



Моделирование турбулентного переноса примесей в планетарном пограничном слое с применением методов крупных вихрей и машинного обучения

выполнил: **Герасимов И. А.**

научный руководитель: к. т. н. **Криницкий М. А.**

научный консультант: к. ф.-м. н. **Мортиков Е. В.**

Актуальность

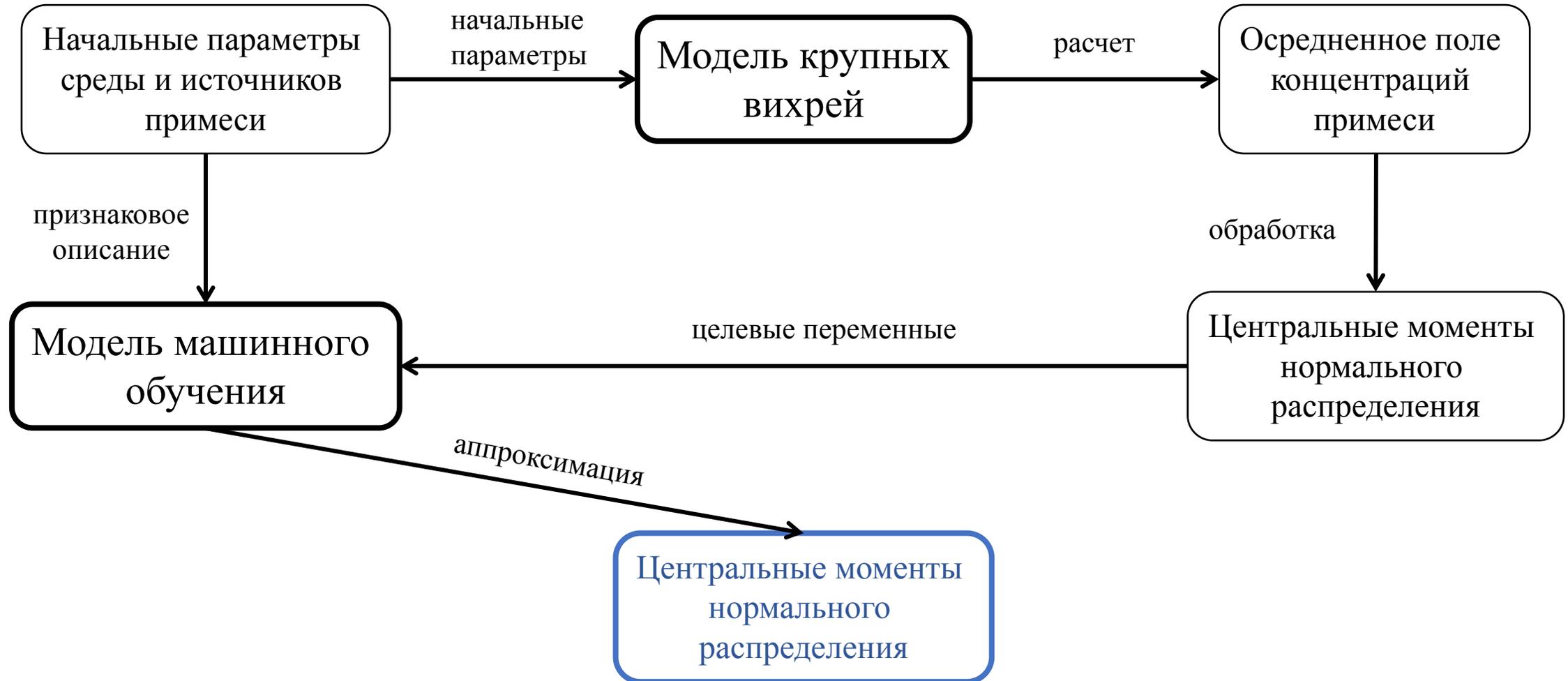
1. Необходимость точной пространственной оценки турбулентного переноса примесей для экологического мониторинга и климатического прогнозирования
2. Традиционные методы моделирования пограничного слоя атмосферы имеют ограничения в точности или вычислительной эффективности
3. Методы машинного обучения позволяют оптимизировать существующие способы оценки турбулентного переноса

Цель: Разработка методологии аппроксимации первых моментов пространственного распределения примесных компонент в турбулентном ППС с применением методов машинного обучения (МО)

