Обзор / Review

https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45
УДК 631.58:635.1/.8

Технологии точного земледелия в овощеводстве

А.Ю. Федосов, А.М. Меньших*

Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научный центр овощеводства» (ВНИИО – филиал ФГБНУ ФНЦО)
140153, РФ, Московская область, Раменский район, д. Верея, стр. 500

Автор для переписки:
soulsunnet@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы участвовали в написании статьи, прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Для цитирования: Федосов А.Ю., Меньших А.М. Технологии точного земледелия в овощеводстве. *Овощи России.* 2022;(6):40-45. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45

Поступила в редакцию: 30.08.2022
Принята к печати: 30.09.2022
Опубликована: 02.12.2022

Резюме

Технологии точного земледелия могут помочь смягчить воздействие сельского хозяйства на окружающую среду за счет сокращения использования удобрений и орошения при одновременном снижении затрат. В технологии точного земледелия в овощеводстве используются система географического позиционирования (GPS), географическая информационная система (GIS), искусственный интеллект (IoT), робототехника, сенсорные технологии, редактирование генома на основе данных и т.д., чтобы улучшить производство и качество овощей. Цифровое секвенирование генома, разработанное за последнее десятилетие, значительно сократило затраты и время, необходимые для картирования ДНК растений и других организмов. Цифровые методы секвенирования генома генерируют огромные объемы данных о последовательностях генома, которые, в свою очередь, помогают в селекции растений для конкретных полевых условий или желаемых признаков. Это сохраняет отличные перспективы для выращивания овощных культур в рамках нынешнего сценария земледелия, когда изменение климата заставляет переосмыслить всю практику ведения сельского хозяйства. В этой статье содержится полезная информация о технологиях точного земледелия для овощеводов, энтузиастов, фермеров и исследователей. Экономические факторы являются важными движущими силами и препятствиями для внедрения технологий. Практическая значимость новых технологий, предоставляемых посредством коммуникации и образования, имеет дополнительный потенциал с точки зрения их продвижения.

Ключевые слова: **цифровизация, точное земледелие, редактирование генома, внедрение технологий**

Precision farming technologies in vegetable growing

Alexander Yu. Fedosov, Alexander M. Menshikh*

All-Russian Research Institute of Vegetable Growing – branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Vegetable Center" (FSBSI FSVC)
p. 500, Vereya village, Ramensky district, Moscow region, 140153, Russia

Correspondence Author:
soulsunnet@gmail.com

Conflict of interest. The authors have no conflicts of interest to declare.

Author contributions: All authors confirm they have contributed to the intellectual content of this paper.

For citations: Fedosov A.Yu., Menshikh A.M. Precision farming technologies in vegetable growing. *Vegetable crops of Russia.* 2022;(6):40-45. (In Russ.) https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-6-40-45

Received: 30.08.2022
Accepted for publication: 14.09.2022
Published: 02.12.2022

Abstract

Precision farming technologies can help mitigate the environmental impact of agriculture by reducing the use of fertilizers and irrigation while reducing costs. Vegetable precision farming technology uses geographic positioning system (GPS), geographic information system (GIS), artificial intelligence (IoT), robotics, sensor technology, data-based genome editing, etc. to improve the production and quality of vegetables. Digital genome sequencing, developed over the past decade, has greatly reduced the cost and time required to map the DNA of plants and other organisms. Digital genome sequencing methods generate vast amounts of genome sequence data, which in turn aid in plant breeding for specific field conditions or desired traits. This maintains excellent prospects for growing vegetables in the current farming scenario, when climate change is forcing a rethink of all agricultural practices. This article provides useful information about precision farming technologies for vegetable growers, enthusiasts, farmers and researchers. Economic factors are important drivers and barriers to technology adoption. The practical significance of new technologies provided through communication and education has additional potential in terms of their promotion.

