

**МЭИ**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

СЕТЕВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ РККТУ



# КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Докладчик: Нарынбаев Алишер, НИУ МЭИ, каф. ГВИЭ,  
студент магистратуры, гр. ИГ-02м-18

Руководитель: к.т.н., доц. Васьков Алексей Геннадьевич,  
НИУ МЭИ, каф. ГВИЭ

# ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель исследования: построение математической модели краткосрочного прогнозирования солнечной радиации

Задачи исследования:

- Изучение и классификация методов прогнозирования солнечной радиации
- Выбор оптимальной методики построения математической модели

# ВВЕДЕНИЕ

- Солнце является неисчерпаемым источником энергии. Превращение лучистой энергии Солнца (солнечной радиации) в тепловую и химическую энергию обеспечивает возможность существования жизни на Земле
- 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 ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

- Обеспечение возможности точного прогнозирования энергии, производимой фотоэлектрическими системами, определено как одна из ключевых проблем массовой интеграции фотоэлектрических систем<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 производители могут столкнуться со штрафами<sup>[2]</sup>



<sup>[1]</sup> "Solar Photovoltaics on the Road to Large-scale GRID Integration," September 2012. [http://www.pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/other\\_publications/263.pdf](http://www.pvtrin.eu/assets/media/PDF/Publications/other_publications/263.pdf)

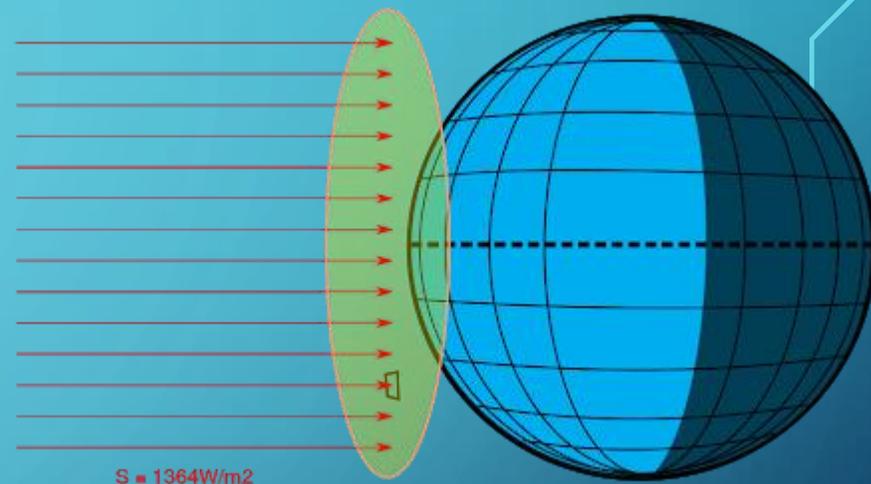
<sup>[2]</sup> D. Jacobs, Renewable Energy Policy Convergence in the EU: The Evolution of Feed-In Tariffs in Germany, Spain and France. Ashgate, Farnham., 2012.

# ГОРИЗОНТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ



# КОМПОНЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Солнечная постоянная  $I_0$  - интегральный поток солнечного излучения, проходящий через единичную площадку, перпендикулярную направлению лучей, за пределами земной атмосферы и на среднем расстоянии от Солнца (1 а.е.). Принимается равной  $1367 \text{ Вт/м}^2$ <sup>[1]</sup>.

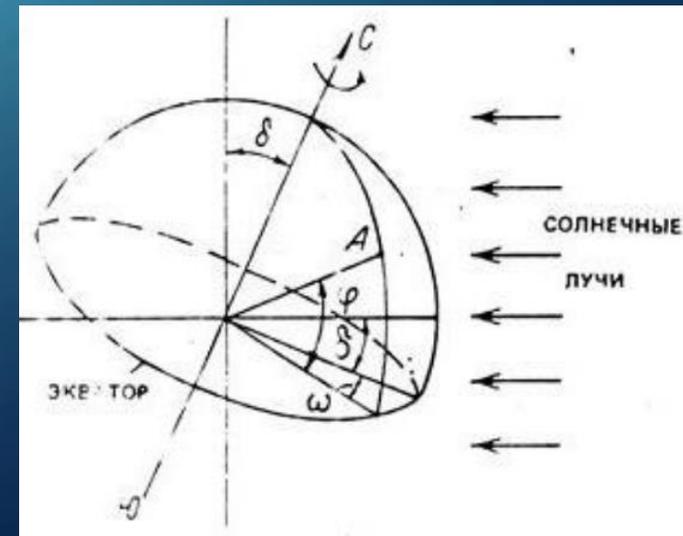


- Формула расчета величины суточной суммы заатмосферной солнечной радиации, приходящая на горизонтальную площадку на заданной широте  $\phi$ :

$$H_0 = I_0 \cdot \frac{24}{\pi} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left( \frac{\pi \omega_3}{180} \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_3 \right)$$

$\omega_3$  - часовой угол захода Солнца;  $\delta$  - угол склонения Солнца;

$n$  – порядковый номер дня в году



<sup>[1]</sup> "Макарова Е.А., Харитонов А.В., Распределение энергии в спектре Солнца и солнечная постоянная, М., 1972

# КОМПОНЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

- Суммарная солнечная радиация на горизонтальной приемной площадке представляется в виде суммы составляющих:

$$H = H_b + H_d$$

$H_d$  - диффузная (рассеянная) солнечная радиация;

$H_b$  - прямая солнечная радиация.

- Суммарная солнечная радиация на наклонной приемной площадке может быть представлена в виде следующей суммы составляющих:

$$H_{\beta} = H_b \cdot R_b + H_d \cdot \cos^2 \frac{\beta}{2} + H \cdot \rho_r \cdot \sin^2 \frac{\beta}{2} = H \cdot R$$

$H_{b\beta}, H_{d\beta}, H_{r\beta}$  - соответственно прямая, диффузная и отраженная составляющие СР на наклонной приемной площадке;  $\beta$  - угол наклона приемной площадки к горизонту, град.;  $\rho_r$  - альбедо земной поверхности;  $R$  – коэффициент пересчета СР с горизонтальной приемной площадки на наклонную.



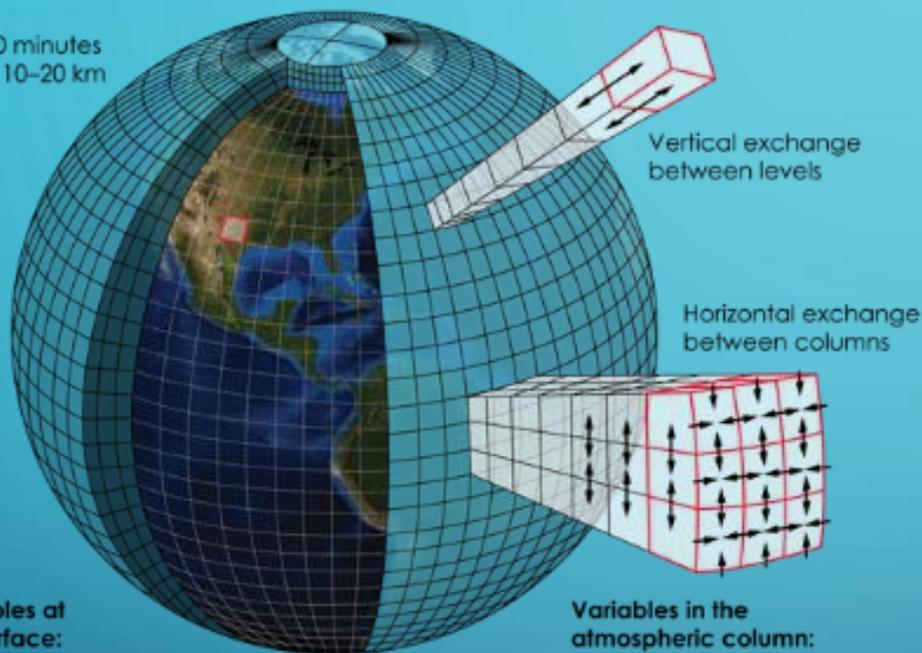
# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ



# ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

## Weather forecast modeling

Timestep 5–10 minutes  
Grid spacing 10–20 km



### Variables at the surface:

Temperature  
Humidity  
Pressure  
Moisture fluxes  
Heat fluxes  
Radiation fluxes

### Variables in the atmospheric column:

Wind vectors  
Humidity  
Clouds  
Temperature  
Height  
Precipitation  
Aerosols

