

EDN: JKWKAW

УДК 004.896

## An Indirect Forecasting System of the Generated Electricity from a Solar Panel Array Based on Modified Fuzzy Neural Network

Ekaterina A. Engel\* and Nikita E. Engel  
*Khakas State University  
Abakan, Russian Federation*

Received 26.02.2024, received in revised form 06.05.2024, accepted 06.06.2024

**Abstract.** The forecast of the generated electricity of a solar power plant allows efficient and safe management of electrical grid that include solar power plants. The day-ahead market buys at penalty rates electricity from solar power plants, deviating by more than 5 % of the maximum solar power plant capacity from the provided hourly day-ahead market layout of electricity generated by the solar power plant. An analysis of existing software showed the lack of available software for effectively forecasting the production of a solar power plant. In this study, an indirect forecasting intelligent technology of a solar power plant production based on a modified fuzzy neural network with an attention mechanism was developed, tested and implemented. The UML class diagram and block-modular architecture of the indirect forecasting intelligent technology of a solar power plant production have been developed. This block-modular architecture provides flexibility and easy modification of the indirect forecasting intelligent technology of a solar power plant production. The approval of the indirect forecasting intelligent technology of a solar power plant production reflects its effective, robust results and the feasibility of its use for automatic generation of day-ahead market layouts.

**Keywords:** forecasting of a solar power plant production, recurrent neural networks, attention mechanism, modified fuzzy neural network, UML.

**Acknowledgements.** The research was carried out within the framework of the event “Development of intelligent systems for forecasting and maximizing the output of a solar power plant based on an original modified fuzzy neural network, their implementation as computer programs and the introduction of renewable energy sources at power plants” of the world-class REC “Yenisei Siberia” activity program. The research was carried out at the expense of a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Belarus (Agreement No. 91 dated 12/13/12), a research project “Development of an intelligent system for indirect forecasting of solar power generation based on a modified fuzzy neural network”.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: ekaterina.en@gmail.com

Citation: Engel E. A., Engel N. E. An indirect forecasting system of the generated electricity from a solar panel array based on modified fuzzy neural network. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(4), 464–473. EDN: JKWKAW



## **Интеллектуальная технология непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции**

**Е. А. Энгель, Н. Е. Энгель**

*ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет  
им. Н. Ф. Катанова»  
Российская Федерация, Абакан*

**Аннотация.** Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, интегрирующими сегмент солнечной энергетики. Рынок «сутки вперед» покупает по штрафным тарифам электроэнергию солнечных электростанций, отклоняющуюся более чем на 5 % максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового макета рынка «сутки вперед» ее выработки. Проведенный анализ существующего программного обеспечения показал отсутствие доступного программного обеспечения для эффективного прогнозирования выработки солнечной электростанции. В данном исследовании разработана, апробирована и реализована технология непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания. Разработаны UML диаграмма классов и блочно-модульная архитектура интеллектуальной технологии непрямого прогнозирования солнечной электростанции, обеспечивающая ее гибкость и легкую модификацию. Апробация интеллектуальной технологии непрямого прогнозирования выработки солнечной электростанции отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для автоматического построения макетов рынка «сутки вперед».

**Ключевые слова:** прогнозирование вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции, рекуррентные нейросети, механизм внимания, модифицированная нечеткая нейросеть, UML.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках мероприятия «Разработка интеллектуальных систем прогнозирования и максимизации выработки солнечной электростанции на основе оригинальной модифицированной нечеткой нейросети, их реализация как программ для ЭВМ и внедрение на электростанции возобновляемых источников энергии» программы деятельности НОЦ мирового уровня «Енисейская Сибирь».

Исследование выполнено за счет средств гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 91 от 13.12.22), научно-исследовательский проект «Разработка интеллектуальной системы непрямого прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети».

Цитирование: Энгель Е. А. Интеллектуальная технология непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции / Е. А. Энгель, Н. Е. Энгель // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 464–473. EDN: JKWKAW

## Введение

Результаты исследования соответствуют пункту 20А стратегии научно-технологического развития РФ [1], развивая интеллектуальные технологии солнечной электроэнергетики в Российской Федерации, в том числе в Республике Хакасия, имеющей богатый природный потенциал для увеличения мощности сети солнечных электростанций (величина инсоляции соответствует уровню инсоляции Краснодарского края [2]).

