного до  
планетарного масштаба»**

# Суперзадача для суперкомпьютеров

- 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**



Академик  
Г.И. Марчук



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

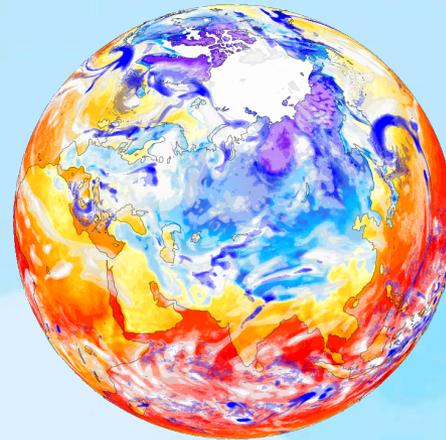


# Геофизическая гидродинамика.

Особенности моделируемой среды:

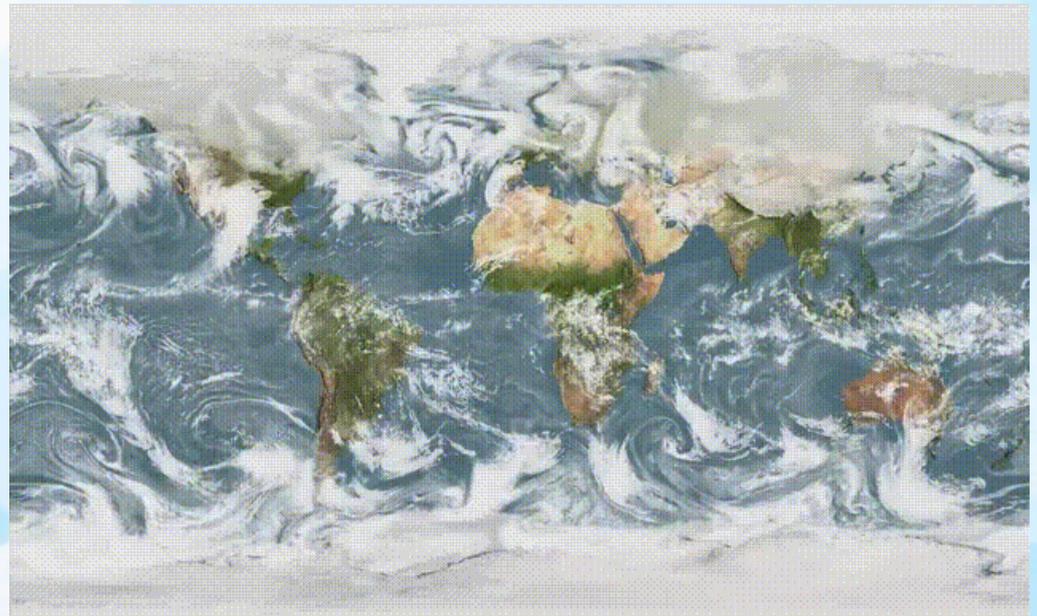
- Земля – круглая.
- Земля вращается.

Главный внешний источник энергии –  
солнечное излучение.



*Первое в мире метеорологическое общество - 1781. Оно снабжало наблюдателей в разных странах мира одинаковыми приборами. По его программе действовало 39 метеостанций, расположенных от Кембриджа до Урала с синхронными сроками измерений (в 7, 11, 14 и 21 час).*

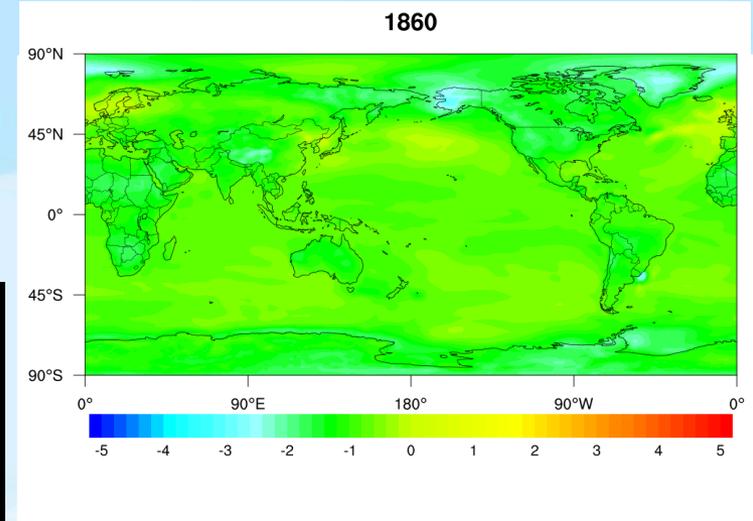
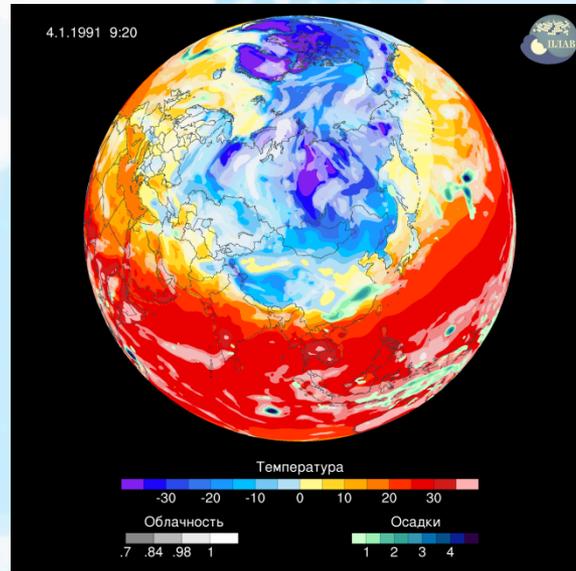
*Lewis Fry Richardson: «Weather Prediction by Numerical Process» (1922).*



# Многомасштабное моделирование Земной системы

## Моделирование Земной системы

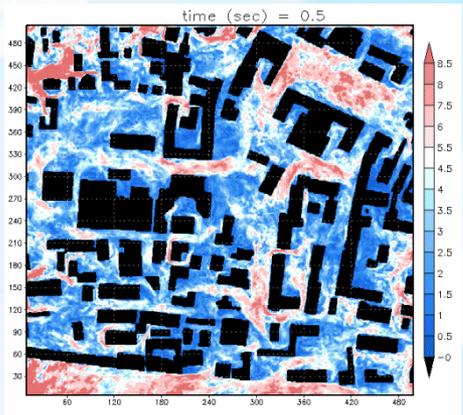
### Прогноз погоды



Атмосфера, океан, морской лед, суша, озера, реки, ледниковые щиты, атмосферная химия и электричество, биохимия океана.

Глобус, Тропосфера, стратосфера, ионосфера, ..

### Моделирование турбулентных течений



Атмосфера, океан, морской лед, суша.

Десятки километров - глобус, Тропосфера и стратосфера, Дни-месяцы.

Пограничный слой атмосферы. Метры, Нижняя тропосфера, Часы.



