

Обзорно-аналитическая статья/Review article

УДК 528.8:631

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

**Возможности применения цифровых двойников местности
для исследования растительного покрова в сельском хозяйстве**

Д. В. Филиппов¹✉

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: Gislab@ngic.ru

Аннотация. Одним из основных методов оперативного мониторинга растительного покрова является дистанционное зондирование Земли, включающее в себя съемку с космических аппаратов и авиационных носителей, в том числе и с беспилотных летательных аппаратов. Растительный покров представляет собой сложную динамическую природную систему, подверженную влиянию множества факторов. Для повышения эффективности распознавания растительного покрова по материалам дистанционного зондирования Земли необходима разработка и внедрение новых технологий. Одной из таких технологий является создание и использование цифровых двойников. Внедрение цифровых двойников в мониторинг растительного покрова позволит сократить время обработки материалов, а также существенно повысить достоверность получаемых результатов. Цифровые двойники получили значительное распространение в таких сферах, как машиностроение, авиастроение, космическая отрасль и строительство. Тем не менее, в области изучения растительного покрова, в сельском хозяйстве и природопользовании данная технология на сегодняшний день не получила столь же широкого применения. Целью данной статьи является проведение анализа основных научно-технических литературных источников, посвященных разработке методических и технологических возможностей применения цифровых двойников для изучения растительного покрова природных ландшафтов. На основе анализа литературных источников по созданию цифровых двойников объектов местности предложено одно из направлений по изучению вопросов создания и применения цифровых двойников растительного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, искусственный интеллект, машинное обучение, цифровые двойники местности, растительный покров, сельское хозяйство

Для цитирования:

Филиппов Д. В. Возможности применения цифровых двойников местности для исследования растительного покрова в сельском хозяйстве. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 56–65. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

Application of digital terrain twins for vegetation analysis in agriculture

D. V. Filippov¹✉

¹Geoinformation Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

e-mail: Gislab@ngic.ru

Abstract. Remote sensing from orbital and aerial platforms, including unmanned aerial systems (UAS), constitutes a primary methodology for operational vegetation monitoring. Vegetation cover

represents a complex dynamic system governed by numerous biotic and abiotic drivers. To enhance the robustness of vegetation classification from remote sensing imagery, the development and integration of advanced computational frameworks are imperative. Digital twin technology emerges as a prospective solution to address this challenge. The assimilation of digital twins into vegetation monitoring can substantially reduce data processing latency while significantly improving the reliability and reproducibility of analytical outputs. Despite their widespread adoption in industrial sectors such as aerospace engineering and construction, the application of digital twins in phytocoenology, agriculture, and nature management remains underexplored. The study presents a systematic review of scientific and technical literature concerning the methodological foundations and technological capabilities required for implementing digital twins in natural landscape analysis. Based on this critical appraisal, the authors delineate a strategic research direction for the conceptualization and deployment of high-fidelity digital twins for vegetation systems.

Keywords: Remote sensing, UAVs, artificial intelligence, machine learning, digital terrain twins, vegetation cover, agriculture

For citation:

Filippov D. V. (2026). Application of digital terrain twins for vegetation analysis in agriculture. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 56–65. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-56-65>

Введение

Анализ мировых тенденций показывает, что информационное обеспечение – ключевой фактор для принятия обоснованных решений на разных уровнях. Оперативное получение достоверной и точной информации позволяет достигать наилучших результатов в любой сфере деятельности. Дистанционная разведка является одним из перспективных направлений получения оперативной информации. Данный вид разведки по назначению условно можно разделить на два направления – военное и гражданское. Однако независимо от назначения разведки задача у нее одна – выявить и распознать искомый объект (цель) по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В данной работе рассмотрена возможность применения цифровых двойников для исследования состояния растительного покрова с помощью дистанционной разведки.

Концепция цифрового двойника была введена в начале 2000-х гг. в ответ на растущую потребность в точном проектировании и управлении жизненным циклом продукции. Профессор, доктор Майкл Гривс из Мичиганского университета считается основоположником концептуальных основ цифровых двойников (ЦД). В 2002 г. он изложил основные концепции ЦД в докладе об управлении жизненным циклом продукта [1].

Наибольшего прогресса в создании и использовании цифровых двойников добились в космической, самолетостроительной, машиностроительной областях, в здравоохранении, а также в области развития технологии «Умный город» [1–3]. Применение этих технологий позволит во много раз повысить оперативность получения требуемой информации для изучения физических объектов и процессов при минимальных затратах человеческих ресурсов.