Нелинейную динамику выработки солнечной станции, вследствие их неопределенностей и колебаний инсоляции и температуры [3], сложно прогнозировать традиционными алгоритмами, в то время как интеллектуальные технологии обеспечивают приемлемую точность [3].

В рамках стратегического ответа ЕС на COVID-19 стандарты интеллектуальной энергетики определяют спецификацию облачной платформы для распределенной экосистемы больших данных солнечной энергетики, которая обеспечит создание интеллектуальных эффективных технологий солнечной энергетики [4]. Долгосрочный вклад солнечной энергетики основан на преодолении оставшихся проблем интеграции электрических сетей с сегментом солнечной энергетики, ее высоких затрат и низкой эффективности, путем создания и внедрения интеллектуальных технологий вследствие неэффективности традиционных технологий. В рамках прорывных исследований средствами интеллектуальных технологий собрано, проанализировано и преобразовано в знания огромное количество данных систем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) [3]. Таким образом, применение интеллектуальных технологий для цифровизации систем солнечной энергетики имеет огромный потенциал для повышения их стабильности, надежности, динамического реагирования, экономической эффективности, других важных достижений и облегчения их интеграции в электрические сети. Прогноз вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции позволяет эффективно и безопасно управлять электрическими сетями, включающими сегмент солнечной энергетики.

Рынок «сутки вперед» покупает по штрафным тарифам электроэнергию солнечных электростанций, отклоняющуюся более чем на 5 % установленной максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового макета рынка «сутки вперед» выработки солнечной электростанции.

Существующее программное обеспечение (ПО) [5–13], ориентированное на проектирование солнечных электростанций, выдает примерную среднемесячную вырабатываемую электроэнергию солнечной электростанции для заданной широты и долготы места на основе теоретической инсоляции и температуры и не ориентировано на краткосрочное прогнозирование на основе фактической инсоляции и температуры, поэтому не может обеспечить реализацию поставленной цели настоящего исследования. Таким образом, целесообразно и актуально создание интеллектуальной технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции.

В данном исследовании создана интеллектуальная технология непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции (ИТПВЭСЭ), реализующая программным обеспечением разработанную в работе авторов [14] интеллектуальную систему непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе модифицированной нечеткой нейросети с механизмом внимания (МНН).

При сравнении с известными нечеткими нейросетями, например с адаптивной сетью на основе системы нечеткого вывода (ANFIS), МНН включает в себя ряд отличительных особенностей: многомерные функции принадлежности аппроксимируются на основе архивных данных рекуррентной нейросетью; нейросетевые слои МНН состояются рекуррентными нейросетями с механизмом внимания, поскольку указанные нейросети интегрируют информацию о временных рядах, генерируют робастные выходные сигналы в условиях неопределенности и недостатка архивных данных, стандартные алгоритмы машинного обучения при этом испытывают затруднения [3]; нечетко-возможностная свертка выходов глубоких нейросетей с механизмом внимания формирует выход модифицированной нейросети (прогнозируемое значение выработки солнечной электростанции).

Case-средством Microsoft Visio созданы: UML диаграмма классов и блочно-модульная архитектура ИТПВЭСЭ, обеспечивающая гибкость и простоту модификации ИТПВЭСЭ.

Апробация ИТПВЭСЭ отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для автоматического построения макетов рынка «сутки вперед».

Созданная ИТПВЭСЭ, обеспечивающая цифровизацию и эффективность «зеленых» технологий солнечной энергетики, способствует энергосбережению, комфорту и безопасности среды для жизни; улучшению качества окружающей среды, экологическому благополучию населения, улучшению качества жизни населения.

### 1. Жизненный цикл интеллектуальной технологии непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции

Нелинейная динамика выработки солнечной электростанции зависит от колебаний инсоляции и температуры воздуха линейно и нелинейно, соответственно. Рынок «сутки вперед» покупает по штрафным тарифам электроэнергию солнечных электростанций, отклоняющуюся более чем на 5 % установленной максимальной мощности солнечной электростанции от предоставляемого почасового макета рынка «сутки вперед» выработки солнечной электростанции (рис. 1). На рис. 1 представлены:

- особенности технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции, диктуемые рынком «сутки вперед» [3];
- классификация на основе горизонта прогноза технологий прогноза выработки солнечной электростанции.

