

УДК 620.4, 528.7

DOI 10.51691/2541-8327\_2022\_5\_1

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

**Котельников Д.Ю.**

*аспирант*

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*Севастополь, Россия*

**Кузнецов П.Н.**

*кандидат технических наук*

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*Севастополь, Россия*

**Майорова Ю.А.**

*старший преподаватель*

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*Севастополь, Россия*

**Пузырёв А.В.**

*магистр*

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,*

*Севастополь, Россия*

**Аннотация**

Одним из важнейших условий эффективной эксплуатации солнечных электростанций является обеспечение систематического мониторинга состояния фотоэлектрических модулей. Данная статья посвящена решению данной задачи за счет использования развитой системы автоматизированного мониторинга.

Решение основано на использовании беспилотного летательного аппарата с полезной нагрузкой, способной осуществлять видеосъемку и регистрировать геопространственные данные. Для выполнения процедур детектирования проблемных модулей предлагается использовать технологию технического зрения, использующую нейросетевые методы классификации, характеризующиеся высокой адаптивностью к различным параметрам изображения. Предварительные тесты технологии показали, что применение нейронной сети, основанной на архитектуре R-CNN с алгоритмом обучения – Inception v2 (COCO) позволяет в ясный день обнаруживать проблемные фотоэлектрические модули с точностью более 95%.

**Ключевые слова:** мониторинг, диагностика, нейросетевые технологии, солнечная энергетика, энергоэффективность, фотоэлектрические модули.

### ***METHOD FOR SURFACE MONITORING OF PHOTOVOLTAIC MODULES***

***Kotelnikov D.Y.***

*postgraduate student*

*Sevastopol State University,*

*Sevastopol, Russia*

***Kuznetsov P.N.***

*Candidate of Technical Sciences*

*Sevastopol State University,*

*Sevastopol, Russia*

***Mayorova Y.A.***

*senior lecturer*

*Sevastopol State University,*

*Sevastopol, Russia*

***Puzyrev A.V.***

*student*

*Sevastopol State University,*

*Sevastopol, Russia*

## **Abstract**

One of the most important conditions for the efficient operation of solar power plants is to ensure systematic monitoring of the surface of photovoltaic modules. This article is devoted to solving this problem through the use of a developed automated monitoring system. The solution is based on the use of an unmanned aerial vehicle with a payload capable of capturing video and recording geospatial data. To perform the procedures for detecting problematic modules, it is proposed to use a vision technology that uses neural network classification methods characterized by high adaptability to various image parameters. Preliminary tests of the technology showed that the use of a neural network based on the R-CNN architecture with a learning algorithm - Inception v2 (COCO) allows you to detect problematic photovoltaic modules on a clear day with an accuracy of more than 95%.

**Keywords:** monitoring, diagnostics, neural network technologies, solar energy, energy efficiency, photovoltaic modules.

На сегодняшний день мировая энергетика признала необходимость и эффективность солнечных электрических станций (СЭС) в производственном цикле электрической энергии. Использование солнечной энергетика требует оптимизации последовательности преобразования и поддержания рабочих характеристик фотоэлектрических модулей. Характеристики модулей подвержены воздействию факторов различной природы, от не качественных материалов и нарушения технологии установки самих модулей, до загрязнённости, дефектов и повреждений их поверхностей. Загрязнённость поверхности фотоэлектрических модулей влечёт за собой уменьшение

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

энергетической эффективности всей СЭС ввиду рассогласования по напряжению в точках максимальной мощности. В связи с этим возникает необходимость систематического мониторинга состояния поверхности модулей, а также их диагностики [1–3].

Использование систем мониторинга фотоэлектрических модулей позволяет оптимизировать работу путем своевременного реагирования на изменение их нормального состояния. Кроме того, системы и инструменты мониторинга позволяют проводить анализ данных, сравнение, обнаружение и идентификацию неисправностей [4]. Системы мониторинга должны быть в состоянии постоянно отслеживать рабочее состояние модулей, расположенных на территории электростанции, чтобы поддерживать их оптимальные условия работы.

