

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.372:004.8

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-13-19>**Интеллектуальная технология определения оптимального давления воздуха в шинах колёс сельскохозяйственных тракторов*****Е.В. Труфляк¹, В.В. Алексеев², С.А. Васильев^{3✉}, В.П. Филиппов⁴, Д.В. Евстифеев⁵***¹ Кубанский государственный аграрный университет; г. Краснодар, Россия^{2,3,4} Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова; г. Чебоксары, Россия^{3,5} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; г. Княгинино, Россия¹ trufliak@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>² av77@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>³ vsa_21@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>⁴ flippov_v_p@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>⁵ dvestifeev@mail.ru

Аннотация. Использование мощных тракторов и широкозахватных сельскохозяйственных машин, оказывающих сильное уплотняющее воздействие на почву, обусловлено рентабельностью агропромышленного производства. Отсутствие целостного системного подхода к снижению антропогенного уплотняющего воздействия колёсных движителей и рабочих органов современной энергонасыщенной тяжёлой техники на почву агроландшафтов требует совершенствования технологии в определении оптимального давления воздуха в шинах колёс сельскохозяйственных тракторов. С этой целью разработана интеллектуальная технология определения оптимального давления воздуха в шинах различных типов сельскохозяйственных тракторов. Задача решалась путём обработки «больших» массивов данных об эксплуатируемых машинно-тракторных агрегатах и агроландшафте с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Сбор и анализ первичных данных, необходимых при обучении нейронной сети, проведены на полях Республики Адыгея при возделывании озимого ячменя и озимой пшеницы с применением техники, использующей шины низкого давления Michelin AXIOBIB2. Применялась нейронная сеть прямого распространения Feed forward neural network. В качестве факторов, поступающих на вход нейронной сети, использовались 14 параметров: типы почвы, техники и покрышек; координаты поля; наличие и вид навесного оборудования; время года; вид обработки почвы; гранулометрический состав, влажность и плотность почвы; диаметры колес; скорость движения техники; уклон поля; агрофон. В условиях поставленной задачи основной целевой функцией являлась урожайность. Предобученная на значительном количестве исходных данных нейронная сеть при вводе необходимых данных рассчитывает оптимальное давление воздуха в шинах. На основании созданного программного обеспечения в дальнейшем планируется создание системы автоматической регулировки подкачки шин в зависимости от входящих факторов, вносимых в режимах оффлайн и онлайн.

Ключевые слова: интеллектуальная технология, определение оптимального давления воздуха в шинах, шины колёс сельскохозяйственных тракторов, уплотняющее воздействие на почву, нейронная сеть

Для цитирования: Труфляк Е.В., Алексеев В.В., Васильев С.А., Филиппов В.П., Евстифеев Д.В. Интеллектуальная технология определения оптимального давления воздуха в шинах колёс сельскохозяйственных тракторов // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 2. С. 13-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-13-19>

ORIGINAL ARTICLE

Intelligent technology for determining the optimal air pressure in the tires of agricultural tractor wheels

E.V. Truflyak¹, V.V. Alekseev², S.A. Vasiliev^{3✉}, V.P. Filippov⁴, D.V. Evstifeev⁵

¹ Kuban State Agrarian University; Krasnodar, Russia

^{2,3,4} Chuvash State University named after I.N. Ulyanov; Cheboksary, Russia

^{3,5} Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University; Knyaginino, Russia

¹ trufliak@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>

² av77@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

³ vsa21@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>

⁴ filippov_v_p@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>

⁵ dvevstifeev@mail.ru

Abstract. The use of powerful tractors and wide-beam agricultural machinery, which have a strong compaction effect on the soil, is conditioned by the agricultural production profitability. The lack of a holistic systematic approach to reducing the anthropogenic compaction effect of wheel propulsors and working units of modern energy-intensive heavy machinery on the soil of agricultural landscapes requires the improvement of methods for determining the optimal air pressure in the tires of agricultural tractors. For this purpose, the authors developed an intelligent technology for determining the optimum air pressure in the various types of tires used in agricultural tractors. The problem was solved by processing “large” arrays of data on operating machine and tractor units and agrolandscapes in order to increase crop yields. Collection and analysis of primary data required for training the neural network were conducted on the fields of the Republic of Adygea during the cultivation of winter barley and winter wheat with the use of machinery equipped with Michelin AXIOBIB2 low-pressure tires. The Feed forward neural network was applied. Fourteen parameters were used as input factors to the neural network: types of soil, machinery and tires; field coordinates; presence and type of mounted equipment; season; type of tillage; granulometric composition, moisture and soil density; wheel diameters; motion speed of machines; field slope; agricultural background. The task set presumed the yield parameter as the main target function. The neural network pre-trained on a significant amount of input data calculates the optimal air pressure in tires when inputting the necessary data. Based on the designed software, the authors plan to develop a system of automatic adjustment of tire inflation depending on the incoming factors made in the offline and online modes.

