

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕДЕЛИЕМ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА И ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ**В.К. Каличкин, А. С. Донченко, К. С. Голохваст**

Реферат. Статья посвящена разработке системы цифрового управления земледелием (ЦСУЗ), объединяющей мониторинг сельскохозяйственных объектов, анализ данных длительных полевых опытов и современные информационные технологии. Цель исследования – создание теоретической основы для оптимизации управления агропроизводством за счёт интеграции искусственного интеллекта, машинного обучения, дистанционного зондирования, геоинформационных систем (ГИС) и больших данных. Новизна работы заключается в применении алгоритмов машинного обучения для прогнозирования урожайности, масштабирования архетипов систем земледелия на основе пространственно-временного анализа, а также разработке пространственной системы поддержки принятия решений (СППР), сочетающей ГИС, моделирование и базы знаний. Техническая реализация мониторинга включает использование беспилотных летательных аппаратов, метеостанций, почвенных датчиков и спутниковых снимков, данные которых обрабатываются в облачных средах. Результаты исследований демонстрируют возможность снижения неопределённости в управлении агротехнологиями за счёт предиктивной аналитики, имитационного моделирования и стандартизации мультимодальных данных. Выводы подчёркивают практическую значимость ЦСУЗ для повышения устойчивости, минимизации рисков и рентабельности растениеводства. Предложенная система позволяет перейти от обобщённых рекомендаций к индивидуализированному управлению, учитывающему пространственно-временную изменчивость агроландшафтов. Ключевые компоненты ЦСУЗ – модули прогнозирования урожайности, анализа вегетационных индексов, дифференцированного внесения удобрений и интеграции данных полевых экспериментов – ориентированы на решение задач цифровизации сельского хозяйства. Результаты работы имеют прикладное значение для внедрения интеллектуальных технологий в агропромышленный комплекс.

Ключевые слова: цифровое земледелие, мониторинг, искусственный интеллект, машинное обучение, прогнозирование урожайности, ГИС, СППР.

Для цитирования: Каличкин В.К., Донченко А.С., Голохваст К.С. Формирование системы цифрового управления земледелием на основе мониторинга и длительных полевых опытов// Агробιοтехнологии и цифровое земледелие. 2025. №2(14). С. 58-68.

Введение. Земледелие по своей природе является сложной научной областью, связанной с широким спектром знаний, навыков, методов и процессов, которые могут эффективно поддерживаться современными цифровыми технологиями. Современное земледелие переживает трансформацию, обусловленную этими технологиями, которая представляется многообещающей, поскольку позволит ему перейти на следующий уровень устойчивости, производительности и прибыльности производства растениеводческой продукции.

Последние достижения в области информационных и коммуникационных технологий оказывают значительное влияние на все сектора экономики и земледелие не является исключением. Цифровое земледелие (Digital Agriculture) появилось как следствие демократизации цифровых устройств, а также достижений в области искусственного интеллекта (Artificial Intelligence) и науки о данных (Data Science). Эта новая парадигма, сосредоточенная на получении сельскохозяйственных данных и формировании на их основе знаний, получила несколько названий: Сельское хозяйство 4.0 (Agriculture 4.0) [1] или Сельское хозяйство 5.0 [2], Цифровое земледелие (Digital Farming) [3] или Интеллектуальное земледелие (Smart Farming) [4], и возникла, когда телематика и управление данными были объединены с уже известной концепцией точного земледелия

(Precision farming) [5]. Цифровое земледелие создало новые процессы, позволяющие сделать сельское хозяйство более продуктивным и эффективным при уменьшении давления на окружающую среду [6,7].

Цифровое земледелие – это растущее использование информационных технологий, включающих Интернет вещей, дистанционное зондирование, облачные вычисления, анализ больших данных и искусственный интеллект (ИИ). Эти технологии содействуют повышению продовольственной безопасности, сокращению внесения удобрений и пестицидов и повышению рентабельности производства растениеводческой продукции. Сенсорные системы и связанная с ними аналитика могут предоставить производителям сельскохозяйственной продукции более качественную информацию для принятия своевременных решений с предсказуемыми результатами, а автоматизация решений задач с использованием датчиков в реальном времени и машинного обучения может повысить их надежность. Использование цифровых технологий может также обеспечить инновационную поддержку для успешной реализации систем земледелия и использования земли в их конкретных пространственных условиях и способствовать новому обучению в процессе принятия управленческих решений [8,9].

Источники знаний в земледелии основываются на общих рекомендациях, полученных

в результате индуктивного анализа экспериментов, проведенных на опытных полях научных и учебных учреждений в ограниченном географическом пространстве. Однако уже не вызывает сомнения, что результаты, полученные в отдельной точке пространства (в экспериментах на «небольших участках»), не являются репрезентативными для неоднородных производственных полей, расположенных в различных природных условиях, пусть даже одного почвенно-климатического района. Вопросы масштабирования этих результатов в полной мере до сих пор не решены. Цифровые (интеллектуальные) технологии предоставляют возможность перехода от обобщенного управления земледелием к индивидуализированному и оптимизированному управлению в режиме реального времени с использованием датчиков [10], Интернета вещей [11, 12] и интеллектуального анализа данных [13, 14]. Кроме того, цифровые технологии, включающие геоинформационные системы (ГИС) и дистанционное зондирование [15], могут способствовать выделению и типизации ареалов управления в масштабах поля, хозяйства, региона или почвенно-климатической зоны [16, 17, 18], тем самым способствуя решению проблем масштабирования результатов полевых экспериментальных исследований.

Важную роль в цифровом управлении земледелием играет система мониторинга окружающей среды, обеспечивая умное, устойчивое и экологичное сельское хозяйство, и которая помогает справиться с основными проблемами и факторами, влияющими на повышение его производительности. Интеллектуальная система мониторинга по сути является основой умного земледелия. Она помогает не только поддерживать производительность при ограниченных ресурсах, но и может осуществлять наблюдение за климатическими изменениями, питательными веществами в почве, динамикой воды, осуществлять поддержку управления данными в сельскохозяйственных системах, а также борьбы с сорняками, насекомыми-вредителями и болезнями [19,20].

