

И.Г. Галиуллин, Р.Ф. Сабилов, Д.Е. Чикрин, А.А. Егорчев

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС СЕГМЕНТАЦИИ
ПРЕПЯТСТВИЙ С АРХИТЕКТУРОЙ U-NET ДЛЯ АВТОНОМНОЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ**

Сельское хозяйство играет фундаментальную роль в обеспечении продовольственной безопасности и удовлетворении потребностей населения в пищевых продуктах. Оптимизация производства сельскохозяйственных культур и повышение эффективности работы являются неотъемлемыми задачами для современного сельского хозяйства. В связи с этим все больше внимания уделяется разработке и применению автономных сельскохозяйственных технических систем, способных автоматизировать и оптимизировать различные производственные процессы. Однако эффективность автономных систем ограничивается недостаточным развитием систем обнаружения препятствий и алгоритмов принятия решений. Когда машинно-тракторные агрегаты и другие самоходные машины сталкиваются с препятствиями на своем пути, точное и быстрое распознавание этих препятствий играет решающую роль в принятии соответствующих решений для избежания аварийных ситуаций. В данной статье представлен программно-аппаратный комплекс сегментации препятствий с использованием архитектуры U-Net, разработанный с целью преодоления данных ограничений в автономных сельскохозяйственных технических системах. Архитектура U-Net известна своей способностью к высокоточному распознаванию объектов на изображениях, что делает ее привлекательным выбором для систем машинного зрения в условиях сельского хозяйства. Представленный комплекс обладает высокой производительностью и позволяет проводить сегментацию препятствий типа столб, дерево и кустарниковая растительность в режиме реального времени во время движения машинно-тракторных агрегатов по заданной траектории. Это обеспечивает точное принятие решений и избежание аварийных ситуаций, что существенно повышает эффективность и безопасность работы автономных систем в условиях сельскохозяйственного производства. Проведенные испытания подтвердили эффективность и применимость разработанных решений в реальных сельскохозяйственных условиях. Представленный в статье программно-аппаратный комплекс сегментации препятствий с архитектурой U-Net открывает новые возможности для автономной сельскохозяйственной техники и способствует повышению производительности и эффективности сельского хозяйства. Это важный шаг в развитии современных технологий сельского хозяйства и содействует применению автономных систем для улучшения сельскохозяйственного производства и повышения продуктивности.

Машинно-тракторный агрегат; нейронная сеть; сегментация; распознавание препятствий; алгоритм; система технического зрения; автономный трактор; U-Net.

I.G. Galiullin, R.F. Sabirov, D.E. Chikrin, A.A. Egorchev

**SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR OBSTACLE SEGMENTATION
WITH U-NET ARCHITECTURE FOR AUTONOMOUS AGRICULTURAL
MACHINERY**

Agriculture plays a fundamental role in ensuring food security and meeting the population's needs for food products. Optimization of agricultural crop production and increasing efficiency are essential tasks for modern agriculture. In this regard, more attention is being given to the development and implementation of autonomous agricultural systems capable of automating and optimizing various production processes. However, the effectiveness of autonomous systems is limited by the insufficient development of obstacle detection systems and decision-making algorithms. When agricultural machinery and other autonomous vehicles encounter obstacles in their path, precise and rapid recognition of these obstacles plays a decisive role in making appropriate decisions to avoid accidents. This article presents a software-hardware complex for obstacle seg-

mentation using the U-Net architecture, designed to overcome these limitations in autonomous agricultural systems. The U-Net architecture is renowned for its ability to accurately recognize objects in images, making it an attractive choice for machine vision systems in agricultural conditions. The presented complex boasts high performance and enables real-time obstacle segmentation, including columns, trees, and shrubbery, during the movement of agricultural machinery along a designated trajectory. This ensures precise decision-making and avoidance of accidents, significantly enhancing the efficiency and safety of autonomous systems in agricultural production. Field tests have confirmed the effectiveness and applicability of the proposed solutions under real agricultural conditions. The presented software-hardware complex with U-Net architecture opens up new possibilities for autonomous agricultural technology, promoting increased productivity and efficiency in agriculture. It represents a significant step in the development of modern agricultural technologies and contributes to the use of autonomous systems to enhance agricultural production and improve productivity.

