

Оригинальная статья

УДК 631.61-3.03: 004.94 504.4.062.2

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-13-20>



ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ БЕЗРИСКОВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНОГО КОМПЛЕКСА

Н.С. Севрюгина^{1✉}, А.С. Апатенко, И.Г. Голубев

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина: 127434, г. Москва, ул. Прынишникова, 14/7, Россия

² Росинформагротех; 141261, Московская область, Пушкинский р-н, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60, Россия

Аннотация. Целью исследований явилась разработка концепции создания цифровой копии инфраструктуры мелиоративного комплекса и модели управления с учетом прогнозирования рисков отказов и помощи управления функционирования в случае возникновения нештатных или аварийных ситуаций. Выделена значимость безаварийного функционирования мелиоративного комплекса в структуре безрисковой сельскохозяйственной деятельности. Дано обоснование возможностей исключения возникновения нештатных ситуаций при работе мелиоративного комплекса путем внедрения непрерывного контроля состояния всех систем с использованием современных технологий. Обоснована актуальность разработки концепции создания цифровой копии инфраструктуры мелиоративного комплекса и модели управления с учетом прогнозирования рисков отказов и помощи управления функционирования в случае возникновения нештатных или аварийных ситуаций. Анализ концептуальных моделей показал, что наиболее информативной и реализуемой следует принимать пятимерную модель цифрового образа объекта с включением беспроводной интеграции данных для автономного управления процессами. Технология беспроводной интеграции позволяет управлять процессом, сокращая время разрыва между ожидаемыми и текущими условиями эксплуатации на физическом уровне. Предлагается информационный модуль мелиоративного комплекса представить в виде 3 блоков: блок строительства объекта, блок поддержания работоспособного состояния, блок эксплуатации. Ключевым показателем сформированности цифрового образа принято масштабирование данных по определению ограничений и проблем в каждом периоде жизненного цикла мелиоративного комплекса с выделением функции оптимизации. Принято решение о целесообразности перевода системы оповещения в автономный режим с включением компонентов автоматического регулирования. В качестве примера представлен алгоритм контроля функционирования компонентного элемента мелиоративного комплекса, щитового затвора. Сформирован алгоритм типовой модели цифрового двойника с модулем беспроводной интеграции прогнозирования и выявления аномалии в форме рисков отказов, нарушения безопасности, возникновения нештатных или аварийных ситуаций функционирования отдельных элементов мелиоративного комплекса в режиме реального времени на всем сроке службы систем.

Ключевые слова: мелиоративный комплекс, эффективность функционирования, управление рисками, компьютерная модель, цифровой образ, отказы оборудования, контроль, информативность

Формат цитирования: Севрюгина Н.С., Апатенко А.С., Голубев И.Г. Цифровые модели контроля и управления безрискового функционирования мелиоративного комплекса // Природообустройство. 2024. № 3. С. 13-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-13-20>

Scientific article

DIGITAL MODELS OF CONTROL AND MANAGEMENT OF RISK-FREE OPERATION OF THE RECLAMATION COMPLEX

N.S. Sevryugina^{1✉}, A.S. Apatenko¹, I.G. Golubev²

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Mechanics and Energy named after V.P. Goryachkin: 14/7 Pryanishnikova str., Moscow, 127434, Russia

² Rosinformagrotech, 141261, Moscow region, Pushkinsky district, R.P. Pravdinsky, Lesnaya str., 60, Russia

Abstract. The purpose of the work: – development of the concept of creating a digital copy of the infrastructure of the reclamation complex and a management model, taking into account

