



Факультет Компьютерных наук

Оптимизация генераторов ветропарка

Греков П. П., Рамазян Т.А., Фомичева Н.В

НИУ ВШЭ

Moscow 2026





- Нетривиальность оптимальной расстановки из-за физической сложности
- Вычислительный барьер классических методов
- Преодоление ограничений суррогатных моделей через Вассерштайновскую неопределенность





maximize
 X, Y

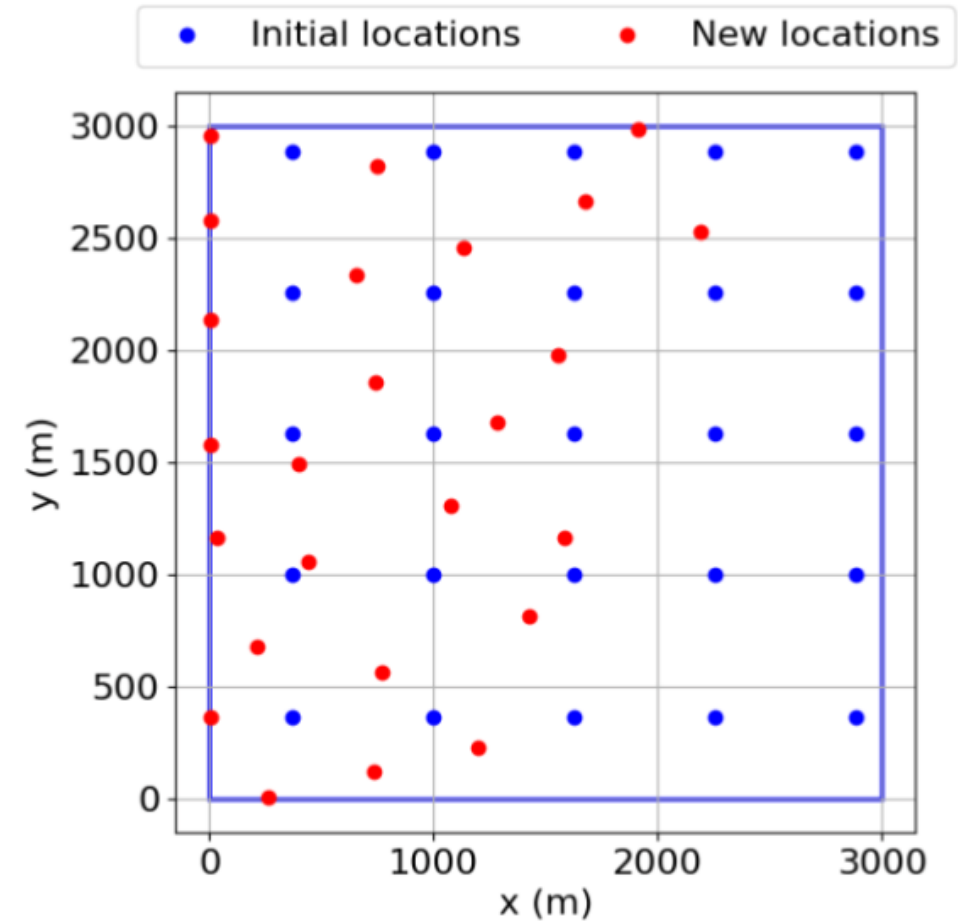
