

Реализация системы автоматизации проектирования севооборотов в цифровой платформе управления агропромышленным комплексом

© 2026. В. И. Меденников ✉

ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследований – формализовать нарастающие интеграционные процессы данных и алгоритмов управления в сельском хозяйстве на развитом этапе цифровой экономики (ЦЭ), результатом которых явился перспективный инновационный проект цифровой платформы управления (ЦПУ) производственной экономикой, интегрирующей онтологически и функционально все управленческие задачи аграриев с единым научно обоснованным подходом к их проектированию, важнейшим элементом которой должна стать универсальная система автоматизации проектирования (САПР) структуры севооборотов (СО), обоснованная математическим моделированием. Первоочередность создания такой САПР в ЦЭ диктуется свойством и способностью научно обоснованных севооборотов определять все технологические процессы в сельском хозяйстве. Проект ЦПУ, в свою очередь, стал результатом синтеза с последующей формализацией проявившихся некоторых ведущих принципов ЦЭ, которые ярко стали видны в попытках стихийно объединить информационные ресурсы и информационно-управляющие системы (ИУС) крупными организациями в процессе информатизации своего бизнеса, а также опыта внедрения подсистем ИУС в более 1000 предприятий в рамках программы «Электронизация сельского хозяйства». Так, работая с экспертами Кубанского НИИСХ, имеющего большой многолетний экспериментальный материал, была разработана математическая модель формирования оптимальных СО. Исследования подтверждаются мировыми тенденциями появления САПР вместо традиционного ручного проектирования систем, что стало следствием развития как интеграционных технологий, так и одновременного совершенствования методов математического моделирования. В представленной работе использован математический аппарат теории графов в виде задачи об упаковке в контейнеры с одновременным поиском кратчайшего пути, а также оптимизационная математическая модель производственно-логистической цепочки как выращивания, так и дальнейшего перемещения продукции внутри хозяйства и за его пределами, что особенно важно для агрохолдингов. В дальнейшем при переходе агропромышленного комплекса на ЦПУ с накоплением достаточного объема данных можно ставить задачу формирования и новых СО, учитывающих неоднородность полей, с использованием искусственного интеллекта.

Ключевые слова: сельское хозяйство, точное земледелие, цифровая трансформация, интеграция, цифровой двойник, логистика, теория графов, математическая модель

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (тема № FFNG-2024-0009).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Меденников В. И. Реализация системы автоматизации проектирования севооборотов в цифровой платформе управления агропромышленным комплексом. Аграрная наука Евро-Северо-Востока 2026;27(4):900–910.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.4.900-910>

Поступила: 27.01.2026

Принята к публикации: 11.08.2026

Доработана после рецензирования: 21.06.2026

Опубликована онлайн: 31.08.2026

Implementation of automated crop rotation system design on a digital platform for agro-industrial complex management

© 2026. Viktor I. Medennikov ✉

Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The objective of this research is to formalize the growing integration of data and management algorithms in agriculture at the advanced stage of the digital economy (DE). This has resulted in a promising innovative project for a digital management platform (DMP) for the production economy, integrating all agricultural management tasks ontologically and functionally with a unified, scientifically based approach to their design. A key element of this approach should be a universal computer-aided design (CAD) system for crop rotation (CR) structures, substantiated by mathematical modeling. The priority for developing such a CAD system in the DE is dictated by the nature and ability of scientifically based crop rotations to determine all technological processes in agriculture. The DMP project, in turn, was the result of a synthesis and subsequent formalization of several key principles of digital economy that emerged during the spontaneous attempts to integrate information resources and information management systems (IMS) by large organizations in the process of computerizing their businesses, as well as the experience of implementing IMS subsystems at over 1,000 enterprises as part of the "Electronization of Agriculture" program.

Thus, working with experts from the Kuban Research Institute of Agriculture, which has extensive experimental data for many years, a mathematical model for the formation of optimal CR was developed. This research is supported by global trends toward the emergence of CAD systems replacing traditional manual system design, a consequence of the development of both integration technologies and the simultaneous improvement of mathematical modeling methods. This paper utilizes the mathematical apparatus of graph theory in the form of a container packaging problem while simultaneously searching for the shortest path, as well as an optimization mathematical model of the production and logistics chain for both growing and further movement of produce within and outside the farm, which is especially important for agricultural holdings. In the future, with the transition of the agro-industrial complex to a DMP with the accumulation of a sufficient volume of data, it will be possible to set the task of forming new CR that take into account the heterogeneity of fields, using artificial intelligence.

Keywords: agriculture, precision farming, digital transformation, integration, digital twin, logistics, graph theory, mathematical model

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences (theme No. FFNG-2024-0009).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: the author declared no conflict of interest.

For citation: Medennikov V. I Implementation of automated crop rotation system design on a digital platform for agro-industrial complex management. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(4):900–910. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.4.900-910>

Received: 27.01.2026

Revised: 21.06.2026

Accepted for publication: 11.08.2026

Published online: 31.08.2026

Значительно возросшие возможности цифровизации в виде информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), датчиков, исполнительных механизмов, электронного оборудования, математических методов обработки данных в ходе эволюционного развития обусловили появление ряда важнейших принципов цифровой трансформации всего общественного развития [1], в частности один из основных можно трактовать следующим образом – создание некоторых систем управления информационными ресурсами (ИР) на основе интеграционных механизмов неоднородных данных в единое облачное структурированное пространство. Это требование с целью повышения эффективности цифровой экономики (ЦЭ) возникло из-за появившихся технологических возможностей собирать, хранить и эффективно использовать в своей деятельности огромный объем данных. Указанные принципы явились драйвером появления нового инструментария в проектировании изделий – системы автоматизации проектирования (САПР), получившие название CAD-системы, внедренческий успех которых позволил Национальному научному фонду США отнести их к списку величайших событий в технологическом развитии общества в одном ряду с распространением электрической энергии [2].