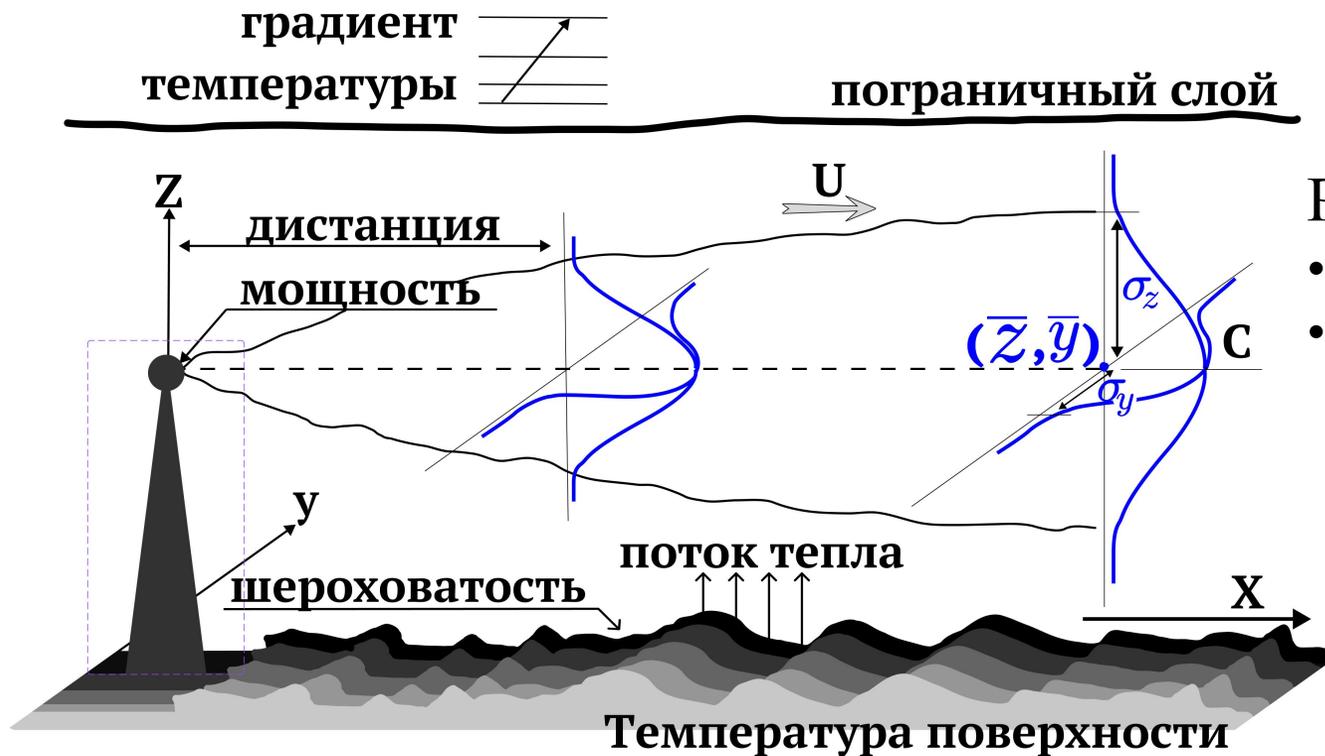
Задачи:

1. Теоретический анализ
2. Численное моделирование методом крупных вихрей
3. Обработка полученных данных для применения машинного обучения
4. Применение МО для аппроксимации моментов пространственного распределения примесных компонент
5. Оптимизация архитектуры и гиперпараметров модели машинного обучения
6. Анализ полученных результатов

Схема исследования



Физическая модель



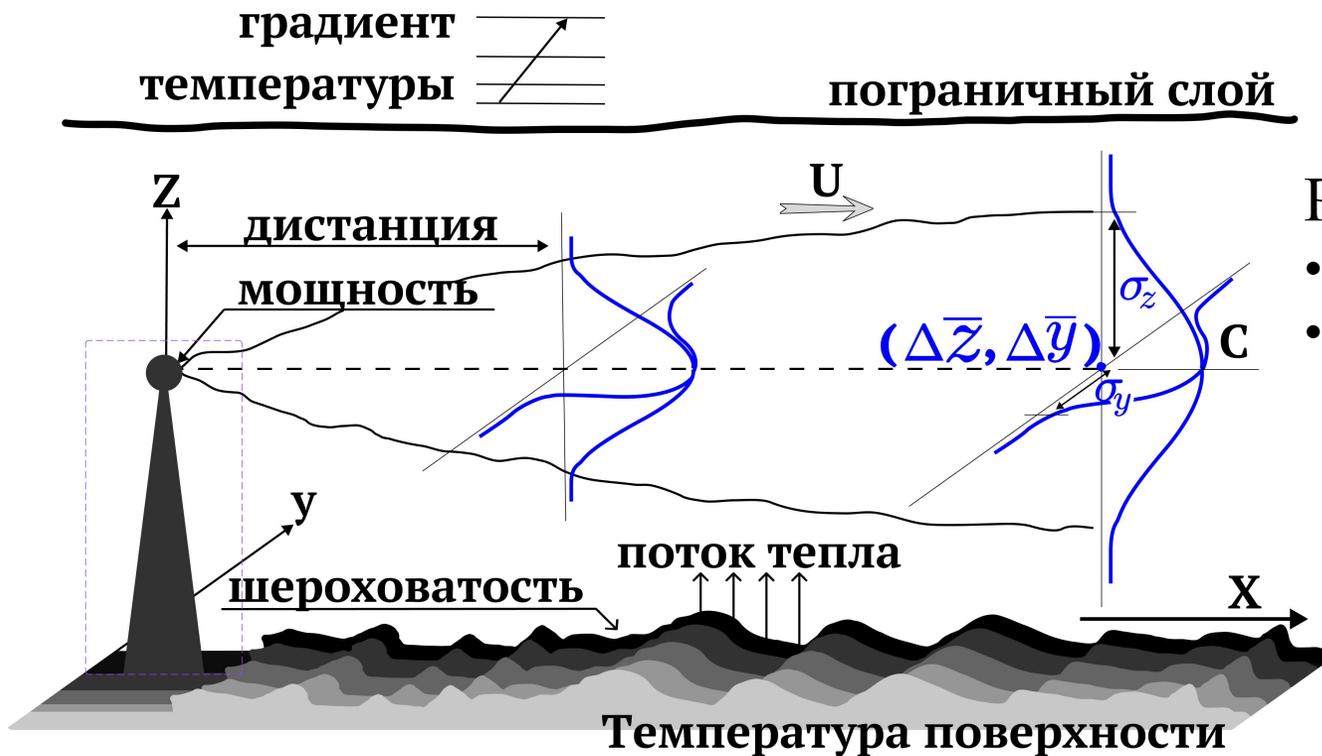
Рассматривается:

- квазистационарный ППС
- стационарное решение уравнения адвекции-диффузии:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{(y - y_s)^2}{2\sigma_y^2(x)} - \frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)$$