Цель исследований – разработка теоретической базы системы цифрового управления земледелием, включающая мониторинг сельскохозяйственных объектов, масштабирование результатов полевых опытов, использование современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта (ИИ).

Условия, материалы и методы. Методологической основой исследований выступал междисциплинарный подход, который реализовывался в использовании принципов объективности и системности. При проведении исследования применялся метод теоретического анализа и синтеза, классификации, метод индукции и дедукции, сравнения и др.

Для разработки основ цифровой системы управления земледелием (ЦСУЗ) был проведен аналитический обзор научных публикаций, описывающий как теоретические

положения и функциональные возможности, так и результаты практического применения современных подходов, позволяющих осуществлять поддержку принятия решений при производстве растениеводческой продукции. Анализ также включал просмотр открытой информации об отечественных инструментах в данной предметной области, представленных в Интернет, близких к общей сфере применения ЦСУЗ, т.е. основанных на общесистемных подходах, которые в автоматизированном режиме собирают и обрабатывают информацию для поддержки принятия решений в земледелии. С этой целью было проанализировано более 25 российских компьютерных программ. В основном в программах реализуется оперативная поддержка агротехнологий путем предоставления агрономической информации – цифровая карта полей и их история, севообороты, агрохимический анализ почв, план производства растениеводческой продукции, различные справочники. Программы предоставляют возможность наблюдения за состоянием посевов с помощью мобильного приложения, делают анализ накопления биомассы по NDVI, используют данные спутникового мониторинга полей и съемок с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), формируют карты дифференцированного внесения удобрений и пестицидов, учитывают погодные данные и контролируют соблюдение агротехнологий с помощью ГЛОНАСС/GPS и др.

Использовали также следующие методы работы с информацией: контент-анализ, абстрактно-логический, обобщение, концептуализация.

Результаты и обсуждение. Цифровая система управления земледелием (ЦСУЗ) – это основанная на правилах и знаниях система поддержки принятия решений (СППР), которая объединяет технологии мониторинга *in situ* (это наблюдение и/или измерение событий в их исходном месте (от латинского слова *situs* – место)) и дистанционного зондирования посевов и природных объектов; алгоритмы машинного обучения и интеллектуальный анализ результатов мониторинга и длительных полевых опытов; формирование архивов систем земледелия и их масштабирование; моделирование пространственных объектов и типизация земель с использованием ГИС; веб-платформы с общедоступными базами данных в реальном времени; модули планирования и поддержки агротехнологий; моделирование экосистемных услуг (ЭСУ) и биоразнообразия; оценку воздействия на устойчивость и экономику производства растениеводческой продукции [21].

ЦСУЗ основана на наземном, проксимальном и дистанционном мониторинге почвы, воздуха и посевов с помощью технологий *in situ* и дистанционного зондирования, осуществляемый на основе данных разнообразных датчиков (инвазивных и переносных) и цифровых снимков,

полученных с БПЛА или спутников через регулярные промежутки времени. Мониторинг позволяет систематизировать информацию по объектам как во времени (вегетационный пе-

риод, год), так и в пространстве (ареал управления, землепользование, агроландшафт), отражая временную и пространственную динамику объектов наблюдения (рис. 1).



Рисунок 1 - Схема мониторинга полевых опытов Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН (СФНЦ РАН)

Технико-технологическая реализация мониторинга состоит из следующих основных блоков:

- оборудование для мониторинга и сбора данных. БПЛА с мультиспектральной камерой (съемка полей в различных спектральных диапазонах для оценки состояния посевов), метеостанция (сбор данных о погодных условиях), полевые датчики (измерение параметров почвы), спутниковые снимки среднего и высокого разрешения;

- вычислительная инфраструктура. Сервер обработки данных (сервер на базе Intel Xeon (32+ ядер), RAM 256+ ГБ, GPU NVIDIA Tesla для задач машинного обучения), система хранения данных (RAID-массив 20+ ТБ с горячим резервированием, система резервного копирования), рабочие станции (ПК с CPU i7/i9, RAM 32+ ГБ, GPU NVIDIA RTX 3060+, SSD 1+ ТБ для работы с ГИС, обработки данных ДЗЗ и разработки программного обеспечения), облачные сервисы (доступ к вычислительным ресурсам Google Colab Pro/Pro+, AWS EC2 для распределенных вычислений);

- Агросигнал- платформа для спутникового мониторинга полей и анализа вегетационных индексов

- 1С:Агропрофи - система управления агропредприятием с модулями учета и планирования

- программное обеспечение. ГИС-платформа (ArcGIS, QGIS для работы с пространственными данными и картографирования), ПО обработки ДЗЗ (ENVI, SNAP, Google Earth Engine для анализа космических снимков), аналитическое ПО (инструменты для статистического анализа и прогнозирования – Python, R), специализированное ПО (Agisoft Metashape для обработки данных с БПЛА, PostGIS для хранения геоданных).

- обучение сотрудников. Курсы повышения квалификации (обучение работе с ГИС, администрированию серверов, IoT-системам), практическая подготовка (работа с полевым оборудованием, калибровка датчиков, обработка данных), научные стажировки (обмен опытом с ведущими научными центрами).

Датчики почвы и носимые устройства для растений играют важную роль в интеллектуальном земледелии, отслеживая в режиме реального времени физические и химические сигналы, такие как температура, влажность, газообмен, площадь листьев, содержание хлорофилла и др., предоставляя ключевую информацию для оптимизации условий выращивания сельскохозяйственных культур, борьбы с биотическими и абиотическими стрессами и повышения урожайности. Инвазивные (внутрипочвенные) датчики используются с помощью беспроводной сенсорной сети на основе Интернета вещей [22].

Дистанционное зондирование – технология, которая может предоставить информацию как о биологических объектах (растительность и ее динамика), так и о физических условиях земель (изменения рельефа, морфологические и физические параметры). Для анализа особенностей пространственных объектов осуществляется интеграция дистанционного зондирования и ГИС. Для этих целей проводится сегментация и классификация изображений цифровых снимков одним из методов, например, GEOBIA (анализ изображений на основе географических объектов) в отличие от традиционных методов на основе пикселей, фокусируется на выявлении и анализе объектов и регионов внутри изображений [23]. Мультиспектральные и гиперспектральные снимки позволяют рассчитывать вегетационные индексы (ВИ), оценивать биомассу растений,

выявлять неоднородности в развитии посевов, признаки заболеваний и сорняки. БПЛА, оснащенные специализированными камерами, дополняют спутниковые данные съемкой сверхвысокого пространственного разрешения, что особенно важно для оперативного мониторинга локальных участков и принятия решений в управлении агротехнологиями.