$AEP(X, Y)$

subject to

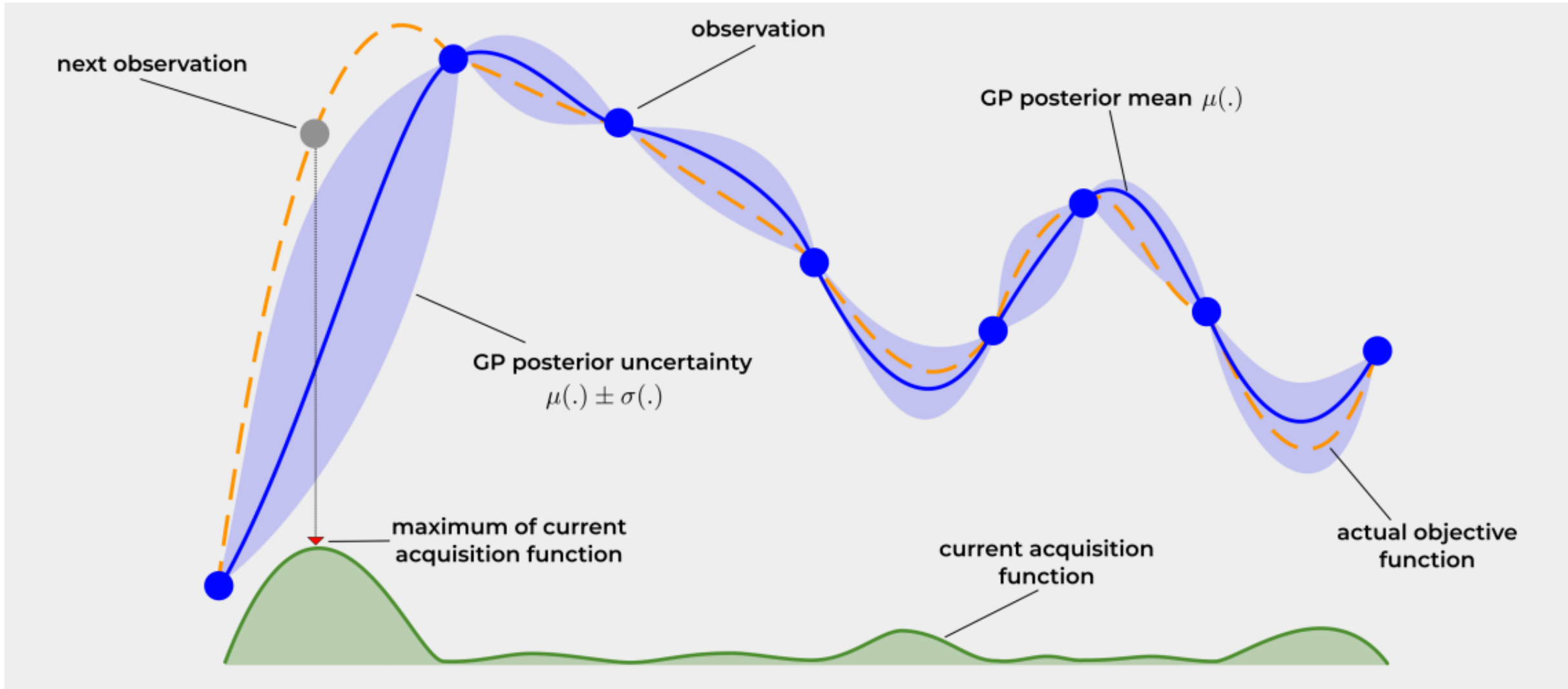
$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq d_{\min}, \quad \forall i \neq j$$

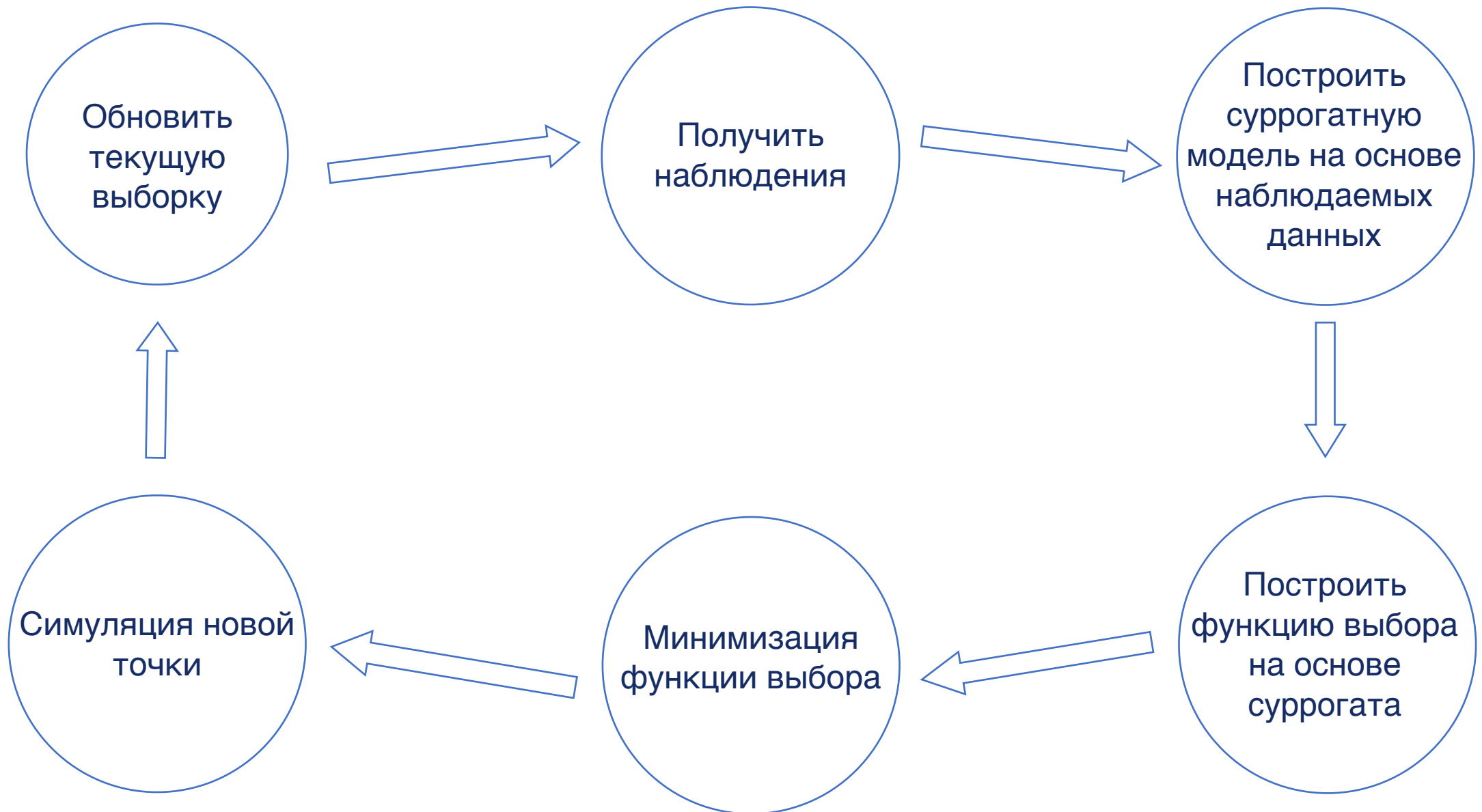
$$(x_i, y_i) \in \mathcal{R}, \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$AEP = 8760 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(X, Y, \theta) f_{ij}$$