В настоящее время не представлено готовых решений для автоматического мониторинга и диагностики состояния фотоэлектрических модулей без непосредственного вмешательства в работу каждого из них, а самыми распространёнными решениями являются:

1. Визуальный осмотр поверхности фотоэлектрических модулей персоналом СЭС. Данное решение является одним из первых и самых распространённых способов решения проблемы мониторинга фотоэлектрических модулей. На текущий момент является устаревшим ввиду больших затрат времени на обход территории СЭС, не точным из-за воздействия человеческого фактора, а также влечёт за собой необходимость в содержании дополнительного обслуживающего персонала [5].
2. Установка датчиков электрических параметров в каждую последовательно соединённую группу фотоэлектрических модулей (стринг). Решение основано на постоянном мониторинге электрических параметров. Для его реализации некоторые производители предлагают устанавливать необходимое оборудование непосредственно на заводе в объединения фотоэлектрических модулей (стринги). Ввиду большого

количества модулей (например, СЭС «Перово» – 440 000 шт. – потребует около 22 000 датчиков) расположенных на территории электростанции, данное решение является очень затратным [6].

3. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для фотофиксации поверхности фотоэлектрических модулей и последующей ручной обработкой полученных данных. Решение является одним из новшеств в сфере диагностики и мониторинга СЭС, но существенно теряет в своей эффективности из-за наличия человеческого фактора, а также необходимости содержать дополнительный персонал.

Поскольку существующие решения имеют ряд существенных недостатков, для решения задачи мониторинга и диагностики состояния фотоэлектрических модулей авторами предлагается использовать автоматизированный комплекс с беспилотным летательным аппаратом [7] и системой детектирования повреждений и степени загрязнения фотоэлектрических модулей, основанной на методах нейросетевой классификации и машинном зрении.

Принцип работы предлагаемого автоматизированного комплекса можно описать с помощью функциональной блок-схемы (рис. 1).

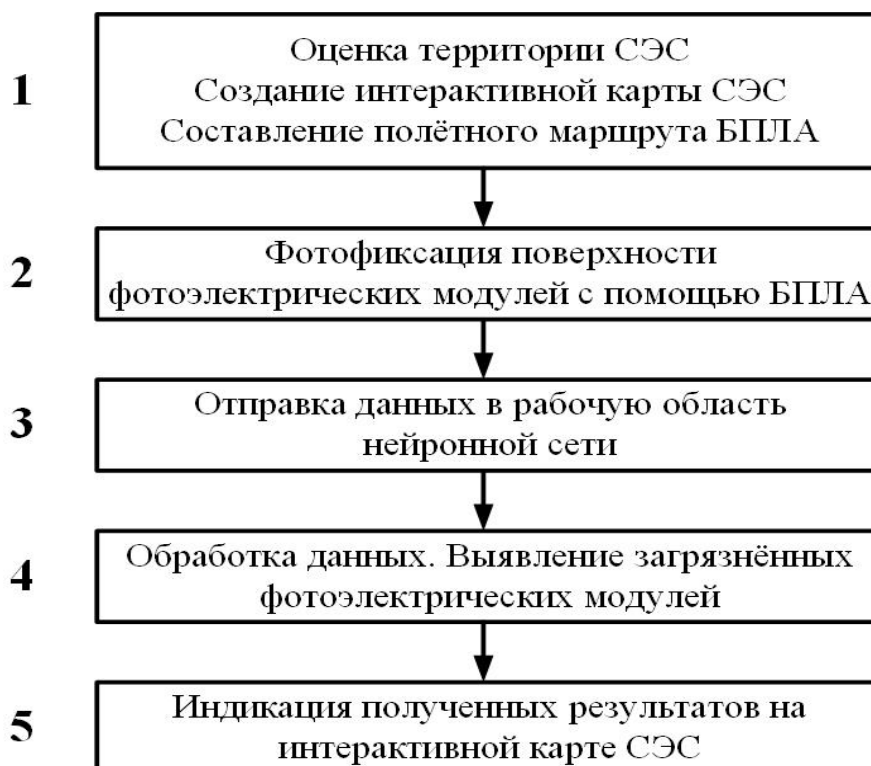


Рис. 1 – Функциональная блок-схема, описывающая принцип работы автоматизированного комплекса (авторская разработка)