Keywords: **digitalization, precision farming, genome editing, technology adoption**

Введение

Ожидается, что к 2050 году население мира достигнет почти 10 миллиардов человек, при этом большая часть роста, по прогнозам, произойдет в крупных городских центрах по всему миру [1]. По мере роста населения производство продуктов питания должно увеличиваться и удовлетворять потребности в питании и здоровье при одновременном достижении Целей устойчивого развития Организации Объединенных Наций [2]. Ежегодно Продовольственная и сельскохозяйственная организация (ФАО) фиксирует около 14% потерь продовольствия до выхода на рынки, что оценивается в 400 миллиардов долларов [3]. Сокращение площади пахотных земель и неблагоприятное воздействие изменения климата на сельское хозяйство создают дополнительные проблемы, которые заставляют внедрять инновации в будущие системы производства продуктов питания для удовлетворения растущего спроса в ближайшие несколько десятилетий. Использование цифровых технологий может помочь в решении растущих проблем в сельском хозяйстве [4]. К ним относятся возрастающий глобальный спрос на продукты питания [5]; экологические проблемы, включая изменение климата, утрату биоразнообразия, деградацию почвы и загрязнение воды, а также растущее социальное давление, отражающееся во все более жесткой сельскохозяйственной политике [4].

Стартапы являются активными новаторами в цифровом сельском хозяйстве, хотя они работают в условиях все более концентрированной и финансиализированной глобальной продовольственной экономики. Недавняя волна слияний в секторе сельскохозяйственных ресурсов, а именно Bayer-Monsanto, Dow-DuPont и ChemChina-Syngenta, частично объясняется технологическими инновациями и объединением опыта в области семян и агрохимикатов [6]. Эти же фирмы активно стремятся позиционировать себя как лидеров цифрового земледелия, разрабатывая собственные технологии или покупая другие компании. Например, BASF, Nutrien Ag Solutions и John Deere, известные производители семян и химикатов, удобрений и сельскохозяйственной техники, в последние годы независимо друг от друга запустили цифровые сельскохозяйственные платформы [7]. Многие из этих крупных фирм стремятся приобрести один из более чем 1600 стартапов, действующих в этой сфере [8]. Перед тем, как быть недавно купленным Bayer, Monsanto купила Climate Corporation — стартап цифрового сельского хозяйства, который с тех пор приобрел более мелкие стартапы, 640 Labs и VitalFields — отчасти для сбора данных [9]. Помимо слияний и поглощений, отраслевые границы размыты партнерскими отношениями между секторами. John Deere, например, наладила связи с Syngenta, Dow, Dupont, Monsanto и BASF до недавней консолидации в этом секторе [10].

Цель этой статьи состоит в том, чтобы дать отчет о прогрессе, достигнутом за последние несколько лет в применении точного земледелия в овощеводстве в качестве средства расширения его использования агрономами и фермерами.

Методика исследований

Обзор сфокусирован на наиболее характерных фактах и важной современной научной информации о применении технологии точного земледелия в мировом овощеводстве, как вклад в растущий объем работ по точному земледелию в традициях медиа-исследований. В обзор включены различные базы данных, как Google Scholar, PubMed, Science Direct, SciFinder, Web of Science, РИНЦ и др., использованы онлайн-источники (Research Gate, Springer Nature Open Access, Wiley Online Library и др.).

Результаты исследований

Спрос на овощи постоянно растет. За последние годы в РФ значительно увеличились площади сельскохозяйственных угодий, используемых для выращивания овощей, и они очень ресурсоемки, например, с точки зрения использования пестицидов и удобрений, а также орошения [11-14]. При этом в обществе растет обеспокоенность негативным воздействием сельского хозяйства на окружающую среду. Поэтому фермеры и политики срочно ищут способы уменьшить воздействие сельского хозяйства на окружающую среду, а производители овощей оказываются в авангарде внедрения технологий.

Точное земледелие–это современная процедура, используемая для повышения урожайности с использованием новейших технологий, облачных вычислений, информационных технологий (IoT), искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО). Применение технологии точного земледелия к различным аспектам процесса выращивания овощных культур представлено на рисунке. Многие типы данных могут быть собраны в течение вегетационного периода. Все они должны иметь географическую привязку с использованием технологии GPS и вводиться в базу данных GIS.