Схема эксперимента с задаваемыми и
вычисляемыми параметрами

Физическая модель



Рассматривается:

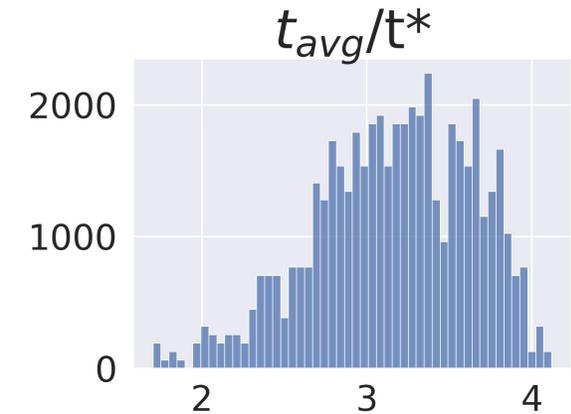
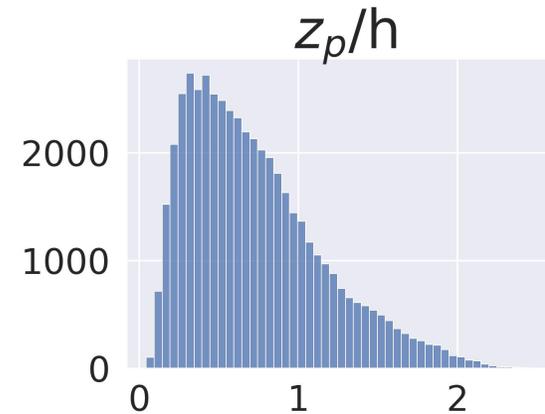
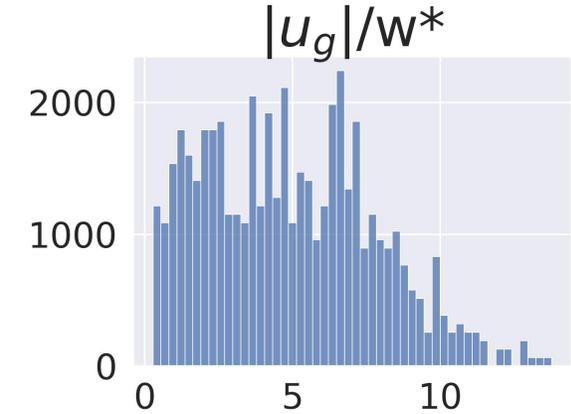
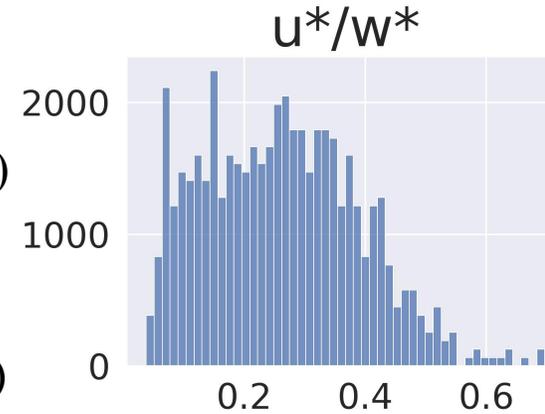
- квазистационарный ППС
- стационарное решение уравнения адвекции-диффузии:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{(y - y_s)^2}{2\sigma_y^2(x)} - \frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)$$

Схема эксперимента с задаваемыми и
вычисляемыми параметрами

Физическое описание признаков

1. $U = 0.5 - 15$ [м/с] (Геострофическая скорость ветра по оси x)
2. $P = 0.8 - 1.7$ (Мощность распространения примесей)
3. $z = 100 - 700$ [м] (Координата источника примеси по оси z)
4. $y = 500 - 1500$ [м] (Координата источника примеси по оси y)
5. $z_0 = 0.001 - 1$ [м] (Шереховатость)
6. $T_0 = 230 - 300$ [K] (Температура поверхности)
7. $S_f = -0.5 - -0.1$ [K × м/с] (Поток тепла от поверхности)
8. $\text{grad}_z T = 0.001 - 0.1$ [K/м] (Градиент температуры над пограничным слоем)
9. $\text{distances} = 7 - 1492$ [м] (Расстояние от источника примеси)



Параметры моделей

LES модель:

- Размер расчетной области:
2000x2000x1000 (м)
- Размерность сетки:
128x128x64
- Проведено экспериментов: **828**
- Количество пассивных трассеров в одном эксперименте: **64/116**