Демонстрация работы оптимизации алгоритма поиска по сетке (GridSearch)







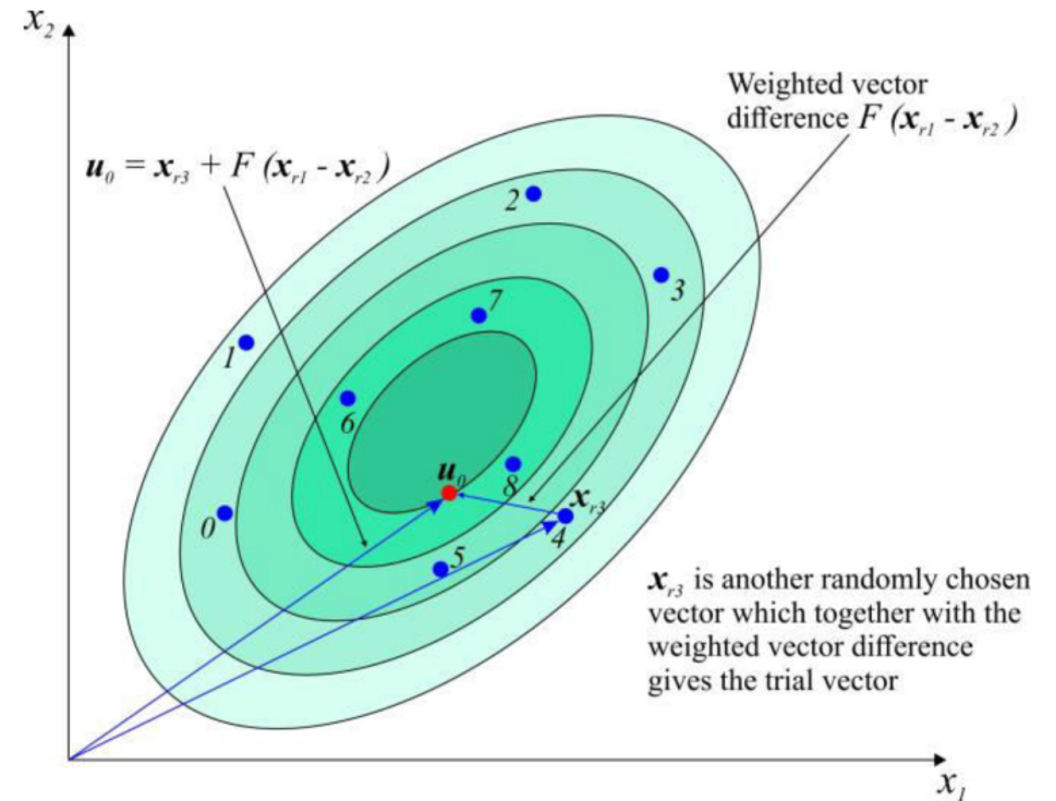
1. Инициализация: генерация популяции

2. Мутация (через DE1):

$$V_i = X_{r3} + F \cdot (X_{r1} - X_{r2})$$

3. Скрещивание: смешивание параметров мутантного вектора с оригинальным для увеличения разнообразия

4. Отбор: меняем родительский вектор на пробный, если у того лучше результаты



Пусть θ – конфигурация системы, и задача найти **оптимальную конфигурацию**, максимизирующую энергию фермы.