Использование новых технологий может помочь фермерам оптимизировать распределение ресурсов и тем самым способствовать снижению затрат, увеличению производительности и повышению эффективности использования ресурсов. Например, использование датчиков может способствовать лучшему мониторингу полей, чтобы такие ресурсы, как удобрения или пестициды, могли применяться в соответствии с ее потребностями [15], при условии, что производитель может использовать собранные данные и применить на практике. Технологии точного земледелия, такие как системы параллельного вождения и электронные измерительные системы [16], также могут иметь социальные последствия, такие как потенциальное повышение удобства работы за счет автоматизации повторяющихся задач или облегчения работы водителя и сокращение сроков выполнения обработок [17]. Однако, несмотря на потенциал точного земледелия, показатели его внедрения сильно различаются в зависимости от географических регионов и разных технологий [18,19].

Возможные препятствия для внедрения технологий точного земледелия многочисленны. Одно из препятствий связано с образованием фермеров, которое имеет решающее значение для приобретения навыков,

Рис. Применение технологий точного земледелия к различным аспектам овощеводства
Fig. Application of precision farming technologies to various aspects of vegetable production

необходимых для внедрения технологий [20], поскольку их использование часто требует специальной подготовки. Во многих странах такие образовательные программы все еще находятся на ранних стадиях разработки [21]. Растущий спрос на включение этой темы в сельскохозяйственное образование можно наблюдать в РФ во всех сельскохозяйственных высших учебных заведениях. Еще одно важное препятствие для внедрения, которое широко описано в литературе, связано с экономическими затратами, в связи с переключением производственных систем на новые цифровые технологии [18]. Наличие достаточного капитала является лучшим предиктором принятия решений. Последним препятствием для внедрения является доступная телекоммуникационная инфраструктура с широким покрытием. Многие устройства зависят от доступа к сети, значительное количество ферм в РФ в настоящее время находится за пределами зоны действия 4G. Для этого необходимо снизить затраты на технологии; требуются более надежные правила принятия решений: фермеры хотят знать, когда использовать какие приложения и каковы будут результаты; необходимо продемонстрировать добавленную стоимость и сделать видимой прибыль.

Концепция точного земледелия использует технологии, тесно связанные с Интернетом вещей.

Датчики. Они могут определять различные биомолекулярные, химические, оптические, тепловые, электрические, радиационные и биологические показатели, чтобы обеспечить всестороннюю оценку состояния здоровья сельскохозяйственных культур. Датчики местоположения используются для определения широты, долготы и высоты текущего расположения. Свет используется оптическими датчиками дляполучения информации о качестве почвы. Электрохимические датчики предоставляют жизненно важную информацию, такую как pH и уровень питательных веществ в почве. Уплотнение почвы измеряется с помощью механических датчиков. Они используют зонд, который входит в почву, имеющий тензодатчики или тензометрические датчики для регистрации сил сопротивления. Для определения уровня влажности используют диэлектрические датчики влажности почвы измеряют диэлектрическую проницаемость почвы. Проницаемость границы раздела почва-воздух измеряется датчиками воздушного потока. Оптические и тепловые датчики будут наиболее предпочтительными источниками данных при фенотипировании растений.

Примеры сенсорных технологий, применяемых в точном земледелии, представлены в таблице.

Информация для сельского хозяйства собирается с помощью спутников, метеостанций и наземных датчиков. Тем не менее, собираемые параметры не согласуются друг с другом, и поэтому централизованного метода сравнения данных просто не существует. Чтобы информация была действительно полезной при принятии решений, поставщики ноу-хау должны работать над функциональной совместимостью и находить эффективные способы ее интеграции.