В результате мониторинга посевов и окружающей среды формируются данные, обычно называемые «большими данными», которые нуждаются в хранении, редактировании, анализе и интерпретации. Последняя обладает значительным потенциалом для лиц, принимающих решения. Большие данные обычно характеризуются объемом, разнообразием, скоростью, достоверностью и ценностью [24]. Такие данные целесообразно хранить и анализировать в облаке cloud (совокупность виртуальных информационных ресурсов, доступ к которым возможен через интернет-соединение). Облачные вычисления – это широко доступная парадигма, которая предлагает такие преимущества, как минимальные усилия по управлению, удобство, простота обслуживания и централизованное управление [25].

Для анализа данных используются различные алгоритмы машинного обучения (МО),

одного из разделов ИИ. Хорошо известными алгоритмами МО являются метод случайного леса (Random Forest – RF), экстремальный градиентный бустинг (eXtreme Gradient Boosting – XGBoost) и метод опорных векторов (Support Vector Machines – SVM). Случайный лес включает в себя пакетирование, создание ансамбля деревьев решений путем случайного выбора объектов из обучающих данных. Комбинируя несколько деревьев принятия решений, RF-классификаторы могут обеспечивать надежные прогнозы, предлагая измерения переменной важности. Подобно RF, метод XGBoost также использует деревья решений в качестве базовых средств обучения, но продвигает процесс дальше, объединяя сильные стороны отдельных деревьев в технике бустинга. Другим традиционным методом являются SVM (набор схожих алгоритмов вида «обучение с учителем», использующихся для задач классификации и регрессионного анализа), однако применение этого метода, не всегда сопровождается лучшей классификацией, чем при использовании RF [26].

Планируемая сеть мониторинга охватывает все стационарные опытные участки филиалов СФНЦА РАН, находящихся в Западной, Средней и Восточной Сибири (рис. 2).

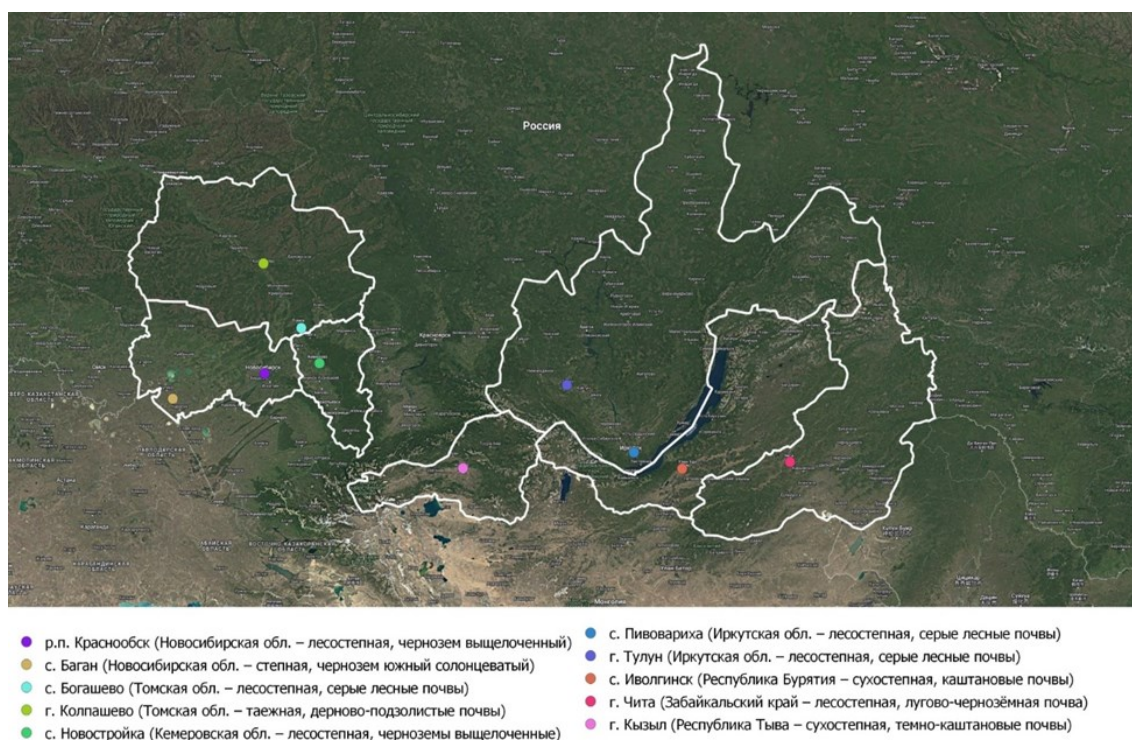


Рисунок 2 - Планируемая сеть мониторинга СФЦА РАН

Результаты мониторинга и анализа данных полевых опытов в виде архетипов систем земледелия необходимо масштабировать в репрезентативных пространственных объектах, для реализации их на «местах» в контексте интеллектуального земледелия [27]. Под архетипом системы земледелия понимается модель использования сельскохозяйственных земель определенной агроэкологической группы

с экологически и экономически детерминированным набором возделываемых культур и соответствующими приемами управляющих воздействий (севооборот, обработка почвы, удобрения, защита растений) [21].

Учитывая растущую доступность ГИС и пространственных данных, необходимо более широко использовать цифровые карты и географическую «привязку»

анализа данных. Такое использование возможностей геоинформационного моделирования нашло бы отражение в лучшем понимании влияния биотических и эдафических факторов среды на реакцию возделываемых культур и способствовало бы более адекватной интерпретации количественных результатов научных экспериментов.