Целевая функция f вычисляется как черный ящик, а истинная вероятностная мера μ параметров среды x — неизвестна.

Для решения данной проблемы мы оцениваем наихудший сценарий на **множестве неопределенности** $\mathcal{P}$:

$$\sup_{\theta \in \Theta} \inf_{\mu \in \mathcal{P}} \mathbb{E}_{\mu}[f(\theta, x)]$$

- Классическая ВО использует дисперсию апостериорного распределения, что **плохо масштабируется** и **не учитывает неопределенность**, связанную с неизвестной розой ветров.
- Введем **метрику неопределенности**, учитывающая как плотность сэмплов, так и геометрию пространства L_2 :

$$\mathbb{W}(\mu, \nu) = \inf_{\pi \in \Pi(\mu, \nu)} \int |x - y|^2 d\pi(x, y)$$

- **Множество неопределенности** моделируется как **шар радиуса ε** с центром в апостериорном распределении, включающий все распределения, дистанция до которых не превышает заданную:

$$\mathcal{B}_\varepsilon(\nu) := \{\mu \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R}^d) : \mathbb{W}(\mu, \nu) \leq \varepsilon\}$$



Классический UCB

Идея: неопределенность воспринимается как **статистическая гладкость**.

$$\mathcal{R}(\theta) = \mu(\theta) + \kappa \cdot \sigma(\theta)$$

Принцип: полагается на дисперсию из Гауссовского процесса, ища **области**, где модель **не уверена** в своих предсказаниях.

Недостаток: **сложность** $\mathcal{O}(M^3)$, в следствие чего ожидаются проблемы с вычислениями при большим количеством ветряков

WU-GO

Идея: неопределенность воспринимается как **геометрическое расстояние**.

$$\mathcal{R}_{\mathbb{W}}(\theta) = \mu(\theta) - \kappa \cdot \sigma_{\mathbb{W}}(\theta)$$

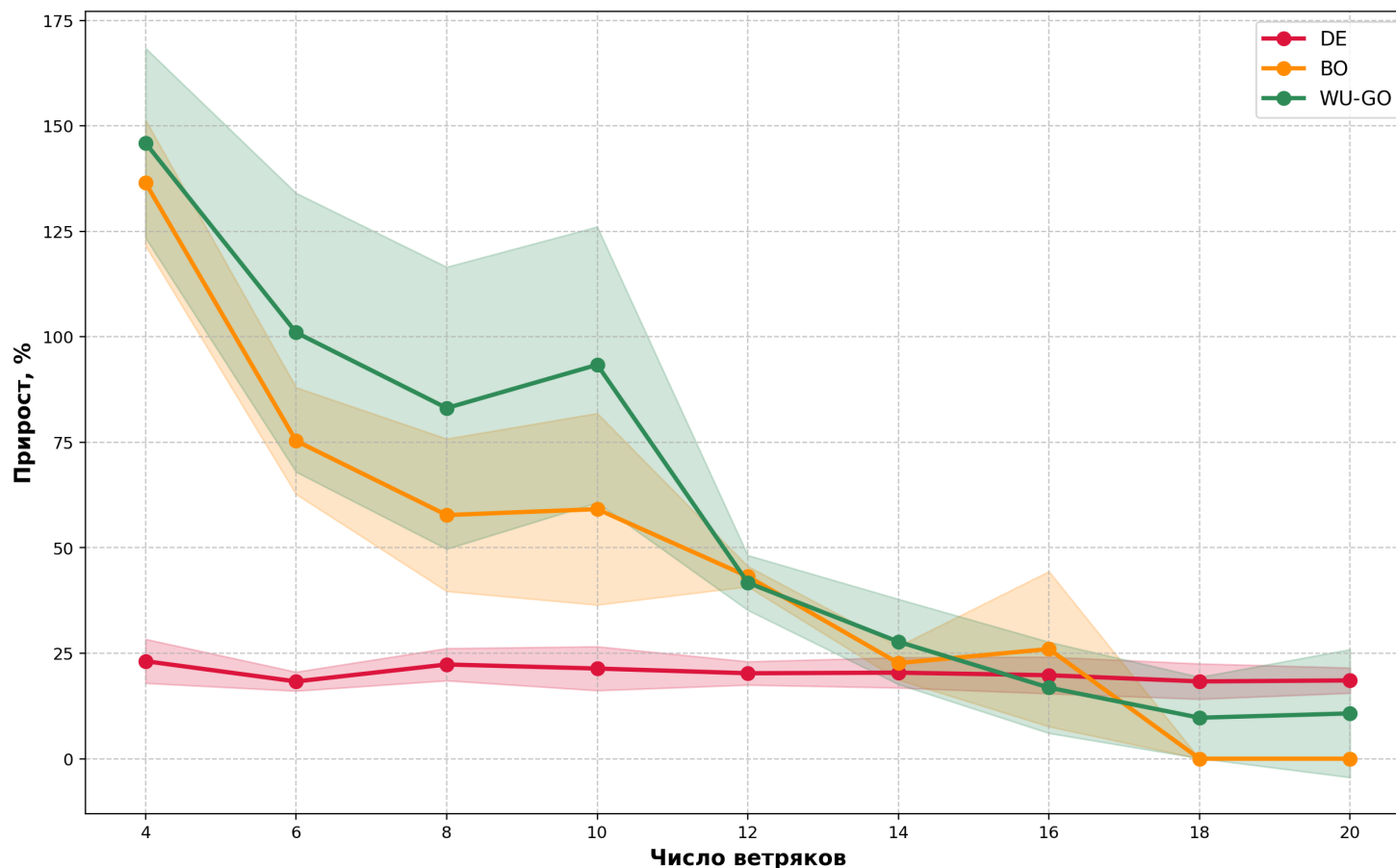
, где $\sigma_{\mathbb{W}}(\theta) = \inf_{\mu \in \mathcal{M}} \mathbb{W}(\mu, \nu)$.