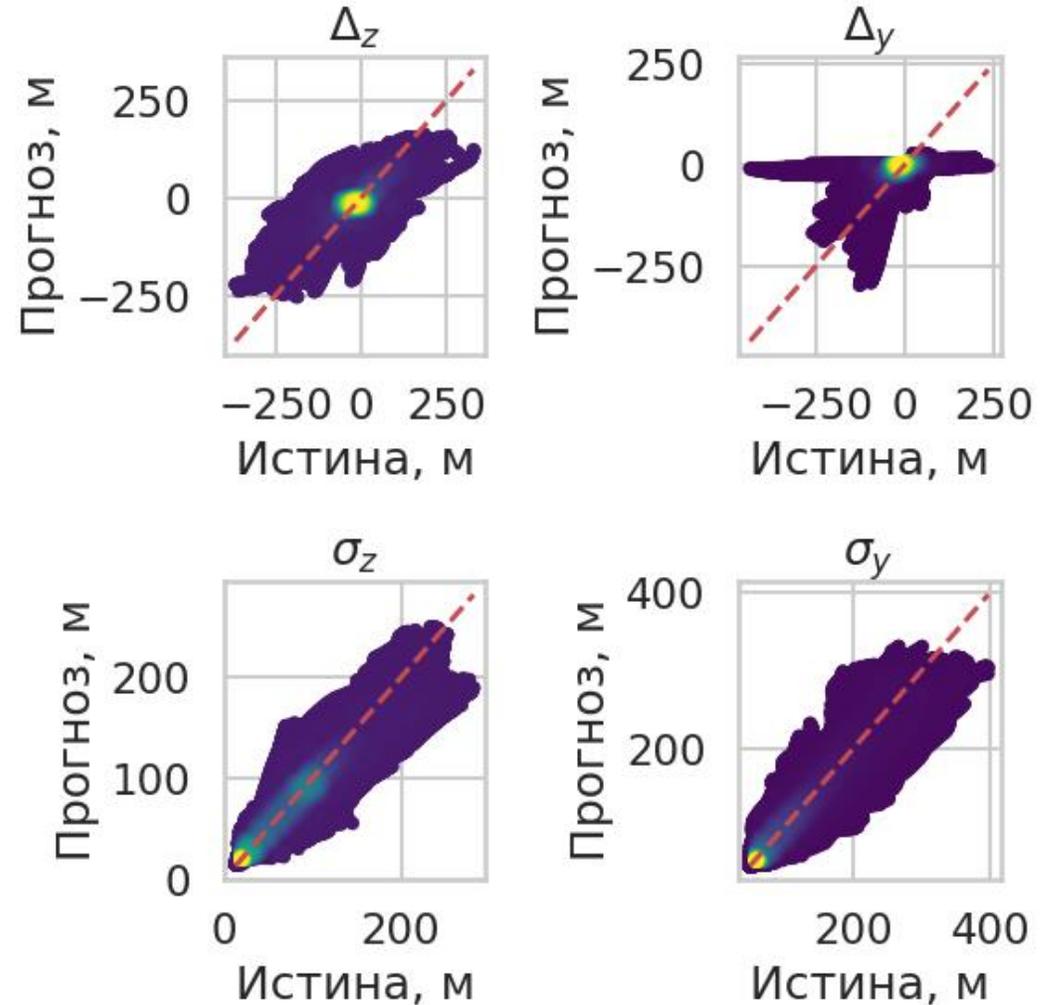
МО модели:

- Общий размер выборки:
 $828 \times 64 \times 94 \approx 5 \cdot 10^5 = T$
- Размер тренировочной выборки:
0.64 T
- Размер валидационной выборки:
0.16 T
- Размер тестовой выборки:
0.2 T

Результаты. Сравнение моделей

	Δ_z	Δ_y	σ_z	σ_y
Эмпирическая модель Бриггса	56.6	41.4	101.3	59.6
Линейная модель	335.7	722.9	32.7	31.4
Модель Случайного леса	36.1	38.2	17.0	20.7
Модель Catboost	34.5	36.8	14.5	30.2
MLP	26.7	32.2	11.3	13.3

Сравнение результатов аппроксимации.
Метрика: RMSE



Результаты для лучшей модели
(MLP)

