

# МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111>



УДК 631.34+635.1

## Обоснование инновационной технологии сортофитопро очистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур

© 2024. А. С. Дорохов<sup>✉</sup>, А. Г. Аксенов, А. В. Сибирёв, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

*Цель исследований – теоретически обосновать процесс сортофитопро очистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур с использованием технологий машинного зрения и элементов роботизации. В статье выполнен анализ современных неразрушающих методов обнаружения заболеваний биологических объектов; технологических процессов и машин для удаления плодов овощных культур с растения в системе цифрового сельскохозяйственного производства с элементами роботизации на операциях ухода за растениями и сбора товарной продукции. Установлена актуальность разработки инновационной технологии и технических средств для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. Для проведения оздоровительных приемов производства семян овощных культур и картофеля разработана инновационная технология и машина для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур в селекционно-семеноводческих посадках, обеспечивающая движение по полю с использованием технологий машинного зрения с определением зараженного растения или растения, не соответствующего сортовым признакам с последующим его удалением. В процессе исследований (2021-2022 гг.) разработаны морфологическая матрица выбора технических средств использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортофитопро очистки овощных культур и картофеля, а также теоретические основы инновационной технологии удаления зараженных биологических объектов. Выявлен показатель эффективности реализации инновационной технологии сортофитопро очистки, учитывающий параметры экономических и агротехнических показателей, а также металлоемкости, энергоёмкости, экологичности и надежности. Представлены аналитические исследования машинной технологии и технических средств удаления зараженных растений овощных культур и картофеля. Выполнено обоснование инновационной технологии сортофитопро очистки овощных культур и картофеля, в части исключения в технологии обнаружения зараженных растений картофеля беспилотного летательного аппарата с качественной оценкой целесообразности выбора технических средств при использовании функционирующих элементов реализации разрабатываемой технологии по критериям экономической и агротехнической оценки, а также металлоемкости, энергоёмкости и надежности. Оценка целесообразности выбора технических средств для функционирования элементов инновационной технологии показала, что по комплексу критериев процесс сортофитопро очистки овощных культур и картофеля целесообразно осуществлять без применения беспилотного летательного аппарата, используя в конструкции машины оптическую систему идентификации зараженных растений.*

**Ключевые слова:** удаление зараженных растений, технологическая платформа, исходные требования

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (№ темы FGUN-2022-003).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирёв А. В., Мосяков М. А., Сазонов Н. В. Обоснование инновационной технологии сортофитопро очистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):98–111. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111>

Поступила: 18.07.2023

Принята к публикации: 22.01.2024

Опубликована онлайн: 28.02.2024

## Justification of innovative technology for variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops

© 2024. Aleksey S. Dorokhov✉, Alexander G. Aksenov, Aleksey V. Sibirev, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

*The purpose of the research is to substantiate theoretically the process of variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops using machine vision technologies and robotic elements. The article analyzes modern non-destructive methods for detecting diseases of biological objects; technological processes and machines for removing the fruits of vegetable crops from plants in a digital agricultural production system with elements of robotization in the operations of caring for plants and collecting marketable products. The relevance of developing innovative technology and technical means for removing infected potato and vegetable plants in breeding and seed production has been established. To carry out health-improving techniques for the production of vegetable and potato seeds, an innovative technology and machine have been developed for removing infected potato and vegetable crop plants in breeding and seed-growing plantings, providing movement across the field using machine vision technologies with the identification of an infected plant or a plant that does not correspond to the varietal characteristics with its subsequent removal. In the process of the research (2021-2022), a morphological matrix for selecting technical means of using functioning elements for implementing innovative technology for varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes, as well as the theoretical foundations of innovative technology for removing contaminated biological objects, were developed. An indicator of the effectiveness of the implementation of innovative phytotype cleaning technology has been identified, taking into account the parameters of economic and agrotechnical indicators, as well as metal intensity, energy intensity, environmental friendliness and reliability. Analytical studies of machine technology and technical means for removing infected vegetable and potato plants are presented. A substantiation of the innovative technology for varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes has been carried out, in terms of the exclusion of an unmanned aerial vehicle in the technology for detecting infected potato plants with a qualitative assessment of the feasibility of choosing technical means when using the functioning elements of the implementation of the developed technology according to the criteria of economic and agrotechnical assessment, as well as metal intensity, energy intensity and reliability. An assessment of the feasibility of choosing technical means for the functioning of elements of innovative technology showed that, according to a set of criteria, the process of varietal and phytocleaning of vegetable crops and potatoes is advisable to carry out without the use of an unmanned aerial vehicle, using an optical system for identifying infected plants in the design of the machine.*

**Keywords:** removing of infected plants, technological platform, initial requirements

**Acknowledgements:** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-003).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A., Sazonov N. V. Justification of innovative technology for variety and phytocleaning in breeding and seed plantings of potatoes and vegetable crops. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):98–111. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.98-111>

Received: 18.07.2023

Accepted for publication: 22.01.2024

Published online: 28.02.2024

Получение стабильных, высоких и качественных урожаев сельскохозяйственных культур в различных почвенно-климатических условиях требует выведения и адаптации новых сортов, что сопряжено с рядом специфических трудно механизмируемых операций полевой стадии производства и обработки урожая на селекционно-опытных делянках [1, 2].

Кроме обычного агротехнического ухода, на семеноводческих посадках проводят специальные оздоровительные приемы, способствующие повышению качества, т. е. тщательные сортовые и фитопатологические прочистки с удалением больных растений и примесей, которые выполняются селекционерами нашей страны с использованием ручного труда: движение по учетной делянке, визуальное определение зараженных растений, ручное извлечение зараженного клубневого гнезда,

утилизация клубневого гнезда в контейнер с последующим движением по инспектируемой площади. Для замены ручного труда при выполнении данных технологических операций предприятиями зарубежного сельскохозяйственного машиностроения освоено производство комплекса машин, обеспечивающее работы от посадки до послеуборочной обработки продукции [1, 2].

Стратегическое решение проблемы механизации процессов селекции, сортоиспытания в первичном семеноводстве овощных культур в России закупкой машин за рубежом нецелесообразно из-за высокой стоимости не только самих машин, но и комплектующих к ним и других расходных материалов.

