



Научная статья
УДК 631.67:004.9
doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_662

ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОФИТОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ: ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ И АСПЕКТЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Н.И. Лебедь, К.Е. Токарев

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Авторами проведена классификация современных подходов к использованию компьютерных средств искусственного интеллекта и машинного обучения для решения проблем повышения продуктивности агрофитоценозов, выделены и обоснованы наиболее перспективные направления. Проведен SWOT-анализ использования подходов к управлению продуктивностью агросистем с использованием искусственного интеллекта, с актуализацией возможностей и угроз. Предложена система оперативного мониторинга агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов аэрофотоснимков для последующего классификации агрофитоценозов, составления их тепловых карт и принятия решений компьютерной системой на основе полученных данных в условиях точного земледелия. Разработана блок-схема процесса обучения нейронной сети для предлагаемой авторами системы анализа снимков дистанционного зондирования и спутникового мониторинга. Предлагаемые алгоритмы и инструментальные средства их компьютерной реализации позволили разработать ряд программных систем, предназначенных для классификации аэрофотоснимков посевов сельскохозяйственных культур, идентификации и анализа их состояния с возможностью локализации экстрагированных участков, на основе WEB-интерфейса с возможностью мониторинга посевов в режиме онлайн, в том числе с использованием мобильных устройств.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, искусственный интеллект, нейросетевые алгоритмы, агрофитоценоз, продуктивность, сверточные нейронные сети

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20041, <https://rscf.ru/project/22-21-20041/> и Волгоградской области.

Original article

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF AGROPHYTOCENOSES IN PRECISION FARMING USING NEURAL NETWORK ALGORITHMS OF DEEP LEARNING: JUSTIFICATION OF APPLICATION AND ASPECTS OF COMPUTER IMPLEMENTATION

N.I. Lebed, K.E. Tokarev

Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russia

Abstract. The authors classify modern approaches to the use of computer tools of artificial intelligence and machine learning to solve problems of increasing the productivity of agrophytocenoses, identify and justify the most promising areas. A SWOT analysis of the use of approaches to managing the productivity of agricultural systems using artificial intelligence, with the actualization of opportunities and threats, was carried out. A system of operational monitoring of agrocenoses is proposed using satellite and aerial photographs obtained from unmanned aerial vehicles for subsequent classification of agrophytocenoses, compilation of their heat maps and decision-making by a computer system based on the data obtained in precision agriculture. A block diagram of the neural network learning process for the system of analysis of remote sensing and satellite monitoring images proposed by the authors has been developed. The proposed algorithms and tools for their computer implementation made it possible to develop a number of software systems designed to classify aerial photographs of crops, identify and analyze their condition with the possibility of localization of extracted plots, based on a WEB interface with the ability to monitor crops online, including using mobile devices.

Keywords: digital agriculture, artificial intelligence, neural network algorithms, agrophytocenosis, productivity, convolutional neural networks

Acknowledgments: the article is prepared with the financial support of the Russian Science Foundation, project № 22-21-20041, <https://rscf.ru/project/22-21-20041/> and Volgograd region.

Введение. В России осуществляется целый ряд государственных программ для развития современного высокоэффективного сельского хозяйства: Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения РФ до 2030 года, Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2025 годы («Сельскохозяйственная техника и оборудование»), «Селекция и семеноводство»), Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации, Ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство. Одной из основных задач программ является переход к цифровому сельскому хозяйству, точному земледелию, активному использованию цифровых технологий. По предварительным оценкам, это позволит к 2024 г. увеличить вклад сельского хозяйства в экономику страны до 5,9 трлн руб., повысить экспортную выручку сельскохозяйственных организаций до 45 млрд долл., существенно повысить эффективность аграрного производства.

Особое значение среди данных технологий приобретают технологии искусственного интеллекта (ИИ). Искусственный интеллект играет важную роль в управлении жизненным циклом информации, включающим обработку данных, управление информационными потоками и знаниями [1, 2].