Цель этой статьи – проведение анализа возможности и перспективности применения технологии цифровых двойников для исследования растительного покрова.

Постановка задачи

Работа выполнялась в рамках диссертационного исследования и основной задачей был обзор современного состояния использования технологии цифровых двойников для изучения растительного покрова, в том числе для сельскохозяйственных культур.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть определение ЦД, а также связанные с ним технологии и отрасли, в которых ЦД уже применяются; сравнить основные сходства и различия ЦД природных и антропогенных объектов; выявить проблемные вопросы, связанные с созданием ЦД растительного покрова; предложить направление создания ЦД растительного покрова.

Первоначальное описание цифрового двойника определялось как виртуальное представление физического объекта, содержащее информацию об указанном объекте, которая берет свое начало в области пространства управления жизненным циклом этого объекта [4, 5]. А. В. Медведев в своих трудах предположил, что ЦД можно рассматривать как совокупность процессов, включающих в себя мониторинг, анализ состояния, прогнозирование и планирование развития территории [6].

В ходе анализа научных трудов был рассмотрен вопрос применения ЦД при выполнении дистанционного мониторинга растительного покрова. Согласно ГОСТ 17.8.1.01-86, природный ландшафт – это ландшафт, состоящий из взаимодействующих природных компонентов и формирующийся или сформировавшийся под влиянием природных процессов. Согласно Федеральному закону от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», к компонентам природной среды относятся земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле [Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»; ГОСТ Р 70284-2022. Охрана окружающей среды. Ландшафты. Термины и определения. М. 2022., 12 с. (Национальный стандарт Российской Федерации)].

В ходе выполнения исследования учитывались следующие факторы, касающиеся растительного покрова:

- возможное быстрое изменение состояния растительного покрова с течением времени, связанное с периодом вегетации, влиянием патологий, изменением водного режима и т. д.;
- присутствие циклического суточного изменения состояния растительного покрова;
- воздействие внешних факторов, влияющих на природный ландшафт в процессе выполнения дистанционного зондирования.

Учитывая установленные факторы, необходимо определить, какие пространственные, спектральные и атрибутивные данные

должны быть включены в состав ЦД растительного покрова и предложить способ получения этих данных. Исходя из состава данных для ЦД, был предложен подход к созданию ЦД растительного покрова. Полученные таким образом ЦД могут применяться в любой сфере деятельности, где необходим мониторинг растительного покрова, в том числе с использованием машинного обучения и ИИ.

Исследование применения цифровых двойников растительного покрова

Создание высокоточных качественных цифровых двойников связано с использованием больших массивов данных [7, 8]. Из истории разработки концепции цифрового двойника следует то, что он обладает четырьмя характеристиками: виртуально реалистичным отображением, синхронизацией в реальном времени, взаимной эволюцией и оптимизацией по замкнутому циклу. ЦД растительного покрова представляет собой сложную динамическую информационную систему, связывающую цифровой и физический образ объекта в течение всего его жизненного цикла [1, 9]. Jun-Feng Yao определил цифровой двойник как динамическое сюрреалистическое отображение системы физического объекта в реальном времени. ЦД облегчает объединение всех доступных данных, обеспечивая взаимосвязанное логическое пространство с согласованной информацией от космических аппаратов [10, 11]. Физическая сущность объекта является основой системы построения и источником данных для ЦД. Виртуальная сущность – это цифровое отображение физической сущности, составленное из геометрических и физических моделей, моделей движения и состояния объекта.

Для обработки большого количества исходных данных широко применяется искусственный интеллект (ИИ). Применение ИИ, основанного на машинном обучении, рассматривается как перспективная технология в области работы с ЦД.

Модель ЦД может быть использована для ускорения этапа машинного обучения путем генерации соответствующего набора обучающих данных и автоматической маркировки его с помощью цепочки инструментов моделирования, тем самым сокращая участие человека в процессе обучения.