Глобальная система позиционирования (GPS). GPS – это сеть спутников, которые предоставляют пользователям точную информацию о местоположении объектов во всемирной системе координат и времени. Основной принцип использования системы – определение местоположения путём измерения моментов времени приёма синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной потребителя. Она имеет точность от 100 до 0,01 м. Она предоставляет фермерам ценную информацию о местоположении объектов и датчиков, передвижении техники, помогают при разметке и других операциях при работе на сельскохозяйственных полях.

Таблица. Неразрушающие компактные датчики для использования в полевых условиях и сбора данных в овощеводстве
Table. Non-destructive compact sensors for field use and data collection in horticulture

Овощная культура Vegetable crop	Характеристика Characteristic	Прибор с датчиками Device with sensors
Solanum lycopersicum	Листья повреждены листоверткой	Спектрометр Nexus FT-NIR
	Спелость	ImSpector V9
	Время сбора урожая	Спектрофотометр AgroSpec
Solanum melongena	Морфология и форма плода	Сканер визуализации
Листовые овощные культуры	Содержание хлорофилла	Спектрорадиометр ASD Fieldspec FR
	Качество послеуборочного хранения	SPAD-502; Agriexpert CCN 6000
Spinacia oleracea	Состояние посевов после полива	Спектрометр Specim V10
Citrullus lanatus	Ликопин, бета-каротин и общее количество растворимых сухих веществ	NIR On-Line® X-One
Lactuca sativa	Признаки растений при обработке экстремальными температурами и солевым стрессом	Датчик серии VNIR Micro-Hyperspec Sensor; Fluor Cam 800 MF
Cichorium intybus	Холодовой стресс	CF имидж-сканер
Phaseolus vulgaris	Фотосинтетические признаки, морфологические параметры и архитектура побега	Growscreen Fluoro
Brassica rapa* sub. *pekinensis* и *chinensis; Cucumis melo	Качество	Флуорометр FluorPen FP 100
	Совместимость с прививками	Флюорометр Imaging-PAM

Географическая информационная система (GIS). Географическая информационная система — это инструмент, который позволяет пользователям собирать, хранить и управлять пространственными или географическими данными. Она предоставляет инструменты для создания карт и отчеты на основе географических данных. Управляемая компьютером GIS-карта содержит слои данных, которые можно использовать для принятия решений относительно размещения посевов, влияния на них почвенных и погодных условий и вредителей. Актуальная база данных сельскохозяйственной GIS может предоставить различную полезную информацию об использовании и состоянии полей, такую как урожайность, типы почв, поверхностный дренаж и нормы орошения. После обработки данные используются для определения корреляций между многочисленными факторами, влияющими на урожай в определенном месте.

Отбор проб почвы по сетке и внесение удобрений с переменной нормой. Отбор проб по сетке (отбор проб почвы) для конкретного земельного участка – это простой и быстрый метод мониторинга состояния почвы. Его можно использовать для сельскохозяйственных работ с технологиями переменной нормы внесения агрохимикатов (VRT). GIS основываясь на информации о ресурсах поля, в зависимости от типа почвы, а также планируемой урожайности, рекомендует нормы и сроки внесения удобрений и гербицидов в течение вегетации. Затем она может корректировать и управлять процессами внесения дифференцировано процессами внесения агрохимикатов. Отбор по сетке повышает интенсивность отбора проб, одновременно используется привязка к географическому положению, что дает нам почвенную карту, на которой видны ее показатели.

Сетка почвенной карты анализируется, чтобы определить нехватку питательных веществ, необходимых для планируемого урожая. Затем составляется карта внесения удобрений. Обе карты загружаются в компьютер, который разрабатывает тщательный график ухода за посевами/посадками растений и систематического внесения удобрений.

Контроллеры скорости подачи. Контроллер переменной скорости – это устройство, которое регулирует скорость подачи химического вещества. Он использует различные датчики для контроля веса, потока материала и давления.

