

# Моделирование турбулентности и переноса примеси с помощью **DNS, LES** и **RANS** подходов

*Научно-образовательная программа “Матричные методы и моделирование в науках о жизни и Земле”. Образовательный центр “Сириус”. Август, 2022*

**Руководители проекта:** **Над задачей работали:**

Е.В. Мортиков

А.В. Дебольский

А.В. Глазунов

Леусенко Леонид

Коленникова Мария

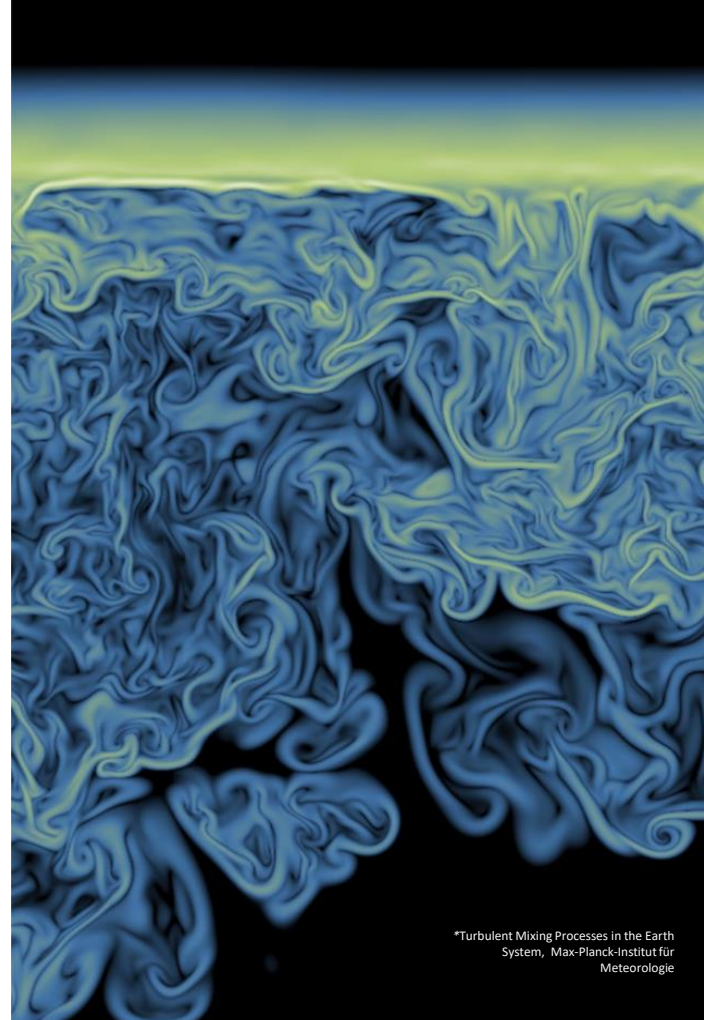
Кошкина Василиса

Касапенко Наталья

Тотменина Екатерина

Кузнецова Светлана

Гащук Елизавета



# Мотивация

1

**Проблема построения параметризаций** - учет не только мелкомасштабных турбулентных движений, но и оценка вклада крупномасштабных когерентных структур в процессы переноса

2

В силу **вычислительной сложности**, нужно рассчитывать динамику и перенос примесей на суперкомпьютерах, для чего требуется разработка алгоритмов для GPU

3

**Распространение загрязнений в пограничных слоях** в атмосфере и в океане, а также в городской среде, требует построения правильного турбулентного замыкания (для LES-, RANS-моделей прогноза погоды и климата)

# Задачи

## Задача №1

Моделирование переноса примесей в пограничных слоях и тестирование замыканий для RANS-моделей

## Задача №2

Программная реализация переноса примеси на GPU

## Задача №3

Исследование турбулентных течений над поверхностями городского типа

## Задача №4

Идентификации крупных структур и оценка их вклада в турбулентные характеристики течения

## Задача №5

Анализ линейной устойчивости турбулентного пограничного слоя

# Численная модель



Проведение численных экспериментов по моделированию идеализированных турбулентных течений, характерных для пограничных слоев, методами **DNS (Direct Numerical Simulation)** на основе унифицированной (DNS-,LES-,RANS-) технологии, разрабатываемой в **НИВЦ МГУ / ИВМ РАН**.

