



ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА  
"ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И  
ПРИОРИТЕТЫ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ" - 2022



# Разработка модели краткосрочного вероятностного прогнозирования интенсивности солнечного излучения

Докладчик: Нарынбаев Алишер Фархатович, аспирант НИУ «МЭИ», г. Москва  
Научный руководитель: Васьков Алексей Геннадьевич, к.т.н., доцент,  
НИУ «МЭИ», г. Москва

17.11.2022

# Введение

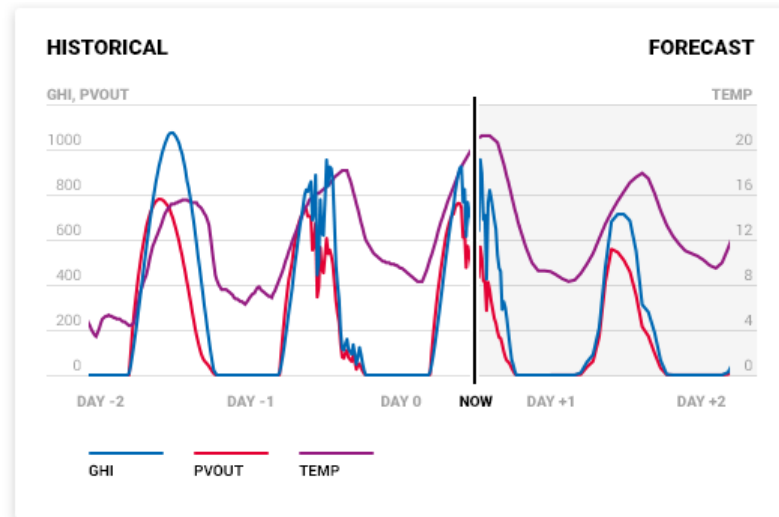


- На поверхности Земли ресурс солнечной энергии характеризуется сильной изменчивостью из-за вращения Земли и атмосферных явлений
- Мировые темпы роста солнечной энергетики выводят проблему прогнозирования ресурса солнечной энергии в ранг одной из наиболее важных



# Актуальность проблемы

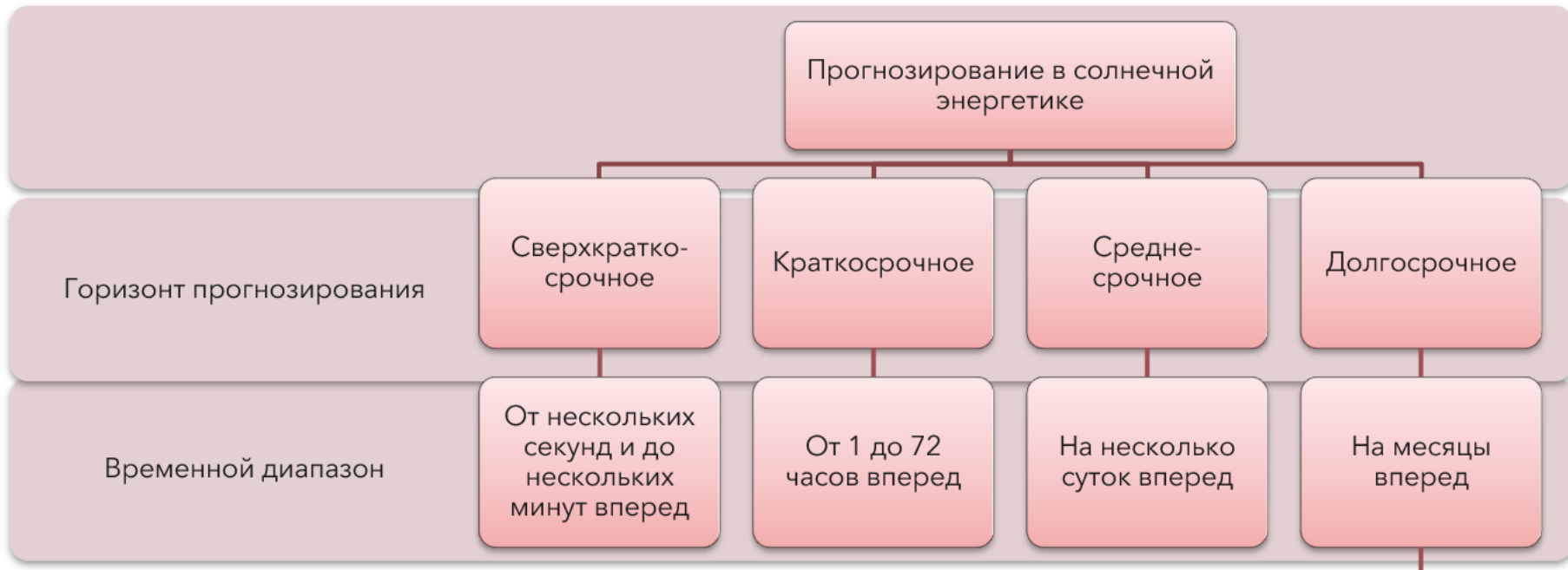
- Обеспечение возможности прогнозирования электроэнергии, производимой фотоэлектрическими системами, определено как одна из ключевых проблем массовой интеграции фотоэлектрических систем в объединенные энергосистемы<sup>[1]</sup>
- Прогнозирование выходной мощности крупных солнечных фотоэлектрических станций необходимо для эффективной и бесперебойной работы энергосистемы и для оптимального управления генерируемыми потоками энергии.
- В случае если отклонения между уровнями прогнозируемой и произведенной энергии превысят допустимый предел, на некоторых рынках электроэнергии поставщики электроэнергии могут столкнуться со штрафами<sup>[2]</sup>