Keywords: intelligent technology, determination of optimal tire pressure, agricultural tractor wheel tires, soil compaction effect, neural network

For citation: Truflyak E.V., Alekseev V.V., Vasiliev S.A., Filippov V.P., Evstifeev D.V. Intelligent technology for determining the optimal air pressure in the tires of agricultural tractor wheels. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(2):13-19. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-13-19>

Введение

Уплотнение верхнего слоя почвы при движении тяжёлой техники на полях является одной из проблем сельскохозяйственного производства в мире. Проблема уплотнения почвы усугубляется увеличением размеров сельскохозяйственной техники и её перемещением по почве повышенной влажности [1, 2], что приводит к ухудшению структуры почвы и её деформации, изменению её свойств (аэрации, прочности почвы и структурных характеристик), влияющих на рост и урожайность сельскохозяйственных культур [3].

Степень повреждения структуры почвы, связанного с её уплотнением, зависит от нескольких взаимодействующих факторов. В ранних работах В. Сене по моделированию сделан вывод о том, что нагрузка на колесо является существенным фактором, определяющим

напряжение, передаваемое на глубокие слои почвы [4]. Кроме того, исследования различных типов почв показали значительное влияние уплотнения на структуру агрегатов глубоких слоёв почвы [5].

Давление воздуха в шинах колес является ключевым фактором воздействия сельскохозяйственных тракторов на верхний слой почвы [6]. Некоторыми зарубежными исследователями указывается на необходимость различия давления накачки и нагрузки на колесо, поскольку номинальное давление увеличивается с ростом нагрузки на колесо [7, 8]. В ряде исследований количественно оценен эффект многократного кратковременного приложения нагрузки: например, прохождение нескольких колёс друг за другом. Обнаружено, что вертикальная деформация почвы пахотного слоя линейно связана с логарифмом числа проходов

колёс [9]. Отмечается снижение урожайности при каждом дополнительном проходе колеса даже при движении с небольшой нагрузкой, что подчёркивает первостепенное влияние свойств верхнего слоя почвы на рост растений. Зарубежными исследователями описаны сложные процессы, происходящие в почве, подвергающейся многократному перекачиванию [10].

Обзор источников литературы показал отсутствие целостного системного подхода к снижению антропогенного уплотняющего воздействия колёсных движителей и рабочих органов современной энергонасыщенной тяжёлой техники на почву агроландшафтов [11-13]. Существующие системы не обеспечивают комплексного подхода к учёту большого числа проанализированных факторов [14, 15].

Предварительный анализ показал, что применительно к рассматриваемому случаю выгодно использовать нейронную сеть прямого распространения (Feed forward neural network) как одну из самых распространённых форм искусственных нейронных сетей. Поиск оптимального значения давления в шинах – это задача, не имеющая аналитического решения, близкого к глобальному оптимуму ввиду большого числа факторов, влияющих на конечный результат. В ходе исследований, на основании результатов полевых экспериментальных исследований и в процессе обучения нейронных сетей, вполне возможно, будет скорректирован сам набор входных факторов. В этом случае использование нейронных сетей представляется разумным подходом для реализации цели исследований.

Цель исследований: разработать интеллектуальную технологию определения оптимального давления воздуха в шинах колёс сельскохозяйственных тракторов, которая путем обработки «больших»

массивов данных о машинно-тракторном агрегате и агроландшафте позволит определить оптимальное давление в шинах для различных типов тракторов при эксплуатации на разных агрофонах для повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы

Проанализированы отечественные и зарубежные системы управления давлением воздуха в шинах; проведены исследования по натурному и модельному взаимодействию шин с почвой; изучены работы по моделированию воздействия шин низкого давления на почву. Изучены вопросы, связанные со сбором и анализом первичных данных, необходимых при обучении нейронной сети, предобработкой данных и выбором топологии нейронной сети. Полученные большие массивы данных сложно обработать аналитическими методами, которые не позволяют связать технические параметры и данные об урожайности, поэтому задача решалась с помощью искусственного интеллекта (использование нейросетей). Обучаемые нейронные сети могут выполнять поиск оптимального давления в шинах колёсных тракторов на множестве альтернативных решений.