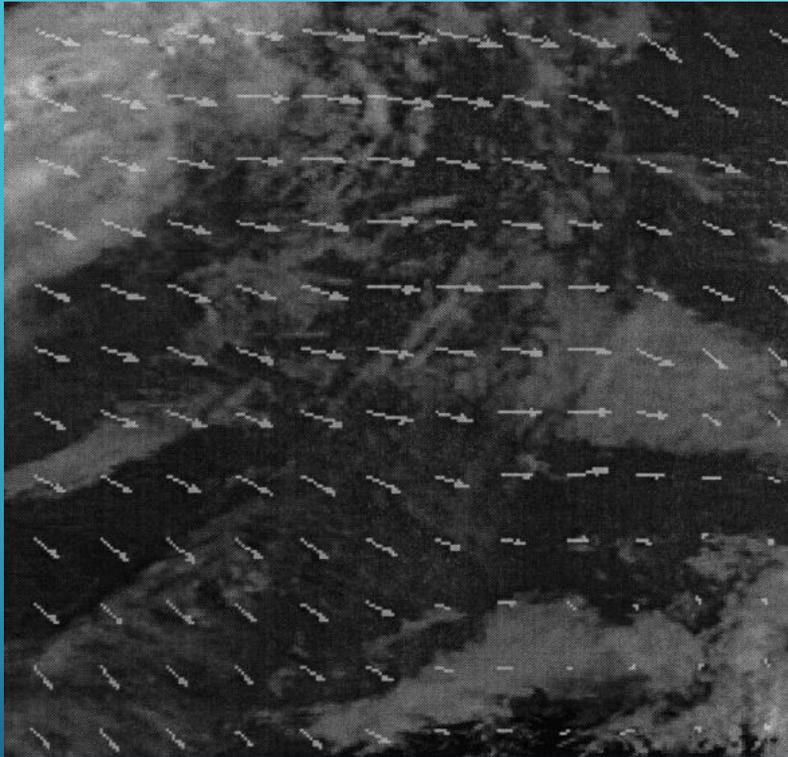
## Глобальные модели:

- Модель ECMWF - European Centre for Medium Range Weather Forecasts (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, (Великобритания))
- Модель GFS – Global Forecasting System (система численного прогнозирования погоды Национальной метеорологической службы США)

Погрешность прогнозирования 18÷40%

Численное прогнозирование погоды (ЧПП)

# ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

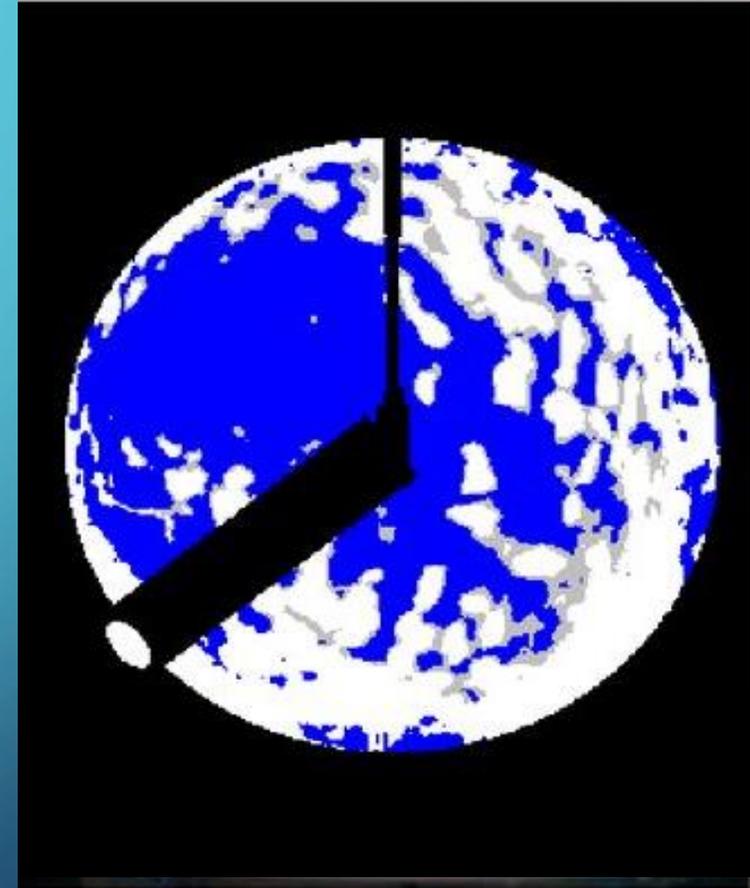


Спутниковый снимок с  
рассчитанными векторами  
движения облаков.

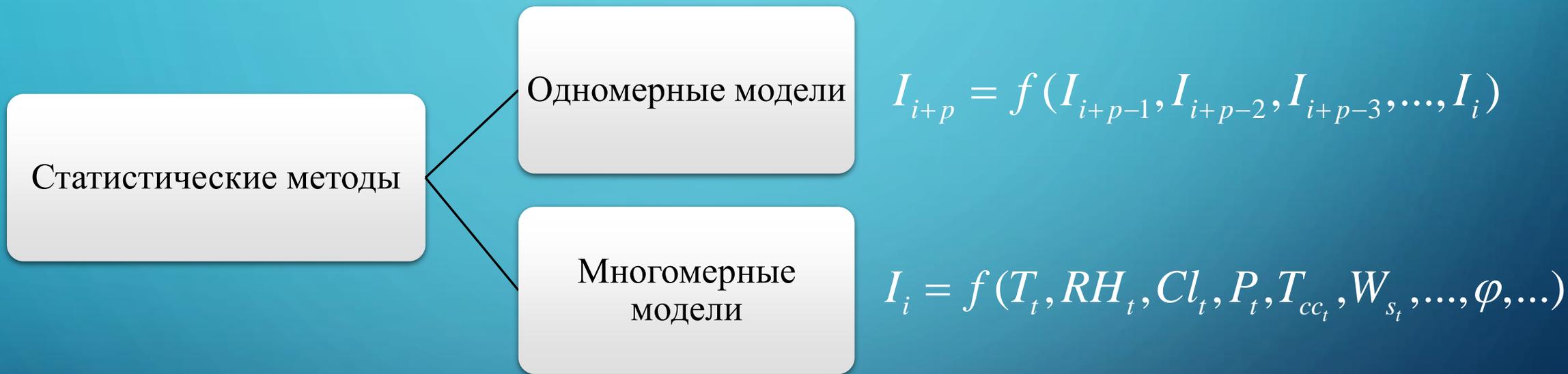
Погрешность прогнозирования  
около 20%



TSI (Total Sky Imager – устройство для  
получения полноразмерных снимков неба).  
Погрешность прогнозирования около 30%