# Технология прогноза погоды

Сбор и анализ  
данных наблюдений

Усвоение данных  
наблюдений

Прогностическая  
модель

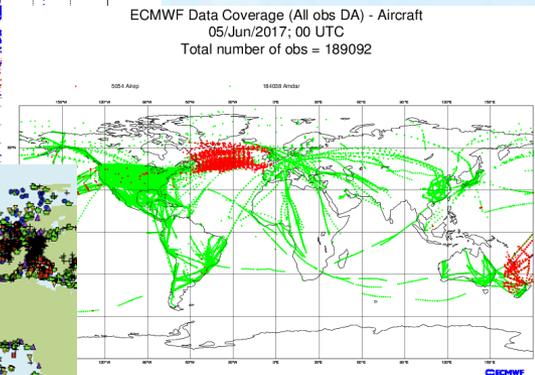
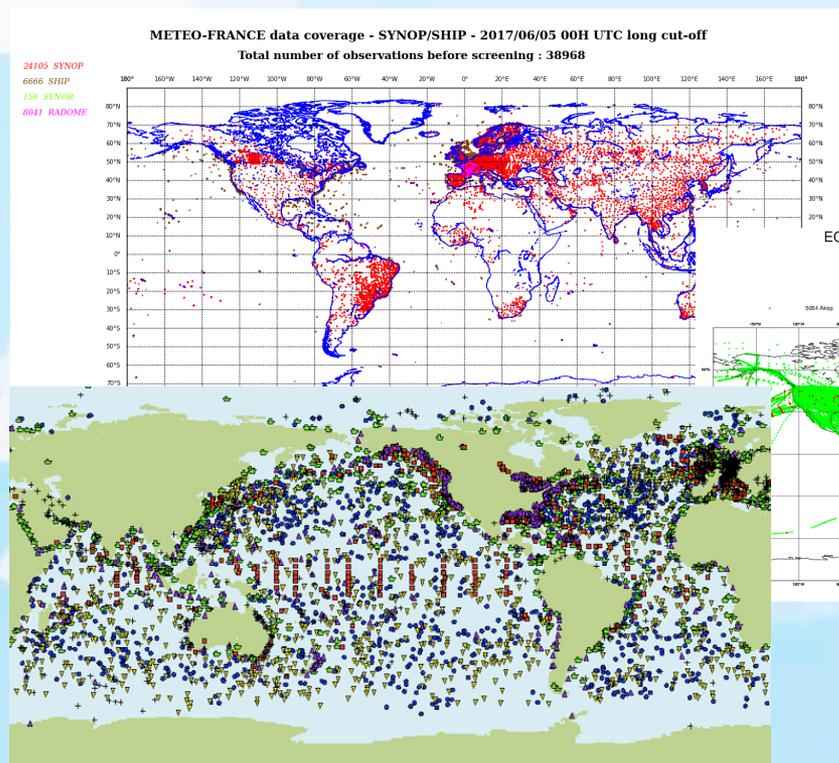
Синоптик

Прогноз

Математическую модель можно коротко записать в виде системы уравнений с начальным условием:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = M(x, t), & t \in (0, T) \\ x|_{t=0} = x_0, \\ J(x_0) = \inf_v J(v). \end{cases}$$

$X$  – вектор прогностических переменных,  
 $M$  – оператор модели.  
 $X_0$  – вектор прогностических переменных в начальный момент времени.  
 $J$  – некоторый функционал.



# ИИ в Технологии прогноза погоды?



Google AI Blog

## Using Machine Learning to “Nowcast” Precipitation in High Resolution

Monday, January 13, 2020

Posted by Jason Hickey, Senior Software Engineer, Google Research

*“We treat weather prediction as an image-to-image translation problem, and leverage the current state-of-the-art in image analysis: convolutional neural networks (CNNs).”*

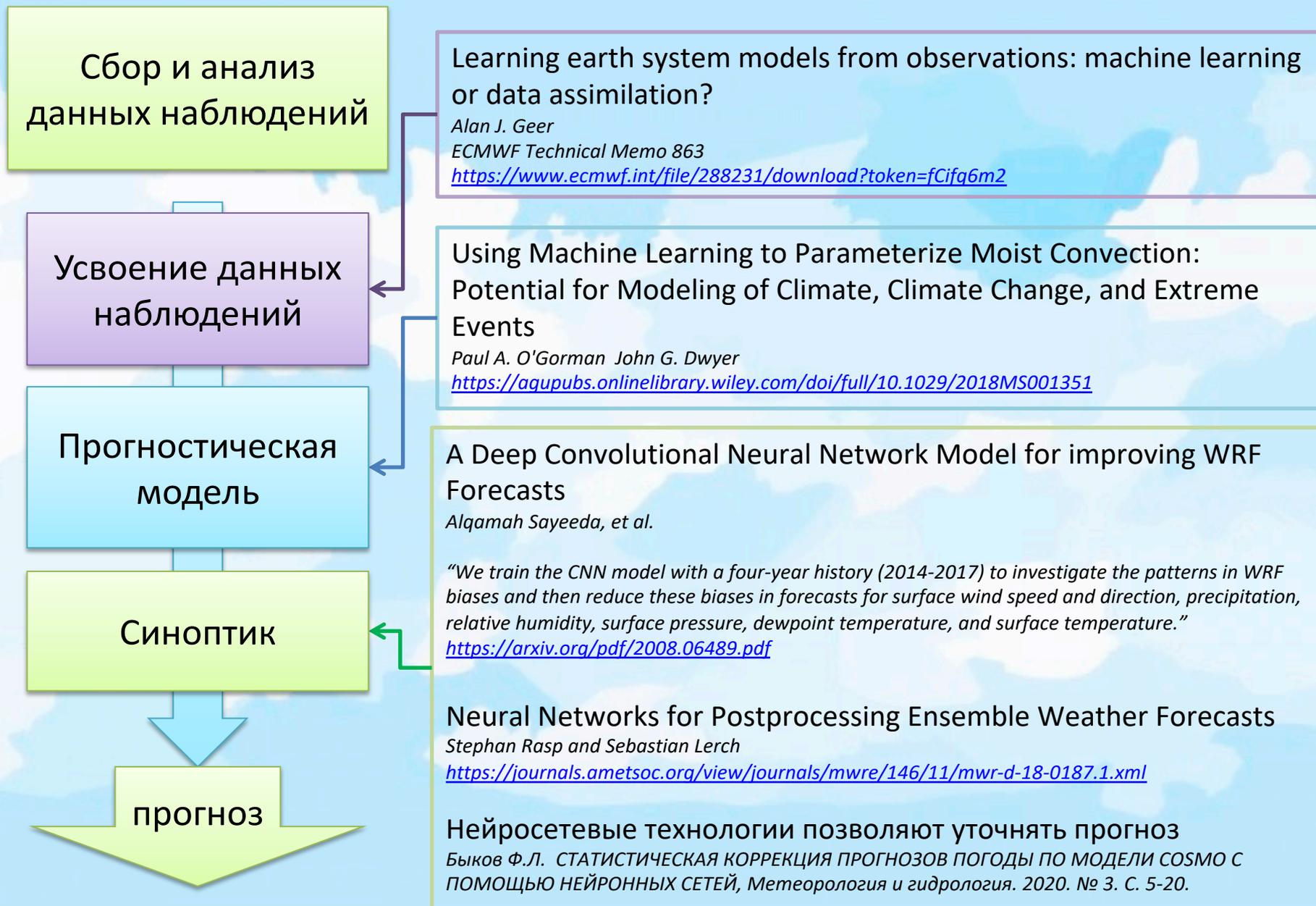
<https://ai.googleblog.com/2020/01/using-machine-learning-to-nowcast.html>

## Как Яндекс прогнозирует погоду

*Мы разработали уникальную технологию — Метеум. Она умеет строить прогноз погоды с точностью до районов города и даже до отдельных домов. Метеум сочетает классические метеорологические модели и технологии машинного обучения. Это позволяет **сконцентрировать машинное обучение на том, чтобы уточнить существующие модели** и учесть локальные особенности. А следовательно — давать более точный прогноз и делать меньше ошибок.*

<https://yandex.ru/company/technologies/meteum/>

# ИИ в Технологии прогноза погоды?



# Области применения моделей геофизических процессов

- Предсказание опасных и экстремальных метеорологических явлений с заблаговременностью до нескольких дней.
- Долгосрочный прогноз аномалий погоды на срок до 6 месяцев.
- Стратегия развития и оценка рисков в условиях изменяющегося климата Земли (1 – 10 лет).