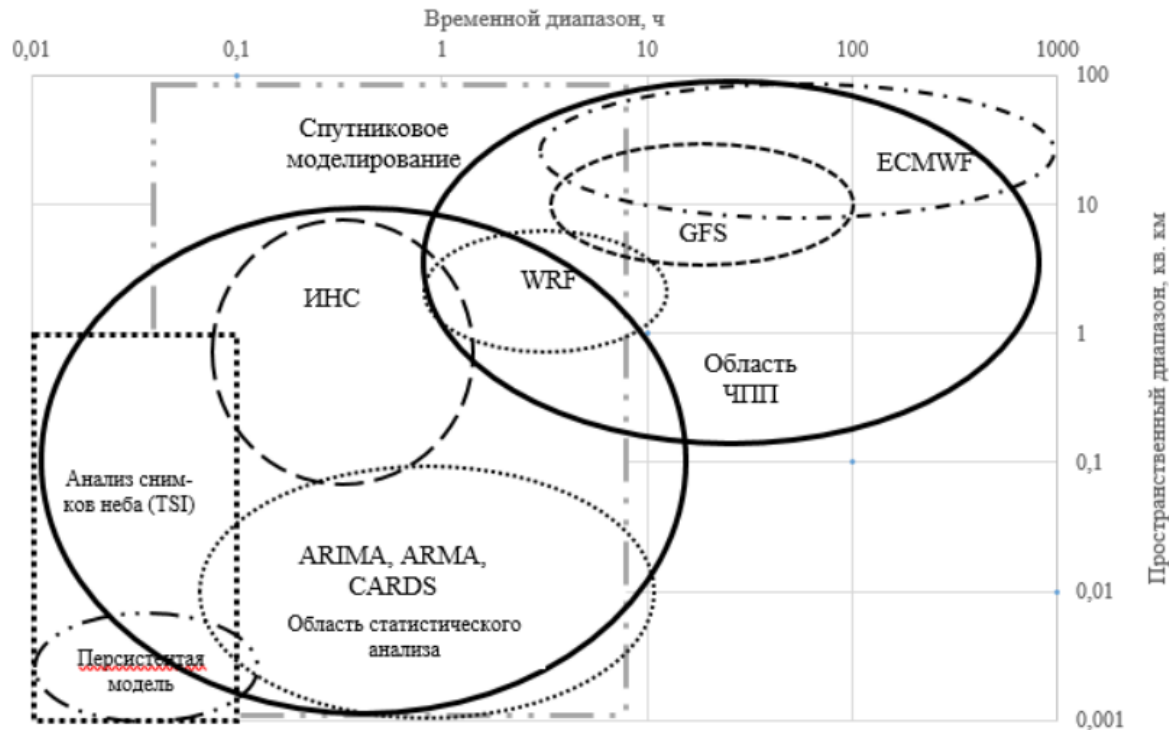
# Классификация методов прогнозирования в солнечной энергетике