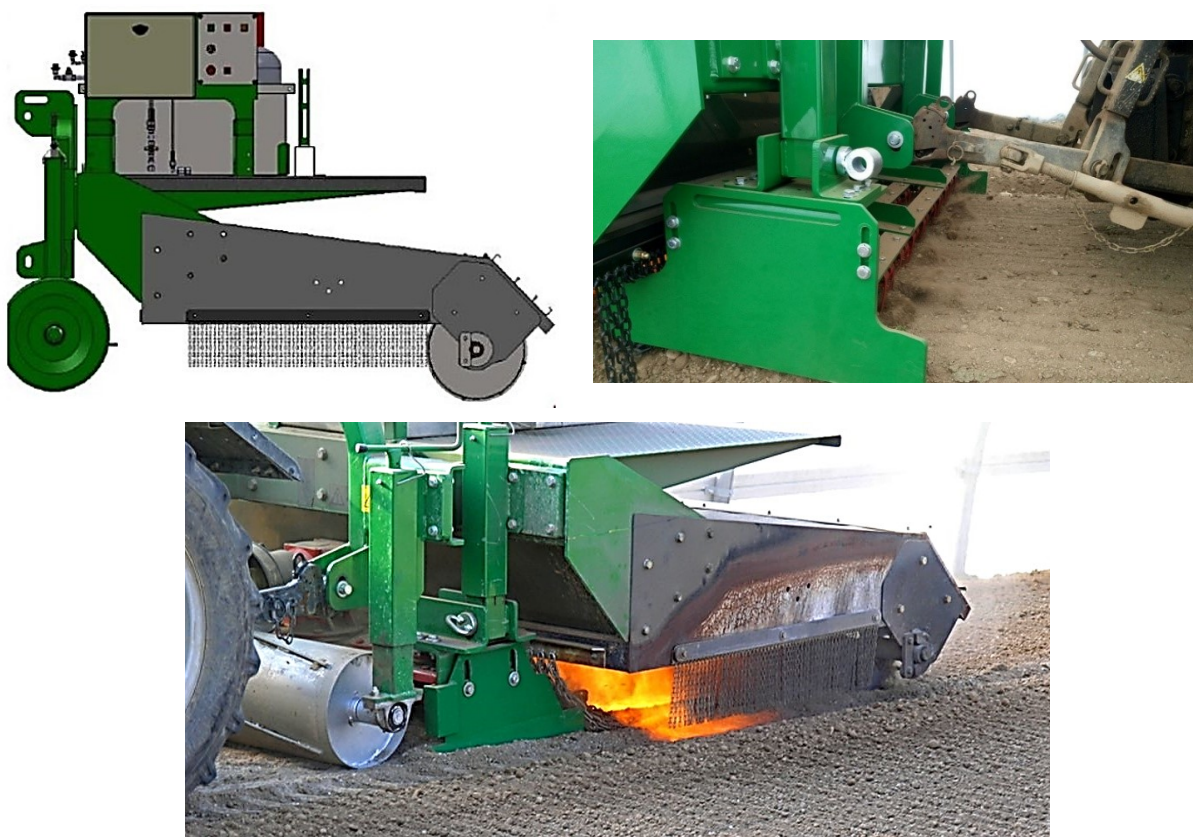
Следовательно, актуальность проведения исследований по разработке машин, обеспечивающих выполнение оздоровительных прие-

мов на семеноводческих делянках овощных культур и картофеля, обусловлена необходимостью осуществления работ по выведению новых перспективных сортов, которые являются основой продовольственной безопасности государства, а также обеспечения населения безопасными продуктами питания [3, 4].

Одним из сдерживающих факторов более интенсивного увеличения площадей возделывания и объема валового сбора овощных культур и картофеля является нерешённая проблема выполнения комплекса агротехнических приемов, ограничивающих распространение вирусных, грибных и бактериальных болезней в процессе роста и развития растений [5].

Для удаления сорняков и зараженных культурных растений компании США и стран Евросоюза разработали огневой культиватор, обеспечивающий проведение технологических операций по подготовке почвы перед посадкой и после при выжигании сорняков термическим воздействием на поверхностный слой почвы<sup>1</sup>.

Огневой культиватор (рис. 1), установленный на трехточечную навеску трактора, работает на сжиженном газе, содержащемся в баллонах, максимальная полезная ширина действия 1,8 м. Культиватор имеет газовую горелку, состоящую из газового сопла, смесителя, коллектора и воздушных сопел. Горелка работает на газовоздушных смесях, состав которых вне пределов воспламеняемости.



*Рис. 1. Схема и общий вид огневого культиватора Mingozi PTRB 1800 SP /  
Fig. 1. Diagram and general view of the fire cultivator Mingozi PTRB 1800 SP*

При движении жесткие высокоскоростные с температурой 400–600 °С факелы огневого культиватора воздействуют на поверхность почвы. Огневая культивация полностью уничтожает всходы однолетних сорняков, возбудителей болезней и вредителей на поверхности почвы, стимулирует прорастание культурных растений,

на 85–90 % сокращает засоренность в последующий вегетационный период. Существенным недостатком данного технического средства является сплошной характер воздействия на обрабатываемую среду, что приводит к повреждению культурных растений и отсутствию дифференциации по признакам заражений

<sup>1</sup>Вольф А. Н., Монахов Г. Ф., Леунов В. И. Машины в селекции и семеноводстве овощных культур: учебное пособие. М.: изд-во РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева, 2012. 218 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vnkqbn>



в автоматическом режиме. Для устранения данного недостатка необходимо обеспечить дифференцированное огневое воздействие на сорняки, т. е. разработать цифровую систему контроля и управления процессом обработки.

В настоящее время имеются различные машинно-технологические комплексы для удаления зараженных растений картофеля и овощных культур, которые выполняют технологический процесс по запланированному алгоритму.

Необходимость разработки машинно-технологического комплекса отечественного производства для выполнения операций по распознаванию, извлечению и утилизации зараженных растений овощных культур и картофеля

определяет возможность получения безвирусного семенного материала, что позволит обеспечить продовольственную безопасность страны вне зависимости от внешних условий [6, 7].