Частичное затенение считается одним из наиболее серьезных недостатков из-за вредного воздействия, которое может оказать на фотоэлектрические модули. Для обнаружения данной проблемы были использованы различные методы, основанные на анализе электрических [8] и не электрических параметров [9]. Одним из инструментов для прогнозирования мощности, моделирования и оценки производительности фотоэлектрических модулей являются искусственные нейронные сети [10–12]. Нейронные сети показали свою эффективность в солнечной энергетике, а также в других сферах жизни [13–14], ввиду чего было принято решение использовать их для мониторинга оборудования промышленных солнечных электростанций.

Искусственные нейронные сети, как один из инструментов для решения проблемы мониторинга оборудования СЭС, станут частью автоматизированного комплекса для диагностики состояния фотоэлектрических модулей, состоящего из беспилотного летательного аппарата (БПЛА) со специализированной

полезной нагрузкой и наземного интеллектуального информационно-управляющего комплекса для обработки и отображения данных. Для реализации нейросетевых алгоритмов и применения машинного зрения необходимо составить обучающую выборку из изображений фотоэлектрических модулей с характерными дефектами, а также с затенением и загрязнением (рис. 2).

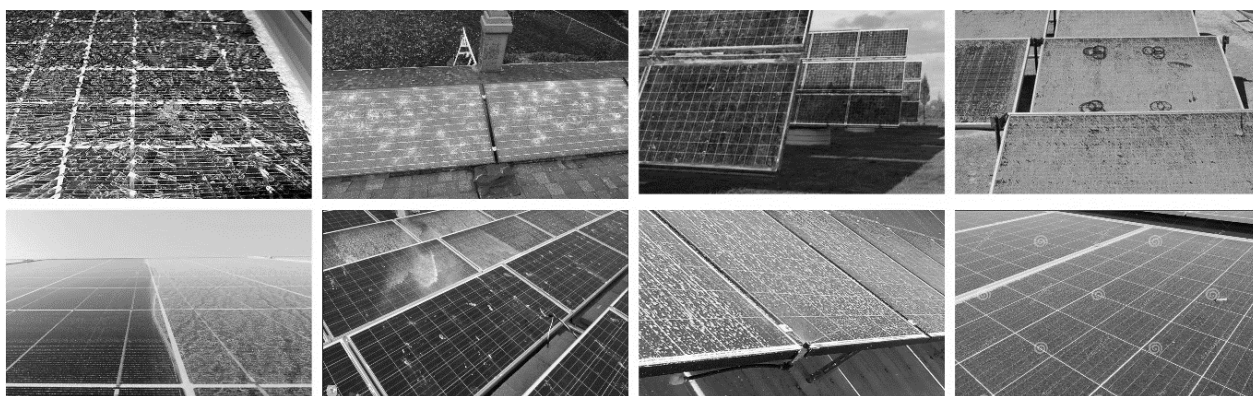


Рис. 2 – Примеры фото из обучающей выборки (авторская разработка)

Для реализации автоматизированного комплекса диагностики и мониторинга фотоэлектрических модулей был выбран беспилотный летательный аппарат коптерного типа – FIMI X8 SE (рис. 3).



Рис. 3 – Квадрокоптер FIMI X8 SE (<https://www.fimi.com>)

Достоинствами квадрокоптера FIMI X8 SE являются: бесколлекторный тип двигателей, что позволяет существенно увеличить его надёжность и срок активного использования, встроенная камера с разрешением 12 МП (съёмка Quad HD 2716x1524 пикселей 60 к/с, фото - 4000x3000 пикселей) при невысокой стоимости. Также данный аппарат имеет трёхосевой механический подвес, выполняющий роль стабилизатора для улучшения качества фото и плавности

видео, что является важным для решения задач, связанных с техническим зрением.