Система **уравнений Навье-Стокса** для вязкой несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + F_i^e,$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$
$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + \frac{\partial u_j C_k}{\partial x_j} + u_j \left( \frac{\partial C_k}{\partial x_j} \right)_0 = \frac{1}{ScRe} \frac{\partial^2 C_k}{\partial x_j \partial x_j} - T_l^{-1} C_k$$

## Исследуемые течения

- течение Куэтта
- течение Куэтта-Пуазейля
- течение в закрытом канале
- течение в открытом канале
- течение Экмана

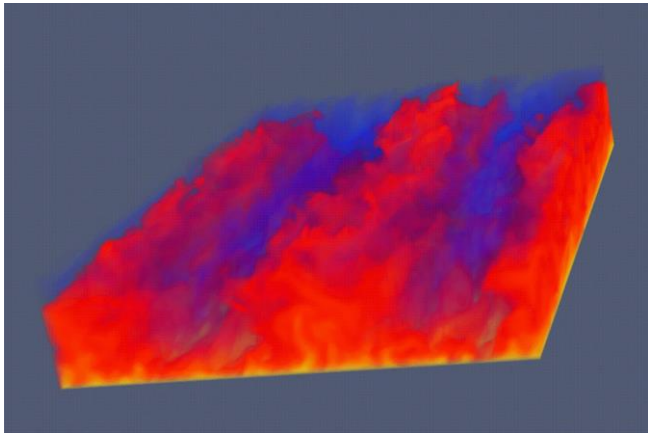


- Все масштабы турбулентности разрешаются **явно**
- Численное моделирование **методом конечных разностей**
- Расчеты проводились на **кластере ИВМ РАН**, задействовано до 400 ядер

# Задача №1. Тестирование параметризации турбулентного переноса пассивной примеси

Точная параметризация по данным DNS

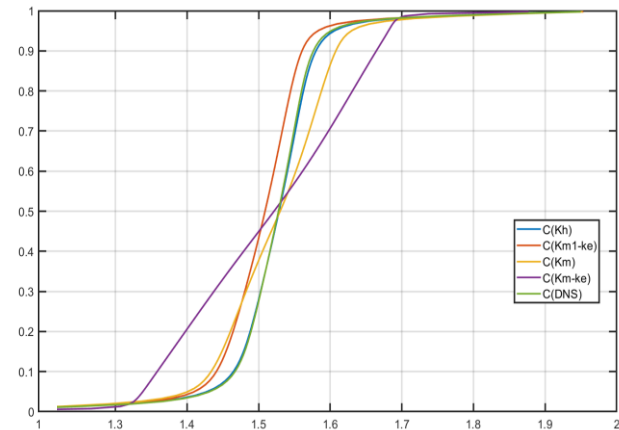
$$\langle C'w' \rangle = -K_{turb} \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial z}$$



Продольная компонента скорости в течении Куэтта

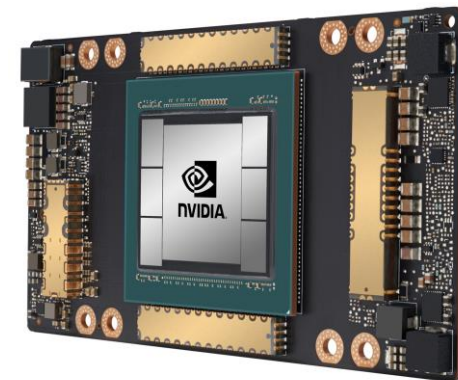
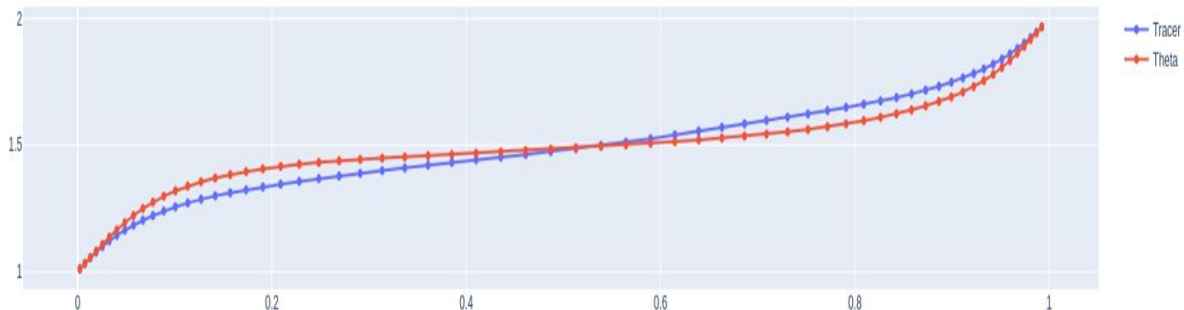
Параметризации, используемые в RANS-моделях