Предприятиями зарубежного сельскохозяйственного машиностроения выпускаются одноименные по принципу действия машины для удаления зараженных растений при вариации энергетических затрат, рядности рабочей зоны, а также вида привода и ширины колеи [8, 9]. К наиболее распространенным организациям-изготовителям данного вида машин относятся VSS Agro, Goucon Selection, Gerkon techniek, линейка продукции которых представлена на рисунке 2, основные технические характеристики машин – в таблице 1.



Рис. 2. Общий вид машин для сортофиточистки посадок овощных культур и картофеля: а – VSS Agro Selection; б – Goucon Selection /

Fig. 2. General view of the machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potato plantings: a – VSS Agro Selection; b – Goucon Selection

Таблица 1 – Техническая характеристика машин для сортофиточистки посадок овощных культур и картофеля VSS Agro Selection и Goucon Selection /

Table 1 – Technical characteristics of the machine for variety and phytocleaning of plantings of vegetable crops and potatoes VSS Agro Selection and Goucon Selection

Наименование показателя / Name of indicator	VSS Agro Selection	Goucon Selection
Привод ходовой системы машины / Drive system of the machine	Гидравлический / Hydraulic	
Колесная формула / Wheel formula	4×4	4×4
Силовая установка / Power unit	Дизельный двигатель / Diesel engine Perkins PowerPack	
Управление / Control	Дистанционное / Remote	
Привод съемного бункера / Removable hopper drive	Гидравлический / Hydraulic	
Ширина колеи, мм / Track width, mm	1800	1500–2000

Широкое внедрение робототехники в сельском хозяйстве на операциях от посадки до закладки товарной продукции на хранение обеспечивается с 1990-х годов и по настоящее время<sup>2</sup> [10].

В исследуемой предметной области по идентификации сельскохозяйственных культур и извлечении их из почвы или с куста растения известны прототипы для сбора огурца [11, 12], клубники [13, 14] и других сельскохозяйственных культур, обеспечивающие выполнение операций без применения труда человека по разработанному алгоритму работы при использовании оптических систем идентификации биологических объектов.

В настоящий момент в мире не представлены единые машинно-технологические комплексы, обеспечивающие комплексное выполнение операций с автоматизированным распознаванием, удалением, утилизацией зараженных растений овощных культур и картофеля

и последующем движении по учетной делянке без привлечения оператора управления, следовательно, анализ технических решений представлен по отдельным технологическим операциям – распознаванию и удалению биологического объекта с растения.

Исследования по автоматизированной идентификации биологических объектов и последующего их удаления фокусируется на трех ключевых моментах: идентификация, выделение исследуемого объекта по признаку распознавания и последующее его извлечение [15].

Известна машина для сбора плодов томата с куста растения (рис. 3), состоящая из автономного транспортного средства, перемещающегося по рельсам, манипулятора с шестью степенями свободы, исполнительного рабочего органа, блока технического зрения, а также контролера управления режимными и технологическими параметрами машины [16].

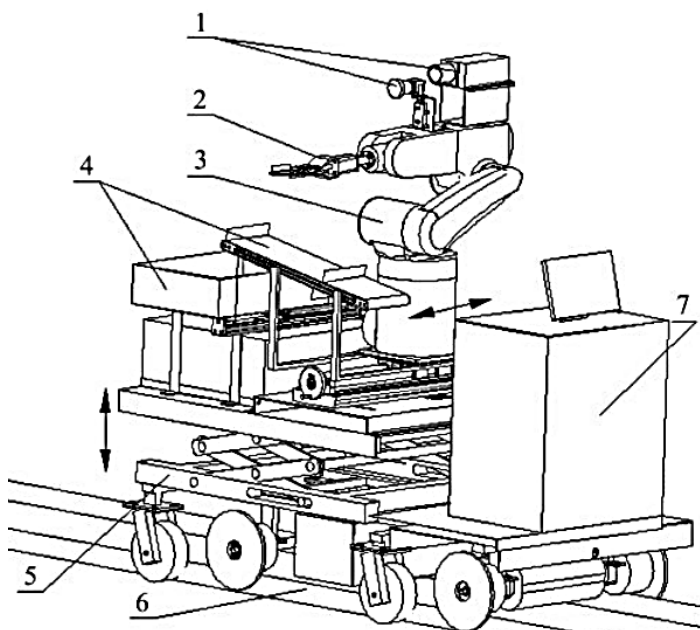


Рис. 3. Общий вид машины для сбора плодов с кустов томата: 1 – блок технического зрения; 2 – рабочий орган; 3 – манипулятор; 4 – сборщик плодов; 5 – платформа; 6 – рельс; 7 – контейнер

Fig 3. Tomato harvesting robot configuration: 1 – stereo visual unit; 2 – end-effector; 3 – manipulator; 4 – fruit collector; 5 – platform; 6 – rail; 7 – container

Манипулятор 3 и рабочий орган 2 устанавливаются на платформу 5 таким образом, чтобы выполнить сбор томатов с разной высоты растения. Кроме того, рабочие органы могут перемещаться по горизонтали, чтобы обеспечить их автоматическую адаптацию к различным вариантам посадок растений.

При идентификации исследуемого биологического объекта системой технического зрения 1 происходит автоматическая остановка платформы 5 рядом с кустом томата и обеспечивается захват плода рабочим органом 2 и его перемещение манипулятором 3 в контейнер 7 сбора продукции.

<sup>2</sup>Отчет Отделения сельскохозяйственных наук РАН о выполнении фундаментальных и поисковых научных исследований в 2017 г. М.: ОСХН РАН, 2018. 412 с.

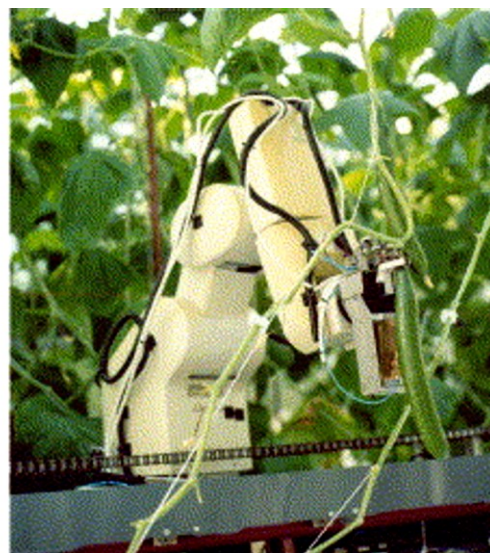
После выполнения вышеописанных действий машина для сбора плодов с кустов томата выполняет последующее движение по рельсовым путям, проложенным в направлении роста томатов, и при их обнаружении алгоритм этих действий повторяется.