## Число опасных метеоявлений в России по годам

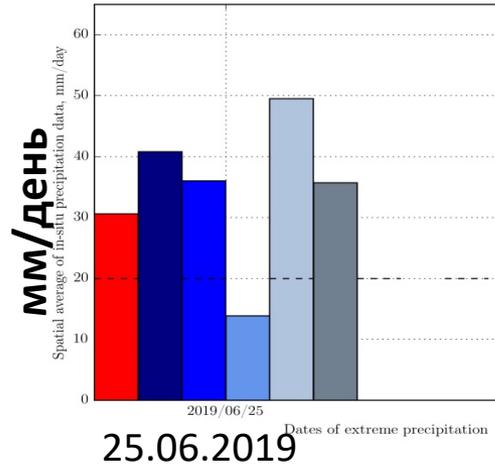
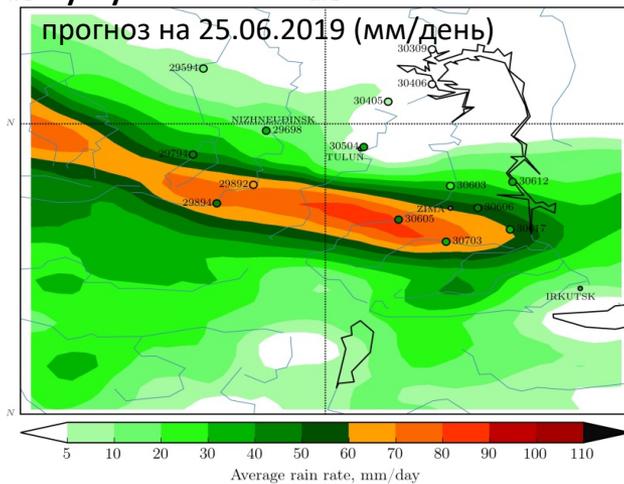


*«В нынешнем (2021 год - ред.) году наблюдалось максимальное количество опасных явлений за последние 25 лет. <...> Наблюдалось 1205 опасных гидрометеорологических явлений, из которых 417 нанесли значительный ущерб», — научный руководитель Гидрометцентра России Р.М.Вильфанд.*

# Оценка качества прогноза сильных осадков в 2019 г. по модели погоды ПЛАВ

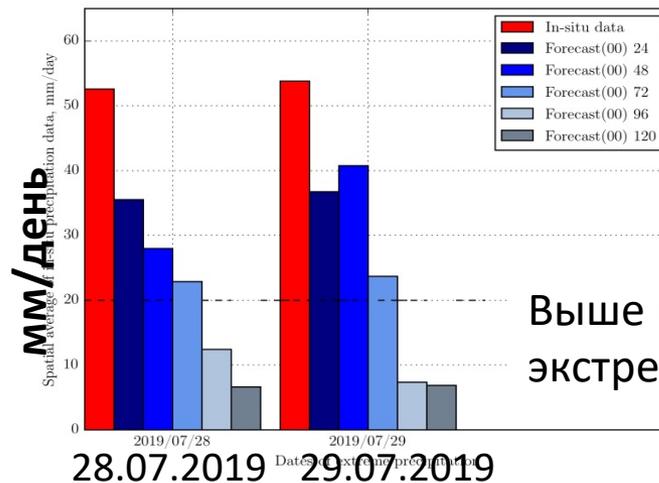
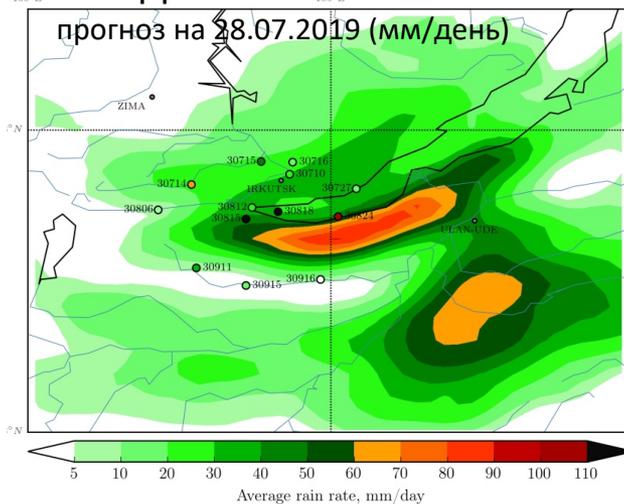


Тулун:



Столбики:  
прогноз средних по  
региону осадков с  
заблаговременностью от 1  
до 5 дней.  
Красное – факт.

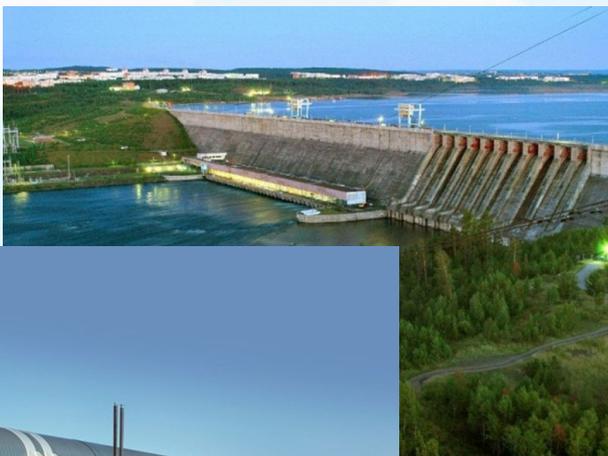
Слюдянка:



Выше пунктира –  
экстремальные осадки.

# Прогноз «погоды» от нескольких месяцев до 10 лет.

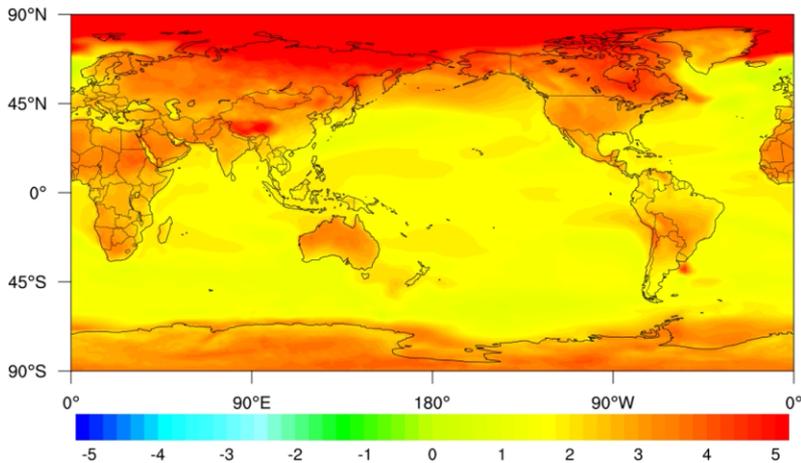
- Северный морской путь и освоение Арктики.
- Добыча природных ресурсов (в т.ч. шельф), сельское хозяйство.
- Потребление энергоресурсов, экологическое состояние и т.д.
- Оценка рисков явлений, вызванных изменениями климата.



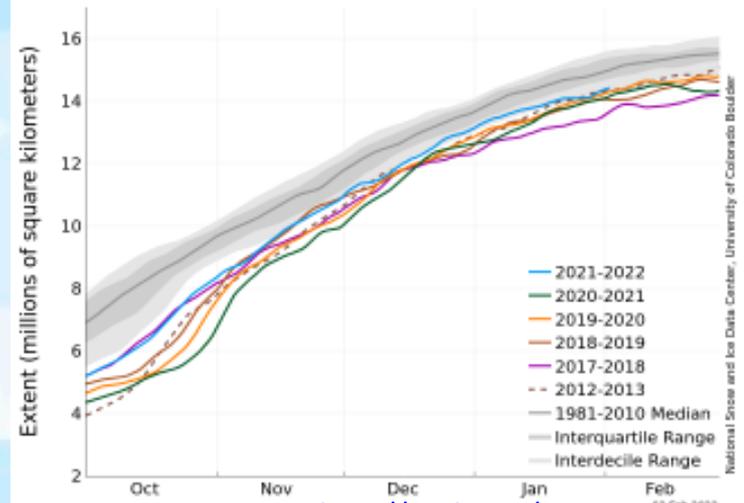
# Северный морской путь

расстояние, проходимое судами из порта Мурманска в порт Иокогамы (Япония) составляет 5770 морских миль, через Суэцкий канал - 12 840 морских миль.

Прогноз изменения среднегодовой температуры в атмосфере на высоте 2м.