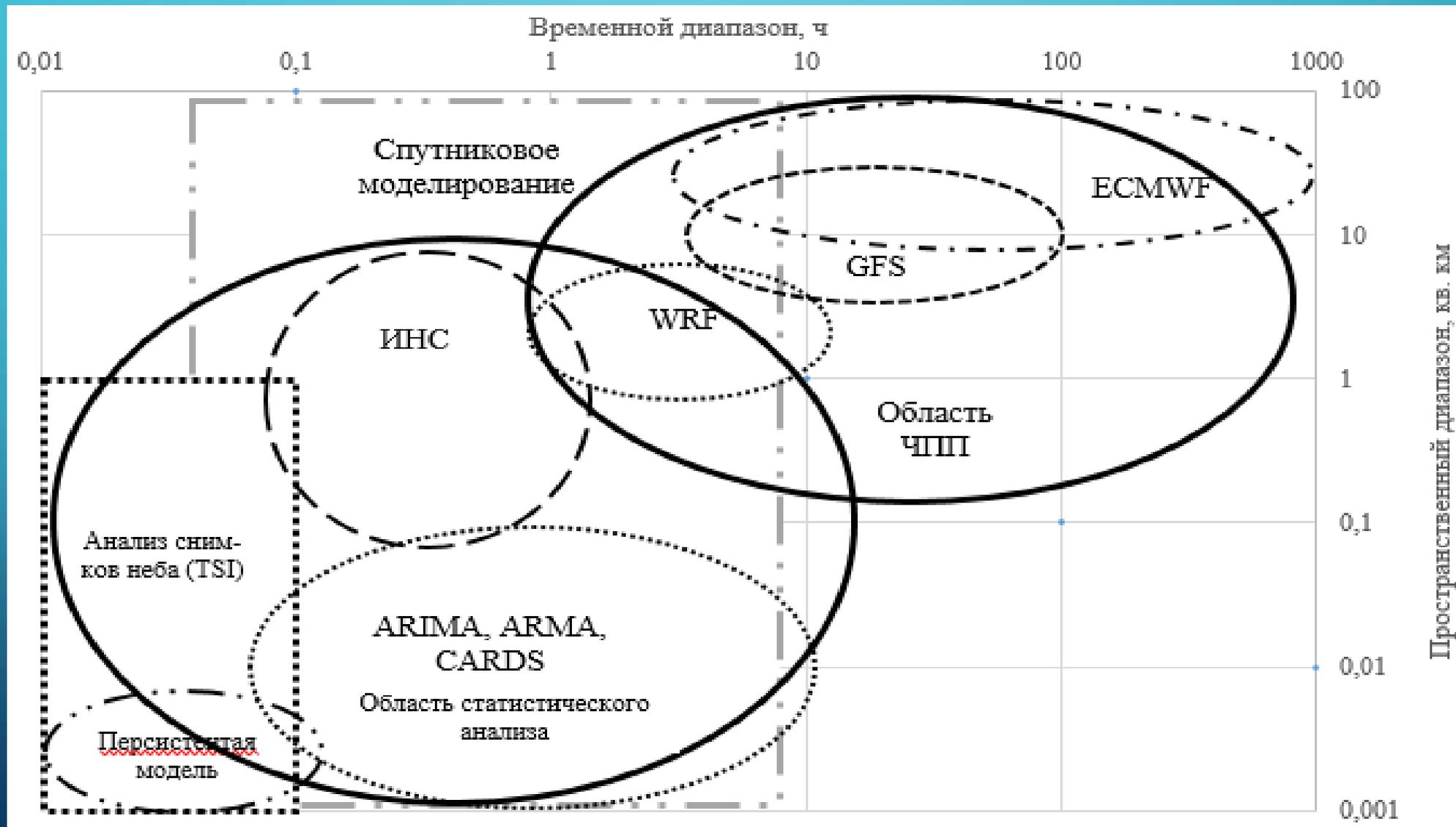


# СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

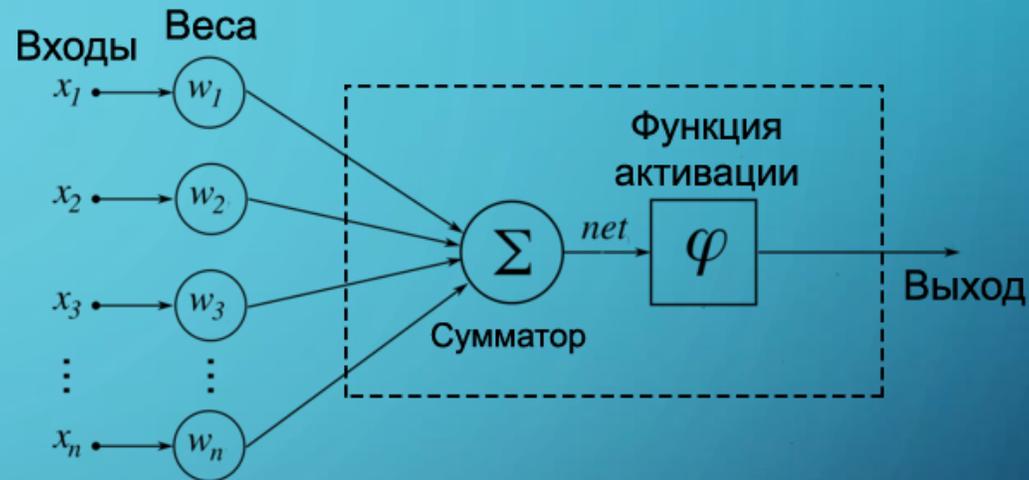
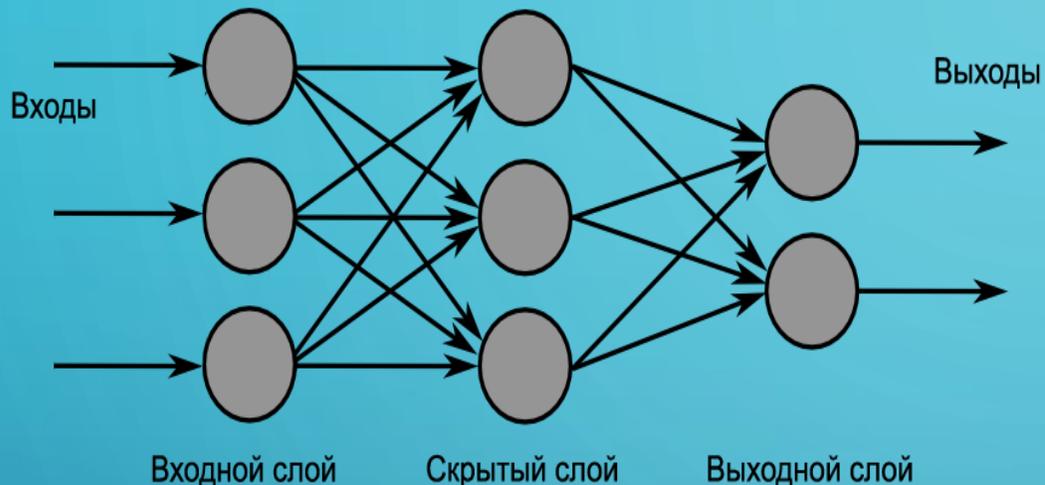


$I$  – интенсивность солнечной радиации;  $T$  – температура воздуха;  $RH$  – относительная влажность;  $Cl$  – уровень облачности;  $P$  – атмосферное давление;  $T_{cc}$  – длительность солнечного сияния;  $W_s$  – скорость ветра;  $\varphi$  – широта местности.

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИАГРАММА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ



# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ



Модель нейрона

Многослойный перцептрон – общий случай искусственной нейронной сети прямого распространения.

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad \varphi(x) = \tanh(x)$$
$$f(x) = \max(0, x)$$

Функции активации

$$y_i = \varphi_i \left( \sum_{j=1}^n w_{i,j} \cdot x_{i,j} - \theta_i \right)$$

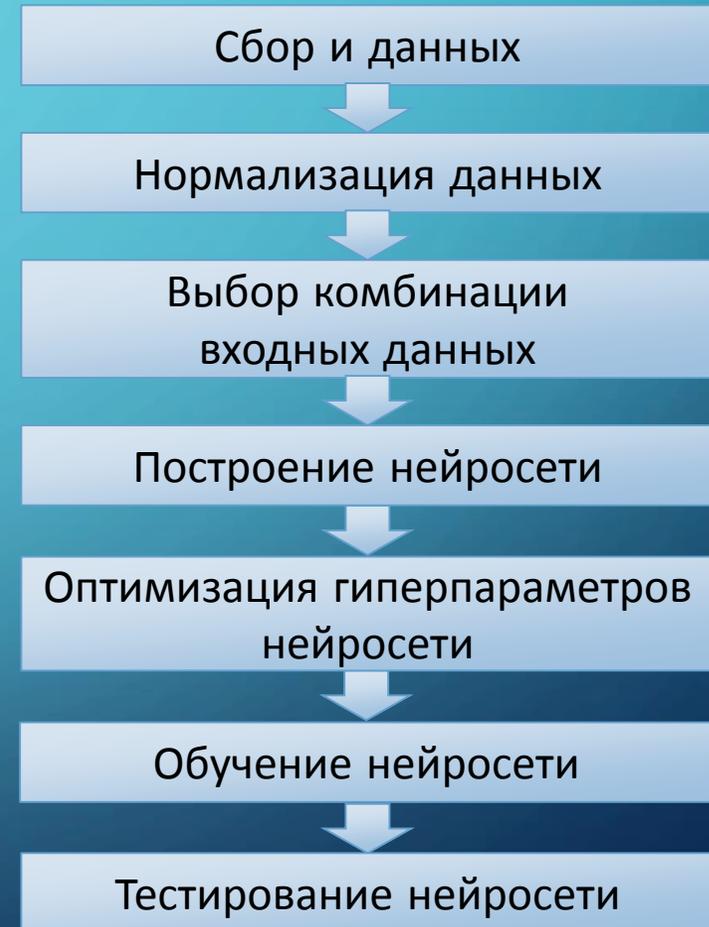
Результат на выходе нейрона

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Общий алгоритм построения нейросетевой прогнозирующей модели:



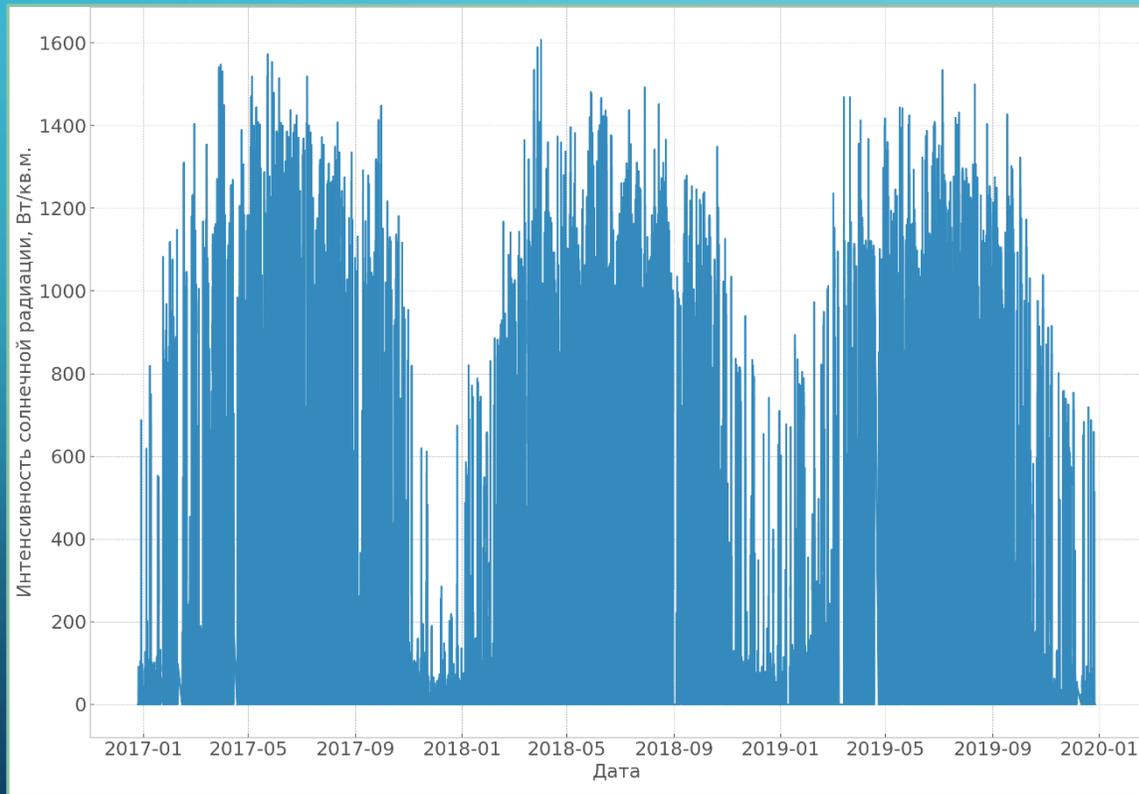
Этапы создания нейросетевой модели в библиотеке Scikit-learn



# ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Исходные данные для модели №1:

Архив наземных измерений интенсивности СР на наклонной площадке с 2017 по 2019 гг., г. Новочебоксарск, РФ



Архив погоды на ближайшей метеостанции (9 км от станции мониторинга СР) с сайта «Расписание погоды»

## Параметры

Температура воздуха (на высоте 2 м), °C

Атмосферное давление на уровне станции (мм.рт.ст)

Относительная влажность (на высоте 2 м), %

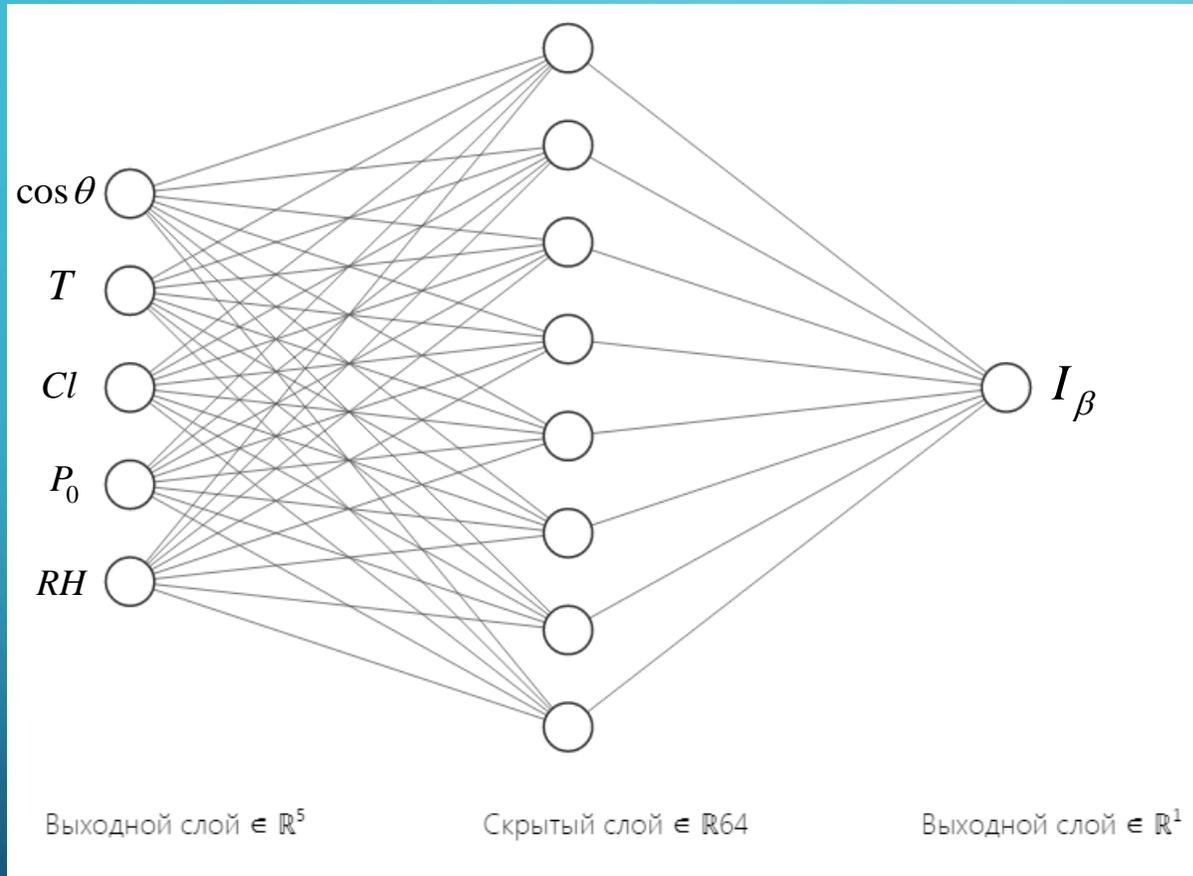
Общая облачность, %

Скорость ветра на высоте 10-12 м, м/с

Направление ветра на высоте 10-12 м (румбы)

$$I_i = f(T_t, RH_t, Cl_t, P_t, W_{s_t}, W_{d_t}, \dots, \varphi, \theta \dots)$$

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №1



Оптимальная архитектура (5-64-1) нейросетевой модели прогнозирования №1

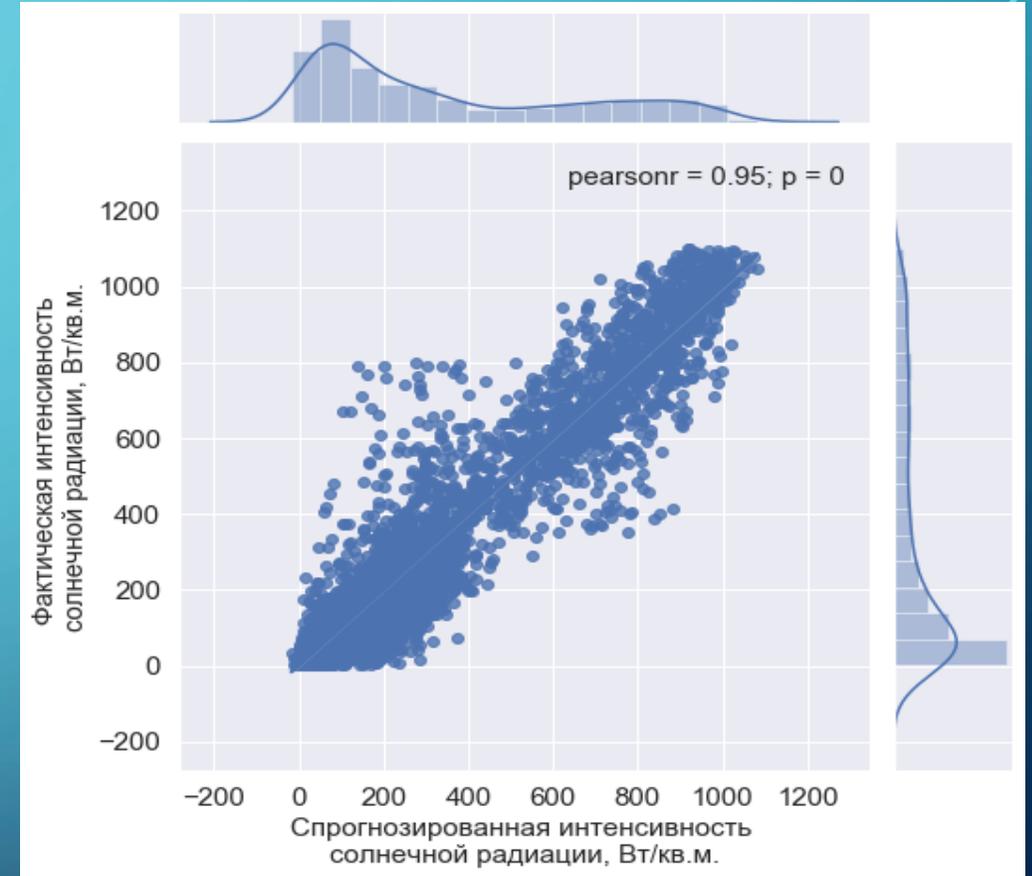
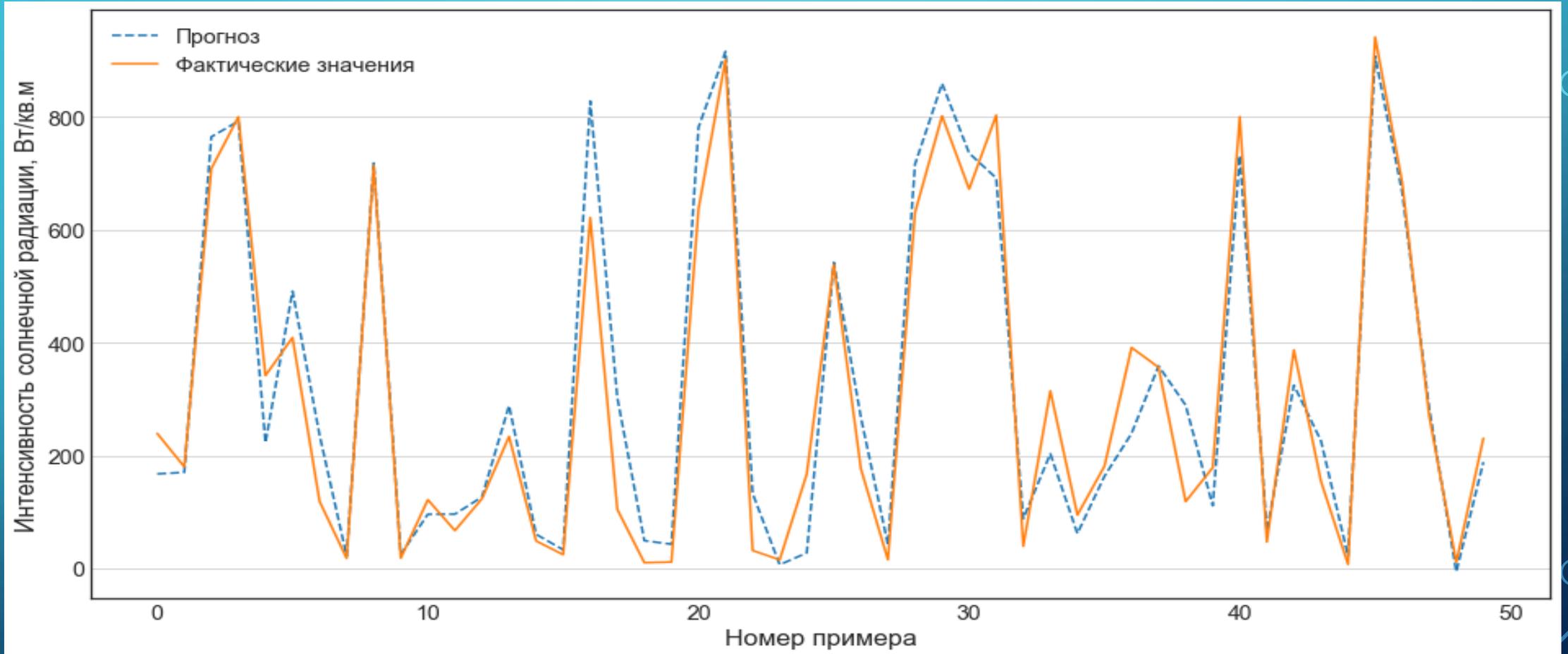