Однако использование данной машины на операции извлечения зараженных растений овощных культур и картофеля из почвы является невозможным в виду особенностей движения платформы по рельсовым путям, что в семеноводстве овощных культур и картофеля является недостижимым по причине их возделывания в открытом грунте.

Кроме того, цифровая система идентификации плодов томата не позволяет обеспечить распознавание кустов растений овощных

культур и картофеля в виду конструктивного расположения системы технического зрения, обеспечивающего одностороннее распознавание исследуемых биологических объектов – для достоверной идентификации зараженного куста растения картофеля необходимо обеспечить сканирование листа как сверху, так и снизу в потоке поступательного движения.

Компанией IMAG разработан робот-сборщик огурцов в теплице, представленный на рисунке 4 [11]. Технологический процесс автоматизированного сбора плодов огурцов аналогичен сбору томатов, описанному выше, с оригинальной особенностью получения, кроме изображения поверхности плода еще и идентификацию плодоножки с помощью системы технического зрения для среза плода.



*Рис. 4. Общий вид машины IMAG для сбора огурцов с кустов в теплице /  
Fig. 4. General view of IMAG robot for harvesting cucumbers in the greenhouse*

Основным недостатком данного робота-сборщика огурцов является отсутствие механизма подпорного среза плода и системы его фиксации при перемещении в контейнер сбора с необходимостью корректировки системы технического зрения для определения степени зрелости плода или его поражения с внутренней стороны куста.

В настоящее время российскими и зарубежными учеными проводятся исследования по разработке методов неинвазивного обнаружения заболевания биологических объектов, в том числе с разработкой нейросетевых алгоритмов классификации здоровых и зараженных растений [17, 18, 19], учитывающих генетические особенности биологических объектов [20, 21].

Таким образом, проведенный анализ технических средств по цифровым системам

идентификации, сбора биологических объектов свидетельствует об отсутствии машинно-технологических комплексов по автоматизированному удалению зараженных растений овощных культур и картофеля в семеноводстве.

Следовательно, актуальной задачей является разработка технологии, машины для осуществления автоматизированного удаления зараженных биологических объектов с площади учетной делянки, а также рабочего органа, позволяющего осуществлять локальное удаление поражённых заболеваниями растений.

**Цель исследований** – теоретически обосновать процесс сортофиточистки в селекционно-семеноводческих посадках картофеля и овощных культур с использованием технологий машинного зрения и элементов роботизации.

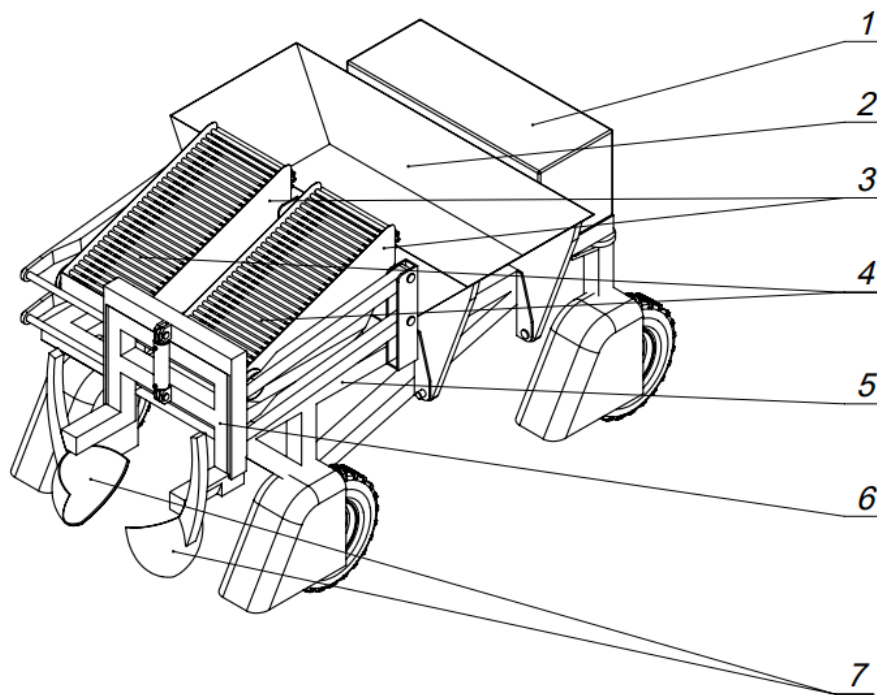


*Научная новизна* – выявлены теоретические закономерности для обоснования инновационной технологии сортофитопро очистки овощных культур и картофеля и определены показатели оценки ее эффективности.

**Материал и методы.** Исследования проводили на базе ФГБНУ «Федеральный научный

агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва) в 2022–2023 гг.

Для исследований предложена машина по проведению сортофитопро очистки посадок овощных культур и картофеля, разработанная коллективом авторов статьи в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рис. 5).



**Рис. 5. Конструктивная схема машины для сортофитопро очистки овощных культур и картофеля:**  
1 – силовая установка; 2 – саморазгружающийся бункер; 3 – бункер для почвы; 4 – планчатый транспортёр; 5 – рама шасси; 6 – подъемный механизм; 7 – рабочий орган в форме ковшей /

**Fig. 5. Structural diagram of a machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potatoes:**  
1 – power plant; 2 – self-unloading bunker; 3 – soil bunker; 4 – slatted conveyor; 5 – chassis frame; 6 – lifting mechanism; 7 – working body in the form of buckets

Представленная машина состоит из рамы шасси 5, на которой установлен саморазгружающийся бункер для растений 2, бункер для почвы 3 с установленным на нём планчатым транспортёром 4 и рабочими органами 7 для извлечения поражённых растений из почвы вместе с корневой системой и почвой. Рабочий орган может представлять собой два ковша с заострёнными кромками или пару вилок.

Принцип работы предлагаемой машины для сортофитопро очистки показан на рисунке 6 и заключается в следующем.