# Горизонты прогнозирования



# Пространственно-временная диаграмма методов прогнозирования солнечной радиации



# Построение модели градиентного бустинга деревьев решений

Этапы создания модели градиентного бустинга в библиотеке Scikit-Learn

Сбор входных данных

Фильтрация выборки

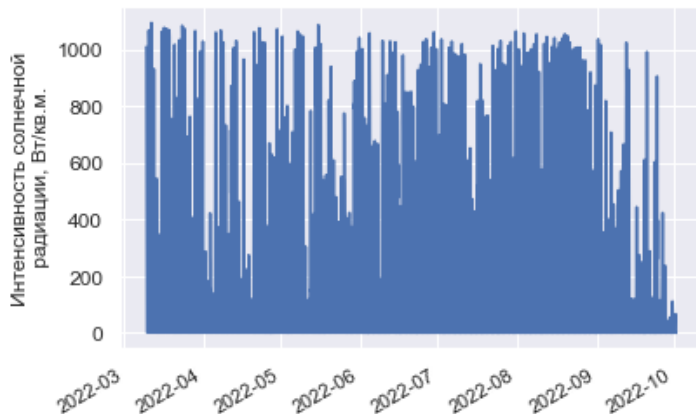
Выбор комбинации предикторов

Построение и обучение модели

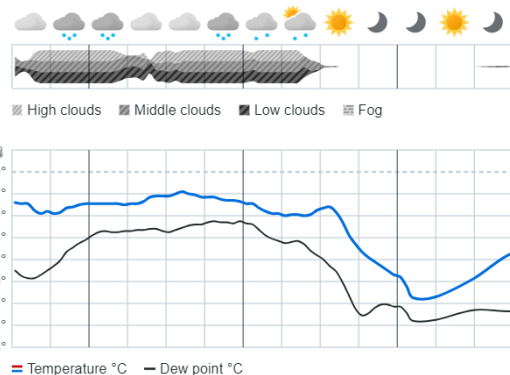
Оптимизация гиперпараметров

Тестирование

Архив наземных измерений интенсивности солнечной радиации на наклонной поверхности, г. Новочебоксарск, РФ



Архив прогнозов погоды для г. Новочебоксарск с сервиса Yr.no<sup>5</sup>



- Рассматривалось построение ансамблевых моделей градиентного бустинга (GB) для квантилей  $\tau$  интервала  $[0,2 \dots 0,8]$  с шагом 0,1 и дополнительно для  $\tau=0,05$  и  $\tau=0,95$ .
- Геометрическим признаком, учитывающим перепады в количестве приходящей СР, связанные с вращением Земли, был выбран зенитный угол Солнца