Одним из подходов машинного обучения является машинное обучение, основанное на коллективном обучении без обмена фактическими данными [1, 12]. Эти наборы данных могут быть расширены и подвергнуты перекрестной проверке с использованием обширных реальных данных, которые не требуют значительного использования [13]. Существует множество типов глубокого обучения, например рекуррентные нейронные сети, сверточные нейронные сети и т. д. Глубокое обучение выполняется непосредственно на основе данных с несколькими уровнями обработки. Количество таких уровней, как правило, не более трех. Такой вид глубокого обучения называется машинным обучением на основе физики [12]. Тем не менее, методу машинного обучения требуется огромное количество высококачественных обучающих наборов данных. В случае контролируемого машинного обучения, для маркировки этих наборов данных часто требуется ручной ввод. Этот метод является дорогостоящим, подвержен ошибкам и занимает большое количество времени, особенно для природных объектов, имеющих сложную структуру и высокую динамичность своего состояния.

К таким условиям можно отнести возможное изменение климатических условий при выполнении ДЗЗ. Для предоставления полезной климатической информации необходимо соблюдение двух условий: повышение качества предоставляемой информации; высокая степень интерактивности. Также необходимо в состав информационной системы ЦД включать людей и процессы их деятельности [14].

Для создания качественного ЦД растительного покрова необходимо использовать данные, получаемые посредством обработки материалов ДЗ, в том числе включающие в себя математическое моделирование, с полемым подтверждением полученных результатов. На сегодняшний день собрано огромное количество материалов ДЗЗ. Но следует отметить, что далеко не все эти данные можно использовать для формирования пространства ЦД. Для ЦД можно применять обработанные материалы ДЗЗ, результаты которых подтверждаются полевыми исследованиями. Такие данные возможно получить только при выполнении подспутниковых наблюдений или в специальных лабораториях [15]. Подспутниковые наблюдения представляют собой ком-

плекс мероприятий, включающий измерения характеристик тест-объектов и тестовых участков, а также, опционально, параметров состояния атмосферы в целях оценки качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса и продуктов их обработки.

При создании ЦД растительного покрова, находящегося в природных условиях, возникает ряд специфических моментов. Помимо морфометрического описания объекта, необходимо учитывать климатические параметры, физико-химический состав грунта, степень увлажненности грунта, освещенность в поле объекта и т. д. Параметры модели ЦД растений, входящих в состав растительного покрова, находятся в постоянной динамике. В работе Пеладаринос и др. [16] указывается на недостаточно активное применение ЦД в исследованиях в области сельского хозяйства. Наиболее часто интеллектуальные алгоритмы обработки материалов ДЗЗ используются для мониторинга растительного покрова на землях с искусственным орошением. Основными методами в этой области являются методы глубокого машинного обучения.

Перспективные разработки в области использования ЦД для изучения растительного покрова в аграрном секторе пока остаются неактивно востребованными из-за их узкой направленности и сложности представления в реальном времени [17]. Для создания ЦД растительного покрова, с возможностью дальнейшего его применения в области дистанционной разведки, ЦД необходимо рассматривать как совокупность составляющих элементов.

Т. В. Сукмановой и Н. С. Беловым [18] рассмотрено применение ЦД в управлении природопользованием на примере побережья Калининградской области. Уровень наполнения информационной модели включает в себя площадные объекты с определенными в пространстве границами. Также модель включает в себя рассчитанный индекс уязвимости береговой зоны, информацию об историческом развитии участка, современном состоянии инфраструктур, рельефе, природных и антропогенных источниках воздействия.

Однако для того, чтобы быть полноценным ЦД такой сложной природно-антропогенной системы, модель должна быть динамичной во времени [19]. Для этого необходимо цифровой двойник дополнять результатами сезонных исследований с указанием даты и времени их про-

ведения. Также в данной модели отсутствует информация о климатических условиях на момент выполнения космической и (или) аэрофото-съемки. Во многих научно-исследовательских работах ЦД рассматриваются как некая виртуальная информационная модель, применяемая для моделирования и прогнозирования различных процессов и ситуаций [18]. ЦД с точки зрения дистанционной разведки – это не только информационная модель самого объекта, но и еще множественные параметры окружающей среды. Растительный покров на материалах дистанционного зондирования в разное время года, суток, при различных климатических условиях может отображаться по-разному.

Растительный покров имеет сложную взаимосвязь своих физических свойств с внешними факторами [20]. Современные средства радиолокационной или сканерной съемки могут получать трехмерные образы растительного покрова и по этим данным можно определять таксационные показатели насаждений [21]. Но для интерпретации растительного покрова по составу куда более эффективным является использование их мульти- и гиперспектральных образов.