Сбор и анализ первичных данных, необходимых при обучении нейронной сети, проведены на полях Республики Адыгея в 2021-2023 гг. при возделывании озимого ячменя и озимой пшеницы. Эксперименты проведены по предложению компании Michelin для расширения детализации исследований [6, 7] и их адаптации к условиям юга России [14]. Установлено, что использование шин низкого давления Michelin AXIOBIB2 при возделывании озимого ячменя и озимой пшеницы (рис. 1) позволяет повысить урожайность в среднем на 4% (табл. 1).



Дискование стерни
Stubble disking



Внесение удобрений
Fertilizer application



Дискование после внесения удобрений
Disking after fertilizer application sowing



Посев
Sowing



Прикатывание посевов
Tilling



Внесение жидких удобрений
Liquid fertilizer application

Рис. 1. Использование шин низкого давления Michelin AXIOBIB2 на тракторах при возделывании озимого ячменя

Fig. 1. Use of Michelin AXIOBIB2 low-pressure tires on tractors in winter barley cultivation

Таблица

Средние данные по урожайности озимого ячменя

Table

Average data on winter barley yields

Урожайность <i>Yield</i>	Значение, т/га / <i>Value, tons/ha</i>		Разница, % <i>Difference, %</i>
	опыт / <i>experiment</i>	контроль / <i>control</i>	
Биологическая / <i>Biological</i>	7,1	6,8	4,4
Комбайновая / <i>Combine</i>	6,9	6,3	9,5
Итоговая / <i>Final</i>	7,0	6,6	6,1

Полученные экспериментальные данные позволили обучить нейронную сеть, имеющую на входе информацию о типе техники, режимах ее работы, текущие агрофизические характеристики поля, а на выходе – оптимальное значение давления воздуха в шинах.

Модель нейронной сети: выход k -го нейрона $i + 1$ слоя рассчитывается как взвешенная сумма всех его входов с i -го слоя, к сумме применима функция активации, нормализующая выходной сигнал:

$$x_k^{m+1} = f\left(\sum_{j=1}^{n_m} w_{(j,k)}^m x_j^m\right), \quad (1)$$

где x_j^m – нейрон с индексом j на слое m ; n_m – количество нейронов на слое m ; $w_{(j,k)}^m$ – весовой коэффициент связи нейрона x_j^m с нейроном x_k^{m+1} ; f – функция активации.

Создание нейронной сети происходит по стандартной схеме и включает в себя следующие этапы:

- сбор и анализ первичных данных, необходимых при обучении нейронных сетей;
- предварительная обработка данных;
- выбор топологии нейронных сетей;
- экспериментальный подбор характеристик сети;
- экспериментальный подбор параметров обучения и обучение нейронной сети на собранных данных;
- проверка эффективности и адекватности обучения на тестовых данных;
- корректировка параметров модели нейронной сети и завершающее обучение;
- практическое применение разработанной и обученной нейронной сети для решения поставленной задачи.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим возможность применения нейросети в интеллектуальной технологии определения оптимального давления воздуха в шинах колёс тракторов при возделывании сельскохозяйственных культур в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2. В качестве факторов, поступающих на вход нейронной сети, учитывались 14 параметров, характеризующих

машинно-тракторный агрегат и сельскохозяйственное поле конкретного агроландшафта.

Предобученная на значительном количестве исходных данных нейронная сеть при вводе (сканировании) необходимых данных на основе формулы (1) рассчитывает оптимальное давления воздуха в шинах.

В условиях поставленной задачи основной целевой функцией являлась урожайность. Нейросетевая модель, связывающая представленный набор факторов с урожайностью через экономические коэффициенты эластичности, позволяла анализировать степень влияния каждого из них. Поскольку работа связана с заданием оптимального давления в шинах, определяющего уплотняющее воздействие на почву, нами детально изучалось «проникновение» уплотнения вглубь почвы.

В качестве индикатора, отражающего изменение состояния почвы, использовались значения коэффициента фильтрации воздуха через почву. Эти значения позволяют проследить динамику уплотненного состояния по всей толщине рассматриваемого слоя почвы.