Диаграмма рассеивания фактических и спрогнозированных величин интенсивности СР

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №1



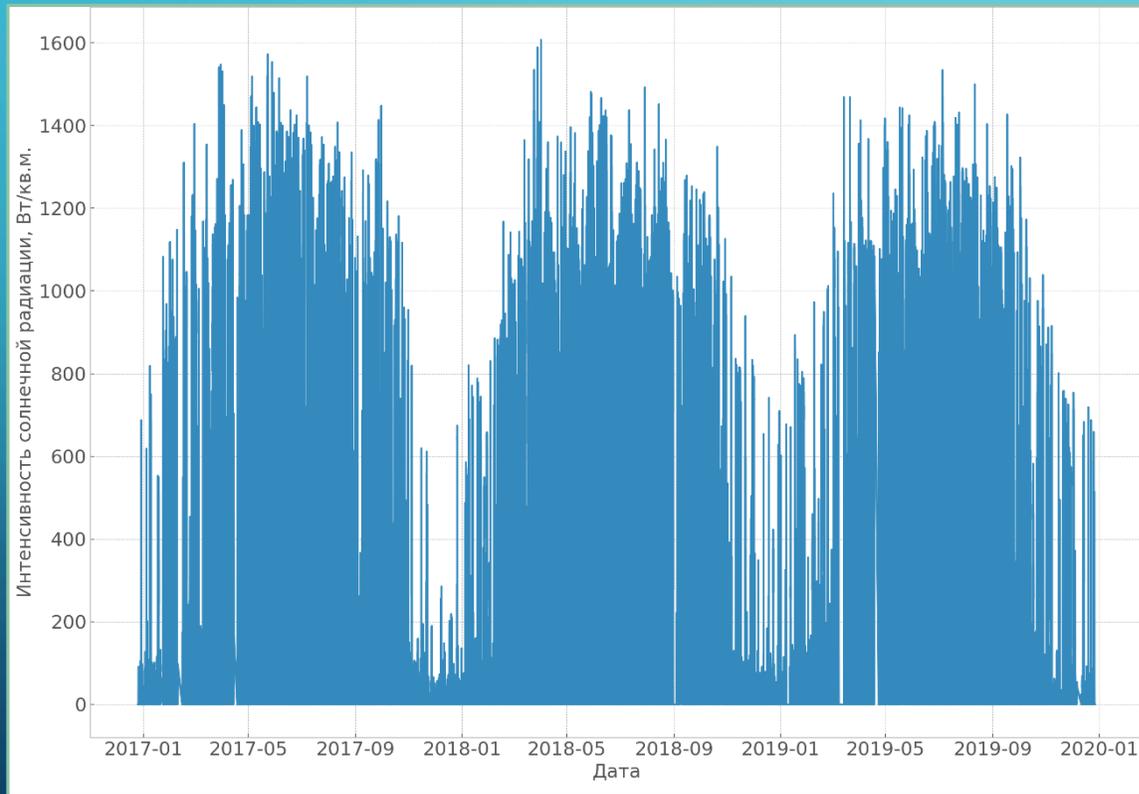
Фактические и спрогнозированные величины интенсивности СР на наклонной площадке

MAE = 71 Вт/м²; nRMSE = 30%

# ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Исходные данные для модели №2:

Архив наземных измерений интенсивности СР на наклонной площадке с 2017 по 2019 г., г. Новочебоксарск, РФ



Архив спутниковых метеоданных с сервиса Solcast за период с 2017 по 2019 г. для г. Новочебоксарск

Параметры

Температура воздуха, °С

Атмосферное давление (мм.рт.ст)

Относительная влажность, %

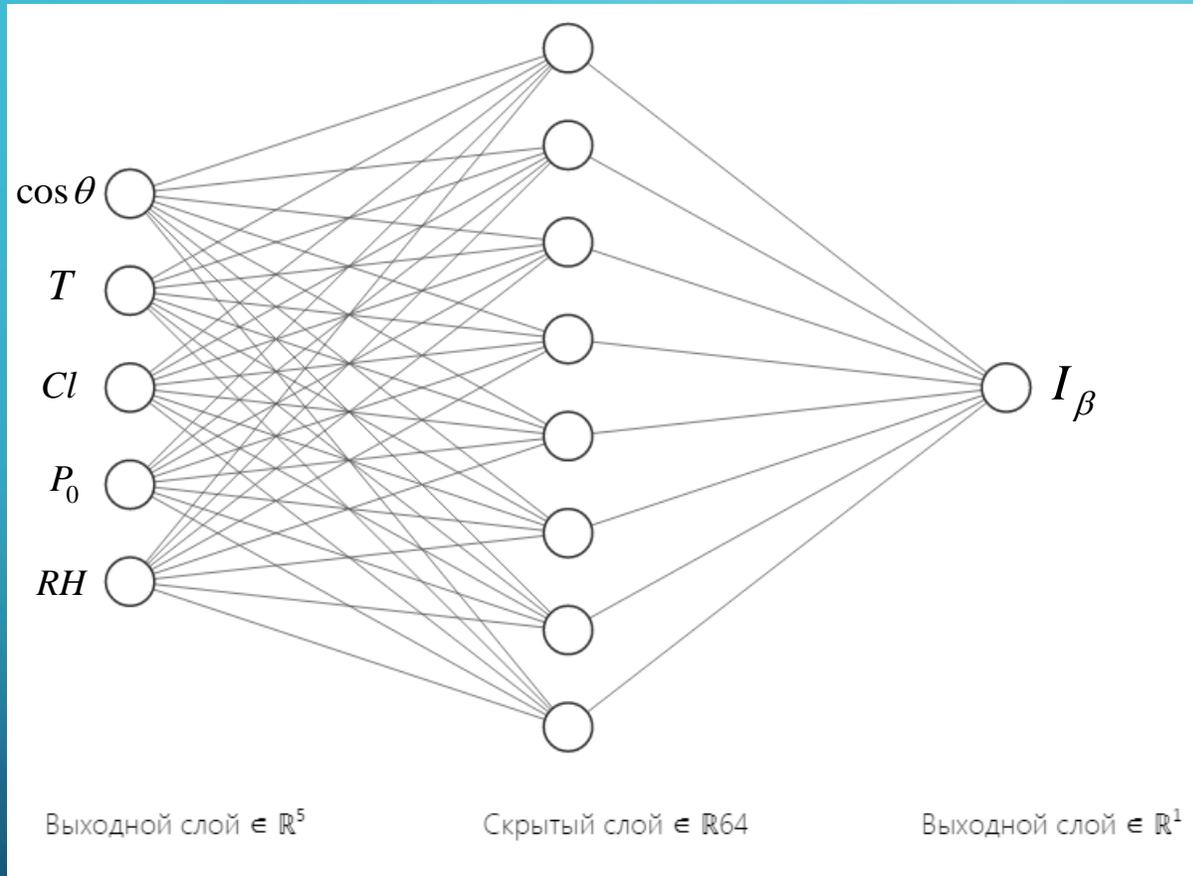
Плотность облачности, %

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с

Направление ветра на высоте 10 м (град.)