Machine-tractor unit; neural network; segmentation; obstacle recognition; algorithm; computer vision system; autonomous tractor; U-Net.

Ведение. Основной задачей развития сельскохозяйственного производства в нынешних условиях является цифровая трансформация процессов по эксплуатации сельскохозяйственной техники, как самоходной, так и сельскохозяйственных машин. Повсеместное применение различных разработанных устройств параллельного вождения привело к значительному снижению нагрузки на операторов машинно-тракторных агрегатов, но и внесла значительное изменение в процесс их работы в поле. Возможность проведения необходимых технологических работ в растениеводстве в период проведения сезонных полевых работ круглосуточно привела также и к определенным трудностям таким как снижение внимания механизаторов, в отдельных случаях – к засыпанию [1].

Современные разработки устройств параллельного вождения в сельскохозяйственном производстве не имеют функций активного определения и распознавания препятствий, а также алгоритмов их объезда [2].

Существующие разработки и исследования в области распознавания препятствий и построения алгоритмов их объезда, а также принятия решений в основном предназначены для автомобилей и не учитывают специфику проведения полевых работ в условиях отсутствия четких границ траектории движения, разметки, дорожных знаков.

Целью исследования является своевременное определение препятствий машинно-тракторных агрегатов с автономным управлением.

Задачами являются: Определение наличия препятствий на траектории движения машинно-тракторного агрегата с учетом габаритных характеристик трактора и присоединённого к нему сельскохозяйственного орудия, сегментация препятствия по видам, корректирование маршрута с целью построения траектории объезда препятствия и возвращения его на линию первоначального движения, т.е. возвращение на построенную ранее линию параллельно движения с целью минимизации потерь при проведении технологических операций при производстве продукции растениеводства.

Методы и результаты исследования. В условиях работы на поле, основными препятствиями, с которыми сталкивается сельскохозяйственная техника, являются столбы, деревья и кустарниковые насаждения. Эти препятствия могут создавать ряд проблем и вызывать опасность при выполнении различных операций в сельском хозяйстве. Столбы, такие как электрические столбы или заборы, могут ограничивать свободу перемещения сельскохозяйственной техники. При неправильном управлении или отсутствии достаточной видимости, столбы могут быть повреждены или даже повалены, что может привести к серьезным последствиям для оборудования, оператора и окружающей среды.

Деревья и кустарниковые насаждения также представляют определенные проблемы на поле. Они могут создавать узкие проходы или перекрыть доступ к определенным участкам. Для сельскохозяйственной техники может быть сложно маневрировать вокруг деревьев и кустарников, особенно если они расположены плотно или имеют непредсказуемую форму.

Преодоление данных препятствий требует точного обнаружения и оценки их местоположения и размеров [3]. Это позволяет разработать соответствующие стратегии управления, чтобы избежать столкновений и минимизировать риски повреждений оборудования. Далее предлагается техническое решение, основанное на системе машинного зрения, которое может быть применено для обнаружения и классификации данных препятствий.

Учитывая технологические параметры использования сельскохозяйственных машин нами был разработан аппаратно-программный комплекс сегментации объектов препятствий, написан исходный код [4]. По итогам исследования [5–21] темы детектирования [22, 25] и классификации [23, 24] объектов на изображениях в рамках данной работы используется сверточная нейронная сеть U-Net.

Нейронная сеть U-Net представляет собой эффективную архитектуру глубокого обучения, специально разработанную для задач сегментации изображений. Ее особенностью является наличие пути прямого связывания между низкоуровневыми и высокоуровневыми признаками, что позволяет сети успешно извлекать и сохранять мелкие детали и контекст информации при работе с изображениями.

Применение нейронной сети U-Net позволяет достичь высокой точности и эффективности в обнаружении и классификации различных типов препятствий на поле, таких как столбы, деревья и кустарниковая растительность. Благодаря возможности работы в реальном времени, алгоритмы, основанные на U-Net, способны оперативно обрабатывать видеопотоки с камер и предоставлять точную информацию о препятствиях.

Для обработки изображений препятствий на поле, таких как столбы, деревья и кустарниковая растительность, была использована нейронная сеть с настроенной архитектурой U-Net, изображенной на рис. 1. Входные данные подавались в виде тензора размерностью $512 \times 512 \times 3$, представляющего собой изображение с трех каналов RGB.