Для формирования цифровых архетипов систем земледелия с использованием мониторинга и временных рядов данных длительных полевых опытов СФНЦА РАН необходимо решить следующие основные задачи:

- классификация групп и видов земель с атрибутами: рельеф, почвенный покров, агрометеорологические ресурсы и др.;
- создание баз данных, баз знаний и логических правил по основным блокам систем земледелия и агротехнологиям;
- выявление архетипов систем земледелия с помощью самоорганизующейся карты Кохонена или методов системной динамики.

Масштабирование архетипов систем земледелия осуществляется с помощью следующих основных операций:

- создание инфраструктуры пространственных данных (ИПД) на основе технологий дистанционного зондирования;
- идентификация почвенного покрова и ВИ, сегментация и классификация пространственных объектов землепользования;
- пространственный анализ и картографирование с помощью МО, интегрированного с ГИС;
- выделение геонтов и агроэкологическая оценка земель пространственного объекта;
- масштабирование архетипических моделей систем земледелия методом многомерной пространственно-временной регионализации.

В целях развития ЦСУЗ в научных исследованиях необходимо уделить больше внимания имитационному моделированию. Модели необходимы для ответа на конкретный вопрос предметной области, создаются для этой цели и бывают разных форм. Статистические модели (также называемые эмпирическими) используют математическую связь между различными переменными. Принципиальным недостатком статистических моделей является то, что они разрабатываются на основе полученных данных и плохо подходят для использования в приложениях, которые не участвовали в параметризации и разработке модели. Они также не могут прогнозировать значения в неопределенном контексте (например, влияние изменения климата на рост сельскохозяйственных культур). Напротив, механистические модели (также называемые биофизическими) основаны на моделировании биофизических процессов. Они используют математические уравнения, описывающие эти процессы, а не просто связывающие две переменные, как в статистическом моделировании. Их можно вывести в отсутствие каких-либо реальных данных, если процесс описан. Интеграция биологических,

физиологических, экологических, физических и экономических компонент привела к разработке таких известных моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений, как APSIM (комплексная модель, разработанная для моделирования биофизических процессов в сельскохозяйственных системах), DSSAT (набор компьютерных программ для моделирования роста сельскохозяйственных культур), STICS (моделирование роста сельскохозяйственных культур с учетом почвенных, климатических и агротехнических факторов.), WOFOST (модель для оценки продуктивности сельскохозяйственных культур на уровне поля и региона.), CropSyst (комплексное моделирование роста культур, водного и nutrient-баланса.) или AGROTOOL (Российская модель для прогнозирования урожайности и агроэкологического моделирования.). Иногда их называют «моделями урожая» и трактуются они как пояснительные инструменты, которые обычно используются при тестировании различных подходов к управлению продуктивностью посевов.

Биофизические модели однако имеют существенные ограничения, а именно, они являются «точечными моделями». Эти инструменты разработаны для моделирования роста и развития сельскохозяйственных культур для однородной единицы в определенной точке пространства. Кроме того, биофизические модели требуют большого количества входных данных. Например, для программы WOFOST требуются данные примерно по 40 входным параметрам, а для AGROTOOL – более 190.

В этом контексте методы дистанционного зондирования могут дополнить биофизические модели, в частности, генерируя недостающую пространственную информацию для единицы моделирования. Хотя эти две технологии развивались независимо, в настоящее время они могут использоваться синергетически в различных пространственных и временных масштабах для общего развития цифрового управления системами земледелия и их реализации на «местах» [28].

В настоящее время широкое развитие получила предиктивная (прогнозная) аналитика с помощью методов ИИ, в частности прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур. В научных исследованиях по земледелию эти модели должны решать задачи планирования (имитации) урожая и управляющих воздействий в камеральных условиях перед выходом в поле. Больших успехов в прогнозировании урожайности удалось достичь с помощью МО. Применяемые алгоритмы отличаются разнообразием и в целом делятся на модели МО и глубокого обучения (ГО). В моделях МО обычно используются алгоритмы: дерево решений (Decision Trees – DT), метод опорных векторов (Support Vector Machines – SVM), цепи Маркова (Markov chain correlation – MCC), к-ближайший сосед (K-Nearest Neighbors – KNN), случайный лес (Random Forest – RF), наивный байесовский

классификатор (Naive Bayes classifier – NB), градиентный бустинг (Gradient Boosting – GB), адаптивный бустинг (Adaptive Boosting – AdaBoost), экстремальный градиентный бустинг (eXtreme Gradient Boosting – XGBoost), искусственная нейронная сеть (Artificial Neural Network – ANN), классические регрессионные модели (Regression Models – RM) и др. В моделях ГО используются: сверточная нейронная сеть (Convolutional Neural Network – CNN), рекуррентная нейронная сеть (Recurrent Neural Network – RNN), глубокая нейронная сеть (Deep Neural Networks – DNN), спайковая нейронная сеть (Spiking Neural Network – SNN), долговременная и кратковременная память (Long-Short Term Memory – LSTM) и др.

Реализация моделей МО и ГО при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур состоит из четырех этапов: сбор данных; предварительная обработка и анализ данных, построение предиктивных моделей и оценка их точности. Ключевые этапы (предварительная обработка и анализ данных, а также построение предиктивных моделей) связаны с будущей эффективностью прогнозирования. Предварительная обработка данных, которая заключается в выполнении преобразований данных и устранение нерелевантных признаков, существенно влияет на эффективность работы предиктивных моделей. После определения релевантных признаков происходит процесс выбора алгоритма

с последующим обучением и оптимизацией модели, в том числе за счет настройки гиперпараметров. Выбор модели МО для успешного прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур существенно зависит от выбора релевантных признаков и их параметров (данных), а также от функциональных возможностей алгоритмов. В большинстве случаев в предиктивных моделях используются признаки, отражающие агрометеорологические ресурсы местности в течение вегетационного периода, характеристики почвы, состояние посевов по стадиям роста растений и применяемые управляющие воздействия в агротехнологиях.

Платформой СЦУЗ выступает система поддержки принятия решений (СППР). СППР – это компьютеризированная информационная система, которая облегчает принятие сложных решений путем сбора, интерпретации и анализа необходимых данных. Система должна гарантировать, что лица, принимающие решения, получают исчерпывающую информацию для принятия решений. Основной смысл разработки СППР заключается в упрощении сложных процессов принятия решений на основе интерпретации данных и использовании знаний предметной области.