$$K_m = \frac{-\langle u'w' \rangle}{\frac{\partial \langle U \rangle}{\partial z}}, \quad K_e = C_1 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad K_e = C_2 E_w \frac{k}{\varepsilon}$$



Среднее вертикальное распределение примеси

## Задача №2. Программная реализация переноса примеси на GPU



### Результаты

реализована численная модель переноса примеси, поддерживающая исполнение расчетов в **полуточности**

*Ampere (microarchitecture)*



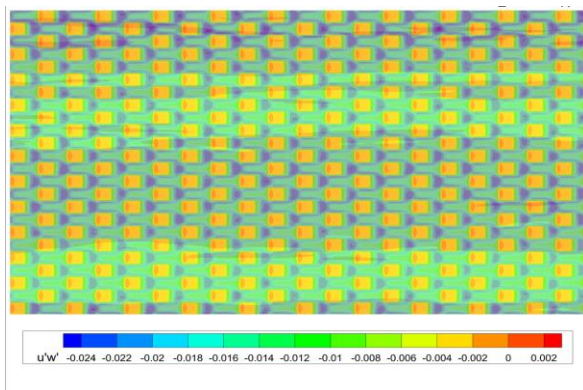
- ускорение расчетов от 30% до **50%**(чем больше задача, тем больше ускорение)
- **уменьшение** требуемой памяти в **2 раза**



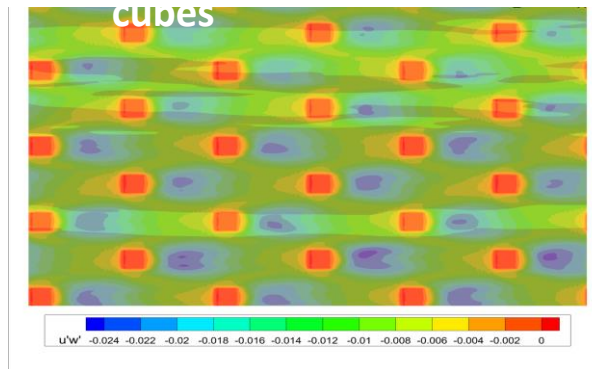
- ошибки округления могут **значительно повлиять на расчет** концентрации и статистических характеристик