Архитектура U-Net базируется на принципе энкодер-декодер. Энкодер и декодер состоят из последовательных операций свертки, нормализации и функций активации. Цель этих операций состоит в изменении разрешения карты признаков. В энкодере каждый уровень уменьшает ширину и высоту карты признаков с помощью слоя MaxPool, одновременно увеличивая ее глубину. Декодер, напротив, увеличивает ширину и высоту карты, но уменьшает глубину, используя слой ConvTranspose и объединение карты с соответствующим уровнем энкодера.

Такая архитектура U-Net позволяет эффективно извлекать и сохранять информацию о препятствиях на различных уровнях детализации. Это особенно полезно при распознавании и классификации различных типов препятствий на поле. Последовательность операций свертки, нормализации и активации помогает выявлять ключевые признаки и структуры препятствий, обеспечивая точность и надежность в процессе обработки изображений.

В целях реализации разработанного алгоритма был разработан и изготовлен аппаратно-программный комплекс [26, 27], включающий цветную матричную камеру промышленного сканирования JAI GO-5000C-PGE и вычислитель с характеристиками: ОЗУ 16 ГБ, видеопамять 6 ГБ NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti MAX-Q.

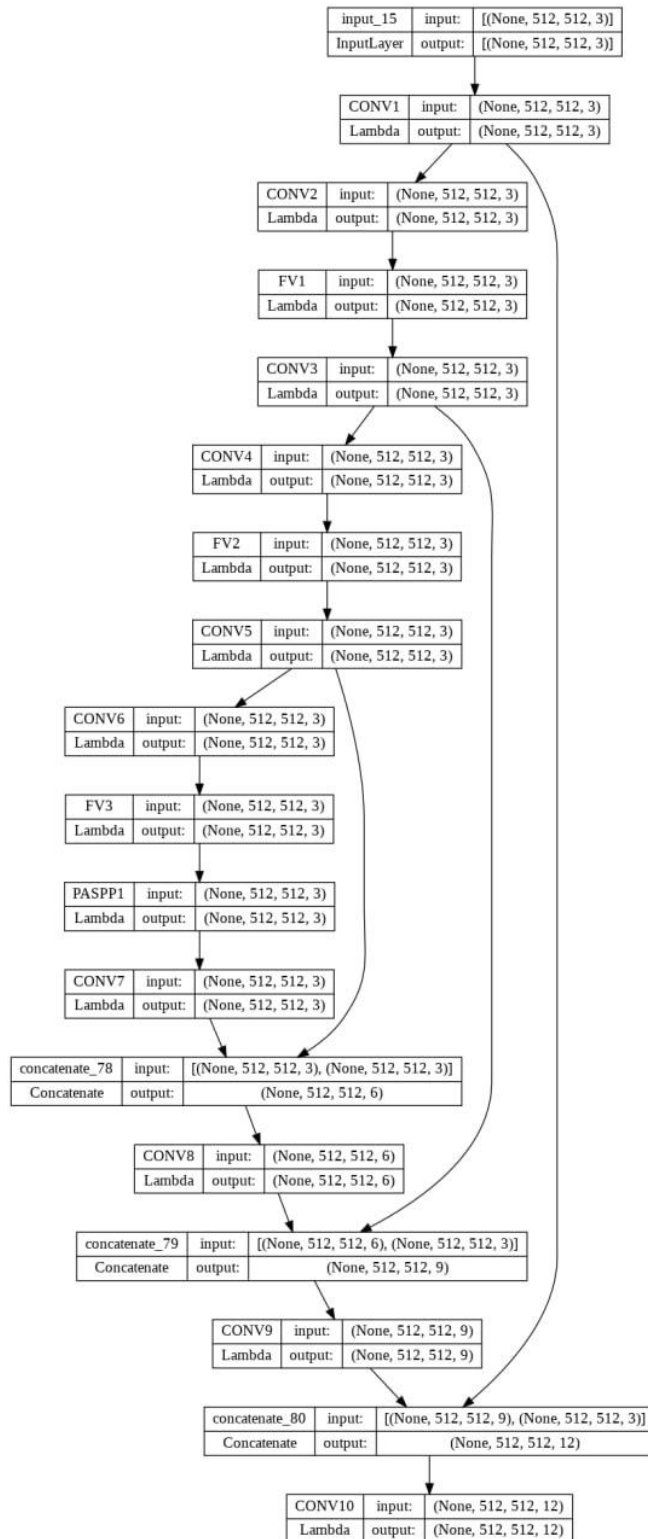


Рис. 1. Архитектура U-Net

Так же была разработана программа на языке Python с использованием нейронной сети. Обучение проводили на выборке из 10000 изображений, предварительно размеченных в целях сегментации препятствий типа столб, дерево и древесно-кустарниковая растительность. В рамках испытаний разработанного аппаратно-программного комплекса были проведены 10 групп экспериментов длительностью по 10 минут каждый по детектированию и классификации объектов классов «столб», «дерево», «кустарниковая растительность». При проведении испытаний были определены интервал времени обнаружения $\Delta T = 0,5$ с и интервал дальности обнаружения до $\Delta S = 40$ м. Результаты проведения испытаний распознавания (детектирование и классификация) представлены в табл. 1 и 2. За нулевую гипотезу принято отсутствие целевого объекта на кадре: ошибка I-го рода соответствует ложной тревоге, ошибка II-го рода – пропуску цели.