Arctic Sea Ice Extent  
(Area of ocean with at least 15% sea ice)



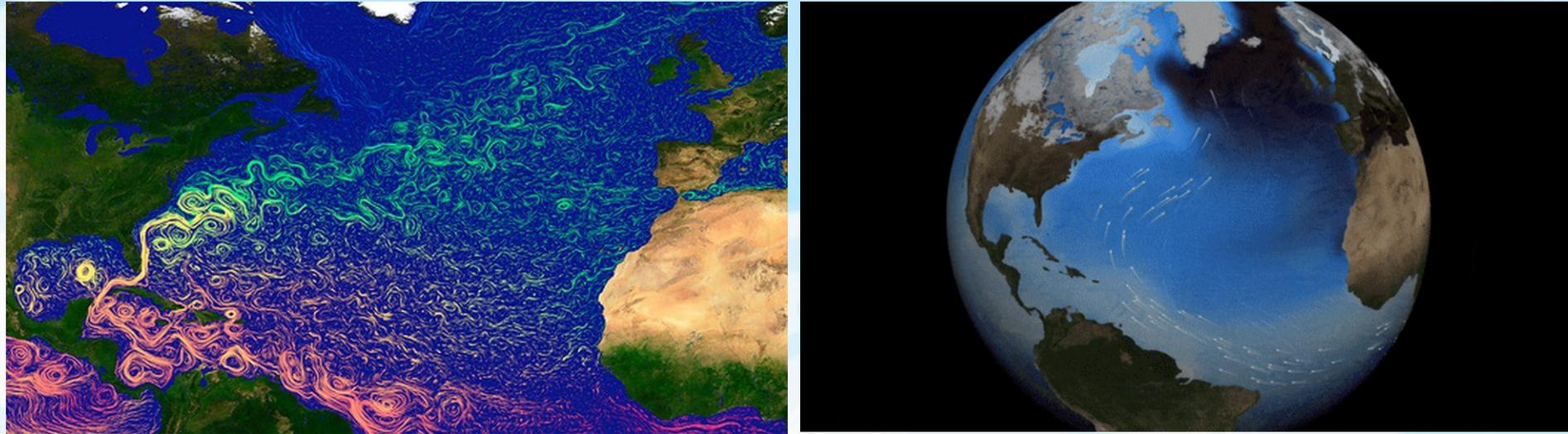
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/>

Объем перевозок по Севморпути (тыс. т.)



# Исследование и прогноз прошлого и будущего климата Земной системы

Течения в океане имеют сложную структуру:



В ИВМ РАН при участии НИВЦ МГУ в настоящее время разрабатываются принципиально новые математические модели атмосферы, океана, морского льда и суши.

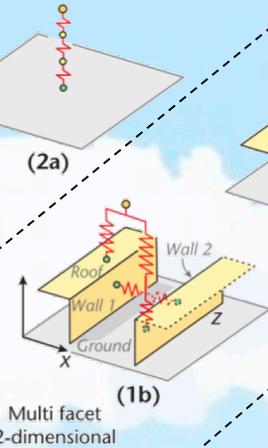
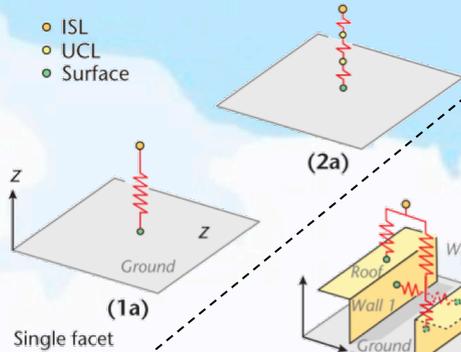
На базе этих моделей будут построены новые отечественные модели прогноза погоды и климата.

Основной костяк разработчиков – аспиранты и молодые сотрудники ИВМ РАН и НИВЦ МГУ.

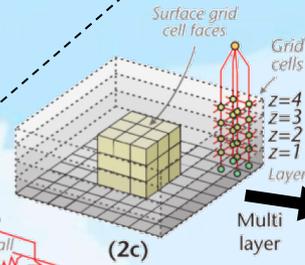
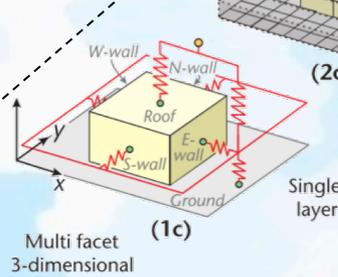
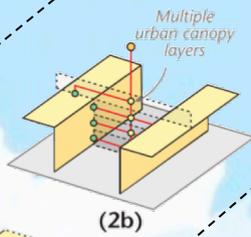
# Модели городской атмосферы

## Интегральный подход

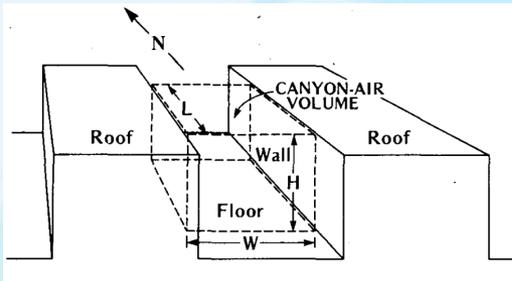
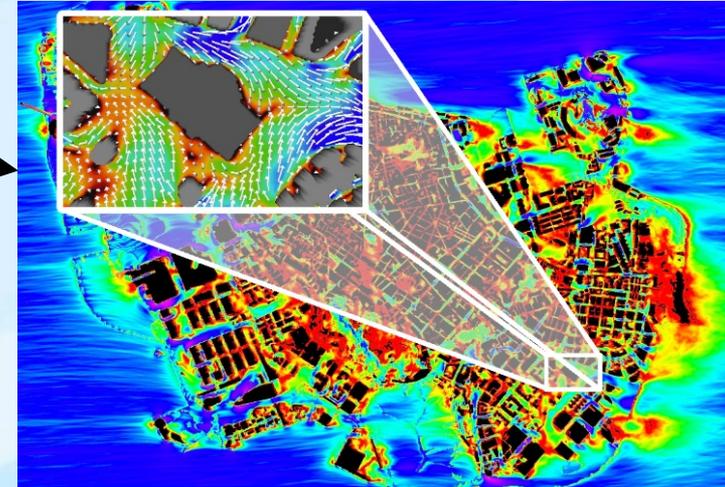
- ISL
- UCL
- Surface