На формирование спектрального образа растительного покрова при выполнении ДЗЗ оказывают сильное воздействие климатические условия. Как было отмечено ранее, для создания ЦД растительного покрова к его информационной модели необходимо добавлять природно-климатические условия [9]. В

работе Kirstine I. Dale [22] рассмотрена проблема влияния климатических условий на объект при создании его цифрового двойника [23]. В своей работе авторы обосновывают, что существуют три категории ЦД: ЦД «Человек в курсе событий», полуавтоматический ЦД и полностью автоматический ЦД. Растительный покров является наиболее сложным объектом для создания ЦД. На параметры его ЦД влияет множество факторов, делающих его сложной многоструктурной системой. Д. Б. Эшпулатов упоминает возможность применения мультиагентного подхода при разработке цифровых двойников сельскохозяйственных культур, с использованием базы знаний и многоагентного моделирования [20]. Многоагентное моделирование сложных систем, к которым относится растительный покров, является задачей, решение которой требует применения знаний в различных областях науки и техники [24]. Материалы ДЗ, как один из основных источников информации для создания ЦД растительного покрова, как правило, представлены в виде мульти- и гиперспектральных цифровых изображений. На формирование яркостей объектов цифрового изображения оказывают влияние ряд факторов, связанных как с климатическими условиями, так и с состоянием растительного покрова. В таблице приведены основные факторы, которые должны быть учтены при создании ЦД растительного покрова.

Факторы, влияющие на спектральный образ растений при мульти- и гиперспектральной аэрокосмической съемке

№	Фактор	Оказываемое влияние	
		первичное	вторичное
1	Время года	Изменение вегетационного состояния растительного покрова	Изменение: температурного режима окружающей среды, условий освещенности покрова, возможное наличие снежного покрова
2	Время суток	Никтинастия у некоторых видов растений	Изменение температуры окружающей среды, условий освещенности покрова
3	Облачность	–	Изменение условий освещенности покрова
4	Водный режим	Нормальный, засуха или переувлажнение, приводящие к негативным процессам	Изменение физических свойств подстилающего почвенного покрова
5	Минералы	Норма, недостаток или избыток минералов в почве, приводящий к негативным процессам в растениях	Изменение физико-химических свойств подстилающего почвенного покрова
6	Патологии	Вредители и болезни, вызывающие угнетение и гибель растений	–

Так, например, наличие плотной облачности во время проведения аэрокосмической съемки травяного покрова сильно снижает уровень освещенности в плоскости исследуемого объекта и тем самым вносит изменение в получаемые цифровые изображения. При этом вегетационная стадия развития и физико-биологическое состояние травяного покрова остаются неизменными. Исключением является никтиназия у некоторых видов растений.

Учитывая проведенный анализ научных работ, можно сказать, что ЦД растительного покрова – это комплексная информационная модель, состоящая из совокупности ЦД, полученных в различное время года и суток, при различных климатических условиях и включающая в себя атрибутивную информацию.

Для создания ЦД природного растительного покрова часто используются релевантные модели. Однако они обладают рядом систематических искажений и каскадных ошибок. Снизить их влияние на качество модели можно путем увеличения пространственного разрешения обрабатываемых данных, однако такой подход может повлечь за собой сильное увеличение вычислительных мощностей [20]. Использование геопространственных технологий при создании ЦД растительного покрова дает ряд существенных преимуществ, таких как точность трехмерных моделей и их пространственного позиционирования, наличие развернутой структуры атрибутивных данных. Однако реализация данного подхода пока связана с необходимостью использования зарубежных технологических и программных средств [25].

Результаты

Как показал проведенный анализ информационных источников, цифровой двойник растительного покрова – это сложная информационная система, создание которой основано на методах трехмерного моделирования и геопространственных технологий. Информационное наполнение ЦД может изменяться в зависимости от того, для решения каких практических задач в области исследования растительного покрова он будет использоваться. Одной из важных составляющих ЦД растительного покрова являются разновременные геопространственные данные, полученные посредством выполнения ДЗЗ.

Принципы дистанционного зондирования Земли основаны на регистрации отраженной от поверхности солнечной энергии или сигнала от

специальных аппаратов. Физические основы формирования отраженного излучения от ландшафтов в видимом и инфракрасном диапазонах спектра показывают, насколько важна для цифрового двойника информация о дате и времени суток, когда были получены материалы ДЗ и атрибутивные данные. Суточное изменение альбедо в условиях сложного рельефа может составлять от десятков до 100 Вт/м² [26]. Данные дистанционного зондирования могут предоставлять для цифрового двойника трехмерные радиолокационные данные, мульти- и гиперспектральные изображения ландшафта. Результатом обработки мульти- и гиперспектральных космических снимков являются индексные изображения.