Мобильные приложения. С ростом использования электронных устройств очень легко получать информацию находясь в любом месте. Приложения для мобильных устройств позволяют разработчикам создавать интерактивные и полезные приложения, которые можно использовать в области точного земледелия. Эти приложения позволяют повысить эффективность и прибыльность сельскохозяйственных операций. Приложения для мониторинга посевов/посадок включают в себя, среди прочего, сведения о погоде, рыночных курсах и наличии семян, материалов и доступных химикатов и т.п. Погодные приложения полезны для использования в сельском хозяйстве.

В последние годы разработаны высокопроизводительные комплексные системы и рабочие процессы для

быстрого мониторинга и измерения больших популяций растений как в теплицах, так и в полевых условиях. Эти системы сочетают в себе современные методы обнаружения и визуализации с помощью установленных датчиков для обеспечения быстрых измерений и охвата большой территории [22-24]. Хотя эти системы и не являются полностью автономными, они представляют собой передовые достижения в области современного фенотипирования растений и имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными, собранными вручную фенотипическими признаками. Роботизированные интеллектуальные системы играют все более важную роль в современном сельском хозяйстве и рассматриваются как неотъемлемая часть точного земледелия или цифрового земледелия [25-29]. Роботы полностью автономны и не нуждаются в опытных операторах для выполнения сельскохозяйственных задач. Это самое большое преимущество роботов по сравнению с традиционными тракторными системами. Автономные роботизированные системы взяли на себя широкий спектр сельскохозяйственных операций, включая сбор урожая перца сладкого [30,31], томата [32] и огурца [33], борьбу с вредителями и сорняками на томате [34] и салате [34, 35]. Наряду с визуализацией и зондированием автономные роботизированные системы также считаются важными и неотъемлемыми частями высокопроизводительного фенотипирования растений, поскольку они существенно увеличивают производительность, скорость, охват, повторяемость и экономическую эффективность измерений признаков растений.

Рост вычислительных мощностей, сбор и обработка больших данных привели к появлению более точных методов селекции овощных растений, в частности, редактирования генома и других технологий на основе данных [36]. Цифровое секвенирование генома, разработанное за последнее десятилетие, значительно сократило затраты и время, необходимые для картирования ДНК растений и других организмов. Цифровые методы секвенирования генома генерируют огромные объемы данных о последовательностях генома, которые, в свою очередь, помогают в селекции растений для конкретных полевых условий или получения желаемых признаков.

Технологии редактирования генов на основе данных, такие как сгруппированные регулярно расположенные короткие последовательности палиндромных повторов и ассоциированные ферменты (CRISPR-Cas9) и эффекторные нуклеазы, подобные активаторам транскрипции (TALEN), существенно изменили селекцию растений за последнее десятилетие. Эти новые технологии, по сути, действуют как молекулярные ножницы, которые позволяют редактировать определенные участки ДНК. С помощью этих методов можно определить, какие именно гены отвечают за какие признаки, и включить или выключить их в зависимости от желаемого эффекта [37]. Например, признаки, которые способствуют быстрому созреванию растений, могут быть удалены, чтобы продлить срок годности урожая, а сортам, обладающим большей устойчивостью к вредителям или суровым погодным условиям, возможно усилить эти признаки. ДНК восстанавливается там, где она была отредактирована, и новые признаки передаются потомству [38]. В настоящее время проводятся исследования по редактированию генов с целью улучшения растений для повышения устойчивости к засухе или вредителям и повышения питательных и товарных качеств; кроме того, значительное количество исследований сосредоточено на обеспечении устойчивости овощных культур к гербицидам, что соответствует целям более ранней сельскохозяйственной биотехнологии [37].