# Задача №3. Турбулентные течения над поверхностями городского типа

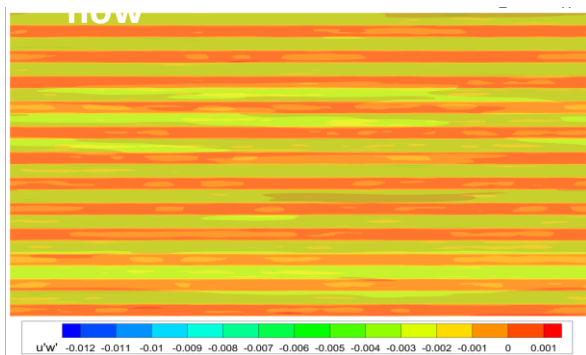
1) dense cubes



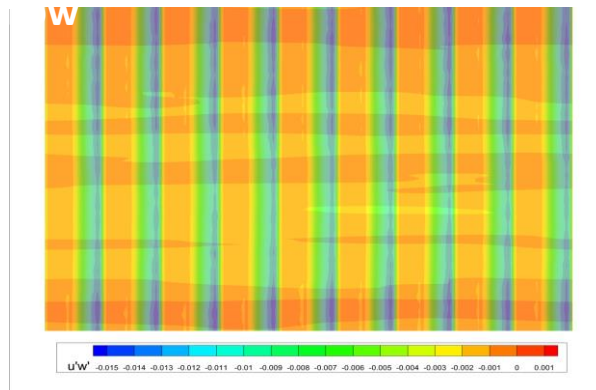
2) sparse cubes



3) canyons along

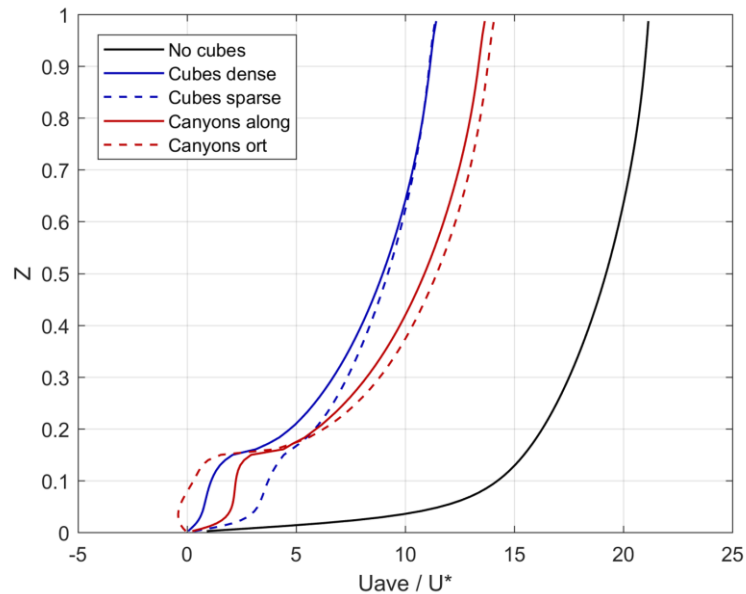


4) canyons orthogonal to

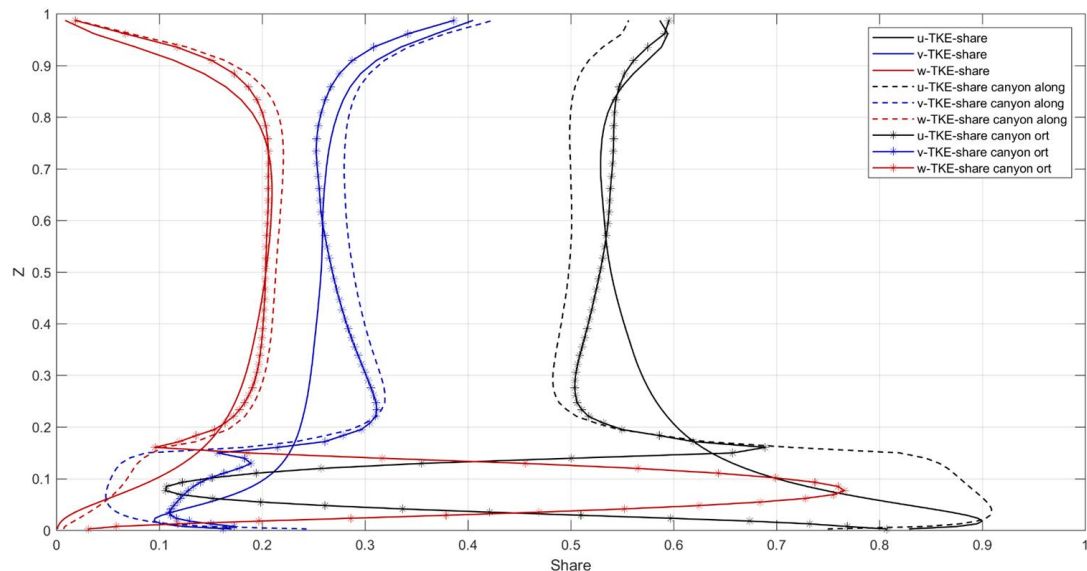