В настоящее время при принятии решений агропроизводитель располагает недоступными ранее источниками информации: спутниковые и аэрофотоснимки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), показания датчиков влажности, наземных метеостанций и др.

На основании анализа литературных данных [3], а также собственных исследований нами выделены актуальные направления использования подходов к управлению продуктивностью агрофитоценозов с использованием искусственного интеллекта (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, применение искусственного интеллекта охватывает все уровни планирования сельскохозяйственного производства, позволяя осуществлять высокоточный мониторинг, а также принимать самостоятельно оперативные решения, обеспечивая автономное управление продуктивностью агрофитоценозов.

Следует выделить наиболее перспективные подходы применения искусственного интеллекта в АПК: – оперативный мониторинг агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов данных [10]. Такой подход позволяет в режиме реального времени

производить поиск, обработку и визуализацию проблемных участков посевов сельскохозяйственных культур в условиях точного земледелия с помощью специализированных библиотек с последующим увеличением точности обработки информации;

– мониторинг за состоянием питательных сред/растительного или животного объекта в условиях *in vitro* для предупреждения единичного и массового заражения с использованием технологий компьютерного зрения. Указанный мониторинг крайне необходим в случае предотвращения бактериальной или микотической инфекции при биотехнологических способах ведения сельского хозяйства, так как такая инфекция в короткие сроки способна поразить весь материал растительных клеток или тканей, что приведет к отбраковке ряда образцов и снижению выхода готовой продукции растениеводства. Кроме этого, в худшем случае не исключено заражение бактериальной или микотической инфекцией всей стерильной камеры или лабораторного помещения, что не позволит реализовать технологию микрочлониального размножения растений до полного решения проблемы контаминации и приведет к производственным потерям; – предиктивная аналитика в совокупности с инструментами инвариантного анализа данных при



управлении сельскохозяйственными предприятиями различной мощности. Такой подход обеспечит эффективное управление производственными процессами предприятия за счет прогнозирования поведения системы, а также расширение вариантов решения проблем самой системой за счет накопления данных от обучения при мониторинге действий людей-специалистов и прошлых событий.

Однако, несмотря на безусловные преимущества применения современных подходов применения искусственного интеллекта в АПК [7, 9], наблюдаются

слабые стороны, а также угрозы при внедрении таких систем (табл. 2).

Методы или методология проведения исследования. Наиболее перспективным методом применения подхода к управлению продуктивностью агрофитоценозов посредством ИИ является использование искусственных нейронных сетей, в частности сверточных сетей (Convolutional Neural Networks — CNN), относящихся к третьему поколению нейромоделей. Сверточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN) и глубинные

сверточные нейронные сети (deep convolutional neural networks, DCNN) сильно отличаются от других видов сетей. Обычно они используются для обработки изображений, реже для аудио.

Такой метод также применим при оперативном мониторинге агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов аэрофотоснимков для последующего классифицирования агроценозов, составления их тепловых карт и последующего принятия решений системой на основе полученных данных.

Таблица 1. Направления использования подходов к управлению продуктивностью агросистем с использованием искусственного интеллекта
Table 1. Directions for using approaches to managing the productivity of agricultural systems using artificial intelligence