$$I_i = f(T_t, RH_t, Cl_t, P_t, W_{s_t}, W_{d_t}, \dots, \varphi, \theta \dots)$$

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №2



Оптимальная архитектура (5-64-1) нейросетевой модели прогнозирования №2

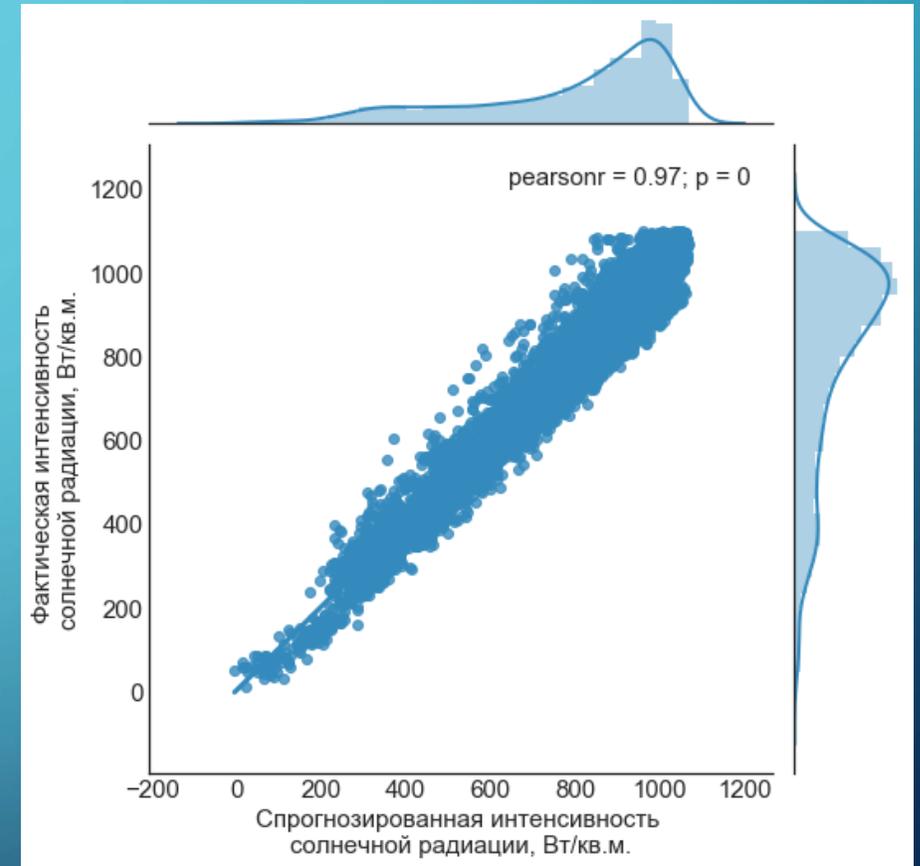


Диаграмма рассеивания фактических и спрогнозированных величин интенсивности СР

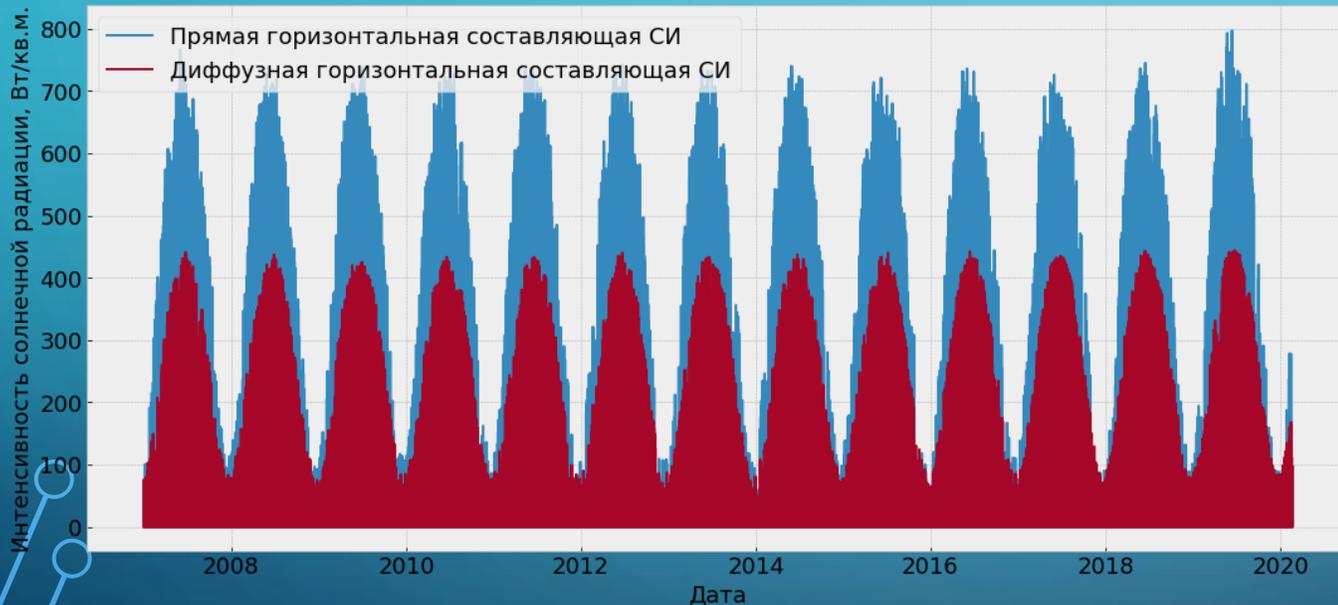
В ясные дни  $0,81 \text{ Вт/м}^2$ ,  $0,45 \text{ Вт/м}^2$ ,  $\text{RMSE} = 20,8\%$ ,  $\text{RMSE} = 7,2\%$

# ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

## Исходные данные для модели №3:

Архив результатов спутникового моделирования составляющих СР на горизонтальной площадке с 2007 по 2019 г. по данным Solcast для г. Новочебоксарск, РФ

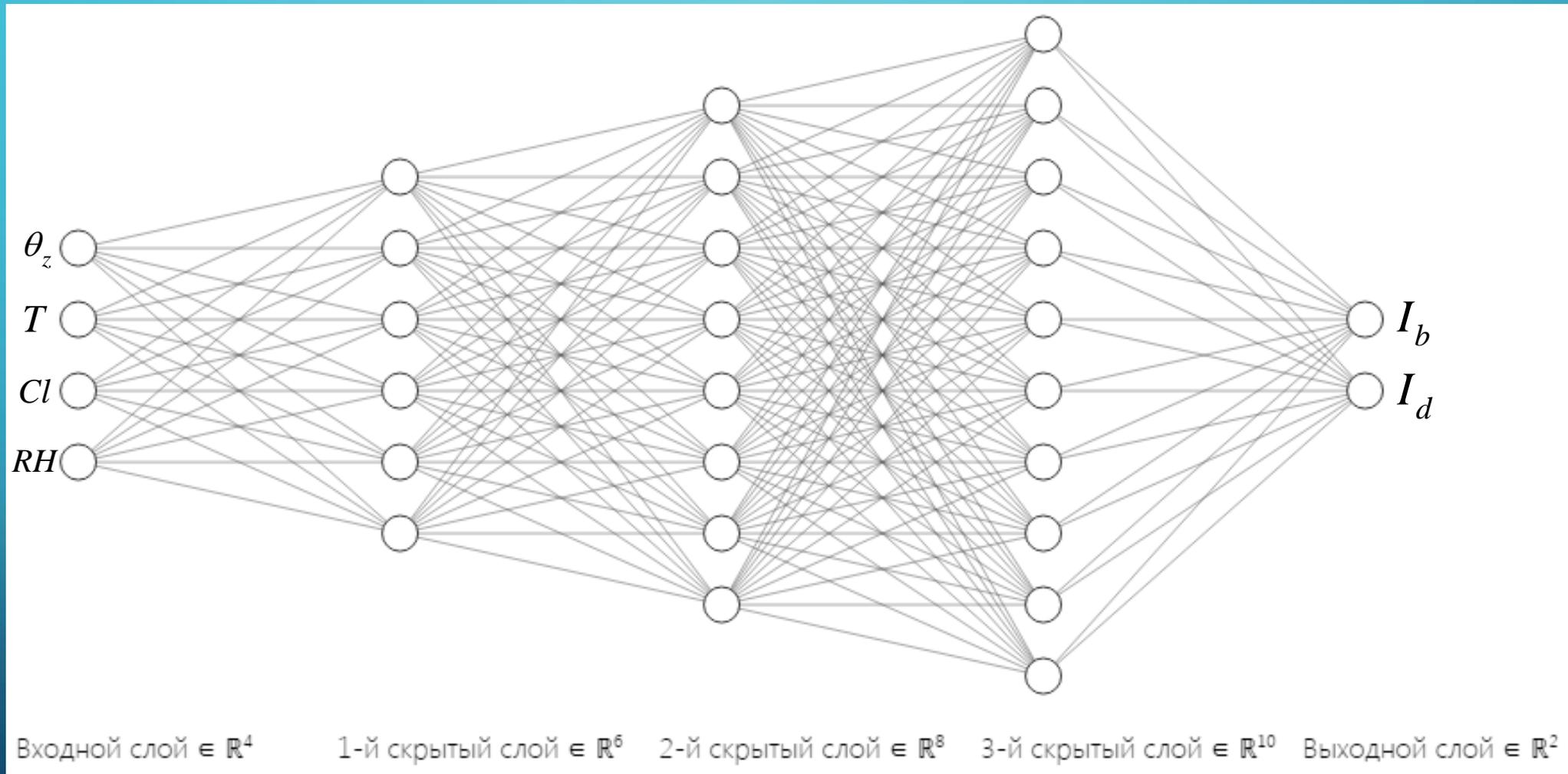
Архив спутниковых метеоданных с сервиса Solcast за период с 2017 по 2019 г. для г. Новочебоксарск



Параметры
Температура воздуха, °C
Атмосферное давление (мм.рт.ст)
Относительная влажность, %
Плотность облачности, %
Скорость ветра на высоте 10 м, м/с
Направление ветра на высоте 10 м (град.)