При послойном изучении уплотнения величина K_1^{-1} , обратная коэффициенту фильтрации почвы на глубине до 22 см, представляется как сумма величин, обратных коэффициентам фильтрации с 1-го по 10-й слой, каждый из которых имеет толщину 2 см:

$$K_1^{-1} = k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{10}^{-1}, \quad (2)$$

где k_i^{-1} – вклад i -го слоя.

Аналогично для глубины 2-22 см рассматривается величина K_2^{-1} и т.д. В итоге получается система уравнений ($i = 0 \dots 10$), решение которой позволяет детально проанализировать уплотнение в каждом тонком слое:

$$\begin{cases} k_{1+i}^{-1} + k_{2+i}^{-1} + \dots + k_{10+i}^{-1} = K_{1+i}^{-1}; \\ k_{n-10+i}^{-1} = K_{n-10+i}^{-1}. \end{cases} \quad (3)$$

Для получения необходимого большого набора экспериментальных данных использовались специально подобранные автоматизированные буры, установленные на квадроциклах (рис. 3). Конструкция буров

позволяет при минимальной деформации извлекать образцы почв с различной глубины.

Анализ значений коэффициентов фильтрации позволяет более точно, чем по измерениям плотности почвы, определить границы уплотнённой области, поскольку каждый почвенный слой вносит свой аддитивный «вклад» для всей почвенной толщи.

Интеллектуальная технология определения оптимального давления воздуха в шинах колёс сельскохозяйственных тракторов реализуется в виде

программного средства, разработанного в ЧГУ им. И.Н. Ульянова, на основе искусственного интеллекта. Скриншоты работы программы представлены на рисунке 4. Интерфейс программы позволяет осуществлять ввод параметров, характеризующих сельскохозяйственное поле конкретного агроландшафта, с привязкой к координатам, используя gis-технологии, а затем – параметры машинно-тракторного агрегата. Далее «обученная» нейросеть выдает величину оптимального давления в шинах МТА.

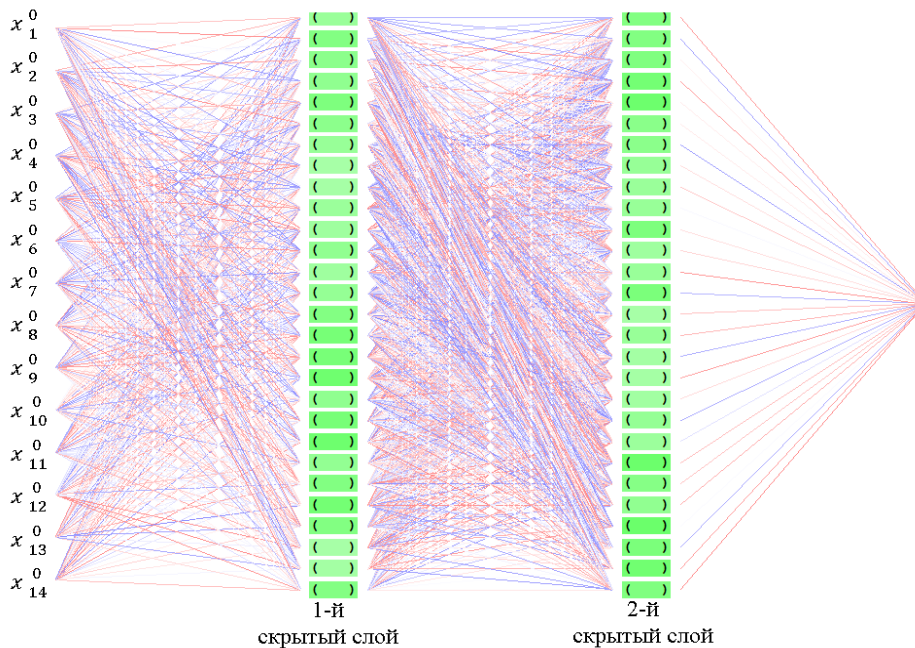


Рис. 2. Двухслойная нейронная сеть, учитывающая 14 параметров на входе:

- 1 – тип почвы; 2 – тип техники; 3 – тип покрышек (производитель, рисунок протектора);
- 4 – номер (координаты) поля; 5 – наличие и вид навесного оборудования; 6 – время года; 7 – вид обработки почвы;
- 8 – гранулометрический состав почвы; 9 – влажность почвы; 10 – плотность почвы;
- 11 – диаметр колес (передних, задних); 12 – скорость движения техники; 13 – уклон поля; 14 – агрофон

Fig. 2. Two-layer neural network considering 14 input parameters:

- 1 – soil type; 2 – type of machinery; 3 – tire type (manufacturer, tread pattern); 4 – field number (coordinates);
- 5 – presence and type of mounted equipment; 6 – season; 7 – type of tillage; 8 – granulometric composition of soil;
- 9 – soil moisture; 10 – soil density; 11 – wheel diameter (front, rear); 12 – speed of machinery; 13 – field slope;
- 14 – agricultural background

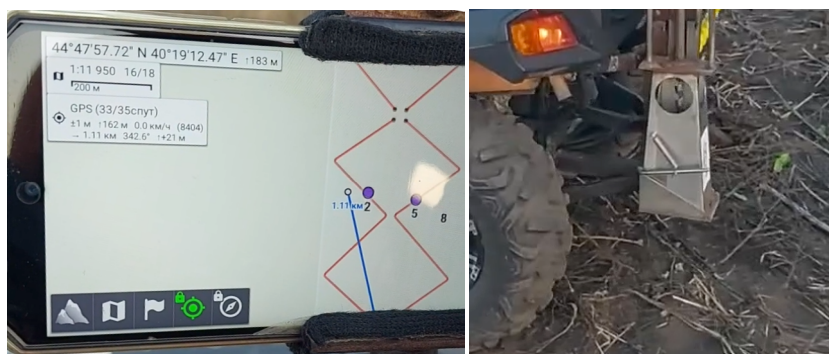


Рис. 3. Автоматизированный отбор проб для определения физико-механических свойств почвы:
 а – интерфейс програм мы; б – средство забора проб

Fig. 3. Automated sampling for determining physical and mechanical properties of soil:
 а – program interface; б – sampling tool



Рис. 4. Скриншоты работы программного средства:
интерфейс программы с входящими (а), выходными (б) данными и конечным результатом (в);
общий вид программы на экране монитора (г)

Fig. 4. Screenshots of the software tool operation:
program interface with input (a), output (b) data and final result (c); general view of the program on the monitor screen (d)

Отметим, что разработанное программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме делать поправки на тип техники, режимы работы (скорость передвижения, степень загрузки и т.п.) и на особенности каждого конкретного поля – агроландшафта с его агрофизическими характеристиками (тип почвы, пористость, уклон и т.п.). Это позволит снизить антропогенное уплотняющее воздействие колесных движителей современной энергонасыщенной и тяжелой техники на почву.

Выводы

1. Разработанное на основе нейронной сети программное средство позволяет определить оптимальное значение давления в шинах колесных тракторов, при котором минимизируется уплотняющая техногенная нагрузка на почву.
2. На основании созданного программного обеспечения в дальнейшем планируется создание системы автоматической регулировки подкачки шин в зависимости от входящих факторов, вносимых в режимах оффлайн и онлайн.

Список источников / References

1. Vermeulen G.D., Verwijs B.R., Van den Akker J.J.H. Comparison of Loads on Soils During Agricultural Field Work in 1980 and 2010 (In Dutch With English Summary). *Plant Research International*. Wageningen. 2013. Rapport 501, 38 pp.
2. Hamza M.A., Anderson W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 2005;82(2):121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
3. Zink A., Fleige H., Horn R. Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. *Soil and Tillage Research*. 2011;114(2):127-134. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.004>
4. Rivero D., Botta G.F., Antille D.L., Ezquerro-Canalejo A., Bienvenido F., Ucgul M. Tyre configuration and axle load of front-wheel assist and four-wheel drive tractors effects on soil

- compaction and rolling resistance under no-tillage. *Agriculture*. 2022;12(11):1961. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111961>
5. Söhne W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tyres. *Engineering, Environmental Science*. 1958;39:276-281, 290
6. Smith E.K. et al. Effects of traffic and tillage on crop yield (winter wheat *Triticum aestivum*) and the physical properties of a sandy loam soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2014. <https://doi.org/10.13031/aim.20141912652>
7. Smith E.K., Misiewicz P., Chaney K., White D., Godwin R. Effect of tracks and tyres on soil physical properties in a sandy loam soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. 2014;6:4471-4477. <https://doi.org/10.13031/AIM.20141912659>

8. Godwin R.J., Misiewicz P.A., Millington W.A.J., White D.R., Dickin E.T., Chaney K. Summary of the effects of three tillage and three traffic systems on cereal yields over a four-year rotation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2017. 1701652. <https://doi.org/10.13031/AIM.201701652>

9. Lipiec J., Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*. 2003;116(1-2):107-136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)

10. Horn R., Way T., Rostek J. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Tillage Research*. 2003;73:101-106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00103-X)

11. Кравченко В.А., Яровой В.Г., Меликов И.М. Характер деформирования крупногабаритных шин низкого давления движителей тракторов класса 5 // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. С. 1230-1241. EDN: ZTTADN

Kravchenko V.A., Yarovoy V.G., Melikov I.M. Pattern of deflection of the oversize tires with low pressure in tractor propulsion units of CLASS5. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2017;132:1230-1241. (In Russ.)