[5]- Сайт «Yr.no» - <https://yr.no>

# Построение модели градиентного бустинга. Выбор предикторов



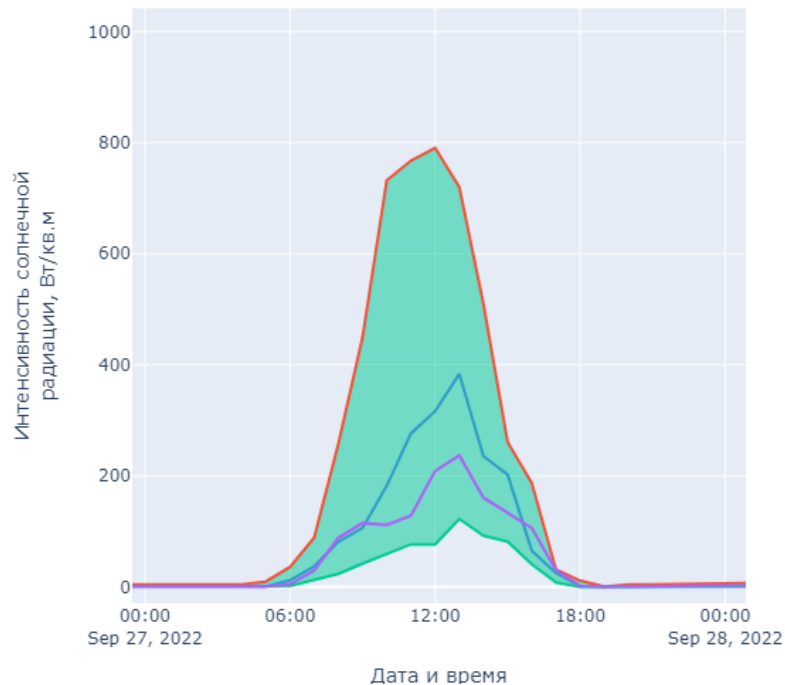
	Зенитный угол Солнца	Атм. давление	Температура воздуха	Общая облачность	Облачность в верхнем слое	Облачность в среднем слое	Облачность в нижнем слое	Температура точки росы	Относительная влажность	Скорость ветра	Направление ветра	Интенсивность солнечной радиации
Зенитный угол Солнца	1.000000	0.076889	-0.420170	-0.053885	0.033915	-0.032070	-0.006743	-0.233088	0.555128	-0.145057	-0.052689	-0.762747
Атм. давление	0.076889	1.000000	-0.100386	-0.361994	-0.283731	-0.303602	-0.279692	-0.220886	-0.213031	-0.307412	-0.204463	0.144143
Температура воздуха	-0.420170	-0.100386	1.000000	-0.124876	-0.009054	-0.173396	-0.304465	0.913060	-0.529066	-0.208570	-0.005662	0.285031
Общая облачность	-0.053885	-0.361994	-0.124876	1.000000	0.713360	0.653002	0.524011	-0.060841	0.184356	0.207387	0.038211	-0.131137
Облачность в верхнем слое	0.033915	-0.283731	-0.009054	0.713360	1.000000	0.353950	0.159667	0.068803	0.176109	0.108224	-0.098950	-0.131721
Облачность в среднем слое	-0.032070	-0.303602	-0.173396	0.653002	0.353950	1.000000	0.422140	-0.141001	0.140539	0.274105	0.055582	-0.133022
Облачность в нижнем слое	-0.006743	-0.279692	-0.304465	0.524011	0.159667	0.422140	1.000000	-0.213063	0.314644	0.306696	0.057774	-0.144979
Температура точки росы	-0.233088	-0.220886	0.913060	-0.060841	0.068803	-0.141001	-0.213063	1.000000	-0.144963	-0.253726	-0.023070	0.050458
Относительная влажность	0.555128	-0.213031	-0.529066	0.184356	0.176109	0.140539	0.314644	-0.144963	1.000000	-0.028747	-0.048796	-0.590818
Скорость ветра	-0.145057	-0.307412	-0.208570	0.207387	0.108224	0.274105	0.306696	-0.253726	-0.028747	1.000000	0.128802	0.082483
Направление ветра	-0.052689	-0.204463	-0.005662	0.038211	-0.098950	0.055582	0.057774	-0.023070	-0.048796	0.128802	1.000000	0.008198
Интенсивность солнечной радиации	-0.762747	0.144143	0.285031	-0.131137	-0.131721	-0.133022	-0.144979	0.050458	-0.590818	0.082483	0.008198	1.000000

Корреляционная матрица из выборки данных метеопрогнозов на 37 часов вперед,  
совмещенных с измеренными значениями интенсивности солнечной радиации