Таблица 1

Результаты детектирования объектов

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,82	2,09	1,81	1,26	1,90	2,81	2,80	1,84	2,33	2,32
II-го рода	3,46	2,82	3,19	2,97	2,45	3,24	2,97	2,83	3,52	2,25

Таблица 2

Результаты классификации объектов

Вид ошибки	Номер испытания									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-го рода	2,13	2,54	2,89	2,39	2,62	2,32	2,77	2,39	2,96	2,15
II-го рода	2,11	2,39	2,56	2,08	2,60	2,83	2,64	2,86	2,71	2,38

На рис. 2 представлен вид разработанного аппаратно-программного комплекса системы распознавания препятствий, установленного на автономный трактор ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ».



Рис. 2. Автономный трактор

На рис. 3–5 представлены результаты сегментации препятствий разработанной программы.

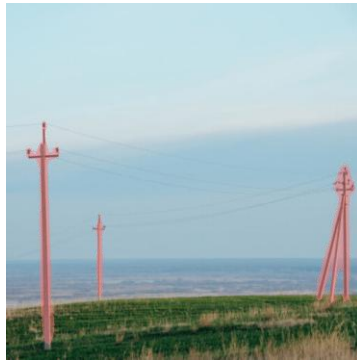


Рис. 3. Распознавание столбов



Рис. 4. Распознавание деревьев и кустарников

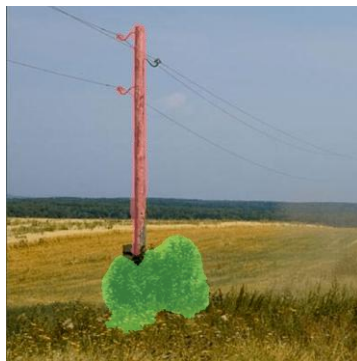


Рис. 5. Комплексное распознавание столба и куста

Выводы. В данной работе показана возможность применения нейронной сети архитектуры U-Net для сегментации и детектирования препятствий типа столб, дерево, куст и их комбинации.

Проведенное исследование выявило высокую эффективность её применения в задаче сегментации и детектировании - принятия решения по ошибке I-го рода для алгоритмов детектирования составляет в среднем 2,2%, классификации в среднем 2,5%; по ошибке II-го рода для алгоритмов детектирования в среднем 2,9%; классификации в среднем 2,5%.

В дальнейших исследованиях предлагается произвести дообучение на изображениях препятствий на грунте – камней, поваленных деревьев, а также пороговых препятствий и рвов.