Результаты. Добавление признаков

Модель Бриггса

$$\bar{r} = r_s$$

$$\sigma = \alpha(1 + \beta x) - \nu$$

$$w^* = (\beta \cdot |S_f| \cdot h) - 1/3$$

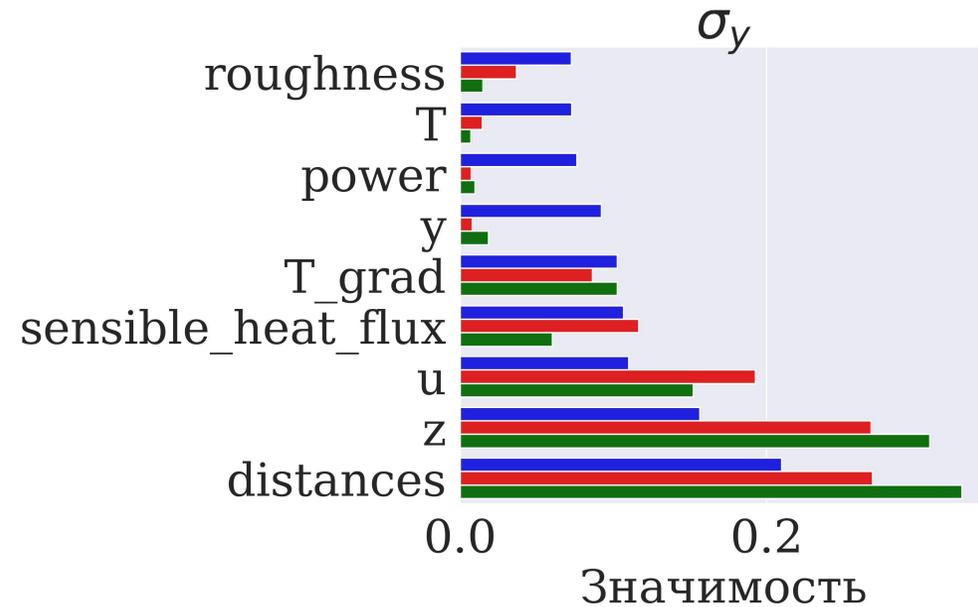
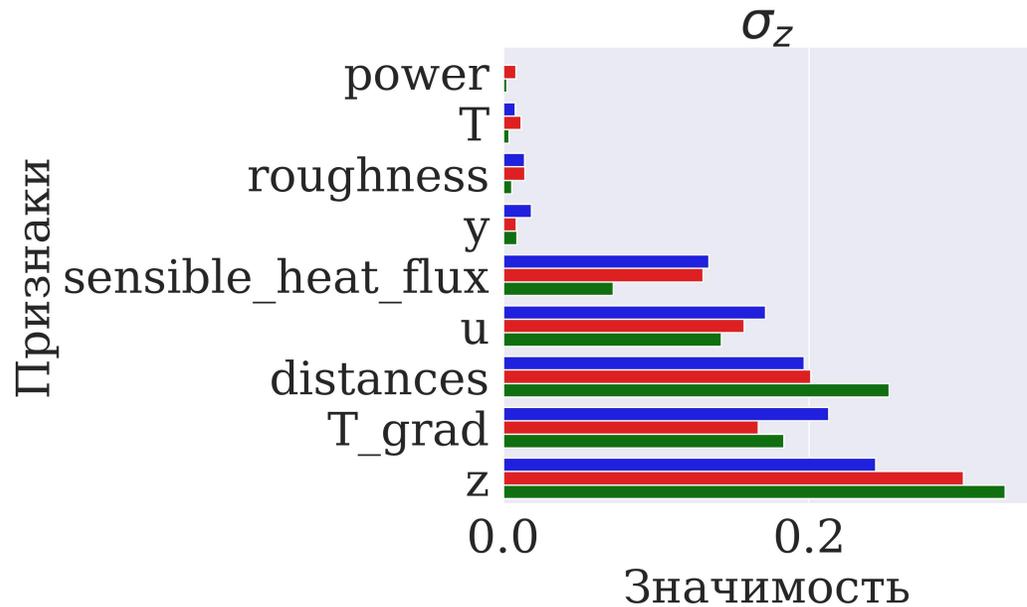
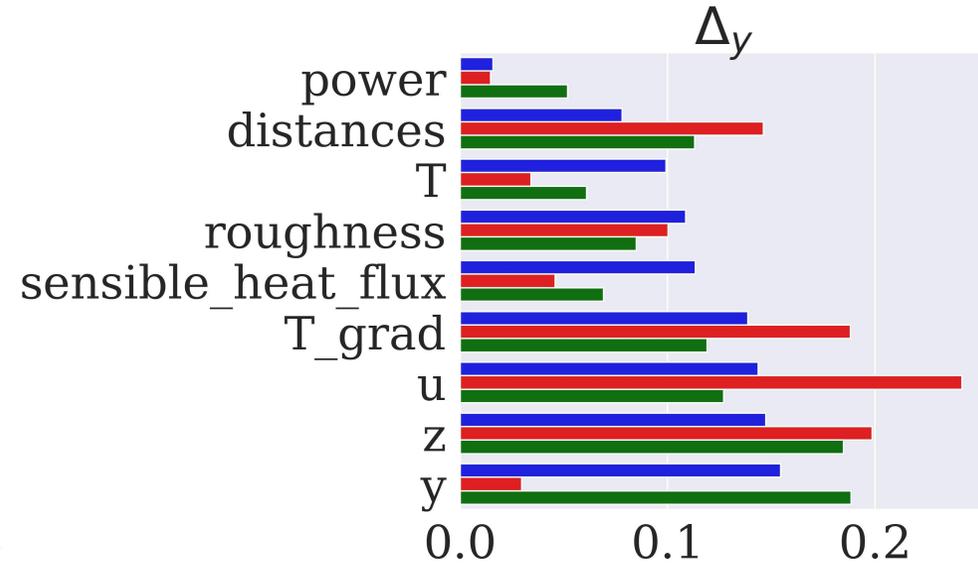
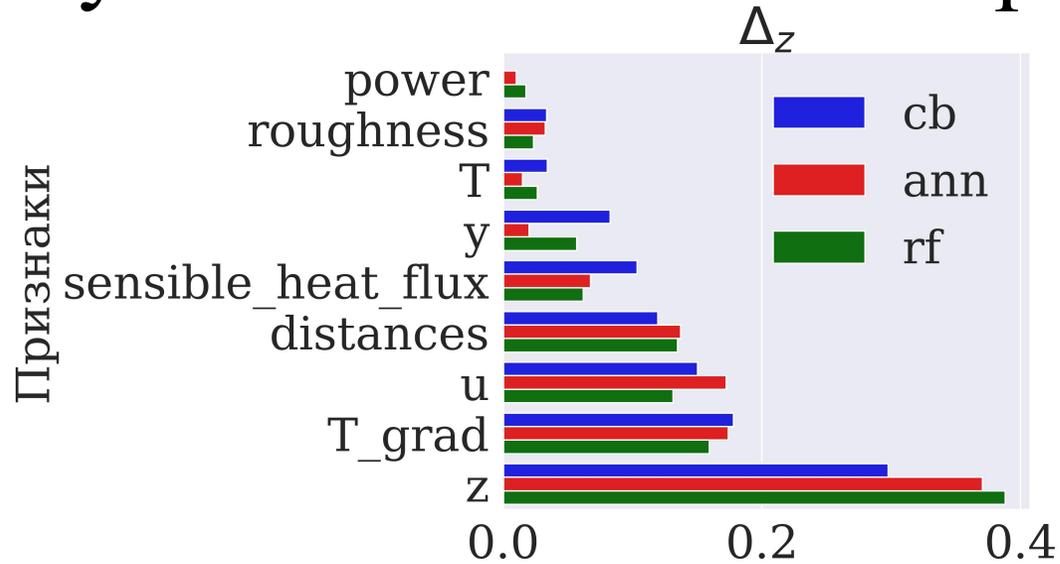
$$u^* = 1/(k \cdot \log(|z - h|/z_0))$$