CRISPR, доминирующая технология редактирования генов, была впервые разработана в университетских условиях. Многие из крупных компаний, ведущих цифровое земледелие, стремятся позиционировать себя как лидеров в области редактирования генов. Они разработали исследовательские программы, приобрели лицензии на технологию CRISPR и подали заявку на патентную защиту сортов, которые включают несколько комплексных изменений для борьбы с устойчивыми к гербицидам сорняками и повышения устойчивости сельскохозяйственных культур к гербицидам [39]. Bayer, Syngenta и Corteva (побочный продукт слияния Dow и DuPont) активно инвестируют в технологии редактирования генов для селекции растений. Например, перед тем, как быть приобретенными Bayer, Monsanto инвестировала 100 миллионов долларов США в стартап по редактированию генов Pairwise Plants [40], а недавнее исследование показало, что Corteva в настоящее время владеет наибольшим количеством патентов и приложений CRISPR в мире [41].

Выводы

Технологии точного земледелия предлагают потенциальное решение проблем продовольственной безопасности и защиты окружающей среды, но они будут успешными только в том случае, если их примут фермеры. Различные технологии, такие как GPS, многочисленные датчики и мобильные приложения, анализ больших данных и редактирование генома на основе накопленных данных могут использоваться для внедрения точных методов ведения сельского хозяйства различными способами, исходя из того, что они обеспечивают большую точность в принятии решений на практике. Точное земледелие объединяет сельскохозяйственное оборудование с программными платформами, которые отслеживают данные в овощеводстве и позволяют анализировать почвенные и климатические условия в конкретном месте, чтобы предоставить производителям советы относительно выбора семян, точного внесения пестицидов и удобрений.

Редактирование генома овощных растений использует большие данные, полученные в результате компьютерного геномного картирования, для определения изменений в ДНК живых организмов, которые обещают более точный способ модификации генетического кода растения для выражения новых признаков, которые могут улучшить урожайность и качество. Хотя концепция точного земледелия все еще находится на ранней стадии, многие ее приложения уже успешно используются. Отсутствие актуальной информации, связи и финансовой поддержки – вот некоторые из факторов, которые могут помешать внедрению точного земледелия.

Об авторах:
Александр Юрьевич Федосов – младший научный сотрудник отдела технологий и инноваций,
https://orcid.org/0000-0001-9492-8667, ffed@rambler.ru
Александр Михайлович Меньших – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и инноваций,
https://orcid.org/0000-0001-7254-8487,
автор для переписки, soulsunnet@gmail.com

About the Authors:
Alexander Yu. Fedosov – Junior Researcher,
Technology and Innovation Department,
https://orcid.org/0000-0001-9492-8667, ffed@rambler.ru
Alexander M. Menshikh – Cand. Sci. (Agriculture),
Leading Researcher, Technology and Innovation Department,
https://orcid.org/0000-0001-7254-8487,
Correspondence Author, soulsunnet@gmail.com