Для реализации процедуры машинного зрения была выбрана свёрточная нейронная сеть Fast R-CNN с архитектурой Inception v2 (COCO). Процедуру обучения можно представить в виде функциональной блок-схемы (рис. 4)/

Для обучения нейронной сети были использованы библиотеки TensorFlow, Keras, OpenCV, Numpy. Первые две – TensorFlow и OpenCV – реализуют алгоритмы машинного обучения и технического зрения. Библиотека Keras необходима для регулирования процесса обучения, а Numpy – для работы с большими массивами данных и матрицами [15]. После подключения необходимых библиотек, изображения из обучающей выборки приводятся к единому размеру и формату. Для обучения нейронной сети распознаванию определённых объектов, проводится аннотирование изображений, то есть выполняется разметка областей на которых изображены фотоэлектрические модули (рис. 5). Для разметки был использован инструмент LabelImg.

После проведения процедуры аннотирования, создаются файлы с переменными, уникальными цифровыми кодами «понятными» для нейронной сети. Далее идёт – создание самой нейронной сети, путём последовательного добавления необходимых слоёв, проверка сети на ошибки и сам процесс обучения, во время которого важно не дать нейронной сети переобучиться. После окончания процесса обучения следует сохранение файла с оптимальным количеством эпох, который необходим для дальнейшей работы.



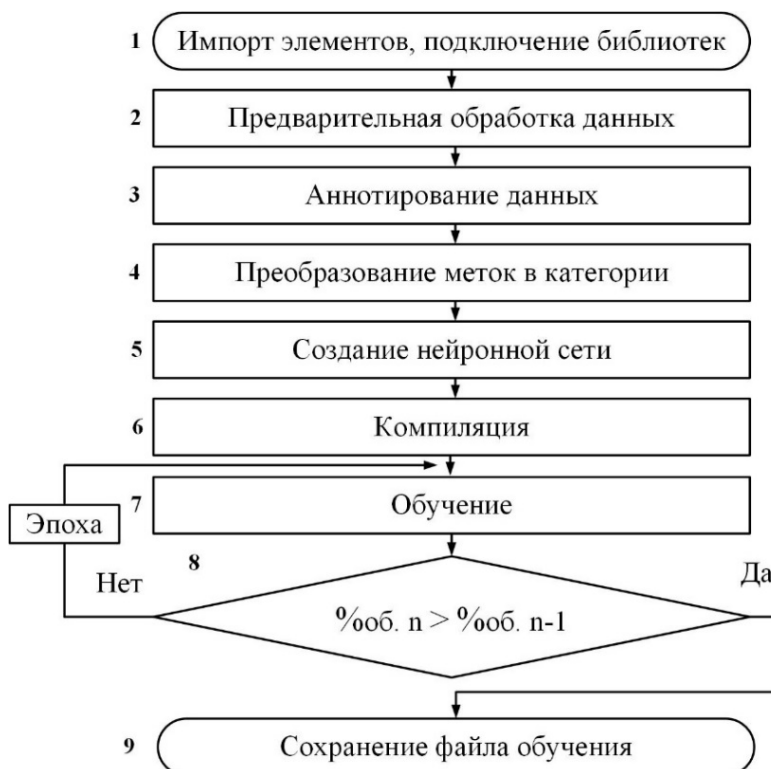


Рис. 4 – Функциональная блок-схема процедуры обучения нейронной сети (авторская разработка)



Рис. 5 – Пример аннотирования фото обучающей выборки (авторская разработка)

После того, как нейронная сеть была обучена, можно приступать непосредственно к детектированию фотоэлектрических модулей (рис. 6).