При движении по полю с использованием технологий машинного зрения определяется заражённое растение или растение (рис. 6, а), не соответствующее сортовому признаку. В случае определения подобного растения машина останавливается, при этом рабочий орган должен находиться над растением (рис. 6, б), которое подлежит удалению, после

чего с помощью гидроцилиндров происходит заглубление каждого из ковшей (вил) до их полного смыкания, тем самым образуя полусферу (рис. 6, в). Затем рабочий орган извлекается из почвы и поднимается над бункером для почвы, после чего происходит раскрытие ковшей (вил) и содержащаяся в них масса почвы и растения с корневой системой поступает на планчатый транспортер (рис. 6, г), при движении по которому происходит отделение почвы от корневой системы растения (рис. 6, д), при этом почва сыпается в нижестоящий бункер для почвы, а растения с корневой системой поступают в саморазгружающийся бункер (рис. 6, е). При данной схеме работы грунт, поступивший в бункер для почвы, может быть в нём дополнительно продезинфицирован одним из наиболее актуальных способов, кроме того, образованная лунка после удаления растения может быть отдельно продезинфици-

рована аэрозолем препаратов. После дезинфекции грунта в машине он может быть ссыпан

в следующую лунку, образующуюся после извлечения другого растения.

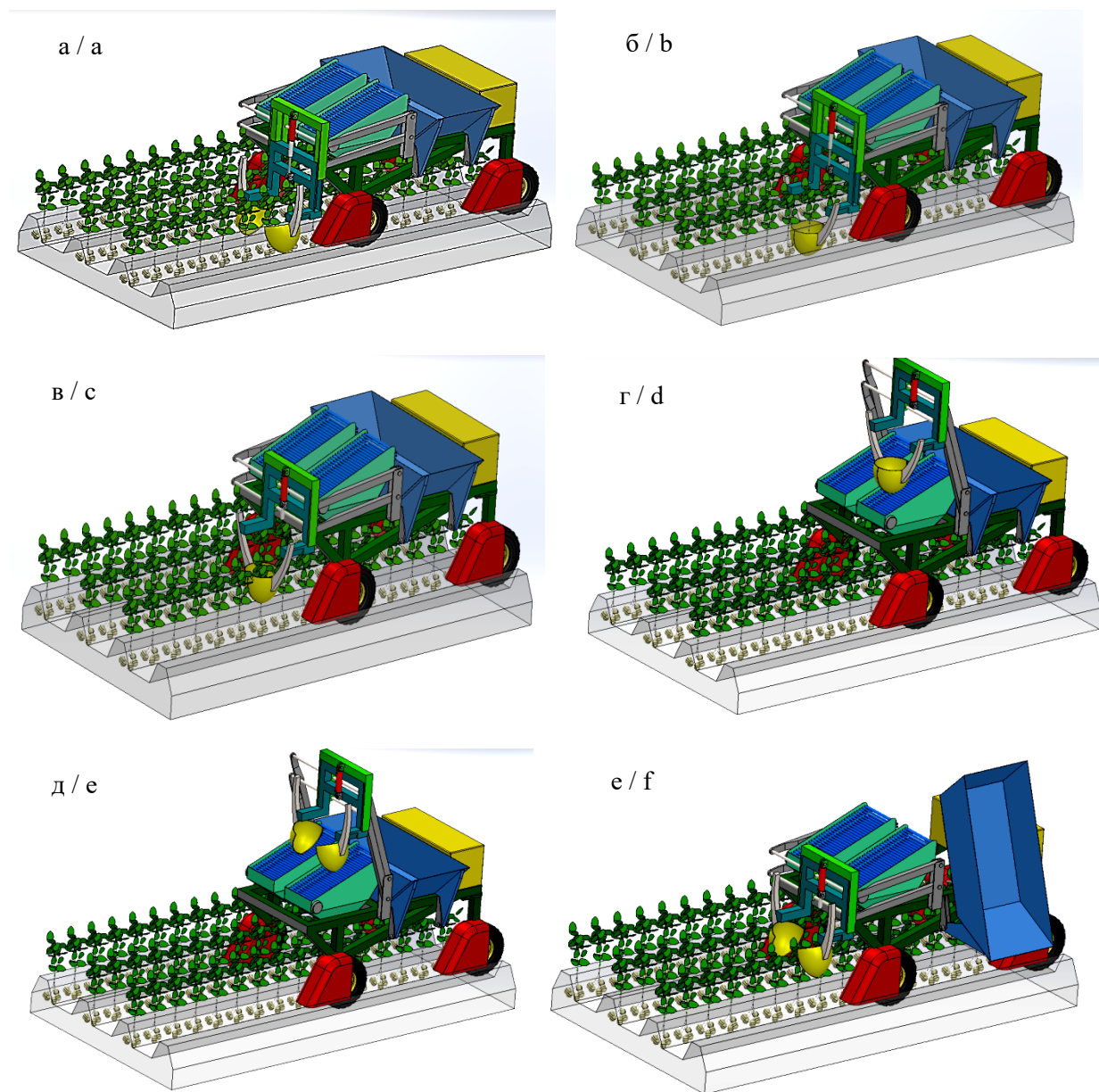


Рис. 6. Технологическая схема работы машины для сортофиточистки овощных культур и картофеля /  
Fig. 6. Technological scheme of the machine for variety and phytocleaning of vegetable crops and potatoes

Для исключения подачи переуплотненных почвенных слоев на поверхность съемного бункера необходимо уменьшить глубину подкапывания почвенного пласта (U|П) с сохранением качественных показателей, обеспечивающих минимальную вероятность обрыва надземной части зараженного растения в момент захвата рабочим органом, для чего необходимо воздействовать на физико-механические свойства почвы и состояние внешней среды, в том числе непосредственно на растение (X|i).

Следовательно, необходимо проведение дополнительных исследований как теоретических, так и экспериментальных при разработке соответствующих технологий по удалению зараженных растений овощных культур и картофеля, а также технических средств для их реализации.

**Результаты и их обсуждение.** Инновационная технология сортофиточистки предусматривает:

1) применение средств воздушного мониторинга на базе беспилотного летательного



аппарата (БПЛА) с интерпретацией данных о состоянии системы по экспресс-оценке функционального состояния растений овощных культур и картофеля;

2) передачу полученной информации о нахождении зараженных растений картофеля и овощных культур на площади учетной делянки на блок управления автоматизированного комплекса для сортофитопрочности, ее движение с последующим извлечением зараженных растений из почвы и дальнейшей их утилизации.