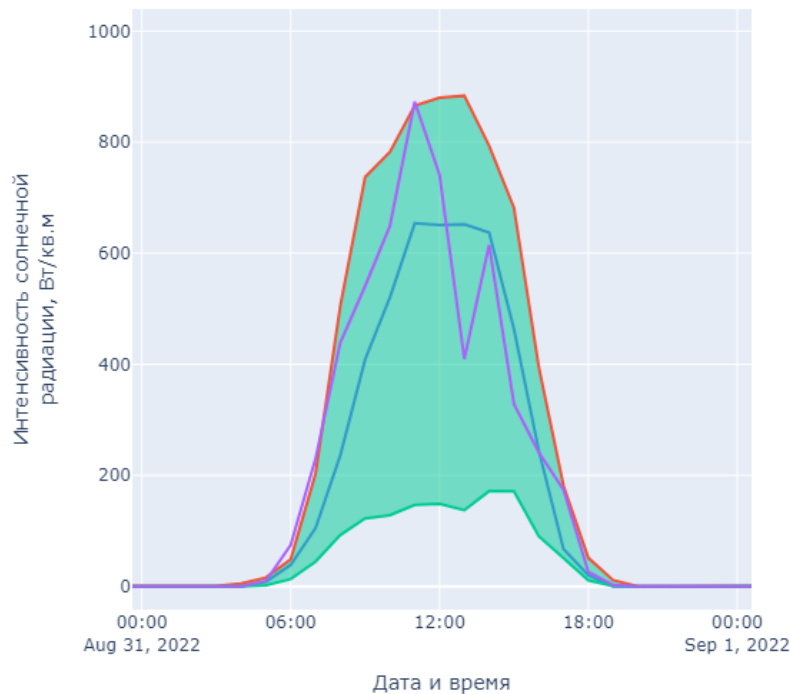


# Примеры вероятностных прогнозов по построенной модели

— Фактические данные    90% интервал  
— 95-й процентиль    — 50-й процентиль



— Фактические данные    90% интервал  
— 95-й процентиль    — 50-й процентиль



# Полученные результаты

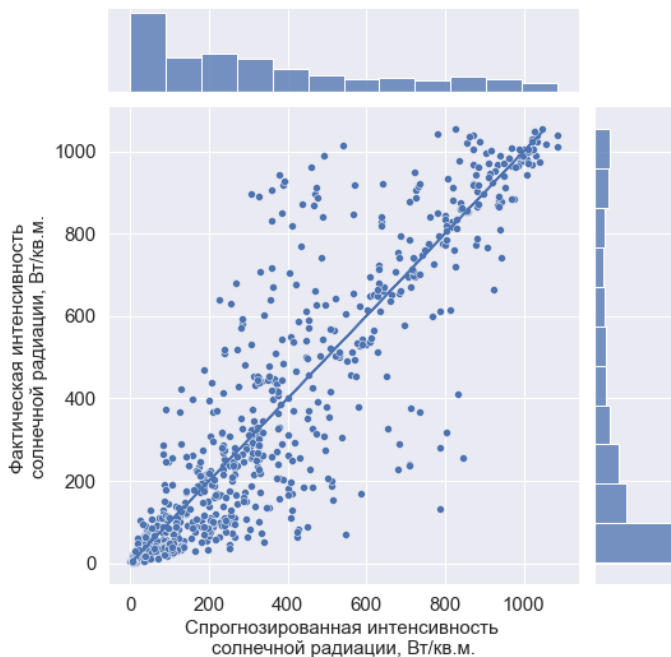
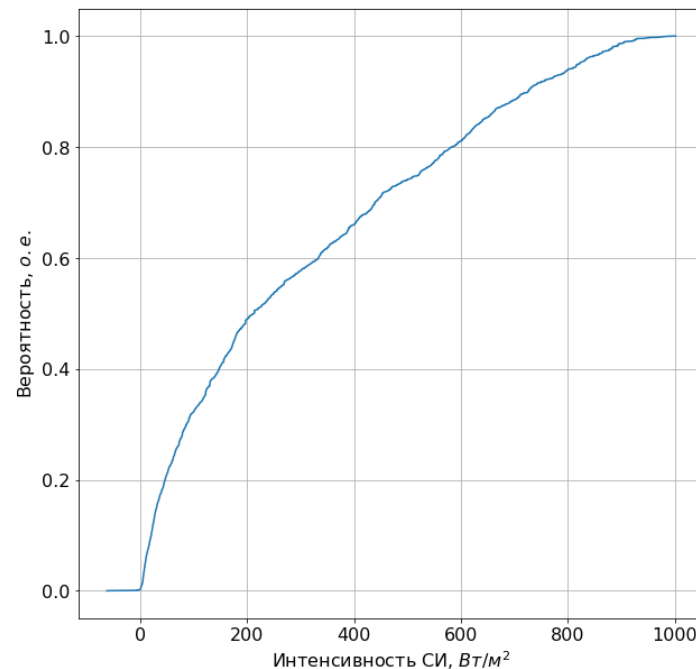