the prediction of failure risks and the assistance of the management of functioning in case of emergency or emergency situations. The importance of accident-free functioning of the reclamation complex in the structure of risk-free agricultural activity is highlighted. The substantiation of the possibilities of eliminating the occurrence of emergency situations during the operation of the reclamation complex by introducing continuous monitoring of the condition of all systems using modern technologies is given. The relevance of the development of the concept of creating a digital copy of the infrastructure of the reclamation complex and a management model is substantiated, taking into account the prediction of failure risks and the help of operation management in case of emergency or emergency situations. The analysis of conceptual models has shown that the most informative and feasible should be a five-dimensional model of the digital image of an object with the inclusion of seamless data integration for autonomous process management. Seamless integration technology allows you to manage the process, reducing the time gap between expected and current operating conditions at the physical level. It is proposed to present the information module of the reclamation complex in the form of 3 blocks: a block for the construction of an object, a block for maintaining a working condition, and an operation block. A key indicator of the formation of a digital image is the scaling of data to identify limitations and problems in each period of the life cycle of a reclamation complex, highlighting the optimization function. A decision was made on the expediency of switching the notification system to an autonomous mode with the inclusion of automatic control components, as an example, an algorithm for monitoring the functioning of a component element of a reclamation complex, a shield gate, an algorithm for a typical digital twin model with a module for seamless integration of forecasting and detecting anomalies in the form of failure risks, security violations is presented, the occurrence of abnormal or emergency situations of the functioning of individual elements of the reclamation complex in real time throughout the entire service life of the systems.

Keywords: reclamation complex, operational efficiency, risk management, computer model, digital image, equipment failures, control, informativeness

Format of citation: Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Golubev I.G. Digital models of control and management of risk-free functioning of a reclamation complex // Prirodoobustrojstvo. 2024. No. 3. P. 13-20. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-13-20>

Введение. Значимость функционирования мелиоративного комплекса для эффективного ведения сельскохозяйственной деятельности определяется спецификой ведения работ. Сельскохозяйственные поля должны быть обеспечены достаточным источником влаги, а при его избытке – эффективной системой отведения, что позволяет перевести растениеводство в категорию низкорискового производства [1]. Чтобы это обеспечить, все компоненты мелиоративного комплекса должны быть надежными и исправно функционировать. Работоспособность и долговечность работы мелиоративного комплекса обеспечиваются периодическим обслуживанием и ремонтом по потребности. Следует отметить, что хотя данный подход риски снижает, но он не исключает возникновения нештатных или аварийных ситуаций [2].

Согласно статистическим данным в настоящее время в федеральной собственности имеется более 34,3 тыс. мелиоративных сооружений, том числе 232 водохранилища, более 2 тыс. регулирующих и распределительных гидроузлов, 134 речные плотины, 1,8 тыс. подающих и откачивающих насосных станций, 42,3 тыс. км магистральных

водопроводящих и водобросных каналов, свыше 3 тыс. км защитных дамб и валов [3].

Современные технологии позволяют исключить возникновение нештатных ситуаций в работе элементов мелиоративного комплекса путем внедрения системы непрерывного контроля состояния всех систем [4, 5]. Представляется, что наиболее эффективными организационными мерами может быть использование цифровых технологий с включением аналитических элементов предсказательного прогнозирования рисков отказов [6].

Цель исследований: разработка концепции создания цифровой копии инфраструктуры мелиоративного комплекса и модели управления с учетом прогнозирования рисков отказов и помощи управления функционирования в случае возникновения нештатных или аварийных ситуаций.

Для достижения поставленной цели требуется решить задачи, заключающиеся в разработке технологий создания цифровых копий мелиоративных комплексов для мониторинга работоспособности компонентов, проведения анализа безопасности и оценки рисков.

Требуется дать аналитическое обоснование механизма определения и характеристики набора уникальных требований и ожидаемых результатов оптимизации функционирования мелиоративных комплексов.

Материалы и методы исследований.

Анализ имеющихся разработок в области создания цифровых двойников охватывает практически все сферы народнохозяйственной деятельности в мире. При всем разнообразии следует отметить общность решаемых задач – в частности, применения цифровых двойников в производственных системах при дополнении технологий индустрии 4.0 и интеллектуализации процессов [7], при создании приложений технического обслуживания [8], задач прогнозирования и управления ресурсом сложных систем [9], структурного моделирования процессов жизненного цикла, эффективности эксплуатации [10] и пр. [11, 12].

Проведенный анализ не дает четких рекомендаций по технологиям применения цифровых двойников для АПК – в частности, мелиоративных систем и комплексов.