Реализация положений 1 и 2 инновационной технологии сортофитопрочности предусматривает адаптацию разработанных средств воздушного мониторинга и автоматизированной технологической платформы в соответствии с полученной информацией без выполнения этапов разработки технологических решений вышеуказанных конструкций, необходимо более детально рассмотреть функциональные возможности рабочих органов, обеспечивающих выполнение операций сортофитопрочности овощных культур и картофеля: определение, извлечение и перемещение зараженных растений овощных культур и картофеля в съемный бункер. Для поиска наиболее максимального числа решений и при последующем выборе из них самого оптимального рассмотрим варианты использования функциональной схемы реализации инновационной технологии сортофитопрочности овощных культур и картофеля с применением или без использования БПЛА, с качественной оценкой целесообразности повышения работы технических средств в виде морфологической матрицы (табл. 2).

При этом эффективность использования беспилотного летательного аппарата или ее отсутствие определим показателем эффективности  $\mathcal{E}_{СП}$  реализации инновационной технологии сортофитопрочности, который представляет собой совокупность значений, определяющий вес критерия оценки исследуемого технологического процесса:

$$\mathcal{E}_{СП} = 1 - \sum_{i=1}^n W_i, \quad (1)$$

где  $W_i$  – вектор весов критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности.

При этом балльная оценка по каждому критерию оценки варьирует в пределах:

$$0 \leq W_i \leq 0,1. \quad (2)$$

Целесообразность реализации инновационной технологии сортофитопрочности при использовании (БП) и без определяется значением показателя эффективности  $\mathcal{E}_{СП}$  по каждому из вариантов:

$$\mathcal{E}_{СП} = 1 - (W_{\mathcal{E}} + W_A + W_M + W_{ЭН} + W_H + W_{ЭК}), \quad (3)$$

где  $W_{\mathcal{E}}$  – вектор весов экономического критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности;  $W_A$  – вектор весов агротехнического критерия оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности;  $W_M$  – вектор весов критерия материалоемкости оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности;  $W_{ЭН}$  – вектор весов критерия энергоемкости оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности;  $W_H$  – вектор весов критерия надежности оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности;  $W_{ЭК}$  – вектор весов критерия экологичности оценки реализации инновационной технологии сортофитопрочности.

Эффективность реализации инновационной технологии сортофитопрочности овощных культур и картофеля с использованием беспилотного летательного аппарата составила:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{СП1} = 1 - (0,1 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,1) = 0. \\ \mathcal{E}_{СП2} = 1 - (0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0,2) = 0,3. \end{cases} \quad (4)$$

Согласно системы выражений (4) имеем, что реализация инновационной технологии сортофитопрочности овощных культур и картофеля более эффективна без применения БПЛА при использовании в конструкции машины оптической системы идентификации зараженных растений, обеспечивающей распознавание некондиционных растений в автоматизированном режиме без визуального контроля селекционера посадок картофеля, от квалификации которого зависит надлежащее выполнение диагностирования. Следовательно, обоснование процессов технологии и параметров технических средств выполняется без использования средств воздушного мониторинга.

**Заключение.** Наличие современных технологий и машин механизированной технологии в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля не обеспечивает качественное выполнение технологического процесса и требует новых научно обоснованных технических решений. Данные решения должны способствовать снижению или полнейшему исключению антропогенного воздействия на качество работ в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля в соответствии с агротехническими требованиями.

Таблица 2 – Морфологическая матрица выбора технических средств использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортофитогорчицки овощных культур и картофеля /  
Table 2 – Morphological matrix for the selection of technical means for the use of functioning elements of innovative technology for cultivar phyto-cleaning of vegetable crops and potatoes

Критерий оценки / Criteria for evaluation	Технические средства использования функционирующих элементов реализации инновационной технологии сортафитогорчицки овощных культур и картофеля / Technical means of using the functioning elements of the implementation of innovative technology of variety and phyto-cleaning of vegetable crops and potatoes			
	использование беспилотного лета- тельного аппарата / use of an unmanned aerial vehicle	обоснование / rationale	отсутствие беспилотного лета- тельного аппарата / lack of an unmanned aerial vehicle	обоснование / rationale
1	2	3	4	5
Экономическая / Economic	-	Затраты на приобретение беспилотного летательного аппарата / The cost of purchasing an unmanned aerial vehicle $W_{31}$ , $W_{31} = 0,1$	+	Отсутствие затрат на приобретение беспилотного летательного аппарата / No cost to purchase an unmanned aerial vehicle $W_{32}$ , $W_{32} = 0$
Агротехническая / Agrotechnical	+	Повышение качества распознавания зараженных растений в виду увеличения в двукратном размере технических средств для распознавания: системы идентификации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Improving the quality of recognition of infected plants in view of the doubling of technical means for recognition: identification systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and technological platform (TP), $W_{A1}$ , $W_{A1} = 0,1$ ; $W_{A1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Снижение качества распознавания зараженных растений в виду наличия системы идентификации только на технологической платформе (ТП) / Decrease in the quality of recognition of infected plants due to the presence of an identification system only on the technological platform (TP) $W_{A2}$ , $W_{A2} = 0,1$
Металлоемкость / Metal consumption	+	Повышение материалоемкости технических средств в виду наличия БПЛА и двух систем идентификации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Increasing the material consumption of technical means due to the presence of a UAV and 2 identification systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), $W_{M1}$ , $W_{M1} = 0,1$ ; $W_{M1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Снижение материалоемкости технических средств в виду наличия БПЛА и двух систем идентифи- кации на беспилотном летательном аппарате (БП) и технологической платформе (ТП) / Reducing the material consumption of technical means due to the presence of a UAV and 2 identifi- cation systems on an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), $W_{M1}$ , $W_{M2} = 0,1$