Обсуждение результатов

Перспективным видом ДЗЗ, материалы которого могут быть использованы для создания ЦД растительного покрова, может быть мульти- и гиперспектральная съемка местности. Вместе с тем, результаты мульти- и гиперспектральной съемки имеют достаточно сильную зависимость от погодных условий и времени выполнения съемки. На рис. 1 представлено влияние условий съемки (освещенности) на спектральный образ ландшафта. Съемка выполнялась гиперспектральной аппаратурой с КА Ресурс-П в разное время суток [15]. Интервал между датами съемок не превышает 7 дней, поэтому можно предположить, что природный ландшафт находился приблизительно в одном и том же физиологическом состоянии.

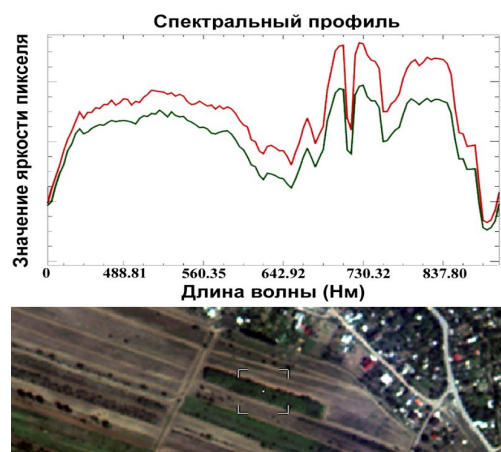


Рис. 1. Спектральный образ ландшафта, полученный по гиперспектральным снимкам Ресурс-П ГСА (зеленый график – 16.06.2018, облачность 0 %, красный график – 06.06.2018, облачность 56 %), точкой на цветном снимке указан объект, для которого построен профиль.

Кроме условий съемки на спектральный образ влияет и состояние растительного покрова. На графиках (рис. 2) видно, что у угнетенной растительности отсутствует поглощение в зонах синего и красного участков спектра, что указывает на низкое содержание в растениях хлорофилла (рис. 2).

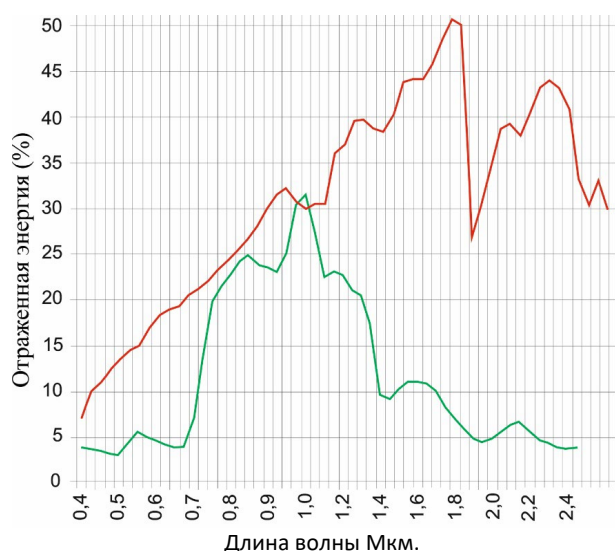


Рис. 2. Спектральный отклик зеленый график – зеленая луговая растительность, красный график – угнетенная травяная растительность

Также у угнетенной растительности отсутствует водное поглощение энергии в средних зонах инфракрасного излучения. Рассмотрев всего лишь два параметра, можно сделать вывод, что один и тот же природный объект, находясь в нормальном или угнетенном состоянии, может даже в

течение одного дня многократно менять свой спектральный состав под воздействием изменения окружающей среды. Поэтому ЦД должен включать в себя в обязательном порядке всевозможные варианты спектрального образа природного ландшафта. Получить достоверный спектральный образ природного объекта, а также смоделировать его изменение в зависимости от разных условий можно исключительно при постоянном его полевом наблюдении или в специализированном лабораторном комплексе.