Принцип: через расстояние Вассерштайна алгоритм ищет **худший сценарий на границе** шара неопределенности.

Преимущество: благодаря **нейросетевому суррогату** должен избегать проклятие размерностей и работать и при больших N



- **Превосходство WU-GO** на большей части эксперимента (особенно до 16).
- **Неспособность BO** оперировать на больших размерах (начиная с 16) – **нулевой прирост**.
- Умеренная **стабильность DE** на всей области определения (но **уступает WU-GO** на меньших N).

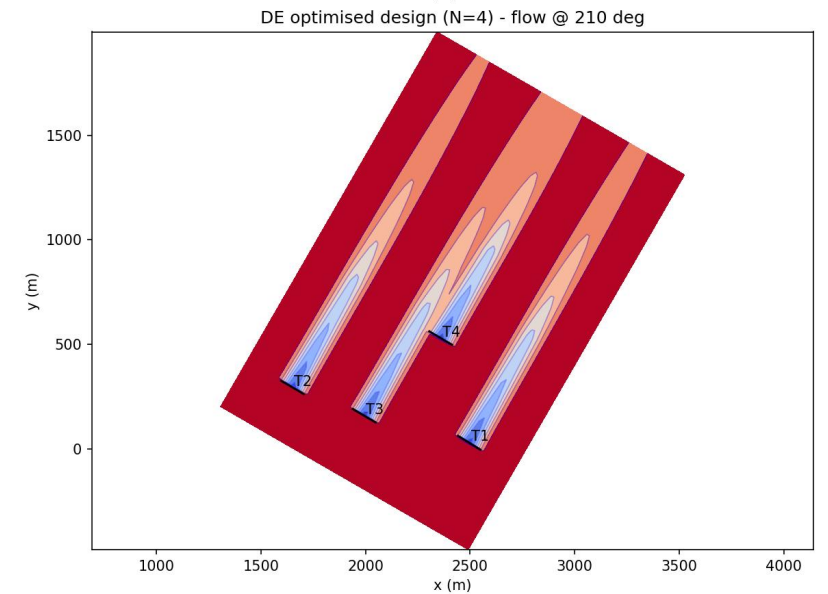
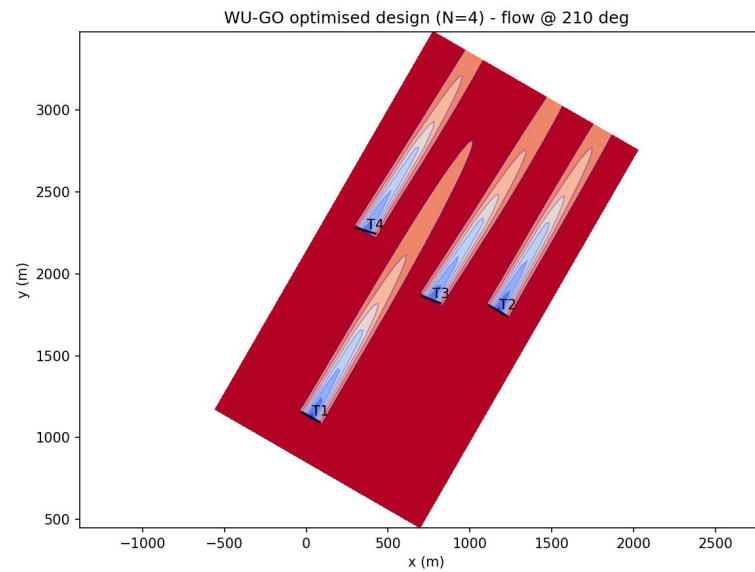
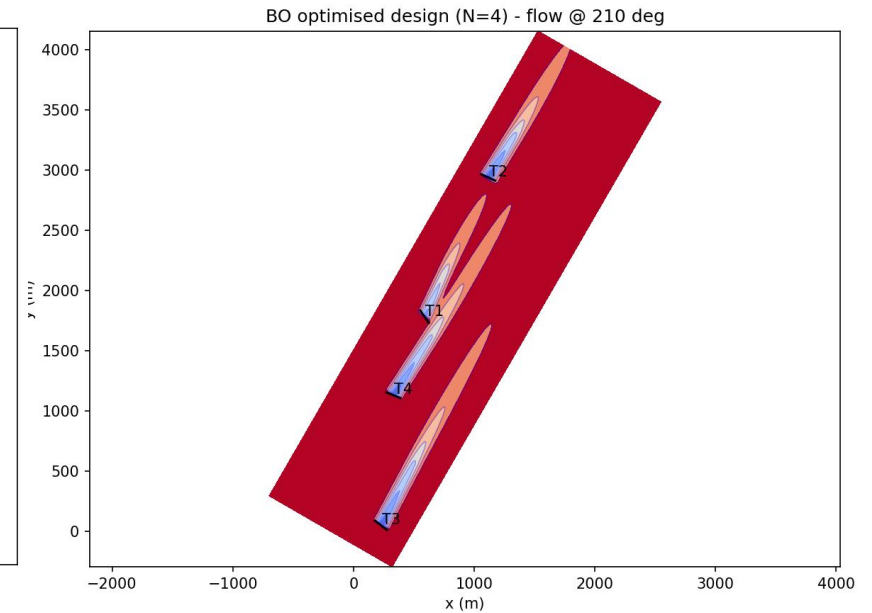
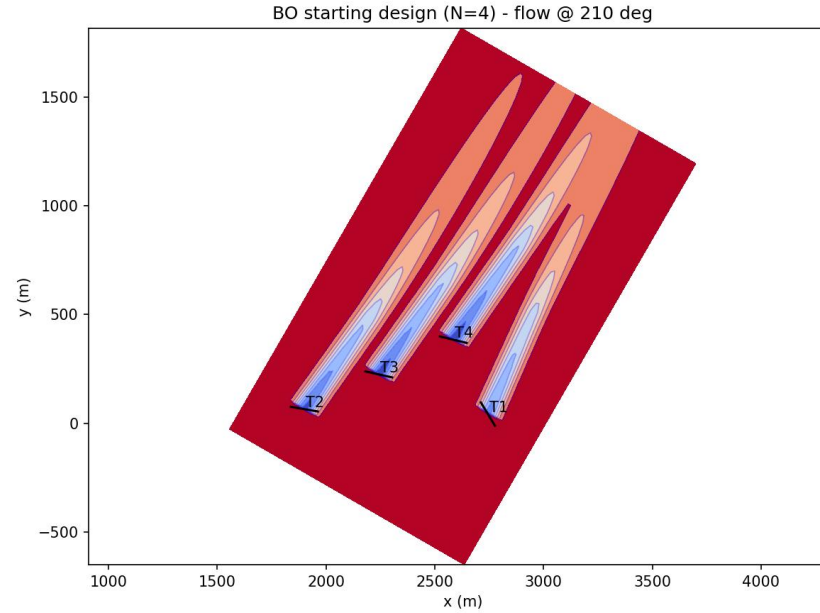
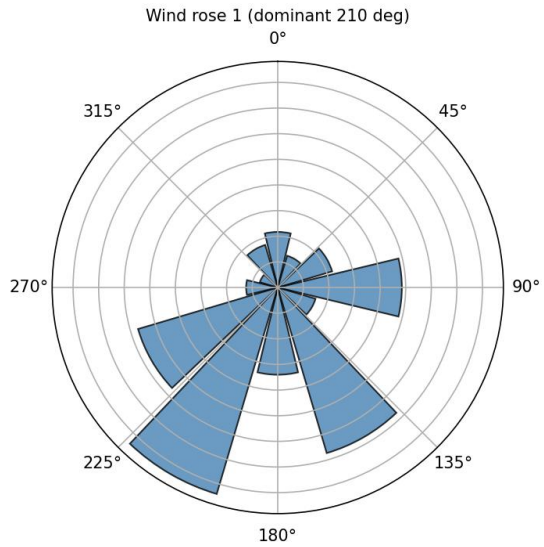