• Литература / References

1. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Available online: https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html (Access date 10.07.2022)
2. Binns C.W., Lee M.K., Maycock B., Torheim L.E., Nanishi K., Duong D.T.T. Climate change, food supply, and dietary guidelines. *Annu. Rev. Public Health.* 2021;(42):233–255.
3. FAO I. Food loss and waste must be reduced for greater food security and environmental sustainability; 2022.
4. Finger R., Swinton S.M., El Benni N., Walter A. Precision farming at the Nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics.* 2019;11(1):313–335.
5. Hickey L.T., Robinson A.N.H., Jackson H., Leal-Bertioli S.A., Tester S.C.M., Gao M., Wulff B.B.H. Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol.* 2019;37(7):744–754.
6. Clapp J. Mega-mergers on the Menu: Corporate Concentration and the Politics of Sustainability in the Global Food System. *Global Environmental Politics.* 2018;18(2):12–33.
7. Pham X., Martin S. How Data Analytics Is Transforming Agriculture. *Business Horizons.* 2018;61(1):125–133.
8. Day S. AgTech Landscape 2019: 1,600+ Startups Innovating on the Farm and in the "Messy Middle." 2019. June 4. https://agfundernews.com/2019-06-04-agtech-landscape-2019-1600-startups.html (Access date 10.07.2022)
9. Bronson K. Looking Through a Responsible Innovation Lens at Uneven Engagements with Digital Farming. *NJAS—Wageningen Journal of Life Sciences* 2019;90–91(100294):1–6.
10. Mooney P. Blocking the Chain: Industrial Food Chain Concentration, Big Data Platforms and Food Sovereignty Solutions. October 10. 2018. https://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/files/blockingchain2.png (Access date 10.07.2022) (In Eng.)
11. Королькова А.П., Кузнецова Н.А., Иванова М.И., Шатилов М.В., Ирков И.И., Ильина А.В., Кузьмин В.Н., Маринченко Т.Е. Экономические аспекты развития овощеводства России. М., ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 204 с. [Korolkova A.P., Kuznecova N.A., Ivanova M.I., Shatilov M.V., Irkov I.I., Ilina A.V., Kuzmin V.N., Marinchenko T.E. Economic aspects of the development of vegetable growing in Russia. M., FGBNU «Rosinformagroteh», 2021. 204 p. (In Russ.)]
12. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Иванова М.И., Рубцов А.А. Инновационные технологии орошения овощных культур. М., Изд-во Ким Л.А., 2021. 306 с. [Fedosov A.Yu., Menshih A.M., Ivanova M.I., Rubcov A.A. Innovative technologies for irrigation of vegetable crops. M., 2021. 306 p. (In Russ.)]
13. Солдатенко А.В., Меньших А.М., Федосов А.Ю., Ирков И.И., Иванова М.И. Повышение конкурентоспособности овощных культур к сорным растениям посредством совершенствования методов борьбы. *Овощи России.* 2022;(2):72-87. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-2-72-87 [Soldatenko A.V., Menshich A.M., Fedosov A.Yu., Irkov I.I., Ivanova M.I. Increasing the competitiveness of vegetable crops to weeds by improving control methods. *Vegetable crops of Russia.* 2022;(2):72-87. (In Russ.) https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-2-72-87]
14. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Иванова М.И. Дефицитное орошение овощных культур. Овощи России. 2022;(3):44-49. https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-3-44-49 [Fedosov A.Yu., Menshikh A.M., Ivanova M.A. Deficient irrigation of vegetable crops. *Vegetable crops of Russia.* 2022;(3):44-49. (In Russ.) https://doi.org/10.18619/2072-9146-2022-3-44-49]
15. Walter A., Finger R., Huber R., Buchmann N. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2017;114(24):6148–6150.
16. Groher T., Heitkämper K., Walter A., Liebisch F., Umstätter C. Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. *Precision Agriculture.* 2020;21(6):1327–1350.
17. Ayerdi Gotor A., Marraccini E., Leclercq C., Scheurer O. Precision farming uses typology in arable crop-oriented farms in northern France. *Precision Agriculture.* 2019;21(1):131–146.
18. Barnes A.P., Soto I., Eory V., Beck B., Balafoutis A., Sánchez B, Gómez-Barbero M. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy.* 2019;(80):163–174.
19. Lowenberg-DeBoer J., Erickson B. How does European adoption of precision agriculture compare to worldwide trends? In J.V. Stafford (Ed.), Precision agriculture '19. Wageningen Academic Publishers. 2019.