Интеллектуальные технологии, в отличие от классических, например интегрированной авто-регрессии и т.д., имеют следующие достоинства: допустимую погрешность макета рынка «сутки вперед», оптимальное управление сегментом солнечных электростанций электрических сетей.



Рис. 1. Особенности оптового рынка «сутки вперед» технологий прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции и их классификации

Fig. 1. Features of the wholesale market “day ahead” of technologies for forecasting the generated electricity of a solar power plant and their classification

Интеллектуальные технологии, основанные на нейросетях, имеют преимущество параллельных вычислений, в том числе с использованием современных графических процессоров, что значительно снижает временные затраты на обработку больших данных SCADA для прогноза выработки солнечной электростанции [3].

Точность и другие требуемые характеристики качества составляют производительность интеллектуальной технологии, которая должна иметь оптимальную производительность [3]. Базовый жизненный цикл интеллектуальной технологии, основанной на нейросетях, включает пять этапов: подготовки данных, создания интеллектуальной технологии, внедрение, мониторинг и сопровождение. Создание интеллектуальной технологии регламентируется методологией межотраслевого стандартного процесса исследования данных (CRISP-DM) [15] и открытым стандартом для представления моделей машинного обучения (ONNX) [16].

Данные датчиков солнечной электростанции собираются в необработанные наборы данных SCADA. Затем эти наборы данных обрабатываются предварительно простым способом (стандартизация или кодирование). Методы подготовки данных включают снижение размерности (анализ основных компонентов (PCA)), выборку (субдискретизация, передискретизация), преобразование, кодирование, извлечение и отбор признаков [3].

Важный шаг создания нейросетевой технологии – извлечение признаков, обеспечивающее создание базы знаний [14]. Наиболее релевантные данные далее разделяются на наборы данных для обучения, валидации и тестирования. Когда нейросетевая технология обеспечивает требуемую производительность, ее веса замораживаются. Далее готовая нейросетевая технология внедряется в информационную систему солнечной электростанции. Если по результатам мониторинга нейросетевая технология не имеет оптимальную производительность, она перенастраивается на основе обновленных наборов данных SCADA.

## **2. Интеллектуальная технология непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе МНН**

Интеллектуальные технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции составляют виртуальную цифровую реальность, обеспечивающую безопасность и эффективность солнечной энергетики, включая ее интеграцию в электрические сети. Описанные в работе авторов [14] научные результаты интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе МНН демонстрируют:

- ее робастность и снижение среднеквадратичной ошибки ее прогноза в среднем в три и шесть раз в сравнении с рекуррентными нейросетями и стандартной моделью ARMA в условиях воздействия различного рода неопределенности;
- целесообразность реализации интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе МНН, методы которой подробно описаны в работе авторов [14], как ИТПВЭСЭ для автоматического построения макетов рынка «сутки вперед».

Блочная-модульная архитектура ИТПВЭСЭ обеспечивает ее гибкость, легкую модификацию имеющихся и добавления вновь разработанных модулей, реализующих вспомогательные методы, например, интеграцию с аппаратным обеспечением инвертора и/или бесконтактной

верификации пользователя (описание которых выходит за рамки настоящей статьи). Ядром ИТПВЭСЭ является модуль МНН. Таким образом, модуль солнечной электростанции можно заменить другим модулем, реализующим, например, ветровую электростанцию. Реализованная Case-средством Microsoft Visio блочно-модульная архитектура ИТПВЭСЭ состоит из трех модулей (рис. 2).

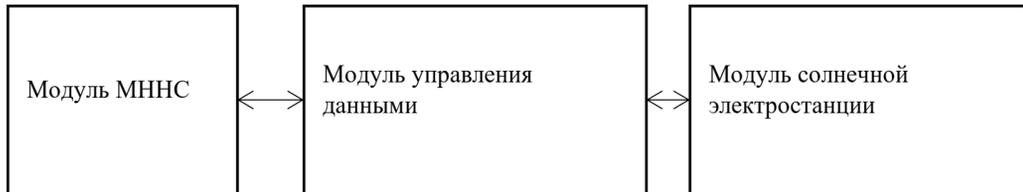


Рис. 2. Блочнo-модульная архитектура ИТПВЭСЭ

Fig. 2. Block-modular architecture of ITPWE

Модуль МНН является центральным. Созданная в нотации UML средствами Microsoft Visio диаграмма классов ИТПВЭСЭ состоит из 6 классов, имеющих многоуровневую иерархию (рис. 3).