| Спутниковый мониторинг, применение БПЛА, сенсорика | Видео- и аудиоанализ | Автоматизация |
|---|--|--|
| Диагностика патологий и заболеваний сельскохозяйственных растений и животных; мониторинг почв на оптимальное количество микроэлементов, необходимых для выращивания качественных сельскохозяйственных культур; прогнозирование природно-климатических условий и принятие на основании этого соответствующих мер; оперативный мониторинг агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) аэрофотоснимков для последующего классифицирования агроценозов, составления их тепловых карт и последующего принятия решений системой на основе полученных данных. | Мониторинг за деятельностью животных с целью минимизации их стресса и принятия оперативных мер воздействия при возникновении критических ситуаций; автоматизация сельскохозяйственных технических систем, позволяющая в режиме реального времени принимать соответствующие меры при резкой смене природно-климатических условий; мониторинг за состоянием питательных сред/растительного или животного объекта в условиях in vitro для предупреждения единичного и массового заражения с использованием технологий компьютерного зрения. | Техническая автоматизация сельскохозяйственных процессов и явлений, позволяющая при накоплении соответствующих данных оптимизировать выполняемые типовые процедуры, ускорить посевные и уборочные работы, ликвидировать человеческий тяжелый ручной труд; обработка растений и животных веществами, опасными для здоровья и жизни человека; урбанизированное растениеводство в исполнении вертикальных высокотехнологичных полностью автоматизированных ферм, находящихся внутри зданий на территории городов; система прогнозирования рисков и диагностики производственных процессов при управлении сельскохозяйственными предприятиями различной мощности на основании накопленных знаний системой о действии в аналогичных ситуациях человеком-специалистом. |

Таблица 2. SWOT-анализ использования подходов к управлению продуктивностью агросистем с использованием искусственного интеллекта
Table 2. SWOT analysis of the use of management approaches productivity of agricultural systems using artificial intelligence

| Сильные стороны | Слабые стороны |
|---|--|
| Повышение эффективности труда в организациях сельского хозяйства, использующих технологии ИИ. | Необходимость продолжительных исследований и значительных инвестиций в разработку технологий ИИ для сельского хозяйства. |
| Повышение эффективности принимаемых управленческих решений, а также повышение уровня знаний и доступа информации. | Длительность выхода технологий ИИ на рынок, сложность определения коммерческой эффективности данных технологий. |
| Повышение привлекательности отрасли для молодого поколения кадров. | Необходимость обработки огромных объемов данных, энергетических затрат и дорогостоящего цифрового оборудования. |
| Возможности | Угрозы |
| Привлечение выпускников вузов работать в сфере АПК, не уезжая из города. Достижимо развитием урбанизированного растениеводства внутри отапливаемых вертикальных ферм внутри многоэтажных зданий городов, а также работе с удаленным доступом. | Отсутствие методических рекомендаций по внедрению цифровой интеллектуальной техники в отрасли АПК. Отсутствие системы подготовки кадров, способных осваивать цифровые технологии в сельском хозяйстве. |
| Существенный рост прогресса в развитии технологий ИИ в сельском хозяйстве на основе машинного обучения, использования больших данных, нейронных сетей и т.д. | Низкий энтузиазм сельхозтоваропроизводителей при переходе к новым технологиям ведения сельского хозяйства из-за консервативного мышления. Отсутствие отечественной компонентной базы. |

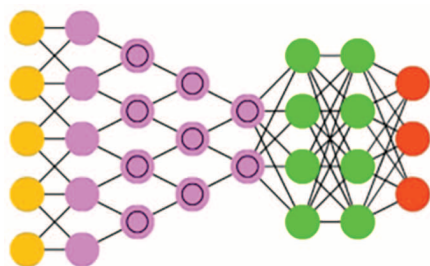


Рисунок 1. Логическая структура сверточной сети
Figure 1. Logical structure of the convolutional network

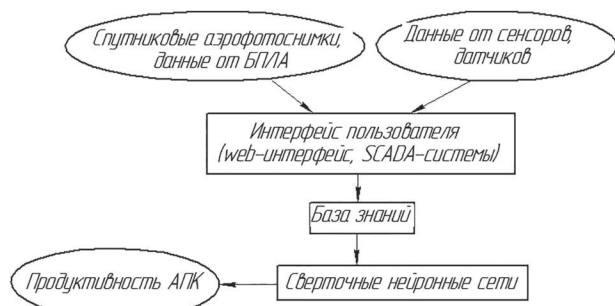


Рисунок 2. Схема системы оперативного мониторинга агроценозов
Figure 2. Scheme of the operational system monitoring of agroecosystems