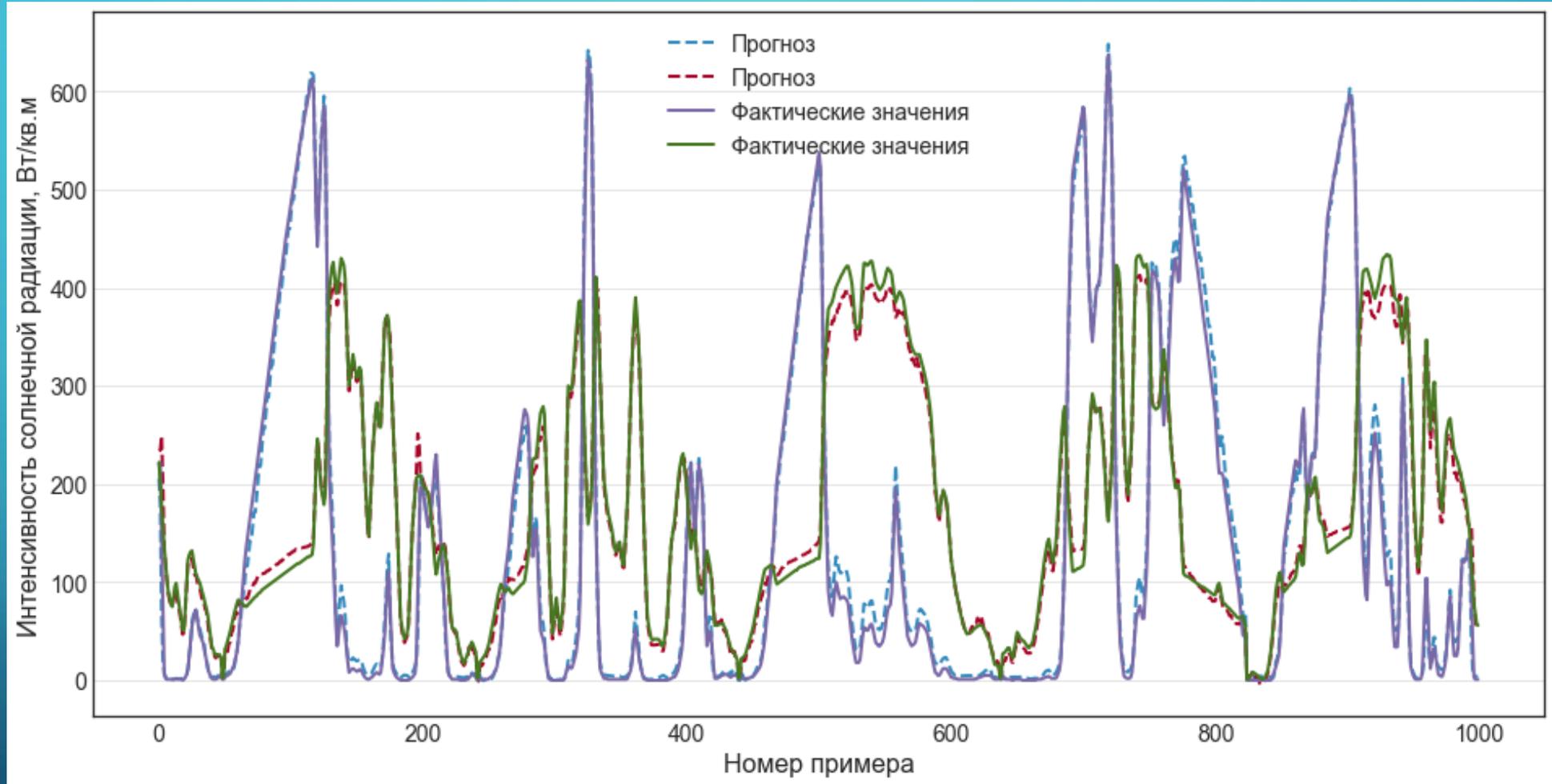
$$I_{bi}, I_{di} = f(T_t, RH_t, Cl_t, P_t, W_{st}, W_{dt}, \dots, \theta_z \dots)$$

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №3



Оптимальная архитектура (4-6-8-10-2) нейросетевой модели прогнозирования №3

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №3



Фактические и спрогнозированные величины составляющих СР на горизонтальной площадке

MAE = 12 Вт/м<sup>2</sup>; nRMSE = 20,2 %

# ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРЕДСКАЗАНИЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ



У тебя есть понятное объяснение  
твоих вычислений?

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Вклад каждого из признаков в итоговый прогноз модели:



Случай 1. Ясное небо в летний полдень

Дата и время	Признаки (SHAP-значения, Вт/м <sup>2</sup> )					Прогноз модели, Вт/м <sup>2</sup>	Факт. значение I, Вт/м <sup>2</sup>	Ошибка, Вт/м <sup>2</sup>
	Косинус угла падения CP	Темп-а воздуха, °C	Облачность, %	Атм. давление, гПа	Отн. влажность, %			
<b>2019-08-31 12:20:00</b>	0,9867 (+293,2)	14,5 (-10,5)	0 (+313,7)	1005 (-3,7)	51,3 (+51,2)	987,05	1046,4	59,35

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Вклад каждого из признаков в итоговый прогноз модели:

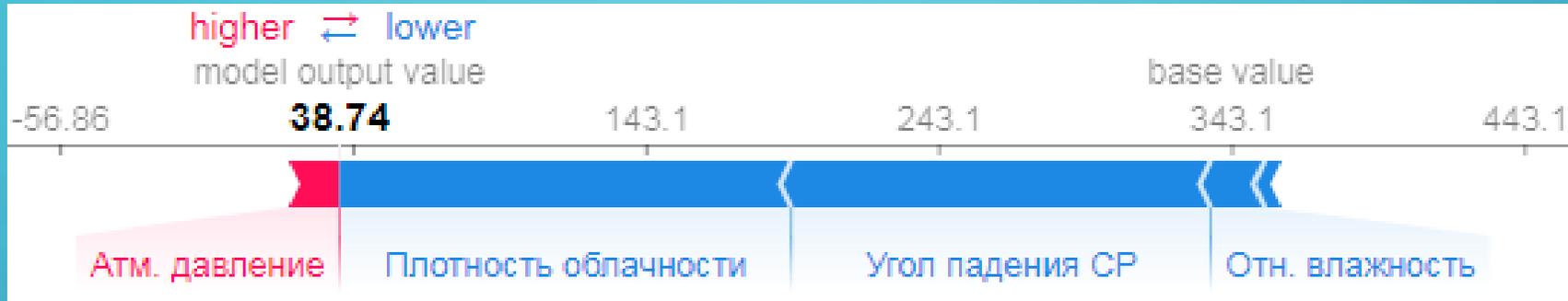


Случай 2. Частичная облачность в летний полдень

Дата и время	Признаки (SHAP-значения, Вт/м <sup>2</sup> )					Прогноз модели, Вт/м <sup>2</sup>	Факт. значение I, Вт/м <sup>2</sup>	Ошибка, Вт/м <sup>2</sup>
	Косинус угла падения CP	Темп-а воздуха, °C	Облачность, %	Атм. давление, гПа	Отн. влажность, %			
<b>2018-07-25 12:35:00</b>	0,9876 (+150,2)	28,4 (+7,41)	57,1 (-164,7)	1006 (-1,2)	40,5 (17,5)	352,3	394	41,7

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ №2. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАБОТЫ МОДЕЛИ