# Задача №3. Турбулентные течения над поверхностями городского типа

## Вертикальный профиль средней скорости течения



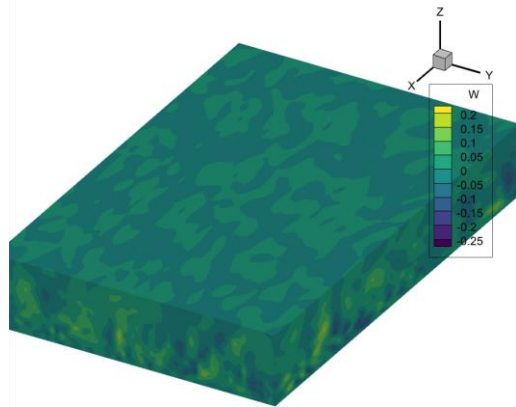
## Доля компонент кинетической энергии турбулентности (ТКЭ)



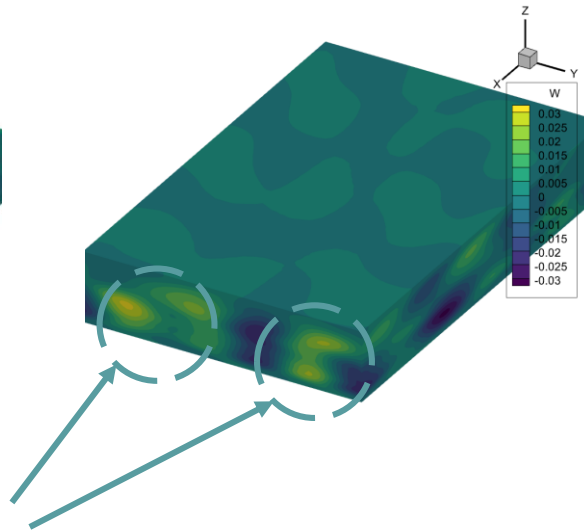


# Задача №4. Идентификация крупных структур в течении Куэтта

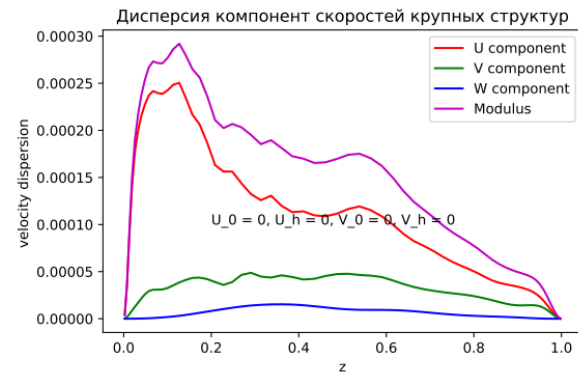
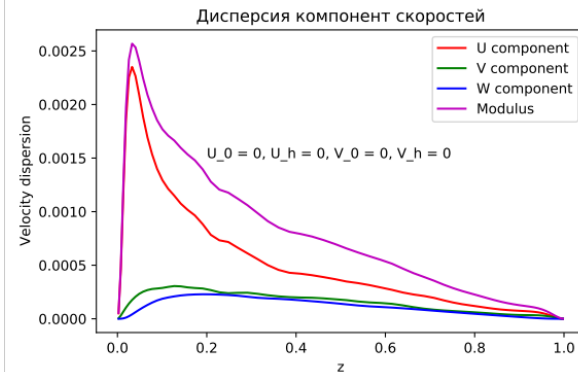
Поле скоростей