Базовым классом для ИТПВЭСЭ является МНН с методами: структурно-параметрического синтеза, диагностического функционирования и масштабированной коррекции.

Исследователи в [10] отметили, что требуется дорожная карта реализации интеллектуальной технологии прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции. Поэтому мы предложили простую, но эффективную дорожную карту разработанной ИТПВЭСЭ, издержки которой в основном связаны с затратами на ее разработку и сопровождение. Центр контроллера солнечной станции управляет всеми устройствами и данными солнечной станции, собирает наборы данных SCADA от датчиков, метеорологических станций и инверторов [3]. Разработанный модуль управления данными обеспечивает интеграцию базы данных SCADA солнечной электростанции ИТПВЭСЭ и загрузку данных методов МНН: структурно-параметрического синтеза, диагностического функционирования и масштабированной коррекции.

### 3. Апробация интеллектуальной технологии непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции

ИТПВЭСЭ реализована на основе МНН, созданной с использованием трехлетнего архива данных фактической вырабатываемой электроэнергии Абаканской солнечной электростанции  $I_h^t$  и вектора

$$X_h^t = (C_h^{t-2-m}, I_h^{t-2-m}, l_h^{t-m}, T_h^{t-m}, P_h^{t-m}, W_h^{t-m}, d_h^{t-m}), \quad (1)$$

где  $C_h^{t-2-m}$  индекс ясного неба;  $l_h^{t-m}$  облачность (%);  $T_h^{t-m}$  температура воздуха;  $P_h^{t-m}$  атмосферное давление;  $W_h^{t-m}$  and  $d_h^{t-m}$  скорость и направление ветра, соответственно;  $m$  – размер окна прогнозирования,  $m = \overline{m} = 0..14, 361..369$ ,  $h \in \{1, \dots, 19\}$ ,  $t \in \{370, \dots, 1095\}$ .