Благодарность: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сабиров Р.Ф., Медведев В.М., Яруллин Ф.Ф., Шафигуллин Г.Т.* Нейросетевое моделирование технологических процессов в сельском хозяйстве // Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса: Матер. международной научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса, Казань, 07–08 июня 2019 г. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2019. – С. 182-184. – EDN WOJDMR.
2. *Чикрин Д.Е.* Универсальные комплекты автоматизации сельскохозяйственной техники для робо-тизированных агрохозяйств // Международная агропромышленная выставка «АгроВолга 2021». – 2021.
3. *Тормагов Т.А., Генералов А.А., Шавин М.Ю., Ранопорт Л.Б.* Задачи управления движением автономных колесных роботов в точном земледелии // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 1 (116). – С. 39-60. – DOI 10.17285/0869-7035.0083. – EDN GWCIQX.
4. Свид. о гос. регистрации прогр. для ЭВМ 2021667661 Рос. Федерация. Программный модуль сегментации объектов препятствий дерево и столб на основе нейронных сетей / Сабиров Р.Ф., Валиев А.Р., Медведев В.М., Шафигуллин Г.Т., Галиуллин И.Г. Заявл. 20.10.2021; зарегистр. 01.11.2021; опубл. 01.11.2021, Бюл. № 11. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47257657>.
5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. *Сикорский О.С.* Обзор свёрточных нейронных сетей для задачи классификации изображений // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – №20. – С. 37-42.
7. *Николенко С., Кадури А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
8. *Atole R.R., Park D.* A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 67-70.
9. *Rajmohan R., Pajany M., Rajesh R., Raghu Raman D., Prabu U.* Smart paddy crop disease identification and management using deep convolution neural network and SVM classifier // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2018. – Vol. 118, No. 15. – P. 255-264.
10. *Athanikar G., Badar P.* Potato Leaf Diseases Detection and Classification System // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2016. – Vol. 5, Issue 2. – P. 76-88.
11. *Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A., Culibrk D., and Stefanovic D.* Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2016. – 11 p.
12. *Abdullahi H.S., Zubair O.M.* Advances of image processing in Precision Agriculture: Using deep learning convolution neural network for soil nutrient classification // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). – August 2017. – Vol. 4, Issue 8. – P 7981-7987.
13. *Huang H., Deng J., Lan Y., Yang A., Deng X., Zhang L.* A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // PLoS ONE 13(4): e0196302. – 2018.
14. *Inkyu Sa, Zetao Chen, Marija Popovic, Raghav Khanna, Frank Liebisch, Juan Nieto, Roland Siegwa.* WeedNet: Dense Semantic Weed Classification Using Multispectral Images and MAV for Smart Farming // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3 (1). – P. 588-595.
15. *Potena C., Nardi D., Pretto A.* Fast and Accurate Crop and Weed Identification with Summarized Train Sets for Precision Agriculture // IAS 2016: Intelligent Autonomous Systems. – 2017. – 14. – P 105-121.

16. Yao C., Zhang Y., Zhang Y., and Liu H. Application of convolutional neural network in classification of high resolution agricultural remote sensing images // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII2/W7. – 2017. – P. 989-992.
17. Atole R.R., Park D. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 67-70.
18. Ganchenko V., Doudkin A. Image Semantic Segmentation Based on Convolutional Neural Networks for Monitoring Agricultural Vegetation // *Communications in Computer and Information Science*, Springer, 2019. – 2019. – Ch. 5. – Vol. 1055. – P. 52-63.
19. Adam: A Method for Stochastic Optimization. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
20. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7803544/>.
21. Densely Connected Convolutional Networks. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1608.06993.pdf>.
22. Чикрин Д.Е. Методологические основы проектирования инфокоммуникационных систем автомобильных транспортных средств высокой степени автоматизации: дисс. ... д-ра техн. наук, 05.13.01. – Казань, 2021. – 399 с.
23. Егорчев А.А. Верифицируемые системы виртуального моделирования беспилотных транспортных средств: дисс. ... канд. техн. наук, 05.13.01. – Казань, 2021. – 340 с.
24. Kots M.V., Chukanov V.S. U-Net adaptation for multiple instance learning // *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg, 21–22 March 2019. Vol. 1236. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012061. – DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012061. – EDN SJUOKU.
25. Ганченко В.В., Дудкин А.А., Шелег С.В. Распознавание сельскохозяйственной растительности на изображениях земной поверхности на основе сверточной нейронной сети U-Net // *Big Data and Advanced Analytics*. – 2021. – № 7-1. – С. 110-116. – EDN ZDCYJM.
26. Валиев А.Р., Мануэль Бинело, Зиганишин Б.Г., Сабиров Р.Ф., Шафигуллин Г.Т., Галиуллин И.Г. Беспилотный трактор // *Вестник НЦБЖД*. – 2021. – № 4 (50). – С. 69-75.
27. Галиуллин И.Г. Система автономного управления движением машинно-тракторного агрегата с использованием отечественной элементной базы // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. – 2022. – № 6 (110). – С. 92-98. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-92-98. – EDN NZIISF.