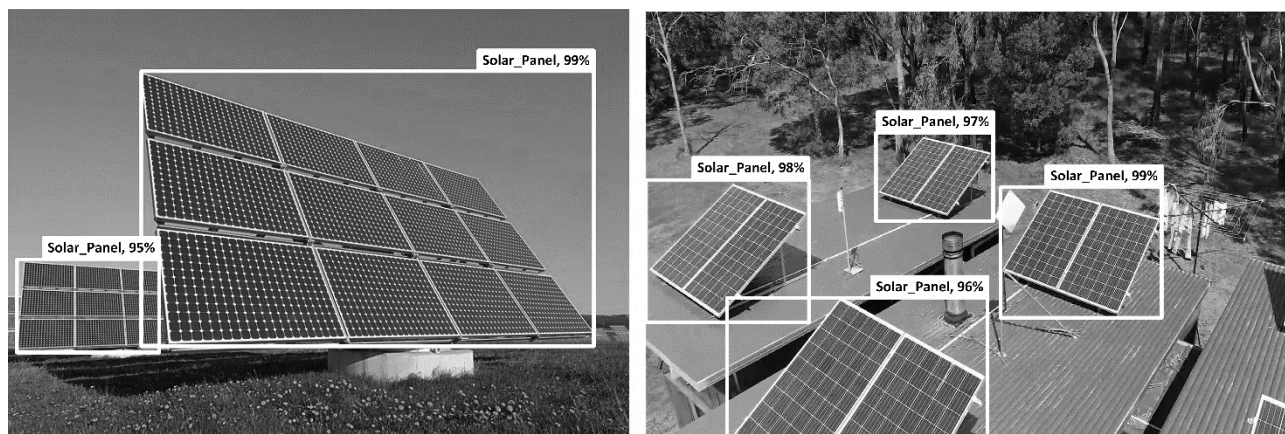


Рис. 6 – Пример результатов детектирования фотоэлектрических модулей (авторская разработка)

Как видно из данных, представленных на рис. 6, нейронная сеть успешно детектировала фотоэлектрические модули различного типа на тестовых изображениях, при этом точность составила 95% и более.

Следующим шагом является обнаружение затенённых (тени от элементов опорных конструкций, других модулей и т.д.), загрязнённых (птичий помёт, снег и т.д.) поверхности фотоэлектрических модулей (рис. 7).

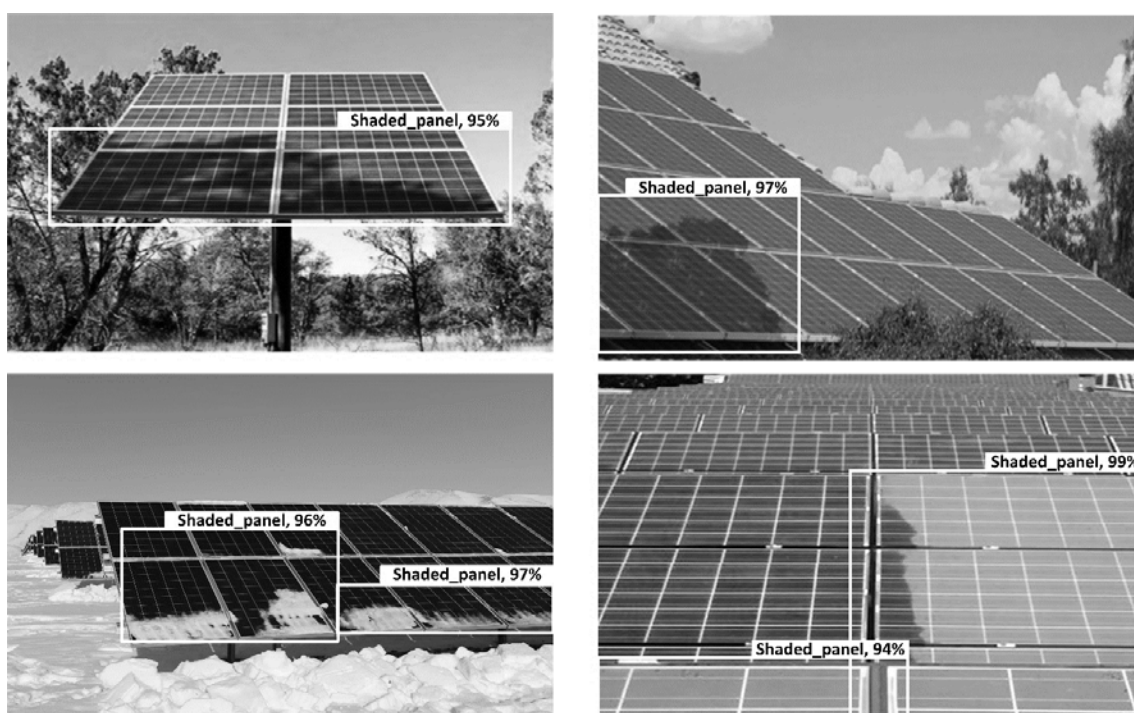


Рис. 7 – Пример результатов детектирования затенённых, загрязнённых и повреждённых фотоэлектрических модулей (авторская разработка)

Как видно из данных, представленных на рис. 7, нейронная сеть успешно обнаружила загрязнения и затенения поверхности фотоэлектрических модулей. Точность обнаружения составляет 94% и более, а для её повышения достаточно увеличить количество фото в обучающей выборке.