Так же важно упомянуть, что в нашем случае предпочтительнее использовать суррогатную оптимизацию, так как она более эффективная по выборке, чем дифференциальная эволюция.



Карта аэродинамического следа для $N = 4$

11



WU-GO: 159.21%

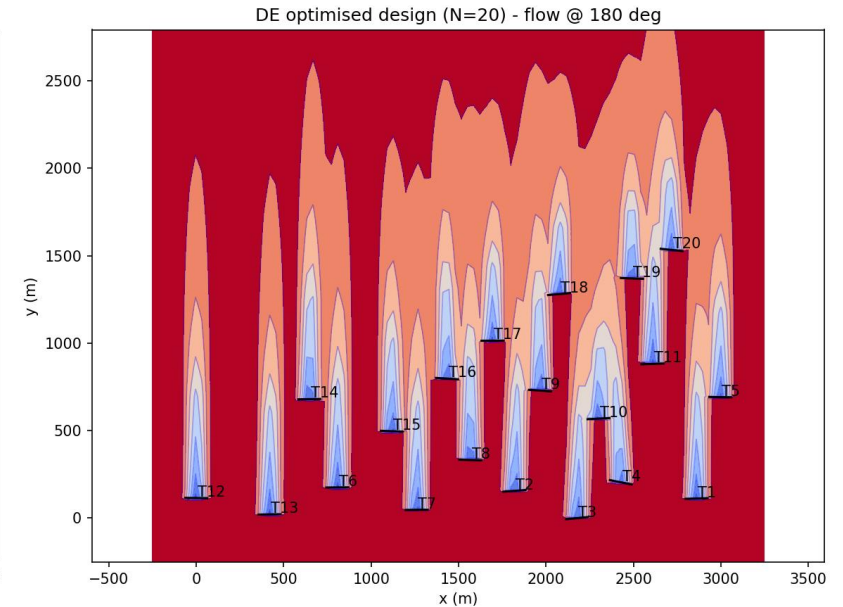
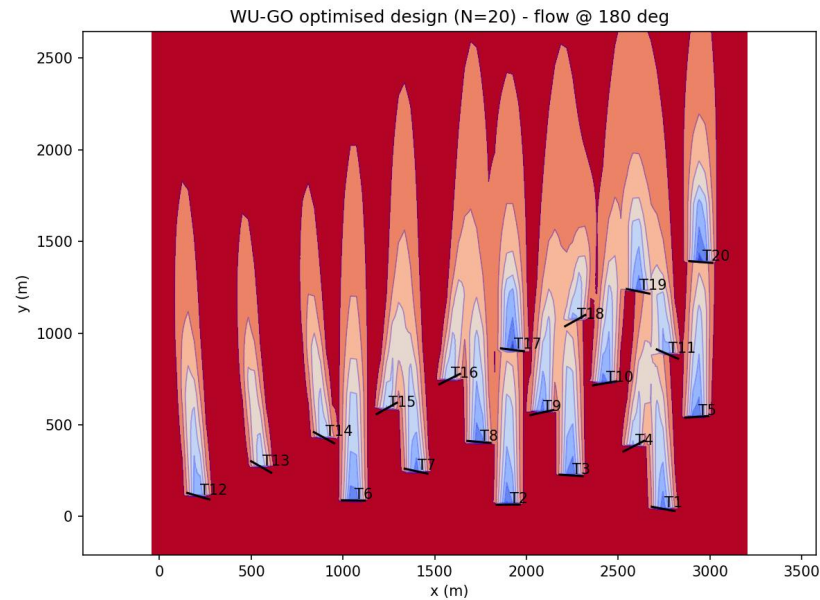
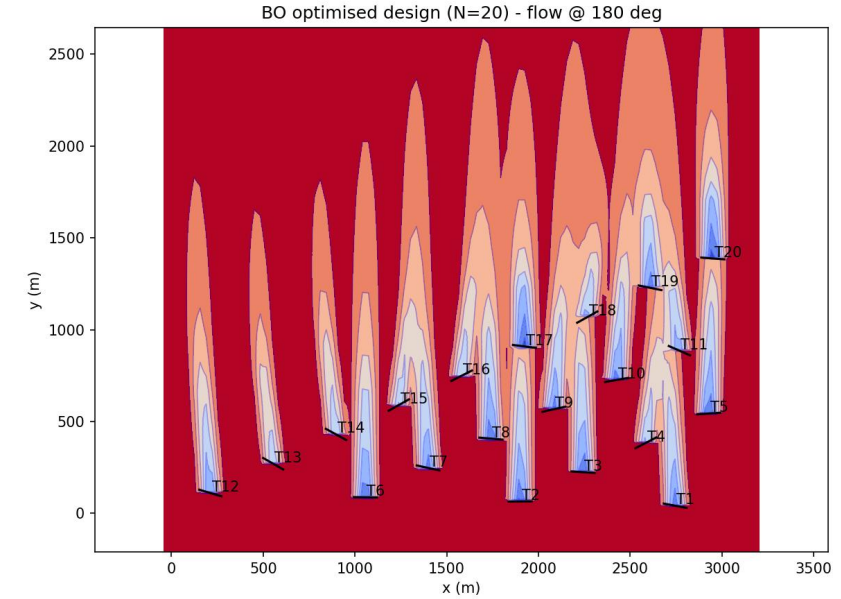
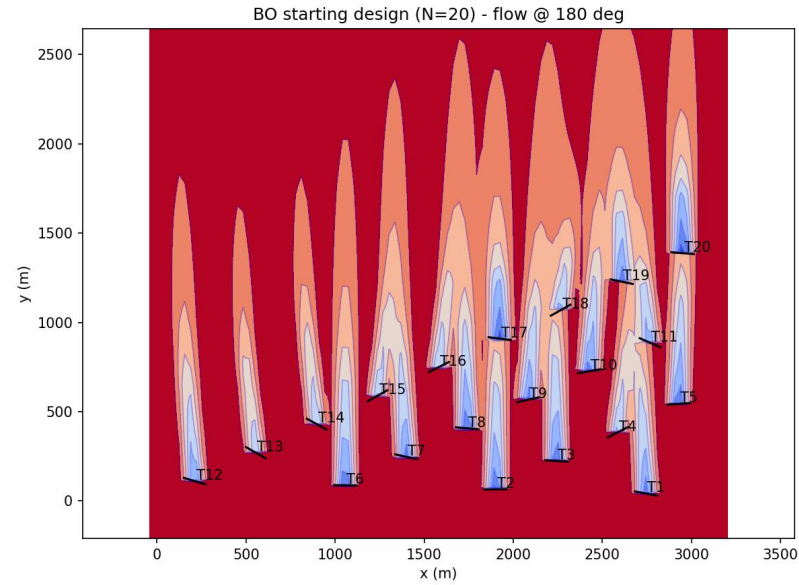
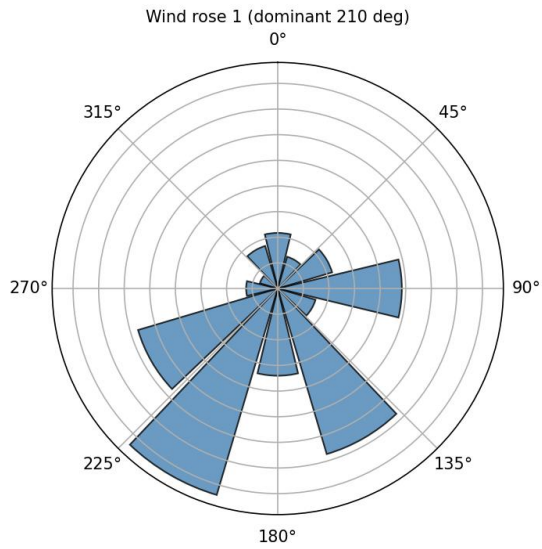
BO: 154.15%

DE: 29.39%



Карта аэродинамического следа для N = 20

12



WU-GO: 32.20%

BO: 0.00%

DE: 22.53%



- Мы рассмотрели задачу оптимизации расположения ветряных турбин в ветропарке через различные известные оптимизационные алгоритмы.
- Мы поставили эксперимент сравнения оптимизационных алгоритмов, измерив зависимость прироста АЕР по сравнению с базовым алгоритмом от количества турбин на поле.
- Мы увидели превосходство алгоритма WU-GO над остальными алгоритмами на большей части выборки.