Δ_z	30.7	30.1	30.1	26.7
Δ_y	30.0	37.6	37.6	32.2
σ_z	16.8	11.7	11.7	11.3
σ_y	20.2	16.2	16.2	13.3

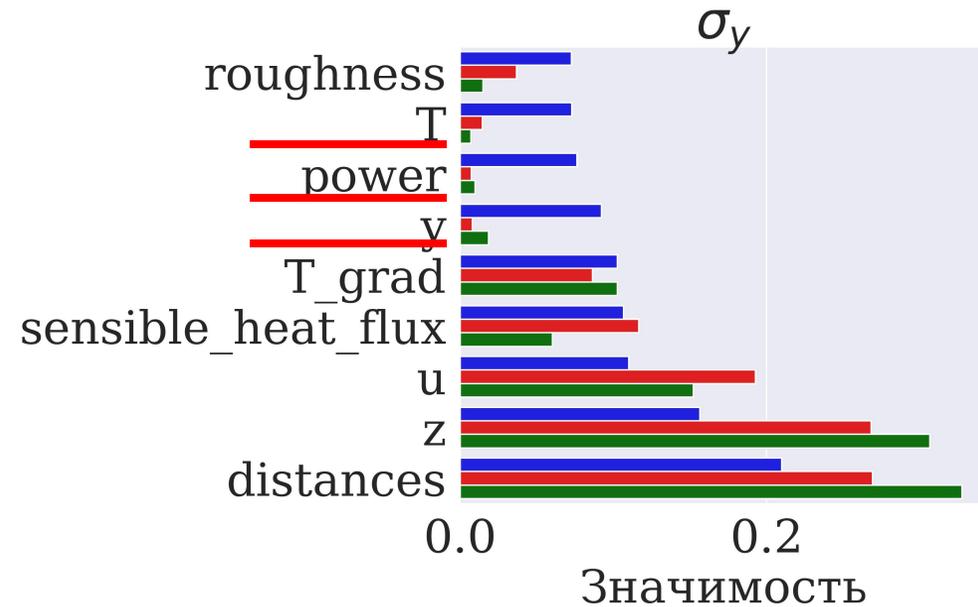
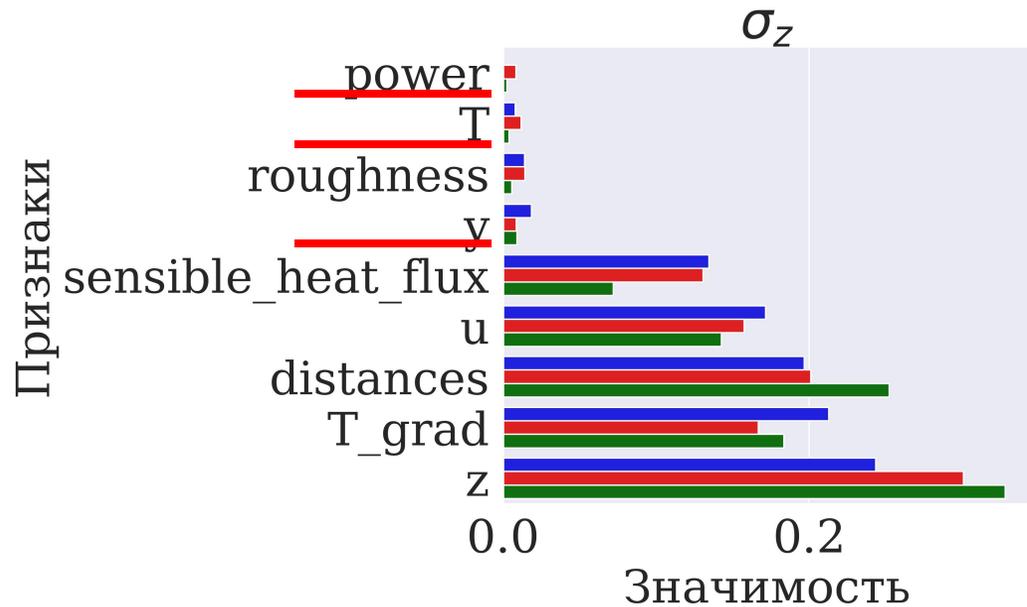
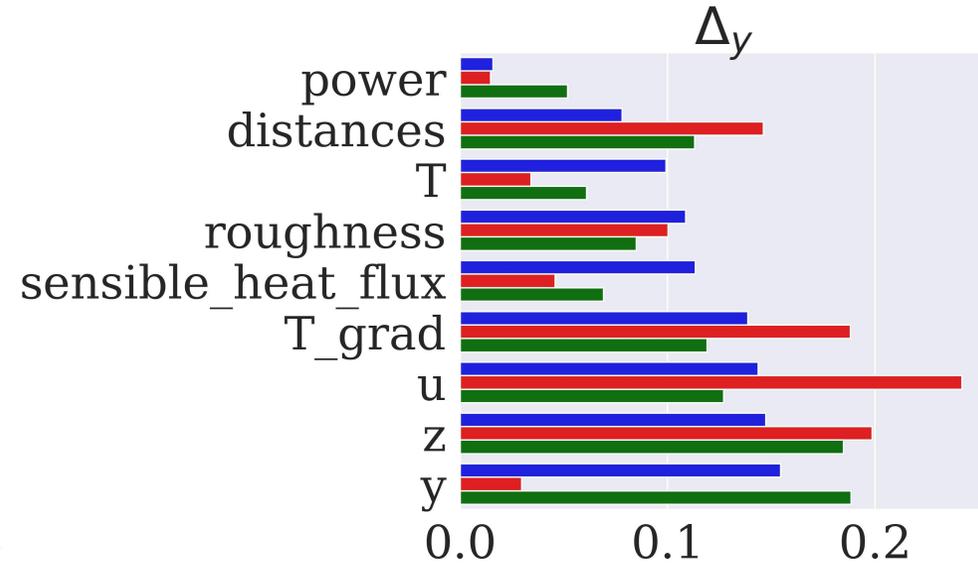
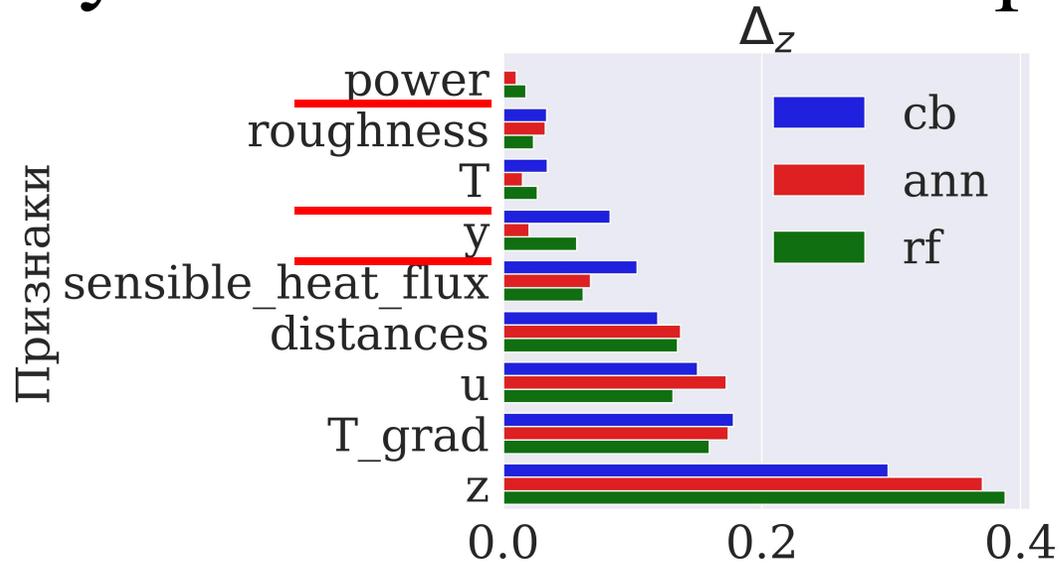
Сравнение результатов аппроксимации после добавления признаков для MLP.