Общая методология создания пространственной системы поддержки принятия решений для реализации ЦСУЗ состоит из следующих блоков (рис. 3).

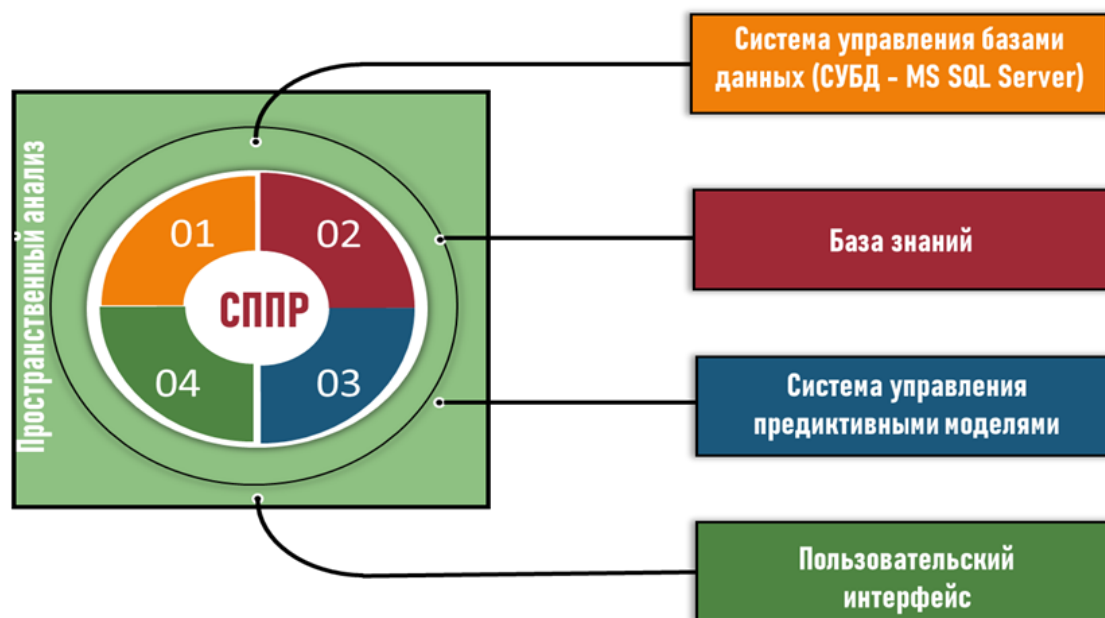


Рисунок 3 - Общая структура пространственной СППР

Система управления базами данных (СУБД), является ядром СППР и состоит из наборов взаимосвязанных данных, предназначенных для удовлетворения информационных потребностей пользователя. Обеспечивая доступ к данным, их поиск и обновление, СУБД расширяет функциональность СППР.

База знаний дополняет традиционные

данные субъективными идеями, логикой принятия решений и процедурными знаниями. Она служит хранилищем, из которого извлекаются решения сложных проблем.

Система управления предиктивными моделями обрабатывает различные модели принятия решений в рамках СППР. Предоставляя информацию о статических, динамических,

теоретических или эмпирических моделях, имитирующих бизнес-процессы или системы. Эта система добавляет глубину процессу принятия решений.

Пользовательский интерфейс выступает в качестве шлюза между лицами, принимающими решения, и СППР. Он призван обеспечить удобное, интуитивно понятное и гибкое взаимодействие между пользователем и системой.

СППР обычно классифицируются тремя типами. Первый тип опирается на математические и аналитические модели для поддержки принятия решений. Этот тип полезен для решения сложных задач, где целесообразно применять предиктивные модели. Большие данные обычно не применяются, а вместо этого используются структурированные методы для анализа переменных и результатов. Они помогают в прогнозировании, оптимизации и моделировании различных объектов и процессов. Второй тип фокусируется на доступе, обработке и анализе Больших данных. Эти системы распространены в приложениях бизнес-аналитики и хранилищ данных, где они помогают генерировать отчеты, тенденции и сводки. Обычно используются такие инструменты, как OLAP (Online Analytical Processing) и методы добычи данных. Третий тип основан на знаниях, также известен как экспертная система. Фокусируется на использовании экспертных знаний и специальных знаний

в предметной области для содействия принятию решений. Эта система использует базы знаний, в которых хранятся подробные правила и экспертная информация, для предоставления советов или рекомендаций.

Характерной особенностью разрабатываемой СППР для реализации ЦСУЗ является ее пространственная составляющая. Пространственные СППР интегрированы в графическом пользовательском интерфейсе (GUI), реализуемом с использованием функциональных возможностей управления пространственными данными с помощью ГИС. Пространственные СППР объединяют пространственные и непространственные данные, функции анализа и визуализации ГИС и модели принятия решений для вычисления различных характеристик с целью решения проблем. В данном контексте может быть использован метод анализа многокритериальных решений на основе ГИС (GIS-MCDA), определяемый как набор методов и инструментов для преобразования и объединения географических данных и предпочтений (оценочных суждений) с целью получения информации для принятия решений [29].

В настоящее время учеными СФНЦА РАН освоены многие инструменты и методы интеллектуального анализа данных, необходимые для разработки ЦСУЗ (табл.).

Таблица - Освоенные темы, методы и инструменты в СФНЦА РАН

Направление	Темы	Инструменты и методы
Интеграция ГИС, дистанционного зондирования и МО	Картографирование, анализ и агроэкологическая оценка сельскохозяйственных земель	Quantum GIS, SAGA GIS, ArcGIS, многозональные снимки БПЛА и спутников
	Сегментация мультиспектральных снимков БПЛА и спутников Sentinel-2 и Landsat 8-9	ISODATA, максимального правдоподобия, расстояние Махаланобиса, метод параллелепипедов, алгоритм OBIS
	Классификация пространственных объектов	GEOBIA и МО, ГеоИИ, концепция «geons»
	Распознавание сельскохозяйственных культур	Расчеты вегетационных индексов, алгоритмы МО: SVM, KNN, RF, XGBoost
	Геопространственная база данных	СУБД – MS SQL Server
	Идентификация и классификация сорняков	Нейронная сеть ResNet-34
Прогнозная (предиктивная) аналитика	Прогнозирование засоренности посевов	Байесовская сеть доверия (БСД), дерево решений (CART)
	Прогнозирование минерального азота, фосфора и влажности почвы	БСД, мультиномиальная логистическая регрессия, нейронная сеть MLP
	Прогнозирование засушливости/увлажненности территории	Нормализованный индекс SPI и МО; R, Python
	Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур	Алгоритмы МО: DT, SVM, KNN, RF, XGBoost, AdaBoost; нейронная сеть MLP; R, Python
	Прогнозирование продуктивности севооборотов	Алгоритмы МО: SVM, KNN, RF, XGBoost; MATLAB, ANFIS