Таким образом, автоматизированный комплекс позволит оперативно отслеживать состояние фотоэлектрических модулей, расположенных на территории СЭС, минимизировать воздействие человеческого фактора и затраченного времени. Оценочные расчёты внедрения данного решения на солнечных электростанциях, показывают, что использование предлагаемого комплекса позволит увеличить их энергетическую эффективность на 2%.

*Работа была выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонда содействия инновациям).*

#### **Библиографический список**

1. Ciani L. Design and implementation of a on-board device for photovoltaic panels monitoring / L. Ciani, L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, M. Rossi // Proceedings of the 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – 2013, P. 1599–1604.
2. Чуйков, Р. Обзор отрасли и перспективы развития солнечной энергетики в России / Р. Чуйков // Альтернативный киловатт. – 2010. – № 2.
3. Одерова, Е. О. Солнечная энергетика-будущее планеты / Е. О. Одерова, В. А. Глебов // Агрофорсайт. – 2019. – № 1(19). – С. 9.
4. Nunes Pereira A. Architecture of information system for monitoring of photovoltaic plants / A. Nunes Pereira, P. Tome, P.M. Costa, J. Pascoal // Proceedings of the 2014 Ninth Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). – 2014, P. 1–6.
5. Кузнецов, П. Н. Автоматизированный комплекс интеллектуального мониторинга солнечной электростанции / П. Н. Кузнецов, Д. Ю.

- Котельников // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 6. – С. 39-45. – DOI 10.18635/2071-2219-2021-6-39-45.
6. Заголило С.А. Перспективы использования солнечной энергетики в децентрализованных энергорайонах Крайнего Севера / С.А. Заголило, А.С. Семёнов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. – № 11-3. – С. 333-336.
  7. Никитова, А.К. БПЛА в топливно-энергетическом комплексе и экологическом мониторинге / А.К. Никитова, В.В. Ключков // Энергия: экономика, техника, экология, 2013. – № 2. – С. 34-41.
  8. Kim K.A. Photovoltaic AC parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection / K.A. Kim, P.T. Krein, G.-S. Seo, B.-H. Cho // Proceedings of the 2013 Twenty Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2013, P. 109–115.
  9. Ramspeck K. In-line thermography for reliable hot spot detection and process control / K. Ramspeck, S. Schenk, D. Duphorn, A. Metz, M. Meixner // Energy Procedia. – 2014. – Vol 55. P. 113–140.
  10. Mellit A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review / A. Mellit, S.A. Kalogirou // Prog. Energy Combust. – 2008. – Vol 34. P. 574–632.
  11. Mellit A. Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module / A. Mellit, S. Saglam, S.A. Kalogirou // Renewable Energy. – 2013. – Vol 60. P. 71–78.
  12. Velilla E. Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models / E. Velilla, J. Valencia, F. Jaramillo // Solar Energy. – 2014. – Vol 107. P. 260–271.
  13. Кузнецов, П. Н. Автоматизированный технологический комплекс мониторинга и диагностики виноградников / П. Н. Кузнецов, Д. Ю.

- Котельников // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 4(56). – С. 16-23.
14. Котельников, Д. Ю. Применение искусственного интеллекта в ядерной энергетике / Д. Ю. Котельников, П. Н. Кузнецов // Энергетические установки и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 4. – С. 5-11.
15. Сирота, А.А. Анализ алгоритмов поиска объектов на изображениях с использованием различных модификаций сверточных нейронных сетей / А.А. Сирота, Е.Ю. Митрофанова, Милованова А.И. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2019. – № 3. – С. 123-137.

*Оригинальность 96%*