Теория моделирования виртуального образа физического объекта и характеристика потоков обмена данными. Для создания зеркальной копии инфраструктурных объектов мелиоративного комплекса следует использовать типовые концептуальные модели, включающие в себя развернутое описание составляющих объектов и их взаимосвязи, выделяя:

– *физический объект (PO)*, представляющий собой отдельный укрупненный компонент или сложную систему с несколькими взаимодействующими компонентами. Для получения полной и исчерпывающей информации о физическом объекте данные формируются путем интеграции нескольких методов сбора данных;

– *цифровой объект (VO)* – совокупность моделей и модулей, имитирующих состояние физического объекта и его изменение во времени. Следует учитывать удаленность расположения объектов мелиоративного комплекса, их территориальную разобщенность, что не позволяет иметь достаточную информацию, а это в свою очередь усложняет процесс моделирования и увеличивает вариативность использования цифрового образа в описании ожидаемых функций;

– *процесс двойственности*, обеспечивающий соответствие беспроводной интеграции и обратной связи между физическим и цифровым объектами. Взаимосвязь обеспечивает обмен информацией и выполняет функции мониторинга

и контроля. Процесс двойственности характеризует требования к взаимодействиям в соответствии с ожидаемыми характеристиками в алгоритме «Физическое-виртуальное» (P2V) и «Виртуальное-физическое» (V2P) соответственно.

Принято считать наиболее эффективными концептуальные модели с учетом объемного описания – это трехмерная и пятимерная модели.

Трехмерная модель [12] включает в себя компоненты физического, виртуального объектов, реверсность обмена данными для осуществления управляющих воздействий, создает замкнутый контур обратной связи.

Трехмерная модель ограничена по информационной составляющей и не позволяет решить задачи учета факторного разнообразия влияний, характерного для объектов мелиоративного комплекса.

Пятимерная модель [7] дополняет трехмерную модель итеративным процессом оптимизации, то есть состоит из физической системы (PS), цифровой системы (VS), механизма обновления (P2V), механизма прогнозирования (V2P) и механизма оптимизации (OPT). Модель контролирует механизм обновления системы на основе полученных данных, прогнозируя будущее состояние физического объекта через виртуальный образ; получение прогнозного решения через обратную передачу управляющих воздействий на физический объект посредством исполнительных механизмов. В свою очередь, интеллектуальный блок обеспечивает корректировку технического состояния конструкции, механизм оптимизации, через информационный банк оценивает вариативность возможностей состояния и корректирует цифрового двойника, обеспечивая точность принятия решения.

Процесс двойственности в алгоритме «Физическое-виртуальное» (P2V) включает в себя две фазы: фазу метрологии – оценки состояния физического объекта; фазу реализации – количественное определение отклонений между физическим и цифровым объектами и механизм обновления виртуального образа. Преимущество данного подхода заключается в использовании технологии беспроводной интеграции, то есть не требуется вмешательство человека в процесс принятия решения до заданного момента критического функционирования включая процесс анализа безопасности, оценки рисков и управления в чрезвычайных ситуациях.

Следует учитывать, что при формировании информационной базы данные могут содержать несколько сигналов, характеризующихся разным разрешением и точностью. При этом

не исключается наличие ложных, противоречивых или неполных данных. Обработка и анализ информации позволяют модифицировать реальные объекты по признакам параметрической и функциональной оптимизации [13].

Метод объединения данных включает в себя три фазы (объединение данных, оценку состояния и объединение на уровне принятия решения):

- объединение данных направлено на установление согласованности между параметрическими значениями во времени для классификации и отладки цифрового образа. Наибольшую эффективность показывает беспроводная интеграция, при которой требуются распознавание обучающих и реальных данных, их генерация для адаптации в целевой функции, способность поддерживать задачи прогнозирования и выявлять аномалии в форме рисков отказов, нарушения безопасности, возникновения нештатных или аварийных ситуаций;

- оценка состояния дает возможность учета вариативности состояний объекта по доступным данным и полученным измерениям. Решается задача наполнения информационного банка логическими цепочками, «фреймами истинности» (выделение значений переменных состояния и параметров, наилучшим образом соответствующих наблюдаемым данным). Для повышения точности оценки состояния могут использоваться комбинированные методы модального анализа и байесовского моделирования;

- объединение на уровне принятия решений выполняет высокоуровневые выводы о состоянии физического объекта и его функциональности в данный отрезок времени.