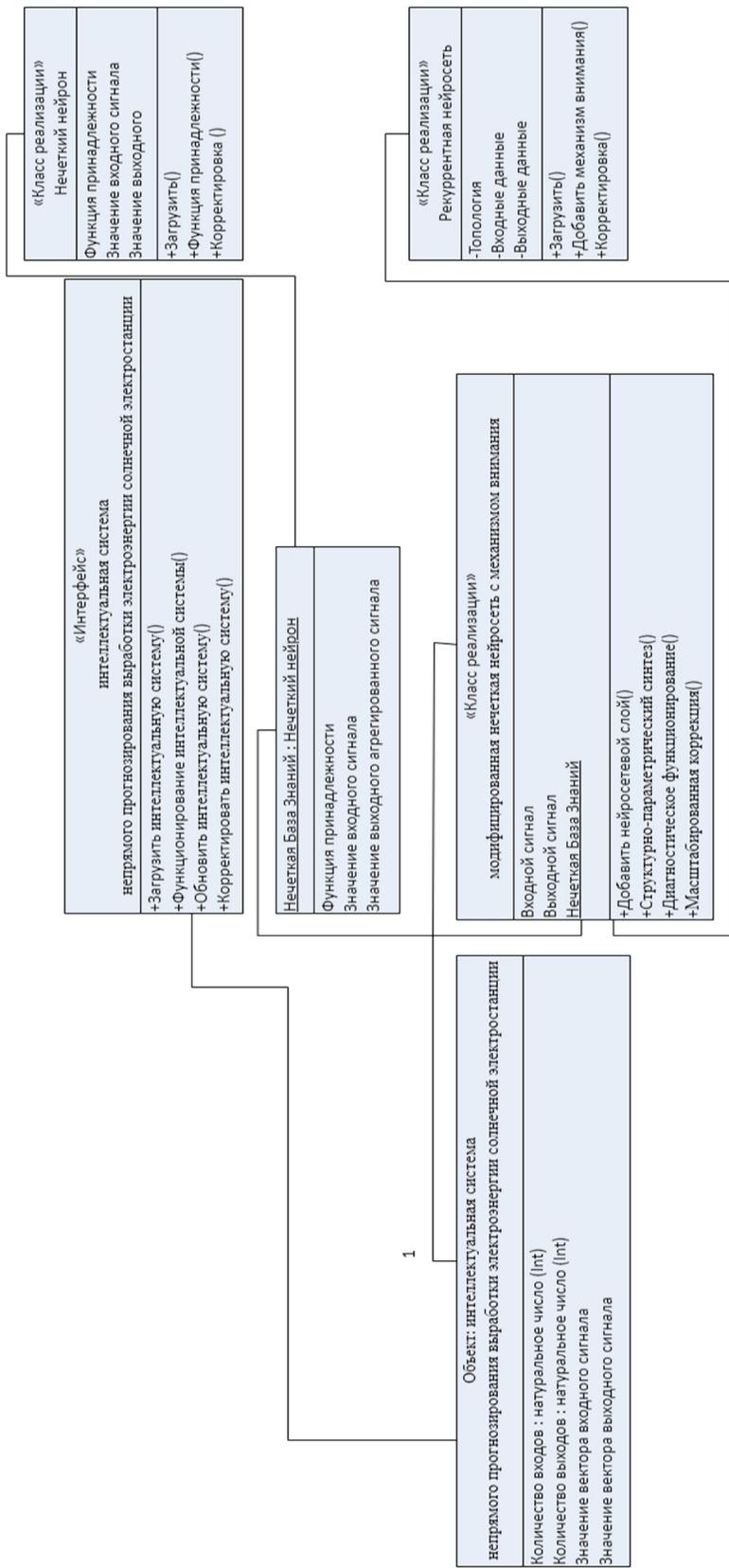


Рис. 3. Диаграмма классов ИТПВЭСЭ

Fig. 3. Diagram of ITRWE classes

Последние четыре элемента вектора данных для  $m = \overline{0..1}$  представляют собой прогноз погоды метеорологического сайта гр5, поскольку по результатам статистических наблюдений достоверность прогноза погоды гр5 выше, в сравнении с наиболее востребованными метеорологическими сайтами yandex и gismeteo. Вследствие неточности прогноза погоды возрастает риск ошибки при прогнозе значения вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции, генерируемого МНН. С целью снижения указанных рисков были построены и проанализированы два набора данных для повышения точности ИТПВЭСЭ:

- набор данных (1\_1), заменяющий последние четыре элемента вектора данных (1) для  $m = \overline{0..1}$  усредненными параметрами прогноза погоды на сутки вперед следующих метеорологических сайтов: yandex, gismeteo и гр5;
- набор данных (1\_2), дополняющий данные (1) отклонениями параметров прогноза погоды на сутки вперед метеорологических сайтов yandex и гр5.

Научные результаты интеллектуальной системы непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии солнечной электростанции на основе МНН, отраженные в статье [14], демонстрируют сильную корреляцию ошибок: среднеквадратичной (RMSE) средней абсолютной (MABE) и смещения (BIAS). Поэтому производительность ИТПВЭСЭ оценивалась среднеквадратичной ошибкой следующим образом:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i^f - I_i^m)^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – число оцениваемых примеров;  $I_i^f$  – прогнозируемое значение выработки солнечной электростанции;  $I_i^m$  – фактическое значение выработки солнечной электростанции.

Табл. 1 отражает анализ ошибок между фактическими и прогнозируемыми значениями выработки, генерируемыми разработанной ИТПВЭСЭ, созданной на основе данных (1), (1\_1) и (1\_2), демонстрирует лучшую точность прогноза ИТПВЭСЭ, созданной на основе данных (1\_2).

Отметим, что усреднение параметров прогноза погоды на сутки вперед снижает точность прогноза ИТПВЭСЭ.

Таким образом, проведенная апробация ИТПВЭСЭ выявила ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для автоматического построения макетов рынка «сутки вперед».

Таблица 1. Результаты ИТПВЭСЭ при почасовом прогнозе выработки солнечной электростанции на сутки вперед

Table 1. The results of ITPWEE with an hourly forecast of the output of a solar power plant for the day ahead

Модель	МНН на основе данных (1_1)		МНН на основе данных (1)		МНН на основе данных (1_2)	
	Солнечные часы	Облачные	Солнечные часы	Облачные	Солнечные часы	Облачные
RMSE (W/m <sup>2</sup> )	17,64	35,23	11,81	21,45	10,12	20,03

## Заключение

В данном исследовании разработана и апробирована ИТПВЭСЭ на основе МНН. Разработаны UML диаграмма классов и блочно-модульная архитектура ИТПВЭСЭ, обеспечивающая ее гибкость и легкую модификацию.