Фильтрованное поле скоростей

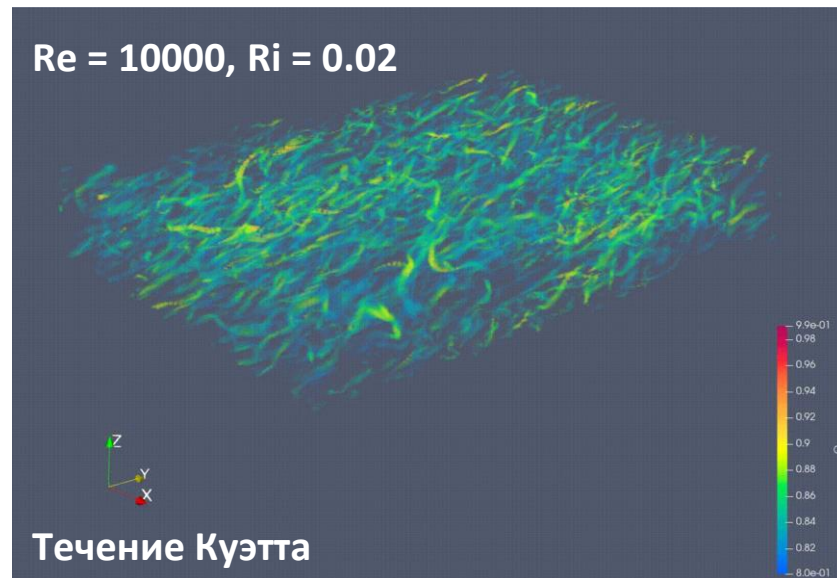
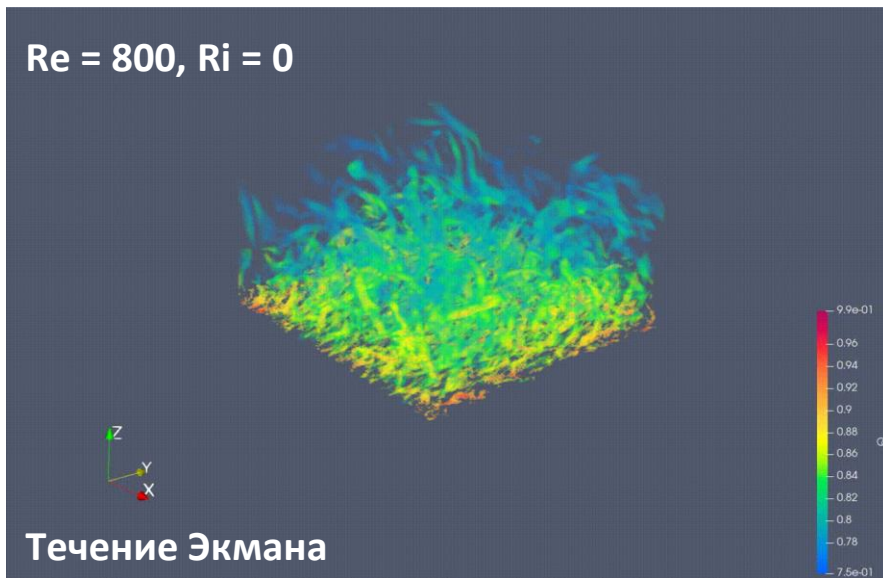