Метод объединения данных в информационной базе создает фрейм с учетом отклонений и ограничений функционирования, то есть собирает информацию факторного влияния как внешней, так и внутренней среды объекта [14].

Следующим этапом является *обоснованность принятия решения* и включение в систему функциональных опций управления с возможностью корректировки состояния физическим воздействием, то есть создание взаимосвязи «Виртуальное-физическое» (V2P) при обеспечении прогнозирования, возможного после установки конфигуратора программируемых логических контроллеров (PLC).

Далее устанавливается уровень несоответствия между требуемым и текущим состоянием физического объекта, когда возможен вариант имитации состояния через реализацию функционала «цифровой тени».

«Цифровая тень» – это цифровой объект с автономным подключением к физическому объекту с реверсным потоком данных от физического к виртуальному объекту непрерывно, а в обратном направлении – с прерыванием. В рассматриваемом варианте цифровой модуль только имитирует состояние физического объекта в режиме реального времени без управляющих воздействий.

Технология беспроводной интеграции позволяет управлять процессом, сокращая время разрыва между ожидаемыми и текущими условиями эксплуатации на физическом уровне.

Алгоритм передачи потока данных между физическим и виртуальным объектами представлен на схеме рисунка 1.

Результаты и их обсуждение. *Концепция характеристики архитектурной структуры цифровых двойников инфраструктуры мелиоративных комплексов.* Структурные составляющие мелиоративных комплексов представляют собой взаимосвязанные гидротехнические сооружения и устройства – такие, как каналы, коллекторы, трубопроводы, водохранилища, плотины, дамбы, насосные станции, водозаборы и прочие компоненты. При создании цифрового образа мелиоративного комплекса следует исходить из долгосрочности функционирования инфраструктурных объектов.

Предлагается информационный модуль мелиоративного комплекса представить в виде трех блоков: блок строительства объекта; блок поддержания работоспособного состояния; блок эксплуатации (рис. 2).

Для первого модуля, несмотря на информационную очевидность параметрических данных,

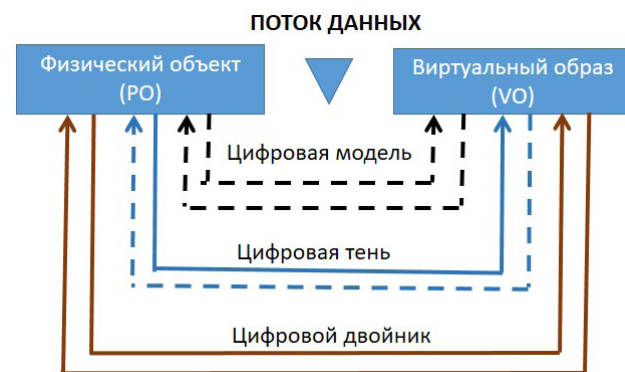


Рис. 1. Варианты схем взаимосвязи цифровых моделей, форм потоков обмена данными между физическим объектом и его виртуальным образом

Fig. 1. Options for diagrams of interconnection of digital models, forms, flows, data exchange between a physical object and its virtual image



Рис. 2. Функциональные блоки этапов жизненного цикла мелиоративных комплексов:

I – этап строительства; II – этап поддержания работоспособного состояния;

III – этап штатного функционирования

Fig. 2. Functional blocks of the stages of the life cycle of reclamation complexes:

I – construction stage; II – stage of maintenance of operable condition; III – stage of normal operation

то есть наличие нормативной и проектно-проектировочной документации, введение в информационный банк данных характеристик компонентов мелиоративного комплекса не даст реальной картины физического состояния существующих конструкций [15]. Соответственно требуется провести предварительный сбор данных об уровне соответствия нормативных и фактических параметров состояния мелиоративного комплекса.

Второй блок следует дополнить информацией о техническом состоянии мелиоративных систем, об уровне их загрязнения, разработать механизм учета степени внешнего воздействия на его функциональные характеристики.

Третий этап включает в себя условия эксплуатации по показателям эффективности и достаточности водной составляющей для выполнения функциональных задач мелиоративных систем по заложенным способам орошения земель.