Заключение

Проведенный анализ показал, что на сегодняшний день ЦД пока не получили широкого применения в отечественной практике исследования растительного покрова. Однако внедрение технологий, основанных на применении ЦД, в изучении растительного покрова, особенно в аграрном секторе, является перспективным направлением. Применение цифровых двойников для мониторинга растительного покрова в аграрном секторе позволит повысить урожайность сельскохозяйственных культур. При этом необходимо учесть, что ЦД отдельного растения, как и совокупность растений в виде растительного покрова, является сложной системой, подверженной влиянию различных факторов, в том числе и временных, которые определяют необходимость в разработке современных методологических и технологических направлений формирования ЦД.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эшпулатов Достонбек Боходир угли Цифровые двойники в сельском хозяйстве: анализ основных тенденций. Цифровая экономика. 2023. № 2. С. 41–54.
2. Дорохов А. С., Павкин Д. Ю., Юрочка С. С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения. Техника и технологии АПК, Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 14–25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25.
3. Загурский А. В. Анализ рынка цифровых двойников и перспективы его развития. Актуальные исследования. 2024. № 11 (193). Ч. II. С. 21–24.
4. Zhihan Lv, Shuxuan Xie Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. Digital Twin. 2021. V.1. № 12. P. 1–20.
5. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом Дистанционного зондирования Земли. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 4. С. 58–67.

6. Медведев А. В. Цифровые двойники территорий для поддержки принятия решений в сфере регионального социально-экономического развития. Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6-1. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38072>.
7. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Применение цифровых двойников при исследовании исторических ландшафтов береговой зоны. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2024. Т. 1. С. 425–441. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-425-441.
8. Сукманова Т. В. Применение цифровых двойников в природопользовании. Хим-БиоSeasons 2023 : сборник тезисов докладов Всероссийского форума молодых исследователей, Калининград, 20–22 апреля 2023 года. Кемерово : Кемеровский государственный университет. 2023. С. 97.
9. Могадам П., Лоу Т., Эдвардс Э. Дж. Цифровой двойник для будущих систем садоводства. TROPAG 2019.Международная конференция по тропическому сельскому хозяйству : сборник материалов (Брисбен, Австралия, 11–13 ноября 2019 г.). Брисбен : 2019. Vol.36, №1(92). DOI <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036092>.
10. Asaf Tzachor, Soheil Sabri, Catherine E. Richards, Abbas Rajabifard and Michele Acuto Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals. Nature Sustainability. 2022. Vol. 5. P. 822–829.
11. Wenqiang Yang, Yu Zheng, (Member, Ieee), And Shaoyang Li Application Status and Prospect of Digital Twin for On-Orbit Spacecraft. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 106489-106500.
12. Omer San, Suraj Pawar & Adil Rasheed Decentralized digital twins of complex dynamical systems. Scientific Reports. 2023. V.13, №20087. P. 1–15.
13. Hui Liu, He Yan, Jialin Hao, Wenshuo Xu, Zhou Min and Daiyin Zhu Application of Digital Twin Technology in Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Intelligent Detection System. Remote Sens. 2024. Vol. 16, № 2863. P. 1–22.
14. Hazeleger W., Aerts J. P. M., Bauer P., Bierkens M. F. P., Camps-Valls G., Dekker M. M., Doblas-Reyes F. J., Eyring V., Finkenauer C., Grundner A., Hachinger S., Hall D. M., Hartmann T., Iglesias-Suarez F., Janssens M., Jones E. R., Kölling T., Lees M., Lhermitte S., van Nieuwpoort R. V., Pahker A. K., Pellicer-Valero O. J., Pijpers F. P., Siibak A., Spitzer J., Stevens B., Vasconcelos V. V. & Vossepoe F. C. Digital twins of the Earth with and for humans. Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5, № 463. P. 1–11.
15. Филиппов Д. В. Исследование влияния освещенности на расчет вегетационных индексов на примере NDVI. Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 151–162. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162.
16. Peladarinos Nikolaos, Piromalis Dimitrios, Cheimaras Vasileios, Tserepas Efthymios, Munteanu Radu Adrian and Papageorgas Panagiotis. Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. Sensors 2023. Vol. 23, № 7128. P. 2–39. DOI: 10.3390/s23167128.
17. Goldenits Georg, Mallinger Kevin, Raubitzek Sebastian, Neubauer Thomas. Current applications and potential future directions of reinforcement learning-based Digital Twins in agriculture. Smart Agricultural Technology. 2024. № 8. P. 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.2406.08854.
18. Сукманова Т. В., Белов Н. С. Применение цифровых двойников в управлении Природопользованием на примере побережья калининградской Области. Сборник трудов конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)». 2024. Т. 1, № 4. С. 498–505.
19. Скобелев П. О, Галузин В. А., Галицкая А. В., Галузин А. А. Прогнозирование развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений. Онтология проектирования. 2025. Т. 15. № 2. С. 211–227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227.
20. Эшпулатов Д. Б. Возможности применения цифровых двойников в сельском хозяйстве. Экономика и предпринимательство. 2023. № 3. С. 523–529.
21. Юнсон Э. В., Мельничук Д. Ю. Цифровой двойник лесного массива. Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 6 (144). С. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.47>.
22. Kirstine I. Dale, Edward C. D. Pope, Aaron R. Hopkinson, Theo Mccaie, And Jason A. Lowe Environment-Aware Digital Twins: Incorporating Weather and Climate Information to Support Risk-Based Decision-Making. Artificial Intelligence for the Earth Systems. 2023. Vol. 2, № 4. P. 1–6. DOI: 10.1175/aies-d-23-0023.1.