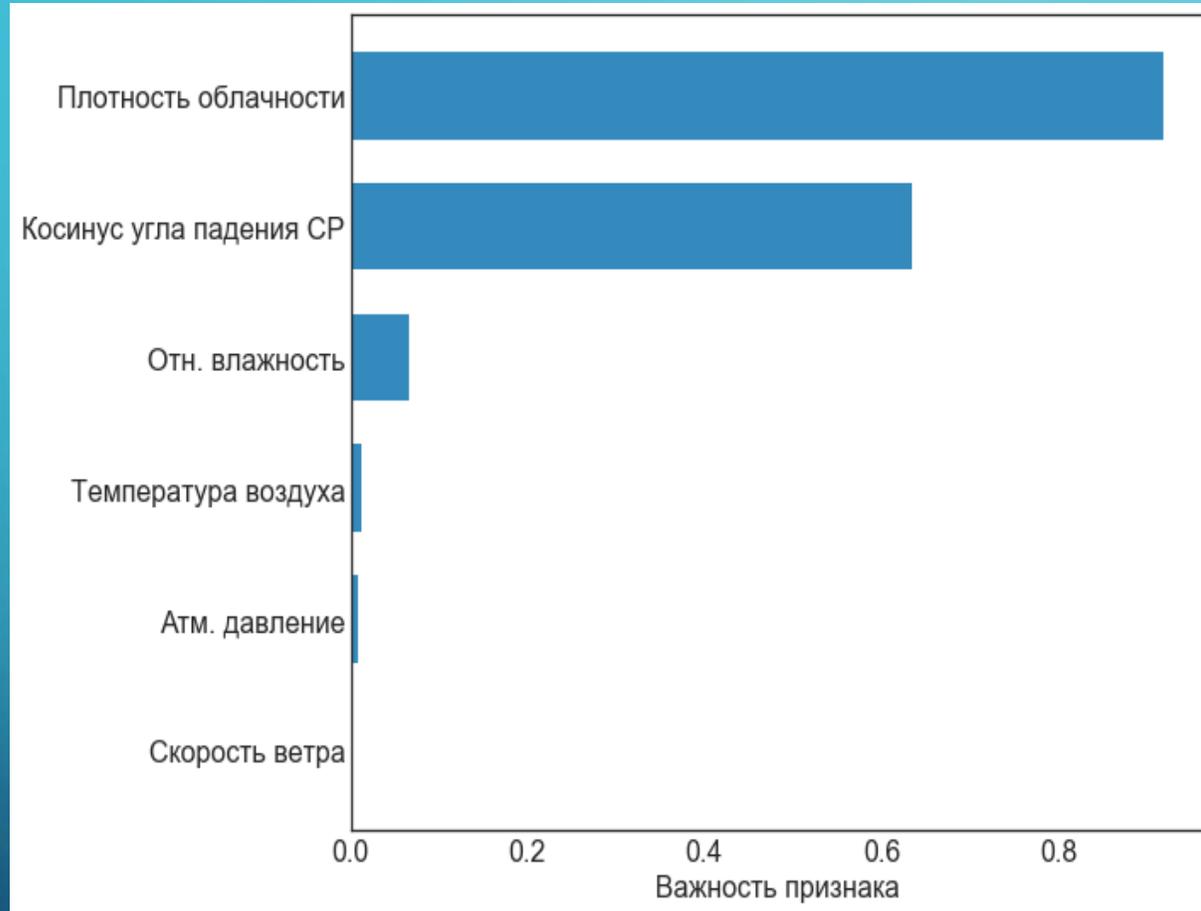
Вклад каждого из признаков в итоговый прогноз модели:



Случай 3. Полная облачность в утреннее время осенью

Дата и время	Признаки (SHAP-значения, Вт/м <sup>2</sup> )					Прогноз модели, Вт/м <sup>2</sup>	Факт. значение I, Вт/м <sup>2</sup>	Ошибка, Вт/м <sup>2</sup>
	Косинус угла падения CP	Темп-а воздуха, °C	Облачность, %	Атм. давление, гПа	Отн. влажность, %			
2017-11-02 07:10:00	0,2034 (-143,2)	-1,2 (-5,8)	93,7 (-154,3)	982 (+17,3)	77,5 (-18,4)	38,74	0,8	37,9

# ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РАБОТЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

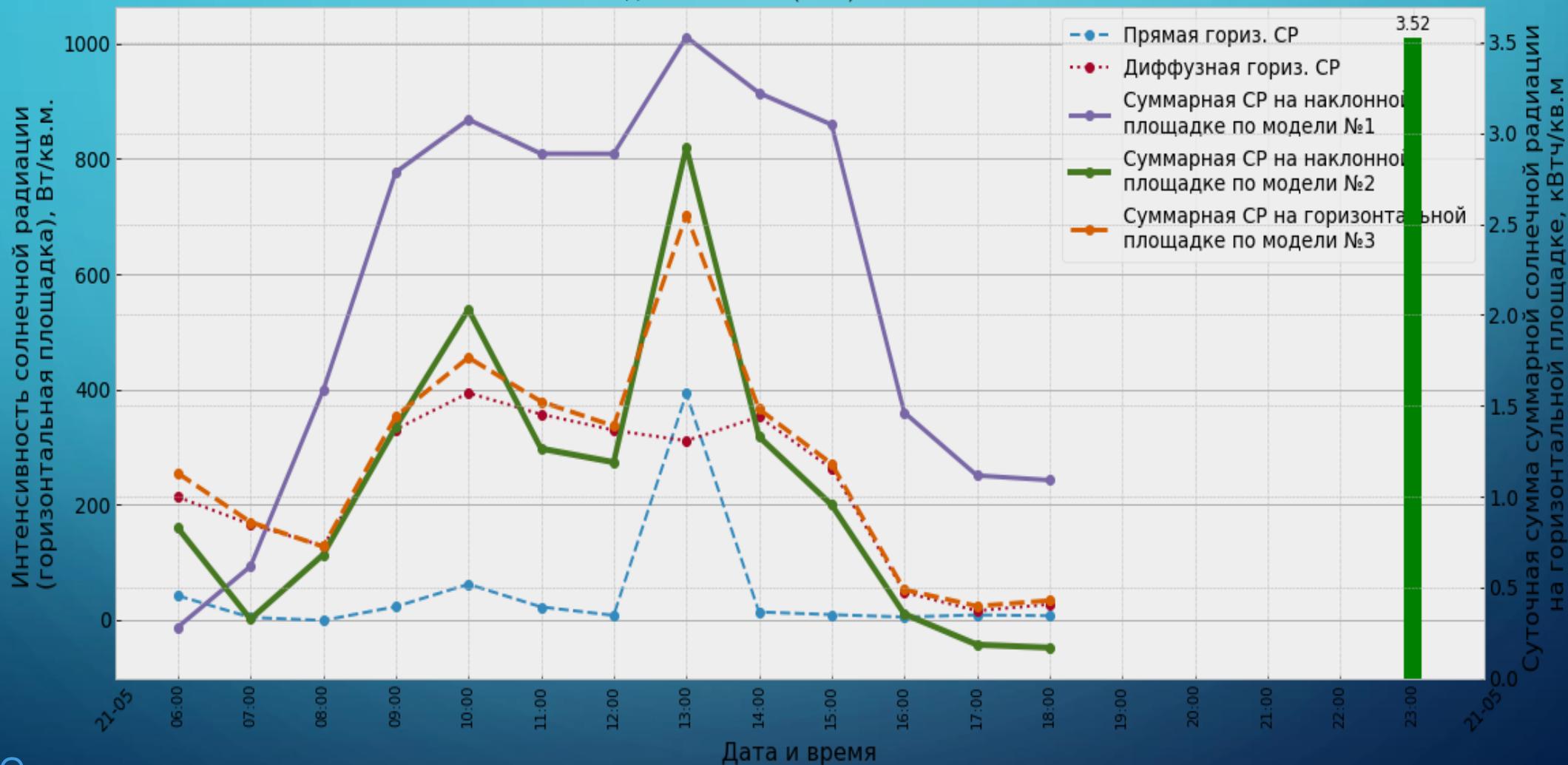


Weight	Feature
$0.9196 \pm 0.0168$	Плотность облачности
$0.6340 \pm 0.0122$	Косинус угла падения CP
$0.0660 \pm 0.0023$	Отн. влажность
$0.0119 \pm 0.0007$	Температура воздуха
$0.0084 \pm 0.0006$	Атм. давление
$0.0028 \pm 0.0003$	Скорость ветра

Важность признаков (степень их влияния на итоговый прогноз)

# ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПОСТРОЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Прогноз на 21-05-2020 по погодным данным RP5 для г. Новочебоксарск.  
Сделан в 23:55 (MSK) 20-05-2020



# ВЫВОДЫ

Исходя из проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- Задача построения мат. модели краткосрочного прогнозирования солнечной радиации может быть решена с помощью метода искусственных нейронных сетей
- Итоговая точность модели сильно зависит от качества предварительной обработки входных данных и от конфигурации нейронной сети
- В качестве входных данных для многомерной модели можно использовать как данные наземных измерений, так и данные спутникового моделирования

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Осуществлена классификация методов прогнозирования солнечной радиации
- Построены мат. модели краткосрочного прогнозирования солнечной радиации на основе метода искусственных нейронных сетей
- Предложены три разных типа входных данных для прогнозирующих моделей
- Рассмотрены варианты интерпретации результатов прогнозирования по построенным моделям

Спасибо за внимание!