Разработка цифрового образа мелиоративных систем строилась как пятимерная модель. За ключевой показатель сформированности принято масштабирование данных по определению ограничений и проблем в каждом периоде жизненного цикла мелиоративного комплекса с выделением функции оптимизации: контроль безопасности, оценка рисков и управление в чрезвычайных ситуациях.

Параметрическая характеристика мелиоративного комплекса включает в себя информационный блок данных. Например, для контроля процесса управления водоподачи на оросительных системах функция базы данных состоит из параметров [16]:

$$F\left(Q_v; \sum_{j=1}^n q_t; k; \eta; w_{ji}; \Delta Q_i; t\right), \quad (1)$$

где Q_v – расход оросительной системы, м³/с; $\sum_{j=1}^n q_t$ – плановые значения водоподачи, м³/с; k – коэффициент спроса; η – КПД оросительной системы; w_{ji} – емкость резервуара в целом и отдельного участка соответственно, м³; ΔQ_i – факторы влияния; t – время, с.

В приведенном примере виртуальная модель записывается алгоритмом логических условий:

$$f_1 = Q_v \geq \frac{\sum_{j=1}^n q_t k}{\eta} \wedge (w_j > w_i) \wedge (\sum w_i \geq \Delta Q_i t); \quad (2)$$

$$f_2 = Q_v \geq \frac{\sum_{j=1}^n q_{max} k}{\eta} \wedge (w_j^i > w_i) \wedge (\sum w_i \geq \Delta Q_i t). \quad (3)$$

Заданные логические условия характеризуют работу оросительной системы в штатном режиме как при плановом режиме водоподачи, так и для максимального водозабора.

Цифровая модель позволяет оптимизировать штатный режим работы мелиоративной системы, а для нештатных ситуаций требуется дополнить систему управляющими компонентами. Для снижения рисков отказов систему оповещения логичнее перевести в автономный режим и включить компоненты автоматического регулирования. В качестве примера представлен алгоритм контроля функционирования компонентного элемента мелиоративного комплекса, щитового затвора (рис. 3).

Пятимерная модель позволяет в режиме реального времени выполнять мониторинг системы, оценивать и прогнозировать ее техническое состояние путем включения в систему блока управления щитовым затвором. Алгоритм управления щитовым затвором в режиме реального времени с применением пятимерной модели представлен на рисунке 4.

Оптимизация функционирования мелиоративного комплекса для прогнозирования и выявления аномалии в форме рисков отказов, нарушения безопасности, возникновения нештатных или аварийных ситуаций включает в себя алгоритмы беспшовной интеграции, последовательных действий.



Рис. 3. Типовая модель формирования цифрового двойника мелиоративного комплекса на примере контроля функционирования щитового затвора

Fig. 3. A typical model for the formation of a digital twin of a reclamation complex on the example of monitoring the functioning of a shield gate



Рис. 4. Алгоритм управления щитовым затвором в режиме реального времени с применением пятимерной модели цифровой копии

Fig. 4. Real-time control algorithm for panel gate using a five-dimensional digital copy model

При контроле уровня безопасности и ситуационного анализа требуется включать алгоритмы:

- расчет факторов, влияющих на безопасность;

- уровень эффективности модели оценки безопасности;

- анализ стабильности информационного банка и факторного воздействия;

- идентификация опасных воздействий и аварий;

- система визуального оповещения в режиме реального времени;

- методы контроля безопасности для технологических процессов различных этапов жизненного цикла;

- мониторинг и анализ безопасности.

При оценке рисков алгоритм решает следующие задачи:

- идентификация рисков;

- количественная оценка рисков;

- диагностика и прогнозирование рисков;

- мониторинг и контроль рисков.

Принятие решения в нестандартных и/или чрезвычайных ситуациях (ЧС):

- модель отслеживания решений для управления безопасностью в ЧС;

- модель ситуационного оповещения во время ЧС;

- модель интеллектуального управления системой в период ЧС.

Выводы

Представлен критический обзор моделей создания цифровых двойников для их применения в оптимизации процессов функционирования инфраструктурных объектов мелиоративного комплекса, анализа безопасности, оценки рисков и управления в нештатной или аварийной ситуации.