Таким образом, в связи с расширением практического применения цифровых технологий в сельском хозяйстве (датчики, Интернет вещей, БПЛА, спутники и др.) и осуществления организации системы высокоточного пространственного мониторинга (*in situ*, проксимальный, дистанционный) с применением методов ИИ (машинное обучение и др.), становится возможным разработка комплекса предиктивных моделей продуктивности сельскохозяйственных земель и применения управляющих воздействий при возделывании культур в онлайн режиме. Повышение уровня информатизации земледелия, характеризующегося высокой вариабельностью, а также стандартизация мультимодальных данных мониторинга в разных природно-климатических зонах позволят создать базы данных и знаний. Это снизит неопределенность, минимизирует риски и повысит устойчивость производства растениеводческой продукции.

Выводы. 1. Разработана теоретическая и методологическая основа Цифровой Системы Управления Земледелием (ЦСУЗ), интегрирующей технологии мониторинга (БПЛА, метеостанции, почвенные датчики, спутниковые снимки), алгоритмы машинного обучения и методы анализа больших данных. Система обеспечивает переход от обобщенных рекомендаций к индивидуализированному управлению агротехнологиями с учётом пространственно-временной вариабельности агроландшафтов.

2. Доказана эффективность применения искусственного интеллекта и машинного обучения (Random Forest, XGBoost, нейронные сети) для прогнозирования урожайности, анализа вегетационных индексов и оптимизации

управляющих воздействий. Алгоритмы демонстрируют высокую точность при обработке мультимодальных данных, включая агрометеорологические показатели, состояние почвы и динамику развития культур.

3. Создана пространственная система поддержки принятия решений (СППР), объединяющая ГИС-технологии, базы знаний и имитационное моделирование. Система позволяет визуализировать данные, проводить многокритериальный анализ и формировать рекомендации для минимизации рисков и повышения рентабельности растениеводства.

4. Разработана методология масштабирования архетипов систем земледелия на основе данных длительных полевых опытов. Использование дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования обеспечивает адаптацию моделей к разнородным почвенно-климатическим условиям, что способствует устойчивому развитию агроэкосистем.

5. Практическая значимость исследования подтверждена снижением неопределённости в управлении агропроизводством за счёт предиктивной аналитики, стандартизации данных и интеграции облачных вычислений. Внедрение ЦСУЗ открывает перспективы для цифровизации сельского хозяйства, повышения ресурсоэффективности и экологической безопасности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением функционала СППР за счёт внедрения моделей глубокого обучения, разработкой адаптивных алгоритмов для экстремальных климатических сценариев и углублённым анализом синергии между биофизическим моделированием и технологиями ИИ.

Литература

1. Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefit/ Maffezzoli F., Ardolino M., Bacchetti A., Perona M., Renga F. // *Futures*. 2022. Vol. 142. P. 102998. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>.
2. Emerging Technologies for Precision Crop Management Towards Agriculture 5.0: A Comprehensive Overview/ Taha M. F., Mao H., Zhang Z. et al. // *Agriculture*. 2025. Vol. 15. № 6. P. 582. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060582>.
3. Gumbi N., Gumbi L., Twinomurinzi H. Towards sustainable digital agriculture for smallholder farmers: A systematic literature review // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. № 16. P. 12530. <https://doi.org/10.3390/su151612530>.
4. Akkem Y., Biswas S. K., Varanasi A. Smart farming using artificial intelligence: A review // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 120. P. 105899. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105899>.
5. Singh A. K. Precision farming // *Water Technology Centre, IARI, New Delhi*. 2010. P. 165-174. URL: <https://drs.icar.gov.in/ebook/EBADAT/6-Other%20Useful%20Techniques/14-Precision%20Farming%20Lecture.pdf>. (дата обращения 20.03.2025).
6. Barrett H., Rose D. C. Perceptions of the fourth agricultural revolution: what's in, what's out, and what consequences are anticipated? // *Sociologia Ruralis*. 2022. Vol. 62. № 2. P. 162-189. <https://doi.org/10.1111/soru.12324>.
7. Big Data Privacy in Smart Farming: A Review/ Amiri-Zarandi M., Dara R. A., Duncan E., Fraser E. D. G. // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 15. P. 9120. <https://doi.org/10.3390/su14159120>.
8. Ingram J., Maye D. What are the implications of digitalisation for agricultural knowledge? // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. Vol. 4. P. 66. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00066>.
9. An in-depth review on the concept of digital farming/ Ammar E. E., Aziz S. A., Zou X. et al. // *Environment, Development and Sustainability*. 2024. P. 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05161-9>.
10. Kim M-Y., Lee K.H. Electrochemical Sensors for Sustainable Precision Agriculture – A Review // *Frontiers in Chemistry*. 2022. Vol. 10. P. 848320. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.848320>.
11. Navarro E., Costa N., Pereira A. A. Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming // *Sensors*. 2020. Vol. 20. № 15. P. 4231. <https://doi.org/10.3390/s20154231>.
12. Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential/ Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T., Pesonen, L. A., Green, O., & Sørensen, C. A. G. // *Biosystems Engineering*.

2020. Vol. 191. pp. 60-84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>.

13. What are the priority research questions for digital agriculture?/ Julie, I., Damian, M., Clive, B., Barnes, A., Bear, C., Bell, M., Manning, L. // *Land Use Policy*. 2022. Vol. 114. P. 105962. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105962>.

14. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies/ . Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. // *International Journal of Intelligent Networks*. 2022. Vol. 3. pp. 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>.