20. Michels M., Fecke W., Feil J.H., Musshoff O., Lülfs-Baden F., Krone S. "Anytime, anyplace, anywhere"—A sample selection model of mobile internet adoption in german agriculture. *Agribusiness.* 2020;36(2):192–207.
21. Eastwood C., Ayre M., Nettle R., Dela Rue B. Making sense in the cloud: Farm advisory services in a smart farming future. *NJAS—Wageningen Journal of Life Sciences.* 2019.
22. Busemeyer L., Mentrup D., Möller K., Wunder E., Alheit K., Hahn V. BreedVision — A multi-sensor platform for non-destructive fieldbased phenotyping in plant breeding. *Sensors.* 2013;(13):2830–2847.
23. Virlet N., Sabermanesh K., Sadeghi-Tehran P., Hawkesford M.J. Field scanalyzer: an automated robotic field phenotyping platform for detailed crop monitoring. *Funct. Plant Biol.* 2017;(44):143–153.
24. Ge Y., Atefi A., Zhang H., Miao C., Ramamurthy R.K., Sigmon B. High-throughput analysis of leaf physiological and chemical traits with VIS–NIR–SWIR spectroscopy: a case study with a maize diversity panel. *Plant Methods.* 2019;(15):66.
25. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big data in smart farming – a review. *Agric. Syst.* 2017;(153):69–80.
26. Chlingaryan A., Sukkarieh S., Whelan B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review. *Comput. Electron. Agric.* 2018;(151):61–69.
27. Zhang Z., Kayacan E., Thompson B., Chowdhary G. High precision control and deep learning-based corn stand counting algorithms for agricultural robot. *Auton. Robots.* 2020;(44):1289–1302.
28. Jin X., Zarco-Tejada P., Schmidhalter U., Reynolds M.P., Hawkesford M.J., Varshney R.K. High-throughput estimation of crop traits: a review of ground and aerial phenotyping platforms. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 2020;(2):1–33.
29. Pandey P., Dakshinamurthy H.N., Young S.N. Autonomy in detection, actuation, and planning for robotic weeding systems. Trans. ASABE. 2021
30. Arad B., Balendonck J., Barth R., Ben-Shahar O., Edan Y., Hellström T. Development of a sweet pepper harvesting robot. *J. F. Robot.* 2020;(37):1027–1039.
31. Hemming J., Bac C. W., van Tuijl B.A.J., Barth R., Bontsema J., Pekkeriet E.J. "A robot for harvesting sweet-pepper in greenhouses," in Paper Presented at AgEng 2014, Zurich.
32. Lili W., Bo Z., Jinwei F., Xiaoan H., Shu W., Yashuo L., et al. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse. I*nt. J. Agric. Biol. Eng.* 2017;(10):140–149.
33. Van Henten E.J., Hemming J., van Tuijl B.A.J., Kornet J.G., Meuleman J., Bontsema J. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Auton. Robots.* 2002;(13):241–258.
34. Raja R., Nguyen T.T., Slaughter D.C., Fennimore S.A. Real-time robotic weed knife control system for tomato and lettuce based on geometric appearance of plant labels. *Biosyst. Eng.* 2020;(194):152–164.
35. Blasco J., Aleixos N., Roger J.M., RabatelЭ G., Moltó E. AE — Automation and emerging technologies: robotic weed control using machine vision. *Biosyst. Eng.* 2002;(83):149–157.
36. Weersink Alfons, Evan Fraser, David Pannell, Emily Duncan, Sarah Rotz. Opportunities and Challenges for Big Data in Agricultural and Environmental Analysis. *Annual Review of Resource Economics.* 2018;10(1):19–37.
37. Zhang Yi, Karen Massel, Ian D. Godwin, Caixia Gao. Applications and Potential of Genome Editing in Crop Improvement. *Genome Biology.* 2018;19(210);1–11.
38. Bartkowski B., Theesfeld I., Pirscher F., Timaeus J. Snipping Around for Food: Economic, Ethical and Policy Implications of CRISPR/Cas Genome Editing. *Geoforum.* 2018;(96):172–180.
39. Brinegar Katelyn Ali, K. Yetisen, Sun Choi, Emily Vallillo, Guillermo U. Ruiz-Esparza, Anand M. Prabhakar, Ali Khademhosseini, Seok Hyun Yun. The Commercialization of Genome-Editing Technologies. *Critical Reviews in Biotechnology* 2017;37(7):924–932.
40. Nickel R. Gene-Editing Startups Ignite the Next "Frankenfood" Fight. August 10. 2018. https://www.reuters.com/article/us-grains-tech-gene-editing/gene-editing-startups-ignite-the-next-frankenfood-fight-idUSKBN1KV0GF (Access date 10.07.2022)
41. Houldsworth A. Who Owns the Most CRISPR Patents Worldwide? Surprisingly, It's Agrochemical Giant DowDuPont. 2018.