Анализ концептуальных моделей показал, что за наиболее информативную и реализуемую следует принимать пятимерную модель цифрового образа объекта с включением бесшовной интеграции данных для автономного управления процессами.

Список использованных источников

1. **Севрюгина Н.С., Апатенко А.С., Войтович Е.В.** Риски экосистемы при функционировании водохозяйственных комплексов // *Природообустройство*. 2020. № 2. С. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX.
2. **Севрюгина Н.С.** Инфографическая модель комплексной безопасности транспортных и технологических машин // *Безопасность труда в промышленности*. 2011. № 6. С. 72-74. EDN: NVVNFL.
3. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: Информационное издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 304 с.
4. **Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С.** Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот // *Мелиорация*. 2021. № 3 (97). С. 67-74. EDN: SYRHE.
5. **Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Голубев В.В. и др.** Передовые практики введения залежных земель в оборот. М.: Росинформагротех, 2021. 80 с. EDN: PFVVEL.
6. **Юрченко И.Ф.** Автоматизация управления формированием мелиоративного состояния агроэкосистем // *Природообустройство*. 2019. № 4. С. 15-22. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-15-22. EDN: NTTEVP.
7. **Tao F., Qi Q.** Make more digital twins // *Nature*. 2019. Т. 573, № 7775. С. 490-491. DOI: 10.1038/Д41586-019-02849-1.
8. **Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S.** Digital Twin for maintenance: A literature review // *Computers in Industry*. 2020. Т. 123. С. 103316. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316.
9. **Agnusdei G.P., Elia V., Gnoni M.G.** Is digital twin technology supporting safety management? A bibliometric and systematic review // *Applied Sciences*. 2021. Т. 11, № 6. С. 2767. DOI: 10.3390/app11062767.
10. **Jones D. et al.** Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // *CIRP journal of manufacturing science and technology*. 2020. Т. 29. С. 36-52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
11. **Enrico Zio, Leonardo Miqueles.** Digital twins in safety analysis, risk assessment and emergency management, *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 246. P. 110040. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110040>.
12. **Grieves M.** Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // *White paper*. 2014.

Представлен перечень ожидаемых функций и технологий, обеспечивающих совместное использование физического и цифрового объектов, алгоритм выделения ограничений и факторной неопределенности при оптимизации. Определены вспомогательные методы и технологии, модальные функции для создания приложений анализа безопасности, оценки рисков и управления в чрезвычайных ситуациях. Сформирован алгоритм типовой модели цифрового двойника мелиоративного комплекса на примере контроля функционирования щитового затвора.

References

1. **Sevryugina N.S.** Ecosystem risks during the functioning of water management complexes / N.S. Sevryugina, A.S. Apatenko, E.V. Voitovich // *Prirodoobustrojstvo*. 2020. No. 2. P. 115-122. – DOI 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. – EDN BJVTGX.
2. **Sevryugina N.S.** Infographic model of integrated safety of transport and technological machines / N.S. Sevryugina // *Labor safety in industry*. 2011. No. 6. P. 72-74. – EDN NVVNFL.
3. Land reclamation complex of the Russian Federation: information. Edition. – M.: FGBNU “Rosinformagrotekh”, 2020. 304 p.
4. **Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S.** Status and prospects for the involvement of fallow lands in circulation // *Melioration*. 2021. No. 3 (97). P. 67-74. – EDN SYRHE.
5. **Golubev I.G., Mishurov N.P., Golubev V.V. [et al.]** Best practices for introducing fallow lands into circulation. Moscow: Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex. 2021. 80 p. – ISBN 978-5-7367-1638-8. – EDN PFVVEL.
6. **Yurchenko I.F.** Automation of control over the formation of the reclamation state of agroecosystems / I.F. Yurchenko // *Prirodoobustrojstvo*. 2019. No. 4. P. 15-22. – DOI 10.34677/1997-6011/2019-4-15-22. – EDN NTTEVP.
7. **Tao F., Qi Q.** Make more digital twins // *Nature*. 2019. Т. 573. №. 7775. – С. 490-491. DOI: 10.1038/Д41586-019-02849-1
8. **Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S.** Digital Twin for maintenance: A literature review // *Computers in Industry*. 2020. Т. 123. С. 103316. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103316
9. **Agnusdei G.P., Elia V., Gnoni M.G.** Is digital twin technology supporting safety management? A bibliometric and systematic review // *Applied Sciences*. – 2021. Т. 11. №. 6. С. 2767. DOI: 10.3390/app11062767
10. **Jones D. et al.** Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // *CIRP journal of manufacturing science and technology*. 2020. Т. 29. С. 36-52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
11. **Enrico Zio, Leonardo Miqueles,** Digital twins in safety analysis, risk assessment and emergency management, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 246, 2024, 110040, ISSN0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110040>