REFERENCES

1. Sabirov R.F., Medvedev V.M., Yarullin F.F., Shafigullin G.T. Neyrosetevoye modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov v sel'skom khozyaystve [Neural network modeling of technological processes in agriculture], *Sovremennoye sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya mekhanizatsii i tekhnicheskogo servisa agropromyshlennogo kompleksa: Mater. mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Instituta mekhanizatsii i tekhnicheskogo servisa, Kazan', 07–08 iyunya 2019 g.* [Current state, problems and prospects for the development of mechanization and technical service of the agro-industrial complex: Proceedings of the international scientific and practical conference of the Institute of mechanization and technical service, Kazan, June 07-08, 2019]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019, pp. 182-184. EDN WOJDMP.
2. Chikrin D.E. Universal'nye komplekty avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennoy tekhniki dlya robotizirovannykh agrokhozyaystv [Universal kits for automation of agricultural machinery for robotic farms], *Mezhdunarodnaya agropromyshlennaya vystavka «AgroVolga 2021»* [International agro-industrial exhibition "AgroVolga 2021"], 2021.
3. Tormagov T.A., Generalov A.A., Shavin M.Yu., Rapoport L.B. Zadachi upravleniya dvizheniem avtonomnykh kolesnykh robotov v tochnom zemledelii [Problems of motion control of autonomous wheeled robots in precision agriculture], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2022, Vol. 30, No. 1 (116), pp. 39-60. DOI 10.17285/0869-7035.0083. EDN GWCIQX.
4. Sabirov R.F., Valiev A.R., Medvedev V.M., Shafigullin G.T., Galiullin I.G. Svid. o gos. registratsii progr. dlya EVM 2021667661 Ros. Federatsiya. Programmnyy modul' segmentatsii ob'ektov prepyatstviy derevo i stolb na osnove neyronnykh setey [Certificate of state registration of computer programs 2021667661 Russian Federation. Software module for segmentation of obstacle objects tree and pillar based on neural networks], *Appl.* 10/20/2021; registered 11/01/2021; publ. 01.11.2021, Bull. No. 11]. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47257657>.

5. *Gonsales R., Vuds R.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 1072 p.
6. *Sikorskiy O.S.* Obzor svertochnykh neyronnykh setey dlya zadachi klassifikatsii izobrazheniy [Review of convolutional neural networks for the problem of image classification], *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New information technologies in automated systems], 2017, No. 20, pp. 37-42.
7. *Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangel'skaya E.* Glubokoe obuchenie [Deep learning]. St. Petersburg: Piter, 2018, 480 p.
8. *Atole R.R., Park D.* A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67-70.
9. *Rajmohan R., Pajany M., Rajesh R., Raghu Raman D., Prabu U.* Smart paddy crop disease identification and management using deep convolution neural network and SVM classifier, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2018, Vol. 118, No. 15, pp. 255-264.
10. *Athanikar G., Badar P.* Potato Leaf Diseases Detection and Classification System, *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2016, Vol. 5, Issue 2, pp. 76-88.
11. *Sladojevic S., Arsenovic M., Anderla A., Culibrk D., and Stefanovic D.* Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, 11 p.
12. *Abdullahi H.S., Zubair O.M.* Advances of image processing in Precision Agriculture: Using deep learning convolution neural network for soil nutrient classification, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, August 2017, Vol. 4, Issue 8, pp 7981-7987.
13. *Huang H., Deng J., Lan Y., Yang A., Deng X., Zhang L.* A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // *PLoS ONE* 13(4): e0196302. – 2018.
14. *Inkyu Sa, Zetao Chen, Marija Popovic, Raghav Khanna, Frank Liebisch, Juan Nieto, Roland Siegwa.* WeedNet: Dense Semantic Weed Classification Using Multispectral Images and MAV for Smart Farming, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, Vol. 3 (1), pp. 588-595.
15. *Potena C., Nardi D., Pretto A.* Fast and Accurate Crop and Weed Identification with Summarized Train Sets for Precision Agriculture, *IAS 2016: Intelligent Autonomous Systems*, 2017, 14, pp 105-121.
16. *Yao C., Zhang Y., Zhang Y., and Liu H.* Application of convolutional neural network in classification of high resolution agricultural remote sensing images, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII2/W7, 2017, pp. 989-992.
17. *Atole R.R., Park D.* A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies, (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 67-70.
18. *Ganchenko V., Doudkin A.* Image Semantic Segmentation Based on Convolutional Neural Networks for Monitoring Agricultural Vegetation, *Communications in Computer and Information Science*, Springer, 2019, 2019, Part 5, Vol. 1055, pp. 52-63.
19. Adam: A Method for Stochastic Optimization. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
20. SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7803544/>.
21. Densely Connected Convolutional Networks. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1608.06993.pdf>.
22. *Chikrin D.E.* Metodologicheskie osnovy proektirovaniya infokommunikatsionnykh sistem avtomobil'nykh transportnykh sredstv vysokoy stepeni avtomatizatsii: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methodological foundations for the design of infocommunication systems for automobile vehicles of a high degree of automation: dr. of eng. sc. diss.], 05.13.01. Kazan', 2021, 399 p.
23. *Egorchev A.A.* Verifitsiruemye sistemy virtual'nogo modelirovaniya bespilotnykh transportnykh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk [Verifiable systems for virtual simulation of unmanned vehicles: cand. of eng. sc. diss.], 05.13.01. Kazan', 2021, 340 p.
24. *Kots M.V., Chukanov V.S.* U-Net adaptation for multiple instance learning, *Journal of Physics: Conference Series*, Saint Petersburg, 21–22 March 2019. Vol. 1236. Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012061. EDN SJUOKU.