15. Kumar S., Khan N. Application of remote sensing and GIS in land resource management // *Journal of Geography and Cartography*. 2021. Vol. 4. № 2. pp. 78-81. <https://doi.org/10.24294/jgc.v4i2.437>.

16. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems/ Jung, J., Maeda, M., Chang, A., Bhandari, M., Ashapure, A., & Landivar-Bowles, J. // *Current Opinion in Biotechnology*. 2021. Vol. 70. pp. 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>.

17. Geoscience-aware deep learning: A new paradigm for remote sensing/ Ge, Y., Zhang, X., Atkinson, P. M., Stein, A., & Li, L. // *Science of Remote Sensing*. 2022. Vol. 5. P. 100047. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2022.100047>.

18. Remote Sensing in Field Crop Monitoring: A Comprehensive Review of Sensor Systems, Data Analyses and Recent Advances/ Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B. K. // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 2. P. 354. <https://doi.org/10.3390/rs15020354>.

19. A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture / Rehman A., Saba T., Kashif M. et al. // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. N 1. P. 127. DOI: 10.3390/agronomy12010127.

20. Application of smart techniques, internet of things and data mining for resource use efficient and sustainable crop production/ Ali A., Hussain T., Tantashutikun N. et al // *Agriculture*. 2023. Vol. 13. N 2. P. 397. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020397>.

21. Каличкин В.К., Максимович К.Ю. Методология формирования цифровой системы управления земледелием // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. № 3. С. 5-20. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-3-1>.

22. Ullo S. L., Sinha G. R. Advances in IoT and Smart Sensors for Remote Sensing and Agriculture Applications // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. № 13. P. 2585. <https://doi.org/10.3390/rs13132585>.

23. Aaron E.M., Warner T.A., Fang F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review // *International journal of remote sensing*. 2018. Vol. 39. № 9. pp. 2784-2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.

24. Machine learning in agriculture: A review/ . Liakos K. G., Busato P., Moshou D., Pearson S., & Bochtis, D. // *Sensors*. 2018. Vol. 18. № 8. P. 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.

25. Cloud and distributed architectures for data management in agriculture 4.0: Review and future trends/ Debauche, O., Mahmoudi, S., Manneback, P., & Lebeau, F. // *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34. № 9. pp. 7494-7514. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.015>.

26. Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review/ Benos L., Tagarakis A. C., Dolias G. et al // *Sensors*. 2021. Vol. 21. N 11. P. 3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>.

27. Каличкин В.К. О необходимости трансформации парадигмы научных исследований в области земледелия (сообщение первое) // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. № 7. С. 117-129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-12>.

28. Каличкин В.К. О необходимости трансформации парадигмы научных исследований в области земледелия (сообщение второе) // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024. Т. 54. № 9. С. 101-114. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-9-11>.

29. Milutinović G., Seipel S., Ahonen-Jonnarh U. Geospatial Decision-Making Framework Based on the Concept of Satisficing // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10. № 5. P. 326. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050326>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Финансирование работы отсутствовало.

Сведения об авторах:

Каличкин Владимир Климентьевич - доктор сельскохозяйственных наук, профессор, руководитель Сибирского НИИ земледелия, биологизации и цифровизации, e-mail: vk.kalichkin@gmail.com

Донченко Александр Семенович - доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, руководитель Института экспериментальной ветеринарии Сибири и Дальнего Востока, e-mail: ac.donchenko@yandex.ru

Голохваст Кирилл Сергеевич - доктор биологических наук, член-корреспондент РАО, профессор РАН, директор, e-mail: drooru@mail.ru

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия

FORMATION OF A DIGITAL AGRICULTURAL MANAGEMENT SYSTEM BASED ON MONITORING AND LONG-TERM FIELD EXPERIMENTS

V.K. Kalichkin, A.S. Donchenko, K.S. Golokhvast

Abstract. The article is devoted to the development of a digital agriculture management system (DAMS) that combines monitoring of agricultural objects, analysis of long-term field experiment data and modern information technologies. The purpose of the study is to create a theoretical basis for optimizing agricultural production management by integrating artificial intelligence, machine learning, remote sensing, geographic information systems (GIS) and big data. The novelty of the work lies in the use of machine learning algorithms for yield forecasting, scaling of agricultural system archetypes based on spatio-temporal analysis, as well as the development of a spatial decision support system (DSS) that combines geographic information systems, modeling and knowledge bases. The technical implementation of monitoring includes the use of unmanned aerial vehicles, weather stations, soil sensors and satellite images, the data of which are processed in cloud environments. The research results demonstrate the possibility of reducing uncertainty in the management of agricultural technologies through predictive analytics,

simulation modeling and standardization of multimodal data. The findings emphasize the practical importance of the digital agriculture management system for increasing sustainability, minimizing risks and profitability of crop production. The proposed system allows moving from generalized recommendations to individualized management that takes into account the spatio-temporal variability of agricultural landscapes. The key components of the digital agriculture management system - modules for yield forecasting, analysis of vegetation indices, differentiated fertilization and integration of field experiment data - are focused on solving the problems of digitalization of agriculture. The results of the work are of practical importance for the introduction of intelligent technologies in the agro-industrial complex.

Key words: digital farming, monitoring, artificial intelligence, machine learning, yield forecasting, geographic information systems (GIS), decision support system (DSS).

For citation: Kalichkin V.K., Donchenko A.S., Golokhvast K.S. Formation of a digital agriculture management system based on monitoring and long-term field experiments. *Agrobiotechnologies and digital farming*. 2025; 2(14). 58-68 p.