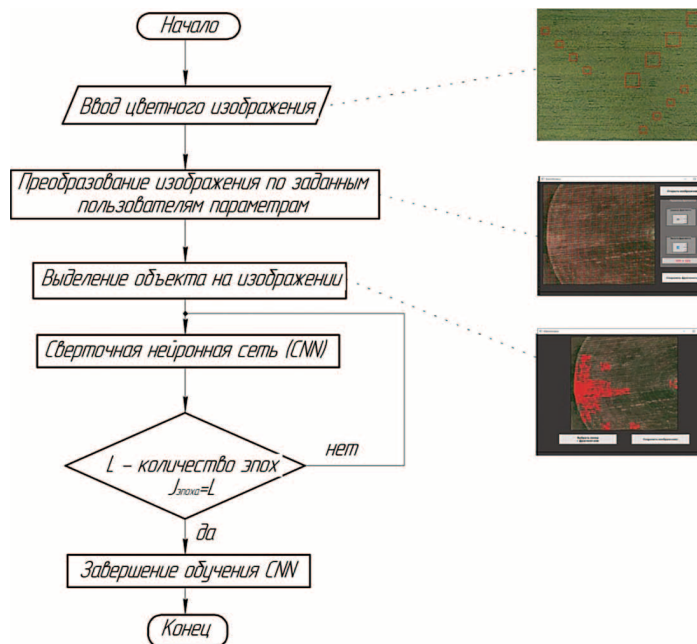


Рисунок 3. Предлагаемый алгоритм (блок-схема) обучения CNN (на примере обработки спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов аэрофотоснимков для анализа и классификации агроценозов)
Figure 3. The proposed algorithm (flow diagram) for training CNN (on the example of processing satellite and aerial photographs obtained from unmanned aerial vehicles for the analysis and classification of agroecosystems)



Логическая структура сверточной сети представлена на рисунке 1.

Выбор сверточной нейронной сети обусловлен тем, что на данный момент у данной разновидности нейронных сетей один из лучших алгоритмов распознавания и классификации изображений. По сравнению с полносвязной нейронной сетью у нее гораздо меньше количество настраиваемых весов, а также есть возможность эффективного применения для извлечения информации из больших или неточных данных, выявления основных признаков и тенденций, которые не могут быть распознаны человеком и прочими методами глубокого обучения.

Результаты и обсуждение. В ходе исследования проблем повышения биопродуктивности предложен алгоритм оперативного мониторинга агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов аэрофотоснимков для последующего классифицирования агроценозов, составления их тепловых карт и последующего принятия решений системой на основе полученных данных (рис. 2).

Предлагаемый алгоритм сбора информации с датчиков и сенсоров представляет собой комбинированную сложную техническую систему, включающую элементы автоматизации нижнего (датчики, сенсоры), среднего (программируемые микроконтроллеры для приема-передачи и предварительной обработки данных), верхнего (SCADA, HM) уровней.

Блок-схема процесса обучения нейронной сети для предлагаемой авторами системы [5-8] анализа снимков дистанционного зондирования и спутникового мониторинга представлена на рисунке 3. В качестве примера работы системы с изображениями представлены реальные спутниковые фотографии агроценозов.

Предлагаемый алгоритм может оказаться полезными при решении задач восстановления характеристик подстилающей земной поверхности по гиперспектральным спутниковым данным.

Выводы. В ходе исследований проведена классификация современных подходов использования искусственного интеллекта при управлении продуктивностью агросистем, выделены и обоснованы наиболее перспективные направления:

- оперативный мониторинг агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) данных;
- мониторинг за состоянием питательных сред/растительного или животного объекта в условиях *in vitro* для предупреждения единичного и массового заражения с использованием технологий компьютерного зрения;
- предиктивная аналитика в совокупности с инструментами инвариантного анализа данных при управлении сельскохозяйственными предприятиями различной мощности.

Проведен SWOT-анализ использования подходов к управлению продуктивностью агросистем с использованием искусственного интеллекта, с актуализацией возможностей и угроз.