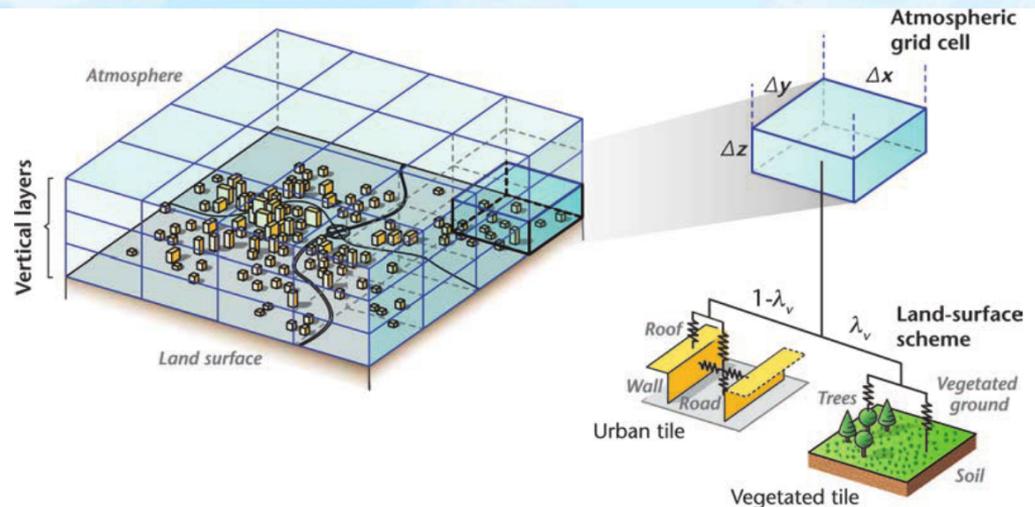
## Модели каньонов



## Модели, явно воспроизводящие городские течения (вихреразрешающие)

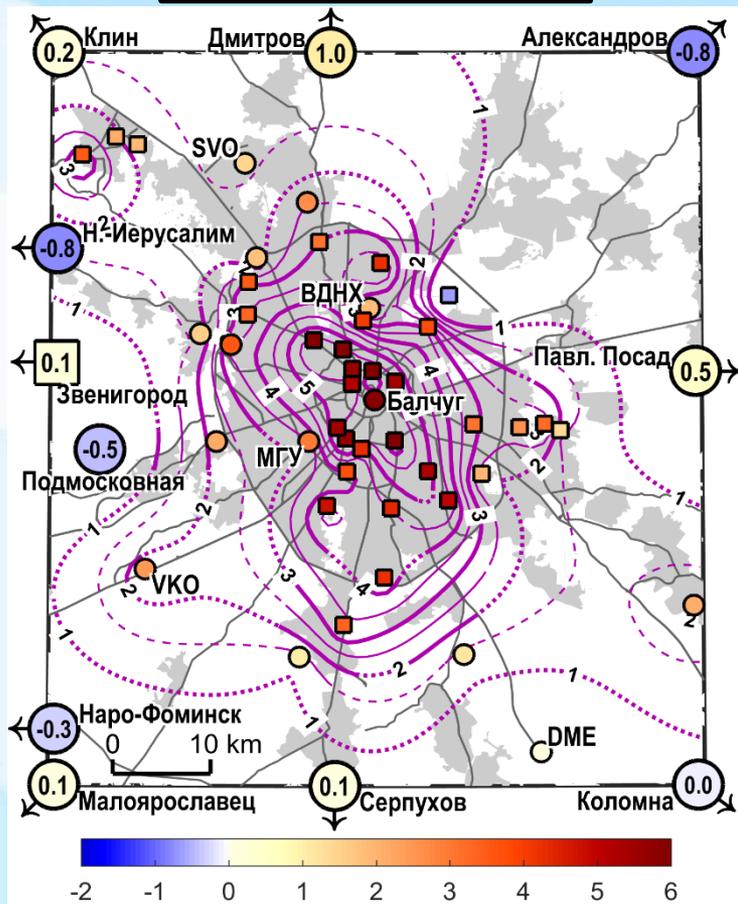


Концепция уличного каньона  
(Oke, Nunez, 1977)

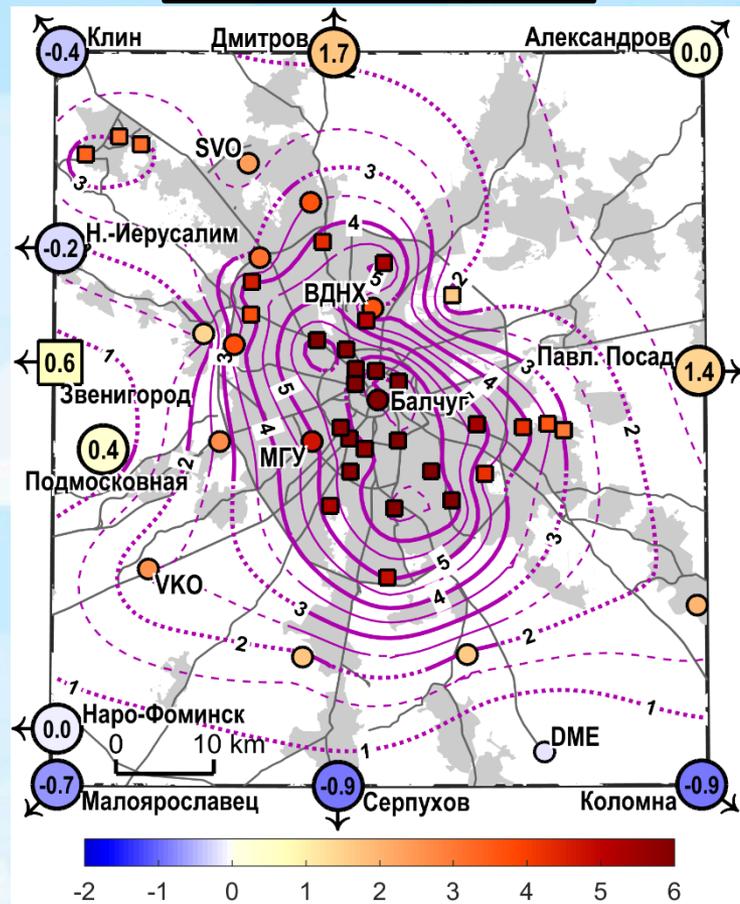


# Моделирование приземной температуры в Москве

Лето 2014



Зима 2013/14



# Синтез данных и искусственный интеллект

Суперкомпьютерные вычисления с гидродинамической моделью

Параметры городской поверхности

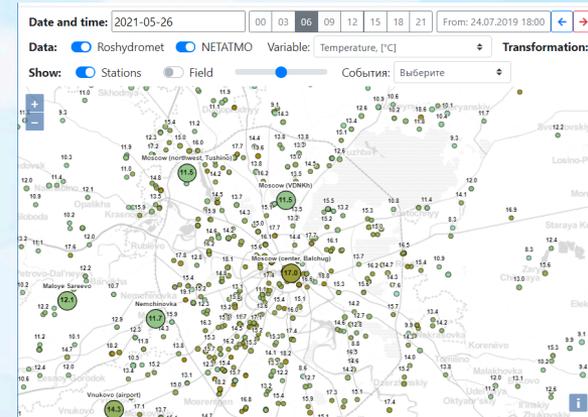
Искусственный интеллект

Наблюдения на официальных и личных метеостанциях

Данные моделирования на грубой пространственной сетке

Быстрый и детальный прогноз приземной погоды в мегаполисе

Приложения картирования погоды, работающие в режиме реального времени



Прототип веб-приложения "Mosclim"

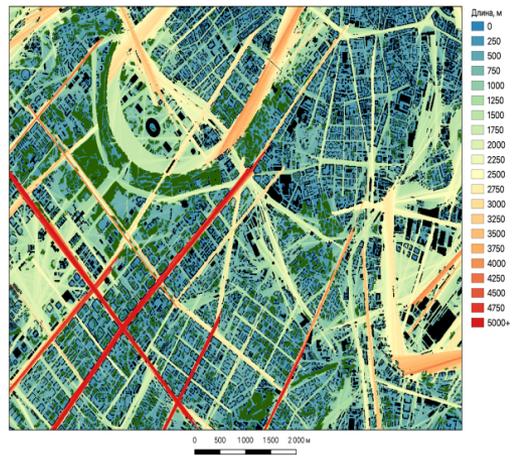
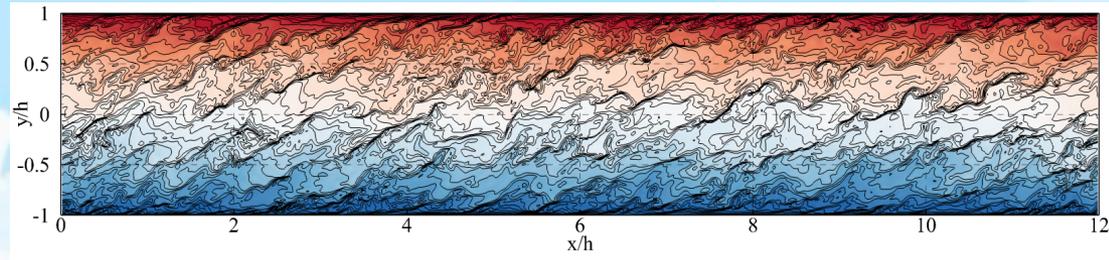
# Динамика атмосферного пограничного слоя

- **Фундаментальные исследования**

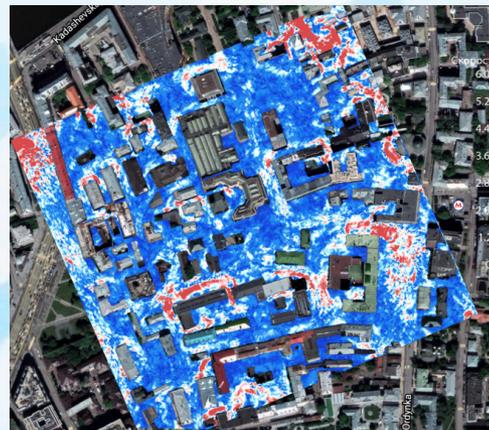
- Конвективные и устойчиво стратифицированные пограничные слои
- Организованные структуры в геофизической турбулентности
- Переходные и внутренние пограничные слои