23. Комсомольская правда: сайт. Санкт-Петербург. Цифровые двойники растений: самарские ученые разработали платформу для точного земледелия URL: <https://www.spb.kp.ru/daily/-27489/4747397/?ysclid=m7t5d2cj9z216598494> (дата обращения 21.10.2025).
24. Верхова Г. В., Акимов С. В., Присяжнюк С. П. Распределенное многоагентное моделирование сложных систем. Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2021. Т. 1. С. 82–85.
25. Раскрытие возможностей геопространственных технологий для создания цифровых двойников/ The Spatial Times. 2003. URL: <https://africansurveyors.net/unlocking-the-power-of-geospatial-technology-to-create-digital-twins/#3-what-is-a-digital-twin>.
26. Ana P. Barros Digital Twin Earth: the next-generation Earth Information System // *Frontiers in Science Editorial*. 2024, Vol. 2. P. 1–4. DOI 10.3389/fsci.2024.1383659.

REFERENCES

1. Eshpulatov D.B. (2023). Digital Twins in Agriculture: An Analysis of Key Trends. *Tsifrovaya ekonomika. [Digital economy]*, 2, 41-54 [in Russian]
2. Dorokhov A.S., Pavkin D. Yu., Yurochka S. S. (2023). Digital twin technology in agriculture: prospects for use. *Tekhnika i tekhnologii APK, Agroinzheneriya. [Machinery and Technologies in the Agro-Industrial Complex, Agricultural Engineering]* 25(4), 14-25. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-4-14-25 [in Russian].
3. Zagurskiy A.V. (2024). Analysis of the digital twin market and prospects for its development. *Aktual'nyye issledovaniya [Current Research]*, 11 (193), 21-24 [in Russian]
4. Zhihan Lv, Shuxuan Xie. (2021). Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*, 1(12), 1-20
5. Altyntsev M. A., Karpik P. A. (2020). Creating metric simulated model of a "digital twin" by the active earth remote sensing method. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 58-67 [in Russian]
6. Medvedev A.V. (2020). Digital Twins of territories to support decision-making in the field of regional socio-economic development. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. [Modern High Technologies]*, 6-1, 61-66. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.38072> [in Russian]
7. Sukmanova T. V., Belov N. S. (2024). Application of digital twins in the study Of historical landscapes of the coastal zone. *InterCarto. InterGIS, [InterCarto. InterGIS]* 1, 425-441. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-425-441 [in Russian]
8. Sukmanova T. V. (2023). Application of digital twins in nature management. *Abstracts in the collection of reports of the All-Russian Forum of Young Researchers: XumBuoSeasons [Collection of abstracts of the All-Russian Forum of Young Researchers Kemerovo State University]* (p. 97) Kemerovo: Kemerovo State. University. [in Russian]
9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. (2020). Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Article in the proceedings of the International Conference on Tropical Agriculture : TROPAG 2019 [Proceedings of the International Conference on Tropical Agriculture: TROPAG 2019]* 36(92) Brisbane DOI <https://doi.org/10.3390/proceedings2019036092>
10. Tzachor A., Sabri S., Richards C.E., Rajabifard, Acuto M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals. *Nat ure Susta inability*. 5. 822–829
11. Yang W., Zheng Y., (Member, Ieee), And Li S. (2023). Application Status and Prospect of Digital Twin for On-Orbit Spacecraft. *IEEE Access*. 9. 106489-106500
12. San O., Pawar S., Rasheed A. (2023). Decentralized digital twins of complex dynamical systems. *Scientific Reports*. 13(20087). 1-15
13. Liu H., Yan H., Hao J., Xu W., Min Zhu, D. (2024). Application of Digital Twin Technology in Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Intelligent Detection System. *Remote Sens*. 16(2863). 1-22
14. Hazeleger W, Aerts J. P. M., Bauer P., Bierkens M. F. P., Camps-Valls G., Dekker M. M., Doblas-Reyes F. J., Eyring V., Finkenauer C., Grundner A., Hachinger S., Hall D.M., Hartmann T., Iglesias-Suarez F., Janssens M., Jones E.R., Kölling T., Lees M., Lhermitte S., van Nieuwpoort R. V., Pahker A.K., Pellicer-Valero O. J., Pijpers F. P., Siibak A., Spitzer J., Stevens B., Vasconcelos V. V., Vossepoef F. C. (2024). Digital twins of the Earth with and for humans. *Communications Earth & Environment*. 5(463). 1-11