Предложена система оперативного мониторинга агроценозов с использованием спутниковых и полученных с беспилотных летательных аппаратов аэрофотоснимков для анализа и классификации

агроценозов, составления их тепловых карт и последующего принятия решений системой на основе полученных данных. Разработана схема системы, включающая в себя для сбора информации элементы автоматизации нижнего (датчики, сенсоры), среднего (программируемые микроконтроллеры для приема-передачи и предварительной обработки данных), верхнего (SCADA, HM) уровней.

Предложена блок-схема процесса обучения нейронной сети для предлагаемой авторами системы анализа снимков дистанционного зондирования и спутникового мониторинга. Предлагаемые схема и алгоритм позволили разработать ряд программных систем, предназначенных для классификации аэрофотоснимков посевов сельскохозяйственных культур, идентификации и анализа их состояния с возможностью локализации экстрагированных участков, на основе WEB-интерфейса с возможностью мониторинга посевов в режиме онлайн, в том числе с использованием мобильных устройств.

Список источников

1. Алферьев Д.А. Искусственный интеллект в сельском хозяйстве // АгроЗооТехника. 2018. Т. 1. № 4. С. 6-13.
2. Токарев К.Е., Лебедь Н.И., Кузьмин В.А., Чернявский А.Н. Теория и технологии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования // Известия Нижегородского государственного университета: наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 4 (60). С. 433-448.
3. Годунов А.И., Балаян С.Т., Егоров П.С. Сегментация изображений и распознавание объектов на основе технологии сверточных нейронных сетей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 62-73.
4. Поленов Д.Ю. Искусственный интеллект в регулировании продуктивности объектов сельского хозяйства // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (68). С. 46-51.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019666234 Российской Федерации. Многослойная нейронная сеть глубокого обучения для анализа аэрофотоснимков сельскохозяйственных культур / К.Е. Токарев, В.А. Кузьмин, А.Ю. Руденко, М.П. Процюк; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВолГАУ. № 2019665010; заявл. 25.11.2019; опубл. 06.12.2019.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020663063 Российской Федерации. Программа для сегментации изображений посевов сельскохозяйственных культур по цифровым аэрофотоснимкам с БЛА / К.Е. Токарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВолГАУ. № 2020662104; заявл. 12.10.2020; опубл. 22.10.2020.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021610501 Российской Федерации. Кроссплатформенная мобильная система идентификации и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур с WEB-интерфейсом / К.Е. Токарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВолГАУ. № 2020667401; заявл. 23.12.2020; опубл. 14.01.2021.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020666192 Российской Федерации. Программа для расчета режимов орошения и оперативного планирования поливов в режиме реального времени / К.Е. Токарев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВолГАУ. № 2020665251; заявл. 24.11.2020; опубл. 04.12.2020.
9. Скворцов Е.А., Набоков В.И., Некрасов К.В., Скворцова Е.Г., Кротов М.И. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Аграрный вестник Урала. 2019. № 8 (187). С. 91-98.
10. Скворцов Е.А. Перспективы применения технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве региона // Экономика региона. 2020. Т. 16. Вып. 2. С. 563-576.

11. Cheng, G., Wang, G., Han J. (2022). IS Net: Towards Improving Separability for Remote Sensing Image Change Detection. *In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-11. Art no. 5623811. doi:10.1109/TGRS.2022.3174276