- **Приложения для городских задач**

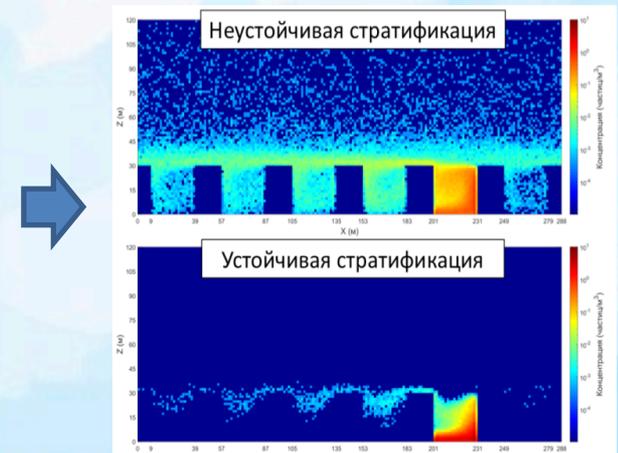
Организованные структуры в атмосферном турбулентном потоке



**Геоинформационные системы**  
(цвет – длина каньона)

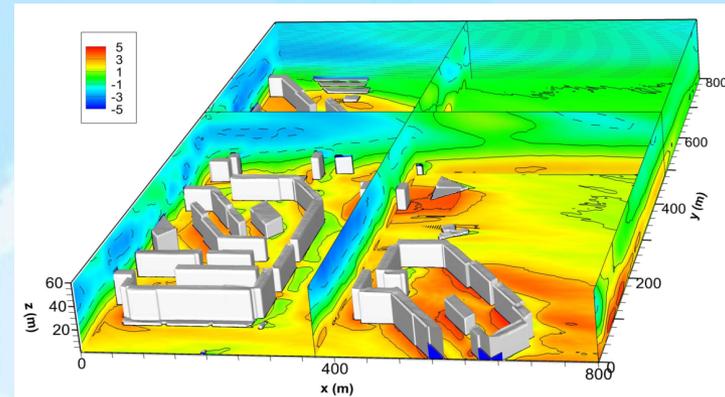


**Вихререзающее моделирование**  
(на примере района ст. м. Третьяковская)

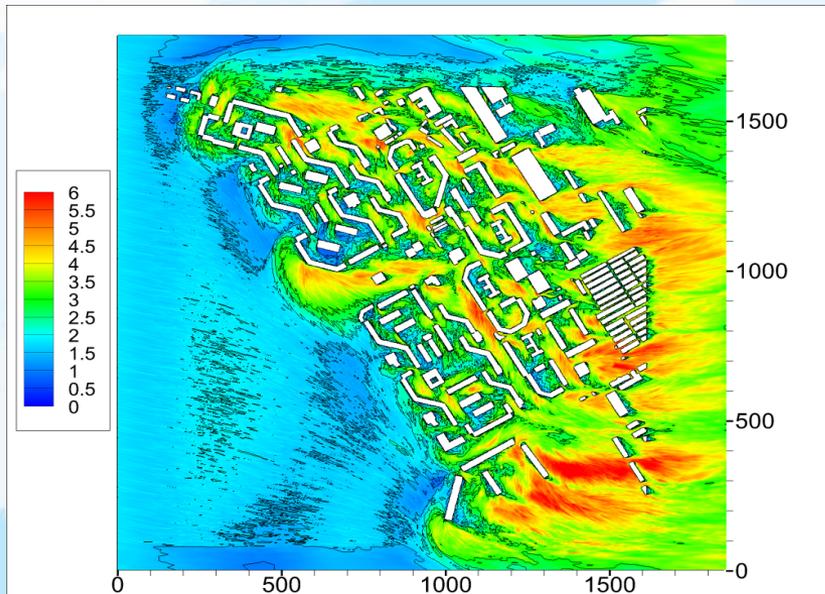


**Расчёт переноса примесей на масштабе отдельных улиц**

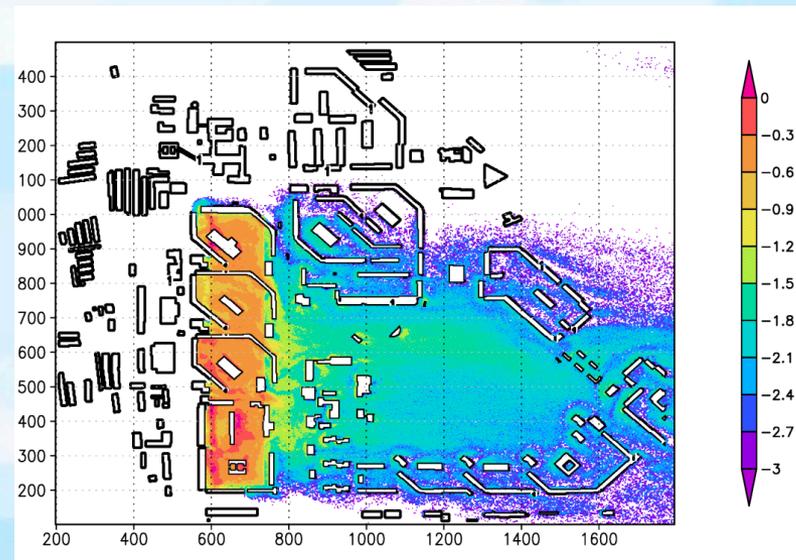
# Пример использования вихреразрешающей модели для расчетов характеристик атмосферной турбулентности и переноса примесей в городской среде с реалистично-заданной геометрией зданий (г. Надым)