Диаграмма рассеяния фактических значений интенсивности СИ и спрогнозированных с использованием медианной модели (50-й процентиль) из построенного ансамбля



Интегральная функция распределения вероятностей спрогнозированных значений интенсивности СИ по тестовой выборке

# Полученные результаты



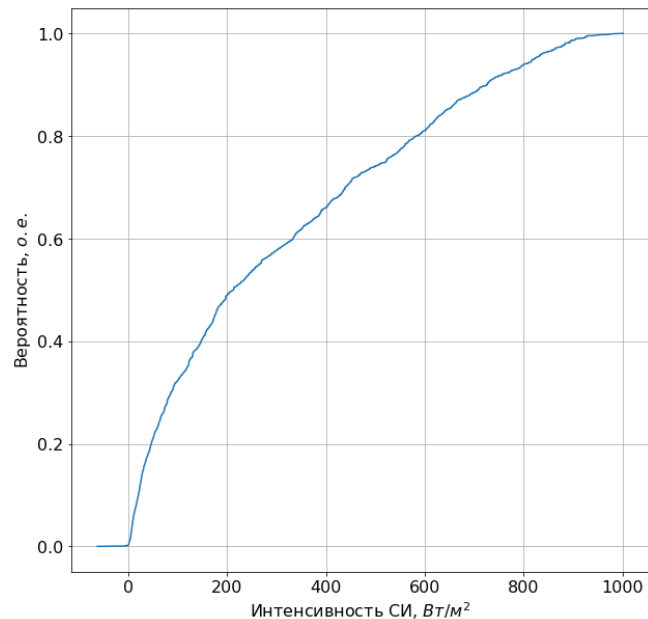
Используемые метрики для оценки степени ошибочности прогнозов:

$$CRPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_{-\infty}^{+\infty} \left( [\hat{P}_{прогн}(I_{прогн}) - P_{факт}(I_{факт})]^2 \right) dI,$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |I_t - I_t|, \quad nMAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{I_t - I_t}{I_{max} - I_{min}} \right|.$$

Таблица 1. Значения метрик оценки качества прогнозов.

Модель	CPRS, Вт/м <sup>2</sup>	nCPRS, %	nMAE, %
GB	179	15	-
Наивная инерционная модель	-	-	23



Интегральная функция распределения вероятностей спрогнозированных значений интенсивности СИ по тестовой выборке

# Выводы



- Построена статистическая модель для осуществления непараметрического вероятностного прогнозирования интенсивности солнечного излучения на сутки вперед (с учетом времени фиксирования входных метеоданных горизонт прогнозирования составляет 37 часов) с часовым разрешением на основе данных численного прогноза погоды.
- Построение модели осуществлено при помощи метода градиентного бустинга над деревьями решений для задачи квантильной регрессии.
- Несмотря на то, что накопленный к моменту проведения исследования массив данных для обучения модели небольшой (менее 1 года), сравнение с базовыми инерционными прогнозами оказалось в пользу результатов разработанной модели, что говорит о ее применимости для решения задачи прогнозирования при последующих усовершенствованиях.



**Спасибо за внимание!**