References

1. Alfer'ev, D.A. (2018). Iskusstvennyi intellekt v sel'skom khozyaistve [Artificial intelligence in agriculture]. *AgroZoo-Tekhnika* [Agricultural and livestock technology], vol. 1, no. 4, pp. 6-13.
2. Tokarev, K.E., Lebed', N.I., Kuz'min, V.A., Chernyavskii, A.N. (2020). Teoriya i tekhnologii upravleniya orosheniem sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove informatsionnykh tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenii i matematicheskogo modelirovaniya [Theory and technologies of crop irrigation management based on information technologies of decision support and mathematical modeling]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex: science and higher vocational education], no. 4 (60), pp. 433-448.
3. Godunov, A.I., Balayan, S.T., Egorov, P.S. (2021). Segmentatsiya izobrazhenii i raspoznavanie ob'ektov na osnove tekhnologii svertochnykh neuronnykh setei [Image segmentation and object recognition based on convolutional neural networks technology]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], no. 3, pp. 62-73.
4. Polenov, D.Yu. (2021). Iskusstvennyi intellekt v regulirovani produktivnosti ob'ektov sel'skogo khozyaistva [Artificial intelligence in regulating the productivity of agricultural objects]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Vestnik of Voronezh State Agrarian University], no. 1 (68), pp. 46-51.
5. Tokarev, K.E., Kuzmin, V.A., Rudenko, A.Yu., Protsyuk, M.P. (2019). Mnogosloynnaya neuronnaya set' glubokogo obucheniya dlya analiza aehrofofotosnimkov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Multilayer deep learning neural network for the analysis of aerial photographs of agricultural crops]. *Certificate of registration of the computer program No. 2019666234 Russian Federation*.
6. Tokarev, K.E. (2020). Programma dlya segmentatsii izobrazhenii posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po tsifrovym aehrofofotosnimkam s BLA [A program for image segmentation of agricultural crops using digital aerial photographs from UAVs]. *Certificate of registration of the computer program No. 2020663063 Russian Federation*.
7. Tokarev, K.E. (2021). Krossplatformennaya mobil'naya sistema identifikatsii i analiza sostoyaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur s WEB-interfejsom [Cross-platform mobile system for identification and analysis of the state of crops of agricultural crops with a WEB-interface]. *Certificate of registration of the computer program No. 2021610501 Russian Federation*.
8. Tokarev, K.E. (2020). Programma dlya rascheta rezhimov orosheniya i operativnogo planirovaniya polivov v rezhime real'nogo vremeni [Program for calculating irrigation regimes and operational planning of irrigation in real time]. *Certificate of registration of the computer program No. 2020666192 Russian Federation*.
9. Skvortsov, E.A., Nabokov, V.I., Nekrasov, K.V., Skvortsova, E.G., Krotov, M.I. (2019). Primenenie tekhnologii iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaistve [Application of artificial intelligence technologies in agriculture]. *Agrarnyi vestnik Urala* [Agrarian bulletin of the Urals], no. 8 (187), pp. 91-98.
10. Skvortsov, E.A. (2020). Perspektivy primeneniya tekhnologii iskusstvennogo intellekta v sel'skom khozyaistve regiona [Prospects for the use of artificial intelligence technologies in agriculture in the region]. *Ekonomika regiona* [Economy of regions], vol. 16, no. 2, pp. 563-576.
11. Cheng, G., Wang, G., Han J. (2022). IS Net: Towards Improving Separability for Remote Sensing Image Change Detection. *In IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-11. Art no. 5623811. doi: 10.1109/TGRS.2022.3174276

Информация об авторах:

Лебедь Никита Игоревич, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и энергетических систем, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8709-6089>, Scopus ID: 56585966900, Researcher ID: E-8723-2017, nik8872@yandex.ru

Токарев Кирилл Евгеньевич, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования и информатики, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5548-5637>, Scopus ID: 57202505742, Researcher ID: ABA-6440-2020, tke.vgsha@mail.ru

Information about the authors:

Nikita I. Lebed, doctor of technical sciences, professor of the department of power supply and energy systems, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8709-6089>, Scopus ID: 56585966900, Researcher ID: E-8723-2017, nik8872@yandex.ru

Kirill E. Tokarev, candidate of economic sciences, associate professor, associate professor of the department of mathematical modeling and informatics, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5548-5637>, Scopus ID: 57202505742, Researcher ID: ABA-6440-2020, tke.vgsha@mail.ru