25. *Ganchenko V.V., Dudkin A.A., Sheleg S.V.* Raspoznavanie sel'skokhozyaystvennoy rastitel'nosti na izobrazheniyakh zemnoy poverkhnosti na osnove svertochnoy neyronnoy seti U-Net [Recognition of agricultural vegetation on images of the earth's surface based on the convolutional neural network U-Net], *Big Data and Advanced Analytics*, 2021, No. 7-1, pp. 110-116. EDN ZDCYJM.
26. *Valiev A.R., Manuel' Binelo, Ziganshin B.G., Sabirov R.F., SHafigullin G.T., Galiullin I.G.* Беспилотный трактор [Unmanned tractor], *Vestnik NTSBZhD* [Vestnik NTsBZhD], 2021, No. 4 (50), pp. 69-75.
27. *Galiullin I.G.* Sistema avtonomnogo upravleniya dvizheniem mashinno-traktornogo agregata s ispol'zovaniem otechestvennoy elementnoy bazy [The system of autonomous control of the movement of the machine-tractor unit using the domestic element base], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022, No. 6 (110), pp. 92-98. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-92-98. EDN NZIISF.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Галиуллин Искандер Гаязович – Институт вычислительной математики и информационных технологий КФУ; e-mail: isgaluillin@email.com; г. Казань, Россия; тел.: +79046714294; соискатель ученой степени кандидата наук.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; тел.: +79172727100; директор; д.т.н.; профессор кафедры анализа данных и технологий программирования.

Егорчев Антон Александрович – e-mail: eanton090@gmail.com; тел.: +79172373047; кафедра анализа данных и технологий программирования; к.т.н.; доцент.

Сабиров Раис Фаритович – Казанский государственный аграрный университет; e-mail: agromehnika116@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: 88435674500; кафедра эксплуатации и ремонта машин; к.т.н.; доцент.

Galiullin Iskander Gayazovich – Institute of Computational Mathematics and Information Technologies at Kazan Federal University; e-mail: isgaluillin@email.com; Kazan, Russia; phone: +79046714294; applicant for the degree of cand. of eng. sc.

Chikrin Dmitry Evgenievich – e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; phone: +79172727100; director; dr. of eng. sc.; professor at the department of data analysis and programming technologies.

Egorchev Anton Alexandrovich – e-mail: eanton090@gmail.com; phone: +79172373047; the department of data analysis and programming technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Sabirov Rais Faritovich – Kazan State Agrarian University; e-mail: agromehnika116@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +78435674500; the department of machine operation and repair; cand. of eng. sc.; associate professor.