Наблюдаются крупные структуры



Вклад фильтрованного поля 6%

## Задача №4. Идентификация крупных структур эйлеровскими методами

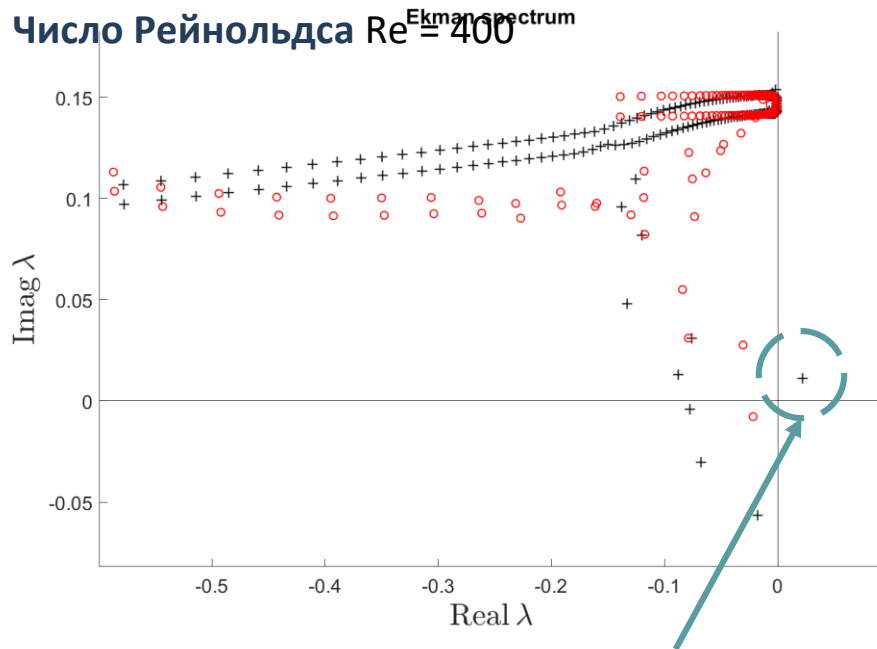


$$\nabla \vec{u} = \vec{S} + \vec{\Omega}$$
$$Q = \frac{1}{2} (\|\vec{\Omega}\|^2 - \|\vec{S}\|^2) > 0$$

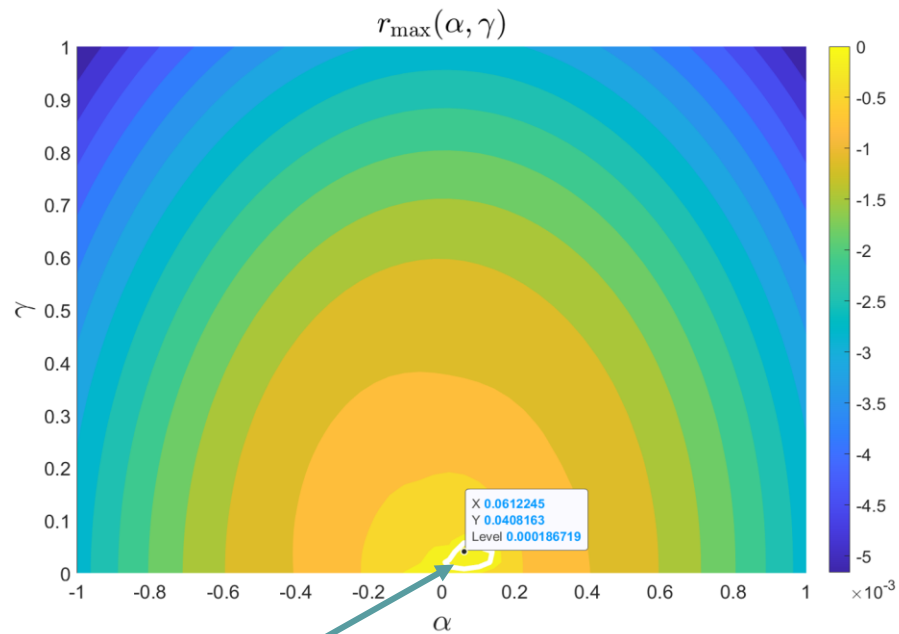
Доля в вихрях	Экман	Куэтт
ТКЭ	0.35	0.34
Энстрофии	0.43	0.51
Спиральности	0.49	0.49

# Задача №5. RANS-модель турбулентного пограничного слоя. Анализ линейной устойчивости

○ turbulent + laminar



Неустойчивая мода ламинарного течения



Неустойчивая мода турбулентного течения

# Выводы

## Задача №1

Параметризации коэффициента турбулентной диффузии для скаляра **не универсальны** для различных течений и типов примесей.



**Имеющиеся параметризации, используемые в моделях пограничного слоя, требуют уточнения**

## Задача №2

Использование половинной точности при расчете переноса примеси на GPU дает **ускорение от 30% до 50%**, уменьшение используемой памяти в 2 раза.



**Ошибки округления** значительно влияют на результат.

## Задача №3

Свойства **турбулентного обмена** значимым образом зависят от **конфигурации городской застройки**. Ослабление средней скорости в нижней части пограничного слоя **сильнее** всего проявляется при **конфигурации каньонов, перпендикулярных** фоновому потоку.

## Задача №4

Показано, что **вклад крупномасштабных структур** в пристеночную динамику турбулентных течений, дисперсии скоростей и концентрации примеси **значителен**

## Задача №5

В турбулентном течении **Экмана** при малых волновых числах **обнаружена слабо-неустойчивая мода**.

# Спасибо за внимание!

Участники проекта выражают благодарность  
Образовательному центру Сириус и организаторам  
программы.