Аномалии температуры воздуха

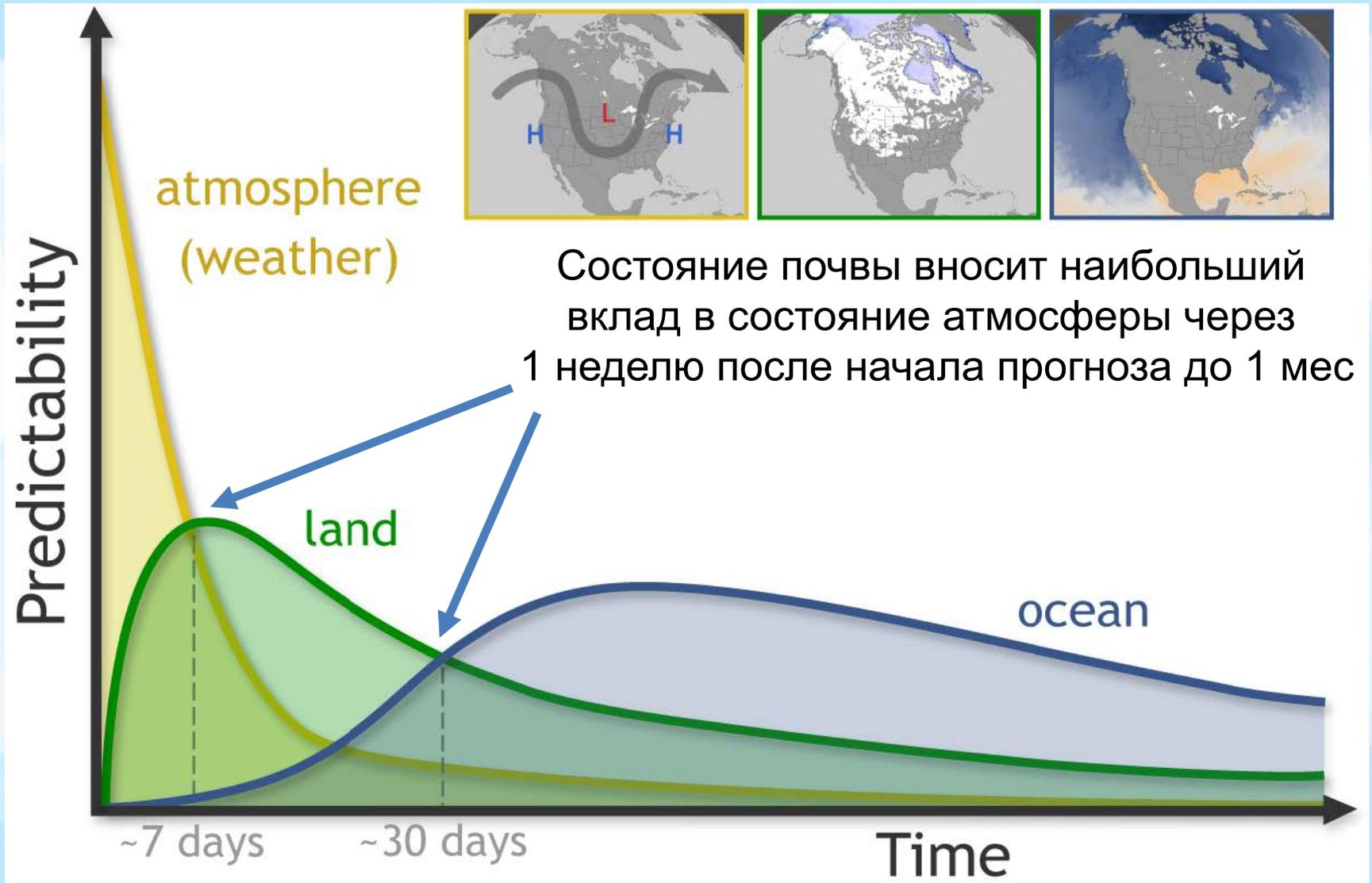


Максимальные порывы ветра на высоте 1м, зафиксированные за 20 минут расчета



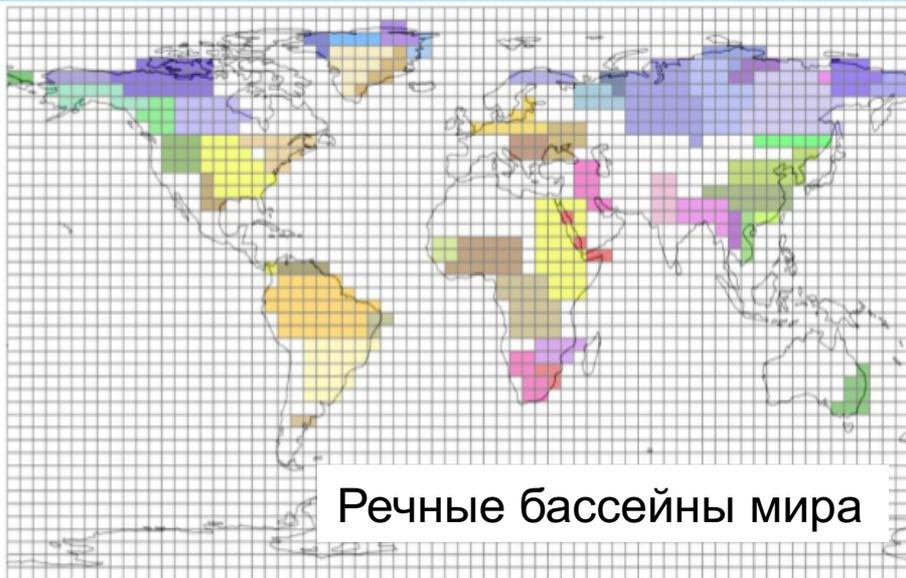
Скорость осаждения взвеси, вброшенной «во дворах» (логарифмическая шкала)

# Роль состояния почвы в предсказуемости атмосферы



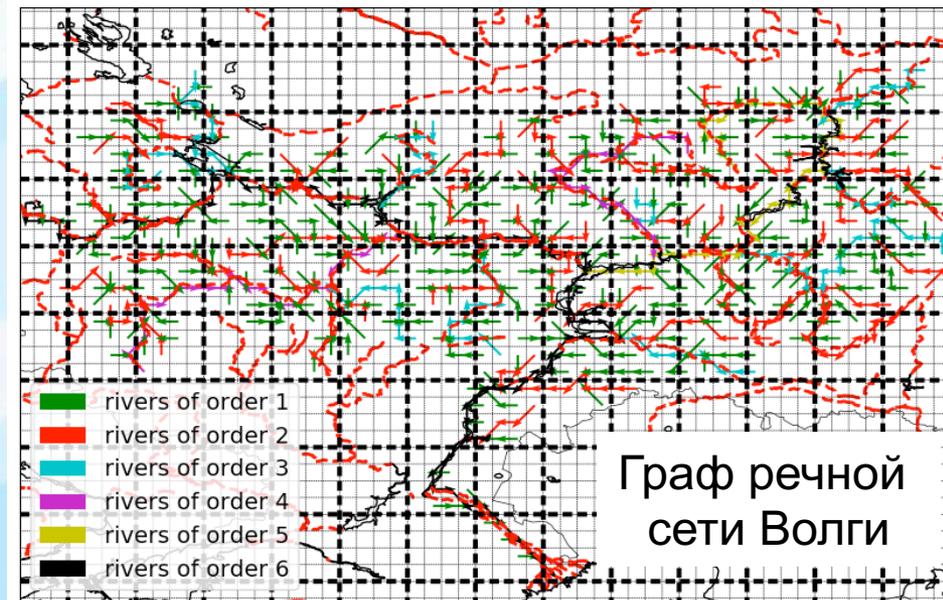
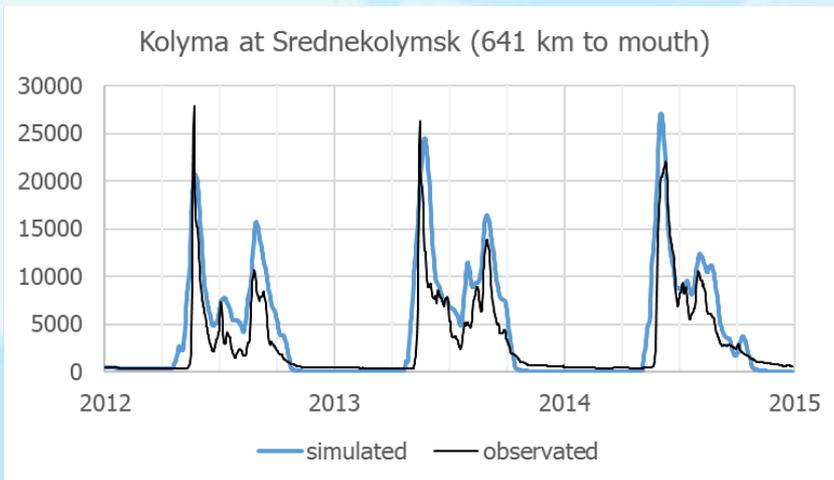


# Модель речных систем



- сезонный прогноз паводков и половодий
- сезонный и климатический прогноз притока воды в водохранилища и выработки электроэнергии
- климатический прогноз выноса парниковых газов из почвы в океан и атмосферу
- климатический прогноз стока пресной воды в океан