12. Васильев С.А. Интеллектуальная технология контроля качества обработки почвы в системе точного земледелия // Земледелие. 2022. № 3. С. 36-41. <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-3-36-41>

Vasiliev S.A. Intelligent technology for quality control of tillage in the precision farming system. *Zemledelie*. 2022;3:36-41. (In Russ.)

13. Philippov V.P., Alekseev V.V., Vasiliev S.A. Taking into account terrain slopes when constructing optimized trajectories of agricultural machinery: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;981:032006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/3/032006>

14. Труфляк Е.В., Бухарцев М.С., Сотников Д.А. Эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 567-587. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.567-587>

Truflyak E.V., Bukhartsev M.S., Sotnikov D.A. Efficiency of low-pressure tires in the cultivation of winter barley. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):567-587. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.567-587> (In Russ.)

15. Бухарцев М.С., Труфляк Е.В. Повышение эффективности механизации возделывания и уборки озимого ячменя использованием шин низкого давления // Вектор современной науки: Сборник тезисов по материалам Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых. Краснодар, 2022. С. 766-768. EDN: CIEWVH

Bukhartsev M.S., Truflyak E.V. Improving the efficiency of mechanization of cultivation and harvesting of winter barley using low-pressure tires. *Vector of Modern Science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists*. 2022:766-768. (In Russ.)

Информация об авторах

Евгений Владимирович Труфляк¹, д-р техн. наук, заведующий кафедрой; trufliak@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>

Виктор Васильевич Алексеев², д-р техн. наук, профессор; av77@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

Сергей Анагольевич Васильев³, д-р техн. наук, заведующий кафедрой; vsa21@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>

Владимир Петрович Филиппов⁴, канд. физ.-мат. наук, доцент; filippov_v_p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>

Евстифеев Дмитрий Викторович⁵, канд. техн. наук, заведующий кафедрой; dvestifeev@mail.ru

¹ Кубанский государственный аграрный университет; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13

^{2,3,4} Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова; 428015, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский пр-т, 15

^{3,5} Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; 606340, Российская Федерация, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22 А

Вклад авторов

Е.В. Труфляк – методология, информационные ресурсы и аналитика

В.В. Алексеев – информационные ресурсы и аналитика, верификация данных, формальный анализ

С.А. Васильев – концептуализация, руководство исследованием, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование

В.П. Филиппов – программное обеспечение, визуализация, создание черновика рукописи

Д.В. Евстифеев – актуальность проблемы, ресурсы

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 11.10.2023, после рецензирования и доработки 20.02.2024; принята к публикации 20.02.2024

Author Information

Evgeny V. Truflyak¹, DSc (Eng), Head of the Department; trufliak@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4914-0309>

Viktor V. Alekseev², DSc (Eng), Professor; av77@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>

Sergey A. Vasiliev³, DSc (Eng), Head of the Department; vsa21@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3346-7347>

Vladimir P. Filippov⁴, CSc (Phys-Math), Associate Professor; filippov_v_p@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7240-4405>

Dmitry V. Evstifeev⁵, CSc (Eng), Head of the Department; dvestifeev@mail.ru

¹ Kuban State Agrarian University; 13 Kalinina Str., Krasnodar, 350044, Russian Federation

^{2,3,4} Chuvash State University named after I.N. Ulyanov; 15 Moskovsky Ave., Cheboksary, 428015, Russian Federation

^{3,5} Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University; Oktyabrskaya Str., 22 A, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation

Author Contribution

E.V. Truflyak – methodology, information resources and analytics
V.V. Alekseev – information resources and analytics, data verification, formal analysis

S.A. Vasiliev – conceptualization, study supervision, finalization (reviewing and editing) of the manuscript

V.P. Filippov – software, visualization, drafting the manuscript

D.V. Evstifeev – relevance of the problem, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 11.10.2023; Revised 20.02.2024; Accepted 20.02.2024