Метрика: RMSE

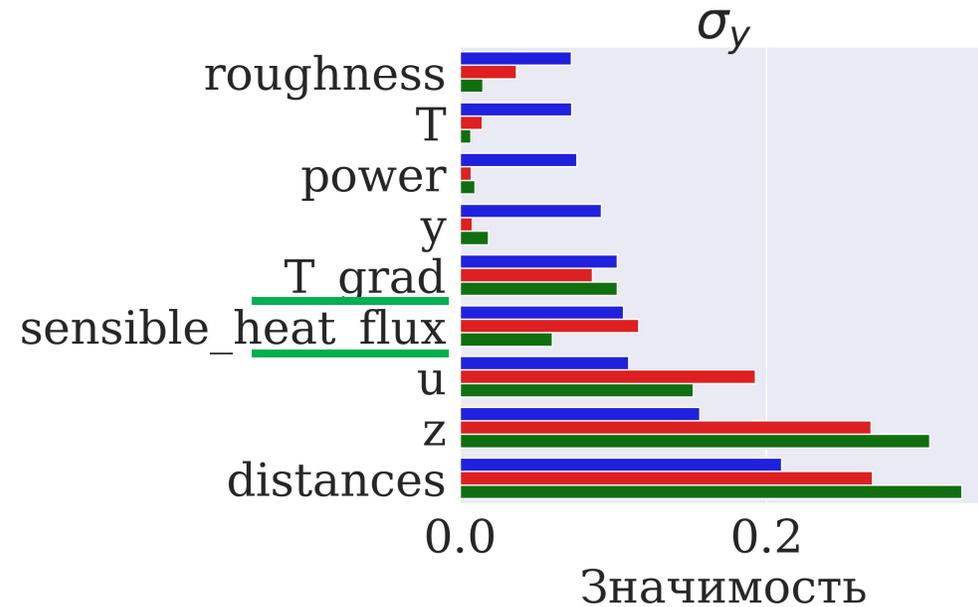
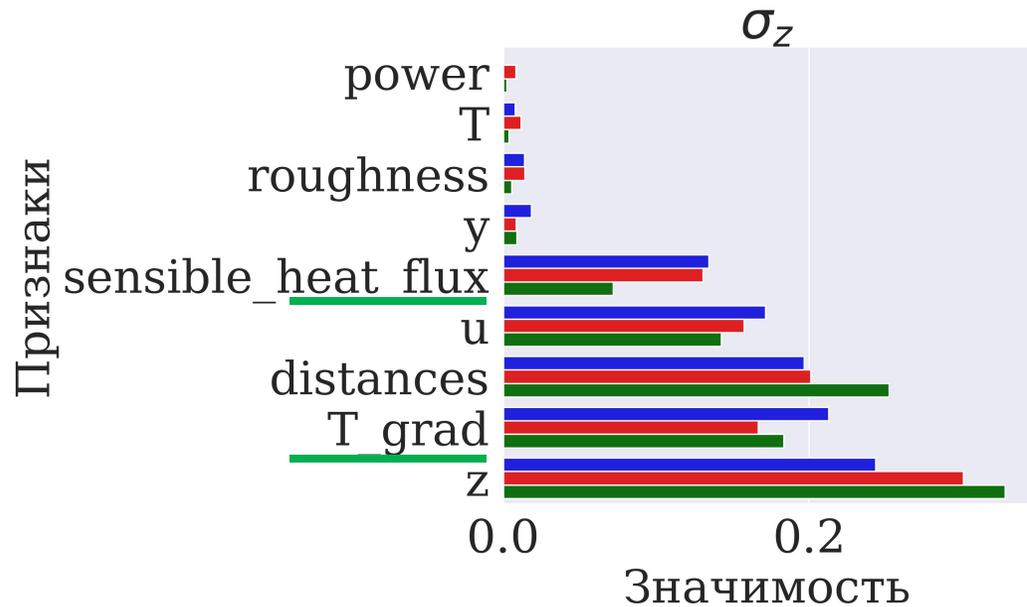
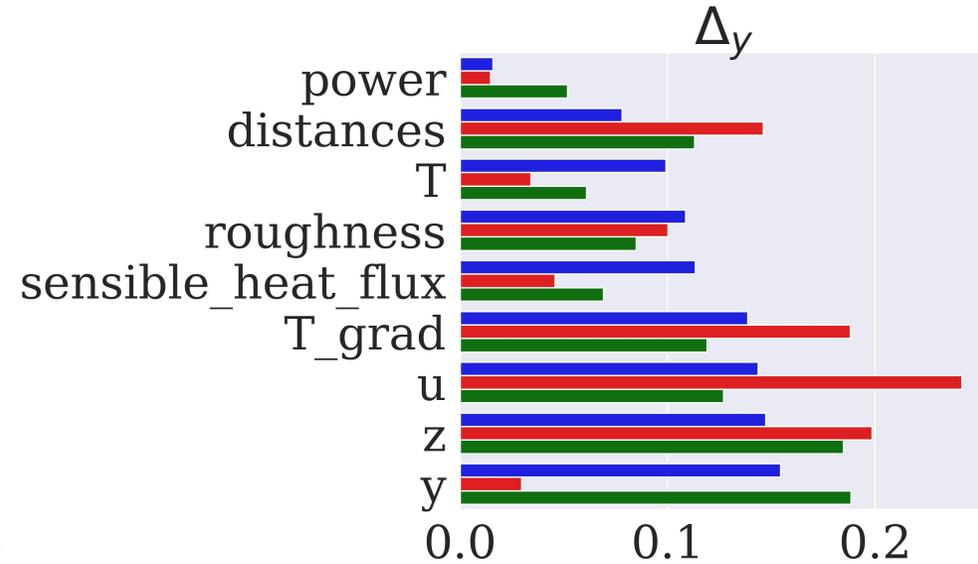
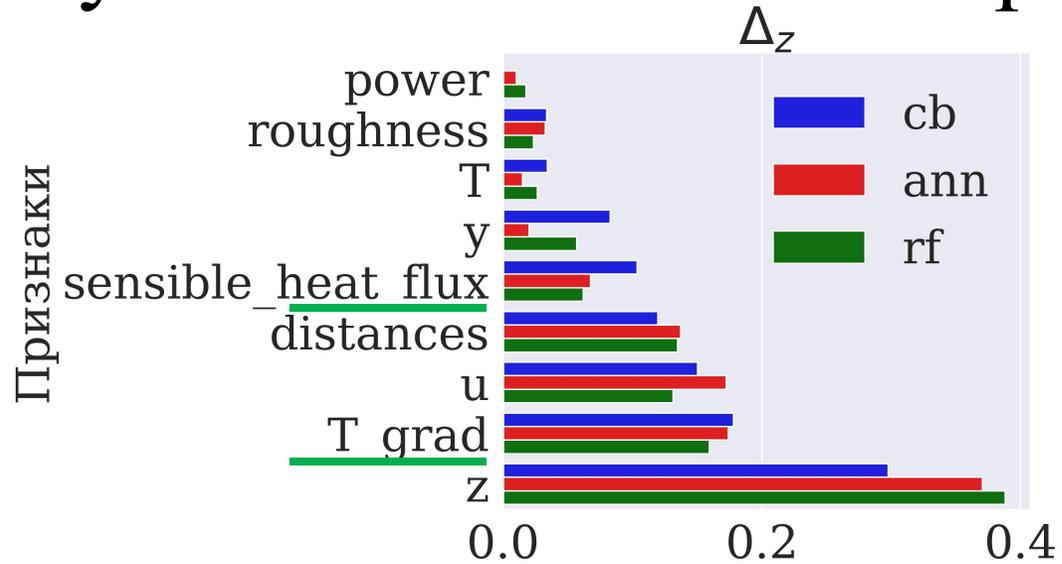
Результаты. Значимость признаков



Результаты. Значимость признаков



Результаты. Значимость признаков



Выводы

1. Получены аппроксимации центральных моментов распространения примеси.

Лучшая модель: MLP

- Аппроксимация Δ_y показывает отсутствие зависимости, что подтверждает гипотезу о том, что целевая переменная в среднем соответствует положению источника, а в нашем случае также зависит от турбулентных структур.
- Аппроксимация Δ_z показывает небольшое улучшение по сравнению с эмпирической моделью Бриггса, что показывает тенденцию к улавливанию универсальных зависимостей $f = f(z/h)$
- Аппроксимации σ_y, σ_z дают значительное улучшение по сравнению с эмпирической моделью Бриггса.

2. Модели МО дают лучшие результаты, по сравнению с эмпирической моделью Бриггса, показывая эффективность моделей в решении данной задачи

3. Результаты значимости признаков моделей позволяют оценить важность учета физических параметров в дальнейшем развитии постановок физических задач и численном моделировании

Спасибо за внимание!