Т. 1, № 2014. С. 1-7. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTSSERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>.

13. Встраиваемая мультиплексная цифровая система мониторинга машин природообустройства / Н.С. Севрюгина, Е.В. Рузанов, М.А. Матвеев, А.С. Апатенко // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XI Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский, 5-7 июня 2019 г. Правдинский: Росинформагротех, 2019. С. 378-383. EDN: XHCIB.

14. **Apatenco A.S., Sevryugina N.S.** Methods of recruiting of mobile repair services and maintenance of machines performing reclamation works // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroymeh-2019, ISM 2019, Kazan, 12-13 сентября 2019 г. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. Vol. 786. P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012037. EDN: SEDJPG.

15. **Севрюгина Н.С., Капырин П.Д.** Эффективность выбора средств механизации строительных и специальных строительных работ // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 11. С. 59-64. EDN: ZSHHHP.

16. **Кирейчева Л.В., Яшин В.М.** Формирование эволюционирующего мелиоративного режима на орошаемых землях // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 6-1 (96). С. 140-144. DOI: 10.23670/IRJ.2020.96.6.025. EDN: NRHWPR.

12. **Grieves M.** Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Т. 1. №. 2014. С. 1-7. <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/DELMIA/PDF/Whitepaper/DELMIA-APRISO-Digital-Twin-Whitepaper.pdf>

13. Embedded multiplex digital system for monitoring environmental management machines / N.S. Sevryugina, E.V. Ruzanov, M.A. Matveenko, A.S. Apatenko // Scientific and information support for innovative development of the agro-industrial complex: materials of the XI International Scientific and Practical Internet conference, Pravdinsky village, June 05-07, 2019. – p. Pravdinsky: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex, 2019. P. 378-383. – EDN XHCIB.

14. **Apatenko A.S.** Methods of recruiting of mobile repair services and maintenance of machines performing reclamation works / A.S. Apatenco, N.S. Sevryugina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Conference Interstroymeh – 2019, ISM 2019, Kazan, 12-13 сентября 2019 года. Vol. 786. – Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012037. – DOI 10.1088/1757-899X/786/1/012037. – EDN SEDJPG.

15. **Sevryugina N.S.** Efficiency of choosing means of mechanization of construction and special construction works / N.S. Sevryugina, P.D. Kapyrin // Mechanization of construction. 2017. V. 78, No. 11. P. 59-64. – EDN ZSHHHP.

16. **Kireycheva L.V.** Formation of an evolutionary reclamation regime on irrigated lands / L.V. Kireycheva, V.M. Yashin // International scientific research journal. 2020. No. 6-1(96). P. 140-144. – DOI 10.23670/IRJ.2020.96.6.025. – EDN NRHWPR.

Об авторах

Надежда Савельевна Севрюгина, д-р техн. наук, доцент, AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevryuginans@rgau-msha.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Иван Григорьевич Голубев, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник; AuthorID: 299734; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>; golubev@rosinformagrotech.ru

About the authors

Nadezhda S. Sevryugina, DSc (Eng), associate professor, AuthorID: 144506; <https://orcid.org/0000-0002-3494-1437>; sevryuginans@rgau-msha.ru

Alexey S. Apatenko, DSc (Eng), associate professor, head of the department; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Ivan G. Golubev, DSc (Eng), professor, chief researcher; AuthorID: 299734; <https://orcid.org/0000-0002-3754-0380>; golubev@rosinformagrotech.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Севрюгина Н.С., Апатенко А.С., Голубев И.Г., выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 21.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 15.05.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 15.05.2024

Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Golubev I.G. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.