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
Энергоемкость / Energy intensity	+	Повышение энергоемкости технологии в виду наличия технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Increasing the energy intensity of the technology due to the availability of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP), $W_{ЭН1}$ , $W_{ЭН1} = 0,1$ ; $W_{ЭН1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	+	Снижение энергоемкости технологии в виду наличия одной технологической платформы (ТП) / Reducing the energy intensity of the technology due to the presence of one technological platform (TP) $W_{ЭН2}$ , $W_{ЭН2} = 0,1$
Надежность / Reliability	-	Снижение надежности реализации технологии в виду согласования работы технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Reducing the reliability of the technology implementation due to the coordination of the operation of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP): $W_{Н1}$ , $W_{Н1} = 0,1$ ; $W_{Н1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$	-	Повышение надежности реализации технологии в виду согласования работы технических средств: беспилотного летательного аппарата (БП) и технологической платформы (ТП) / Improving the reliability of the implementation of the technology in view of the coordination of the operation of technical means: an unmanned aerial vehicle (UAV) and a technological platform (TP) $W_{Н2}$ , $W_{Н2} = 0,1$
Экологичность / Environmental friendliness	+	Снижение экологического воздействия реализации технологии в виду снижения уплотнения почвы, обусловленное отсутствием проходов по учетной делянке технологической платформы (ТП) при идентификации зараженных растений / Reducing the environmental impact of the implementation of the technology in terms of reduced soil compaction due to the lack of passes through the registration plot of the technological platform (TP) when identifying infected plants $W_{ЭК1}$ , $W_{ЭК1} = 0,1$	+	Повышение экологического воздействия реализации технологии в виду увеличения уплотнения почвы, обусловленное дополнительными проходами по учетной делянке технологической платформы (ТП) при идентификации зараженных растений / Increased environmental impact of technology implementation due to increased soil compaction due to additional passes on the registration plot of the technological platform (TP) when identifying infected plants $W_{ЭК1}$ , $W_{ЭК1} = 0,1$ , $W_{ЭК1} = 0,1 \cdot 2 = 0,2$

Примечания: «+» – повышение; «-» – понижение / Notes: «+» – downgrade; «-» – promotion



Разработан показатель эффективности реализации инновационной технологии сортофитопрочистки, учитывающий параметры экономических и агротехнических показателей, а также металлоемкости, энергоемкости, экологичности и надежности.

Выполнено теоретическое обоснование машинной технологии сортофитопрочистки в селекции и семеноводстве овощных культур и картофеля в системе цифрового сельскохозяйственного производства с элементами робо-

тизации, включающее в себя интерпретацию данных о состоянии системы по экспресс-оценке функционального состояния растений, передачу полученной информации о нахождении зараженных растений овощных культур и картофеля на площади учетной делянки на блок управления автоматизированного комплекса для сортофитопрочистки, а также ее движение с извлечением зараженных растений из почвы и дальнейшей их утилизации.

#### *Список литературы*

1. Петухов С. Н. Состояние технического и технологического обеспечения селекции и оригинального семеноводства картофеля. Агротехника и энергообеспечение. 2018;(4):76–84.  
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36852656> EDN: YVECCT
2. Пономарев А. Г., Колчин Н. Н., Зернов В. Н., Петухов С. Н. Селекции и семеноводству картофеля необходима механизация. Картофель и овощи. 2017;(3):22–24.  
Режим доступа: <http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html>
3. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С., Сибирев А. В. Современное состояние технологического обеспечения производства овощных культур в Российской Федерации. Овощи России. 2023;(5):5–10.  
DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17> EDN: CYLUBG
4. Краснощеков Н. В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации. Тракторы и сельхозмашины. 2010;77(8):5–8.  
Режим доступа: [https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru\\_RU#](https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#)
5. Симаков Е. А., Анисимов Б. В., Коршунов А. В., Дуркин М. Л. О концепции развития оригинального, элитного и репродукционного семеноводства картофеля в России. Картофель и овощи. 2005;(2):2–5.  
Режим доступа: [http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio\\_2\\_2005v.pdf](http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio_2_2005v.pdf)
6. Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Неменуца Л. А. Анализ состояния и перспективы развития селекции и семеноводства овощных культур: науч. аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. 96 с.  
Режим доступа: <https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdaniy/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1396-analiz-sostoyaniya-i-perspektivy-razvitiya-selekcii-i-semenovodstva-ovoshchnykh-kultur-2019>
7. Лобачевский Я. П., Ценч Ю. С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022;16(4):4–12. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12> EDN: IDJFYV
8. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Шогенов Ю. Х. Интенсивные машинные технологии, роботизированная техника и цифровые системы для производства основных групп сельскохозяйственной продукции. Техника и оборудование для села. 2018;(7):2–7.
9. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(4):6–10.  
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10> EDN: YFRZDV
10. Лобачевский Я. П., Бейлис В. М., Ценч Ю. С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019;(3(36)):40–45.  
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41192528> EDN: RLCDHO
11. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A. J., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. Biosystems Engineering. 2003;86(3):305–313.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2003.08.002>
12. Ji C., Feng Q., Yuan T., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse. Robot. 2011;33(6):726–730. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2011.00726>
13. Tarrío P., Bernardos A. M., Casar J. R., Besada J. A. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision. Computers in Agriculture and Natural Resources, 4th World Congress Conference, Florida, 2006. pp. 270–275. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=1&AID=21885&CID=canr2006&T=1>
14. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. A new strawberry harvesting robot for elevated-trough culture. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2012;5(2):1–8.  
URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/495>
15. Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирев А. В., Мосяков М. А. Аналитические исследования машинно-технологических комплексов для сортофитопрочистки посадок картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. Аграрный научный журнал. 2022;(4):76–82.  
DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82> EDN: DHXNNI

16. Feng Q. C., Zou W., Fan P. F., Zhang C. F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(1):96–100.  
DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2853>
17. Jin X., Jie L., Wang Sh., Qi H. J., Li Sh. W. Classifying wheat hyperspectral pixels of healthy heads and fusarium head blight disease using a deep neural network in the wild field. *Remote Sens*. 2018;10(3):395.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10030395>
18. Militante S., Gerardo B., Medina R. Sugarcane Disease Recognition using Deep Learning. *IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 2019. pp. 575–578.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942690>
19. Gold K. M., Townsend P. A., Chlus A., Herrmann I., Couture J. J., Larson E. R., Gevens A. J. Hyperspectral Measurements Enable Pre-Symptomatic Detection and Differentiation of Contrasting Physiological Effects of Late Blight and Early Blight in Potato. *Remote Sensing*. 2020;12(2):286. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020286>
20. Zhang W., Zhu Q., Huang M., Guo Ya, Qin J. Detection and Classification of Potato Defects Using Multispectral Imaging System Based on Single Shot Method. *Food Analytical Methods*. 2019;12:2920–2929.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01654>
21. Solovchenko A. E., Shurygin B. M., Kuzin A. I., Solovchenko O. V., Krylov A. S. Extraction of Quantitative Information from Hyperspectral Reflectance Images for Noninvasive Plant Phenotyping. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2022;69:144. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443722601148>