Предложена простая, но эффективная дорожная карта разработанной ИТПВЭСЭ, издержки которой связаны с затратами на ее разработку и сопровождение. Апробация ИТПВЭСЭ отражает ее эффективные, робастные результаты и целесообразность ее применения для автоматического построения макетов рынка «сутки вперед».

Созданная ИТПВЭСЭ, обеспечивающая цифровизацию и эффективность «зеленых» технологий солнечной энергетики, способствует энергосбережению, комфорту и безопасности среды для жизни, улучшению качества окружающей среды, экологическому благополучию и улучшению качества жизни населения.

## Список литературы / References

[1] Большие вызовы и приоритеты научно-технологического развития [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/> – Заглавие с экрана. [Great challenges and priorities of scientific and technological development [Electronic resource] – Access: <https://xn--mlagf.xn--plai/challenges-priorities/>]

[2] Значение солнечной инсоляции в г. Абакане (Республика Хакасия) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.betaenergy.ru/insolation/abakan> – Заглавие с экрана. [Value of solar insolation in Abakan (Republic of Khakassia) [Electronic resource] – Access: <https://www.betaenergy.ru/insolation/abakan>]

[3] Engel E. Engel N. A Review on Machine Learning Applications for Solar Plants. *Sensors.*, 2022, 22, 9060.

[4] EITCI Institute. SMART ENERGY STANDARDS GROUP. [Electronic resource] – Access: <https://eitci.org/sesg>

[5] SolarSoft. [Electronic resource] – Access: <https://www.lmsal.com/solarsoft/>

[6] Solar Array Simulator. [Electronic resource] – Access: <https://www.chromausa.com/product/solar-array-simulator/>

[7] NREL System Advisor Model (SAM). [Electronic resource] – Access: <https://sam.nrel.gov>

[8] Helioscope. [Electronic resource] – Access: <https://helioscope.aurorasolar.com>

[9] Aurora Solar. [Electronic resource] – Access: <https://aurorasolar.com>

[10] Photovoltaic Geographical Information System. Interactive Maps. [Electronic resource] – Access: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en>

[11] SolarServer PV forecast Europe. Individual solar photovoltaic power forecasts. [Electronic resource] – Access: <https://www.solarserver.com/service/solar-photovoltaic-power-forecast-for-worldwide-locations/pv-forecast-europe.html>

[12] PVsyst. Photovoltaic power forecast. [Electronic resource] – Access: <http://www.pvsyst.com/en/software/download>

[13] Clean Power Research. [Electronic resource] – Access: <https://www.cleanpower.com>

[14] Энгель Е. А. Энгель Н. Е. Система непрямого прогнозирования вырабатываемой электроэнергии массивом солнечных панелей на основе модифицированной нечеткой

нейросети. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*, 2023, 6, 744–758. [Engel E. A., Engel N. E. Indirect prediction system of generated electricity by an array of solar panels based on a modified fuzzy neural network. *Journal of Siberian Federal University. Series: Technique and Technology*, 2023, 6, 744–758 (in Rus.)]

[15] Школа больших данных. CRISP-DM. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigdataschool.ru/wiki/crisp-dm> – Заглавие с экрана. [Big data school. CRISP-DM. [Electronic resource] – Access: <https://bigdataschool.ru/wiki/crisp-dm>]

[16] Open Neural Network Exchange. [Electronic resource] – Access: Open Neural Network Exchange. Available online: <https://onnx.ai/>

[17] Яндекс погода. Абакан. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://yandex.ru/pogoda/abakan?lat=53.721152&lon=91.442387> – Заглавие с экрана. [Yandex weather. Abakan. [Electronic resource] – Access: <https://yandex.ru/pogoda/abakan?lat=53.721152&lon=91.442387>]

[18] Gismeteo. Погода в Абакане [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gismeteo.ru/weather-abakan-4723/10-days/> – Заглавие с экрана. [Gismeteo. Weather forecast for Abakan [Electronic resource] – Access: <https://www.gismeteo.ru/weather-abakan-4723/10-days/>]

[19] Rp5. Погода в Абакане [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0\\_%D0%B2\\_%D0%90%D0%B1%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5](https://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0_%D0%B2_%D0%90%D0%B1%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5) – Заглавие с экрана. [Rp5. Weather forecast for Abakan [Electronic resource] – Access: [https://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0\\_%D0%B2\\_%D0%90%D0%B1%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5](https://rp5.ru/%D0%9F%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0_%D0%B2_%D0%90%D0%B1%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B5)]