15. Filippov D. V., Tarnopolskiy L. A., Boyarenkova A. D. (2023). Research of the influence of illumination on the calculation of vegetation indices using as example NDVI. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 28(5). 151-162. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-5-151-162. [in Russian]
16. Peladarinos N., Piromalis D., Cheimaras V., Tserepas E., Adrian Munteanu R., Papageorgas P. (2023). Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. *Sensors*. 23(7128). 2-39. - DOI: 10.3390/s23167128
17. Goldenits G., Mallinger K., Raubitzek S., Neubauer T. (2024). Current applications and potential future directions of reinforcement learning-based Digital Twins in agriculture. *Smart Agricultural Technology*. 8. 1-14. DOI: 10.48550/arXiv.2406.08854
18. Sukmanova T.V., Belov N. S. (2024). The use of digital twins in environmental management: a case study of the Kaliningrad region's coastline. In the proceedings of the conference: "Marine Research and Education (MARESEDU-2023) [Conference materials: "Marine Research and Education (MARESEDU-2023)]". 1(4). (pp. 498-505). St. Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov. [in Russian]
19. Skobelev P. O., Galuzin V. A., Galitskaya A. V., & Galuzin A. A. (2025). Forecasting the development of agricultural crops in a digital twin of plant cultivation. *Ontologiya proyektirovaniya. [Ontology of Designing]*, 15(2), 211-227. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-211-227 [in Russian]
20. Eshpulatov D. B. (2023). Possibilities of using digital twins in agriculture. *Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and Entrepreneurship]*. 3. 523-529. [in Russian]
21. Yunson E.V., Melnichuk D. Y. (2024). The digital double of the woodland. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. [International Research Journal]*. 6 (144). 1-5. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.144.47>. [in Russian]
22. Kirstine I. D., Edward C. D. Pope, Aaron R. Hopkinson, Theo Mccaie, Jason A. Lowe (2023). Environment-Aware Digital Twins: Incorporating Weather and Climate Information to Support Risk-Based Decision-Making. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*. 2(4). 1-6. DOI 10.1175/aies-d-23-0023.1
23. Komsomolskaya Pravda: website. Saint-Petersburg. Digital twins of plants: Samara scientists have developed a platform for precision farming.(2023). Retrieved from <https://www.spb.kp.ru/daily/27489/4747397/?ysclid=m7t5d2cj9z216598494>
24. Verkhova G.V., Akimov S. V., Prisiazhniuk S. P. (2021). Distributed multi-agent modeling of complex systems. in the proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements. [Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2021)].1. (p.p. 82-85). Petersburg: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov. [in Russian]
25. Unleashing the Power of Geospatial Technologies to create Digital Twins (2003). The Spatial Times. Retrieved from <https://africansurveyors.net/unlocking-the-power-of-geospatial-technology-to-create-digital-twins/#3-what-is-a-digital-twin>
26. Ana P. Barros (2019). Digital Twin Earth: the next-generation Earth Information System. *Frontiers in Science Editorial*. 2. 1-4. DOI 10.3389/fsci.2024.1383659

Об авторе

Дмитрий Викторович Филиппов – кандидат технических наук, директор.

Author details

Dmitry V. Filippov – PhD, Director.

Получено / Received 17.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.05.2026

Принята к публикации / Accepted 21.07.2026