### References

1. Petukhov S. N. The state of technical and technological support of breeding and original potato seed production. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2018;(4):76–84. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36852656>
2. Ponomarev A. G., Kolchin N. N., Zernov V. N., Petukhov S. N. Mechanization is necessary for breeding and seed growing of potato. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2017;(3):22–24. (In Russ.).  
URL: <http://potatoveg.ru/mexanizaciya/selekcii-i-semenovodstvu-kartofelya-neobxodima-mexanizaciya.html>
3. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S., Sibirev A. V. The current state of technological support for vegetable crops production in the Russian Federation. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2023;(5):5–10. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-5-5-17>
4. Krasnoshchekov N. V. Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization! *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010;77(8):5–8. (In Russ.).  
URL: [https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru\\_RU#!](https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#!)
5. Simakov E. A., Anisimov B. V., Korshunov A. V., Durkin M. L. About development of conception of the original, elite and reproductive potato seeds breeding in Russia. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2005;(2):2–5. (In Russ.). URL: [http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio\\_2\\_2005v.pdf](http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2013/03/kio_2_2005v.pdf)
6. Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Nemenushchaya L. A. Analysis of the state and prospects of development of breeding and seed production of vegetable crops: scientific and analytical overview. Moscow: *Rosinformagrotekh*, 2019. 96 p.  
URL: <https://rosinformagrotech.ru/data/elektronnye-kopii-izdaniy/rastenievodstvo/send/5-rastenievodstvo/1396-analiz-sostoyaniya-i-perspektivy-razvitiya-selekcii-i-semenovodstva-ovoshchnykh-kultur-2019>
7. Lobachevskiy Ya. P., Tsench Yu. S. Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2022;16(4):4–12. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2022-16-4-4-12>
8. Lachuga Yu. F., Izmaylov A. Yu., Lobachevskiy Ya. P., Shogenov Yu. Kh. Intensive machine technologies, robotized equipment and digital systems for production of main groups of agricultural products. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2018;(7):2–7. (In Russ.).
9. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4):6–10. (In Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
10. Lobachevskiy Ya. P., Beylis V. M., Tsench Yu. S. Digitization aspects of the system of technologies and machines. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019;(3(36)):40–45. (In Russ.).  
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41192528>
11. Van Henten E. J., Van Tuijl B. A. J., Hemming J., Kornet J. G., Bontsema J., Van Os E. A. Field test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*. 2003;86(3):305–313.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2003.08.002>
12. Ji C., Feng Q., Yuan T., Li W. Development and performance analysis on cucumber harvesting robot system in greenhouse. *Robot*. 2011;33(6):726–730. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.1218.2011.00726>
13. Tarrio P., Bernardos A. M., Casar J. R., Besada J. A. A harvesting robot for small fruit in bunches based on 3-D stereoscopic vision. *Computers in Agriculture and Natural Resources*, 4th World Congress Conference, Florida, 2006. pp. 270–275. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=1&AID=21885&CID=canr2006&T=1>
14. Feng Q., Wang X., Zheng W., Qiu Q., Jiang K. A new strawberry harvesting robot for elevated-trough culture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2012;5(2):1–8.  
URL: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/495>

15. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A. Analytical studies of machine-technological complexes for variety-phytocleaning of potato and vegetable crops in breeding and seed production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(4):76–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82>
16. Feng Q. C., Zou W., Fan P. F., Zhang C. F., Wang X. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018;11(1):96–100. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.2853>
17. Jin X., Jie L., Wang Sh., Qi H. J., Li Sh. W. Classifying wheat hyperspectral pixels of healthy heads and fusarium head blight disease using a deep neural network in the wild field. *Remote Sens*. 2018;10(3):395. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10030395>
18. Militante S., Gerardo B., Medina R. Sugarcane Disease Recognition using Deep Learning. *IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 2019. pp. 575–578. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942690>
19. Gold K. M., Townsend P. A., Chlus A., Herrmann I., Couture J. J., Larson E. R., Gevens A. J. Hyperspectral Measurements Enable Pre-Symptomatic Detection and Differentiation of Contrasting Physiological Effects of Late Blight and Early Blight in Potato. *Remote Sensing*. 2020;12(2):286. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020286>
20. Zhang W., Zhu Q., Huang M., Guo Ya, Qin J. Detection and Classification of Potato Defects Using Multispectral Imaging System Based on Single Shot Method. *Food Analytical Methods*. 2019;12:2920–2929. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01654>
21. Solovchenko A. E., Shurygin B. M., Kuzin A. I., Solovchenko O. V., Krylov A. S. Extraction of Quantitative Information from Hyperspectral Reflectance Images for Noninvasive Plant Phenotyping. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2022;69:144. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443722601148>

#### *Сведения об авторах*

✉ **Дорохов Алексей Семенович**, доктор техн. наук, академик РАН, зам. директора по научно-организационной работе, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Аксенов Александр Геннадьевич**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>

**Сибирёв Алексей Викторович**, доктор техн. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: [sibirev2011@yandex.ru](mailto:sibirev2011@yandex.ru)

**Мосяков Максим Александрович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

**Сазонов Николай Викторович**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9197>

#### *Information about the authors*

✉ **Aleksey S. Dorokhov**, DSc in Engineering, academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

**Alexander G. Aksenov**, DSc in Engineering, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-7695>

**Aleksey V. Sibirev**, DSc in Engineering, professor of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: [sibirev2011@yandex.ru](mailto:sibirev2011@yandex.ru)

**Maksim A. Mosyakov**, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

**Nikolai V. Sazonov**, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: [vim@vim.ru](mailto:vim@vim.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9197>

✉ – Для контактов / Corresponding author