References

1. Maffezzoli F, Ardolino M, Bacchetti A, Perona M, Renga F. Agriculture 4.0: a systematic literature review on the paradigm, technologies and benefit. *Futures*. 2022. Vol.142. 102998 p. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>.
2. Taha MF, Mao H, Zhang Z. Emerging technologies for precision crop management towards Agriculture 5.0: a comprehensive overview. *Agriculture*. 2025; Vol.15. 6. 582 p. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060582>.
3. Gumbi N, Gumbi L, Twinomurinzi H. Towards sustainable digital agriculture for smallholder farmers: a systematic literature review. *Sustainability*. 2023; Vol.15. 16. 12530 p. <https://doi.org/10.3390/su151612530>.
4. Akkem Y, Biswas SK, Varanasi A. Smart farming using artificial intelligence: a review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023; Vol.120. 105899 p. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105899>.
5. Singh AK. Precision farming. [Internet]. Water Technology Centre, IARI, New Delhi. 2010; 165-174 p. [cited 2025, March 20]. Available from: <https://drs.icar.gov.in/ebook/EBADAT/6-Other%20Useful%20Techniques/14-Precision%20Farming%20Lecture.pdf>.
6. Barrett H, Rose DC. Perceptions of the fourth agricultural revolution: what's in, what's out, and what consequences are anticipated? *Sociologia Ruralis*. 2022; Vol.62. 2. 162-189 p. <https://doi.org/10.1111/soru.12324>.
7. Amiri-Zarandi M, Dara RA, Duncan E, Fraser EDG. Big data privacy in smart farming: a review. *Sustainability*. 2022; Vol.14. 15. 9120 p. <https://doi.org/10.3390/su14159120>.
8. Ingram J, Maye D. What are the implications of digitalization for agricultural knowledge? *Frontiers in sustainable food systems*. 2020; Vol.4. 66 p. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00066>.
9. Ammar EE, Aziz SA, Zou X. An in-depth review on the concept of digital farming. *Environment, Development and Sustainability*. 2024; 1-27 p. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05161-9>.
10. Kim M-Y, Lee K.H. Electrochemical sensors for sustainable precision agriculture – a review. *Frontiers in Chemistry*. 2022; Vol.10. 848320 p. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.848320>.
11. Navarro E, Costa N, Pereira AA. Systematic review of iot solutions for smart farming. *Sensors*. 2020; Vol.20. 15. 4231 p. <https://doi.org/10.3390/s20154231>.
12. Villa-Henriksen A, Edwards GT, Pesonen LA, Green O, Sorensen CAG. Internet of things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*. 2020; Vol.191. 60-84 p. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013>.
13. Julie I, Damian M, Clive B, Barnes A, Bear C, Bell M, Manning L. What are the priority research questions for digital agriculture? *Land Use Policy*. 2022; Vol.114. 105962 p. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105962>.
14. Javaid M, Haleem A, Singh RP, Suman R. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*. 2022; Vol.3. 150-164 p. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>.
15. Kumar S, Khan N. Application of remote sensing and GIS in land resource management. *Journal of Geography and Cartography*. 2021; Vol.4. 2. 78-81 p. <https://doi.org/10.24294/jgc.v4i2.437>.
16. Jung J, Maeda M, Chang A, Bhandari M, Ashapure A, Landivar-Bowles J. The potential of remote sensing and artificial intelligence as tools to improve the resilience of agriculture production systems. *Current Opinion in Biotechnology*. 2021; Vol.70. 15-22 p. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2020.09.003>.
17. Ge Y, Zhang X, Atkinson PM, Stein A, Li L. Geoscience-aware deep learning: A new paradigm for remote sensing. *Science of Remote Sensing*. 2022; Vol.5. 100047 p. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2022.100047>.
18. Omia E, Bae H, Park E, Kim MS, Baek I, Kabenge I, Cho BK. Remote sensing in field crop monitoring: a comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*. 2023; Vol.15. 2. 354 p. <https://doi.org/10.3390/rs15020354>.
19. Rehman A, Saba T, Kashif M. A revisit of internet of things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. *Agronomy*. 2022; Vol.12. 1. 127 p. doi: 10.3390/agronomy12010127.
20. Ali A, Hussain T, Tantashutikun N. Application of smart techniques, internet of things and data mining for resource use efficient and sustainable crop production. *Agriculture*. 2023; Vol.13. 2. 397 p. doi: 10.3390/agriculture13020397.
21. Kalichkin VK, Maksimovich KYu. [Methodology for the formation of a digital agricultural management system]. *Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki*. 2024; Vol.54. 3. 5-20 p. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-3-1>.
22. Ullo SL, Sinha GR. Advances in IoT and smart sensors for remote sensing and agriculture applications. *Remote Sensing*. 2021; Vol.13. 13. 2585 p. <https://doi.org/10.3390/rs13132585>.
23. Aaron EM, Warner TA, Fang F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: an applied review. *International journal of remote sensing*. 2018; Vol.39. 9. 2784-2817 p. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>.
24. Liakos KG, Busato P, Moshou D, Pearson S, Bochtis D. Machine learning in agriculture: a review. *Sensors*. 2018; Vol.18. 8. 2674 p. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.

25. Debauche O, Mahmoudi S, Manneback P, Lebeau F. Cloud and distributed architectures for data management in Agriculture 4.0: review and future trends. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022; Vol.34. 9. 7494-7514 p. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.015>.
26. Benos L, Tagarakis AC, Dolias G. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. *Sensors*. 2021; Vol.21. 11. 3758 p. DOI<https://doi.org/10.3390/s21113758>.
27. Kalichkin VK. [On the need to transform the paradigm of scientific research in the field of agriculture (first message)]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2024; Vol.54. 7. 117-129 p. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-7-12>.
28. Kalichkin VK. [On the need to transform the paradigm of scientific research in the field of agriculture (second message)]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2024; Vol.54. 9. 101-114 p. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-9-11>.
29. Milutinovic G, Seipel S, Ahonen-Jonnarth U. Geospatial decision-making framework based on the concept of satisficing. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021; Vol.10. 5. 326 p. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050326>

Conflict of interest.

The authors declare that they have no conflict of interest. There was no funding for the work.

Authors:

Kalichkin Vladimir Klimentevich - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of Siberian Research Institute of Agriculture, Biologization and Digitalization, e-mail: vk.kalichkin@gmail.com
 Donchenko Aleksandr Semenovich - Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of Russian Academy of Sciences, Head of Institute of Experimental Veterinary Medicine of Siberia and the Far East, e-mail: ac.donchenko@yandex.ru
 Golokhvast Kirill Sergeevich – Doctor of Biological Sciences, corresponding member of Russian Academy of Education, Professor of Russian Academy of Sciences, Director, e-mail: droopy@mail.ru
 Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk region, Novosibirsk District, Krasnoobsk, Russia.