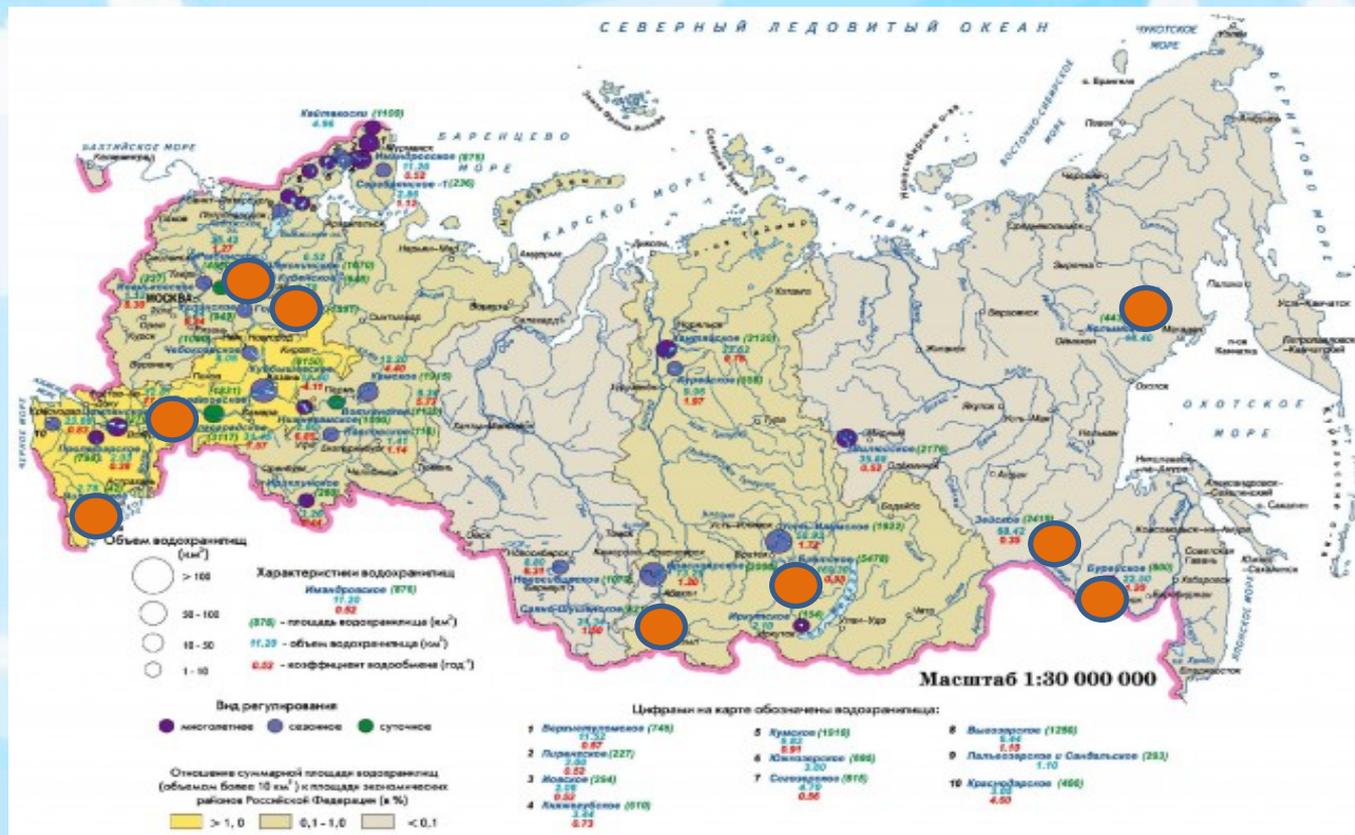
Сравнение с данными измерений речного стока (р.Колыма)



## “Измерение выбросов парниковых газов и оценка поглощающей способности гидроэнергетических объектов” (2021-2024 гг.)

### Задачи исследования

1. Проведение измерений выбросов парниковых газов с поверхности водохранилищ ГЭС.
2. Разработка методики и математических моделей баланса парниковых газов водохранилищ.
3. Придание разработанной методике статуса национальной методики Российской Федерации.

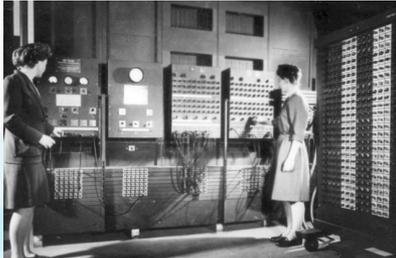


# Суперкомпьютеры



Первый численный прогноз погоды до эпохи ЭВМ на основе уравнений термогидродинамики. Опыт не был успешен, но имел историческое значение.

Л.Ф.Ричардсон «Фабрика прогноза погоды»



Первый в мире успешный численный прогноз погоды – 1950 г.

Дж. фон Нейман Первая ЭВМ – ENIAC (США)

По мере роста вычислительных ресурсов происходило качественное изменение математических моделей:

- баротропные (двумерные) модели
- трёхмерные гидростатические
- трёхмерные негидростатические



Новый суперкомпьютер к 2022 г., 1.2 млрд. фунтов

Cray XC40 (2016), MetOffice (UK), 14 Пфлопс

В списке Top500 2019 г.:



Cray/T-Platforms на базе XC40-LC (2018), Росгидромет, 1.3 Пфлопс



- 10 суперкомпьютеров из Top100 принадлежат национальным Гидрометслужбам

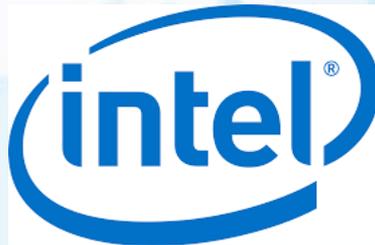
# Научные руководители

ФИО	Научные интересы
<b>Толстых Михаил Андреевич</b> , д.ф.-м.н., в.н.с. ИВМ РАН, зав. лаб. Гидрометцентра России, <a href="mailto:mtolstykh@mail.ru">mtolstykh@mail.ru</a>	Численный прогноз погоды
<b>Степаненко Виктор Михайлович</b> , д.ф.- м.н., зам. директора, зав. лаб. НИВЦ МГУ, <a href="mailto:stepanen@srcc.msu.ru">stepanen@srcc.msu.ru</a>	Численное моделирование деятельного слоя суши
<b>Володин Евгений Михайлович</b> , д.ф.-м.н., в.н.с. ИВМ РАН, <a href="mailto:volodinev@gmail.com">volodinev@gmail.com</a>	Численное моделирование климата
<b>Яковлев Николай Геннадьевич</b> , д.ф.-м.н., в.н.с. ИВМ РАН, <a href="mailto:nick_yakovlev@mail.ru">nick_yakovlev@mail.ru</a>	Численное моделирование Мирового океана
<b>Глазунов Андрей Васильевич</b> , д.ф.-м.н., в.н.с. ИВМ РАН, <a href="mailto:and.glas@gmail.com">and.glas@gmail.com</a>	Численное моделирование геофизических пограничных слоёв
<b>Мортиков Евгений Валерьевич</b> , к.ф.-м.н., с.н.с. НИВЦ МГУ, <a href="mailto:Evgeny.Mortikov@gmail.com">Evgeny.Mortikov@gmail.com</a>	Численное моделирование геофизических пограничных слоёв, численное моделирование Мирового океана

# В ходе обучения по данной программе студенты учатся:

- формулировать постановки задач в области математического моделирования Земной системы,
- разрабатывать вычислительные алгоритмы решения дифференциальных уравнений в частных производных, применять методы анализа больших данных и машинного обучения,
- разрабатывать и реализовывать методы параллельной обработки данных,
- интерпретировать результаты моделирования в терминах физических, химических и биологических процессов.

# Заказчики работ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ  
РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Министерство  
экономического  
развития РФ

# Потенциальные работодатели





# Кафедра вычислительных технологий и моделирования ВМК МГУ

- Подробнее о геофизическом направлении на кафедре: <https://www.inm.ras.ru/kaf-vtmgb/geo/>
- Студенты кафедры ВТМ активно вовлечены в разработку и совершенствование математических моделей для решения прикладных задач. Включение студентов в проектные работы подразумевает оплату этих работ.
- Учебный план кафедры ВТМ постоянно совершенствуется.
- Серии научных конференций с элементами школы молодых учёных CITES (<http://www.scert.ru/ru/conference/cites2021/>) и ENVIROMIS (<http://www.scert.ru/ru/conference/ENVIROMIS-2022/>)
- Школа в Сириусе:
  - «Математические технологии и моделирование», август 2022 г.
  - 1. Матрицы, тензоры, оптимизация (рук. акад. Тыртышников Е.Е.)
  - 2. Интегральные уравнения и их приложения (рук. проф. Сетуха А.В., к.ф.м.н. Ненашев А.С.)
  - 3. Математика в науках о Земле (рук. проф. Грицун А.С.)
  - 4. Математика в науках о жизни (рук. чл.-корр Ю.В.Василевский)



## Кафедра вычислительных технологий и моделирования ВМК МГУ

Магистерская программа: Суперкомпьютерные  
технологии моделирования Земной системы

Квота – 5 человек.

Правила и процедура приёма в магистратуру факультета ВМК МГУ:

<https://pk.cs.msu.ru/magistracy>