Революционная трансформация промышленности, которую начинают привносить САПР в настоящее время, приводит к значительному сокращению как времени, так и ручного труда на операции по проектированию систем, увеличивая точность, производитель-

ность и качество процесса со значительным устранением многих ошибок в этих технологиях. САПР, достигшие нового качественного развития, наряду со стандартизацией интеграционных технологий, породило появление термина цифрового двойника (ЦД), озвученное в 2002 г. Майклом Гривсом (M. Grieves) [3].

В работе [4] дается системное обоснование необходимости разработки единого ЦД сельскохозяйственного предприятия в нашей стране, поскольку дальнейшая цифровизация производства невозможна без комплементарности структуризации и интеграции значительного числа данных и алгоритмов их обработки с пропорциональным ростом величины управленческих функций в этом процессе, что нашло отражение в резко востребованном точном земледелии (ТЗ), технологии которого занимают лидирующие позиции среди всех разработок ЦЭ [5, 6, 7, 8, 9]. Одним из главных свойств ЦД является их большой потенциал в сфере формирования САПР севооборотов (СО). Учитывая определяющее влияние СО в земледелии на выбор большинства технологических операций во всех направлениях сельскохозяйственного производства, в дальнейшем при отработке и масштабировании САПР СО на необходимом числе хозяйств будут созданы предпосылки разработки аналогичных САПР всех производственных процессов в отрасли [4].

В исследованиях [10, 11] анализируется потенциал единой цифровой платформы управления (ЦПУ) сельским хозяйством, в том числе необходимые условия эффективности внедрения и искусственного интеллекта (ИИ), которую,

исходя из цели данной работы, можно назвать ЦД отрасли, поскольку состав и содержание задач, информационный ресурс (ИР) покрывают все потребности большинства хозяйств за счет полноты и типового представления данных, применяемых, в частности, при проектировании СО, разработке технологических карт, годовых планов и анализе их результатов.

В данный момент в отрасли наблюдается почти полное отсутствие контроля со стороны государственных органов за нормативным регулированием почвенного плодородия, которое жестко соблюдалось в СССР, было даже понятие «неубывающее плодородие»¹. Это привело к деградации сельскохозяйственных земель в России, которая оценивается в объеме от 1,6 до 2 млн га с потерей самого насыщенного гумусом почвенного слоя до 1,5 млрд тонн [12, 13, 14]. Данный фактор, наряду с возросшей неопределенностью по прогнозу цен на факторы производства при переходе к рынку, явился причиной также всеобщего несоблюдения и самих принципов как проектирования, так и внедрения СО. В результате такой длительной тенденции деградировали и проектные организации, ранее занимавшиеся разработкой региональных СО без средств автоматизации – в ручном режиме с привязкой к каждому хозяйству на основе многолетнего накопленного опыта.

Данные аргументы лишней раз отражают актуальность исследований в представленной статье по разработке САПР СО, имеющей черты унификации для большинства товарных хозяйств с применением современного математического аппарата моделирования оптимальной структуры СО с реализацией в стандартах ЦПУ аграрным производством. При этом ЦПУ обеспечивает функциональную и онтологическую грамотность интеграции задач управления с единых научно-методических положений, как следствие, возможность устанавливать взаимовлияние namного большего числа факторов в производственной деятельности. Разобраться в таком наплыве новых технологий бизнесу очень непросто, поэтому в развитых странах, являющихся лидерами в развитии ЦЭ, создаются так называемые Центры инновационных разработок для более активного и эффективного исследования с последующим ускоренным внедрением интеграционных механизмов в части указанных выше ресурсов путем формирования соответствующих цифровых стандартов [10].

В России же все процессы, связанные с цифровой трансформацией сельского хозяйства, представлены рыночной стихией. Поэтому ничего нет удивительного в том, что еще в самом начале перестройки был ликвидирован Всероссийский научно-исследовательский институт кибернетики АПК (ВНИИК), созданный в преддверии массового внедрения вычислительной техники двумя прозорливыми академиками Н. Н. Моисеевым и А. А. Никоновым, по договоренности с М. С. Горбачевым, как перспективный инновационный центр, с системных позиций интегрирующий все знания отраслевой науки в цифровом виде. Результат ликвидации ВНИИК незамедлительно сказался на массовом переходе в отрасли к методам оригинальной разработки функционально и онтологически несовместимых ИУС. Данный подход приведет к появлению огромного их числа (потенциально свыше 5 млн подсистем ИУС), что, принимая во внимание десятки тысяч товаропроизводителей в отрасли, ведет к своеобразному цифровому феодализму и очень невысокой, если не сказать отрицательной, эффективности всей ЦЭ. Это является результатом применения большинством производственных предприятий, научных и образовательных учреждений собственных онтологий-понятий, не говоря уже о значительно возросших противоречиях в связи с проникающими во все сферы межотраслевых взаимоотношений принципами ЦЭ [4].

Цель исследований – формализовать нарастающие интеграционные процессы данных и алгоритмов управления в сельском хозяйстве в эпоху ЦЭ, вершиной которых является концепция ЦПУ, интегрирующей все задачи аграрного производства с единых научно обоснованных позиций, в виде математической модели САПР СО, универсальной для большинства хозяйств.

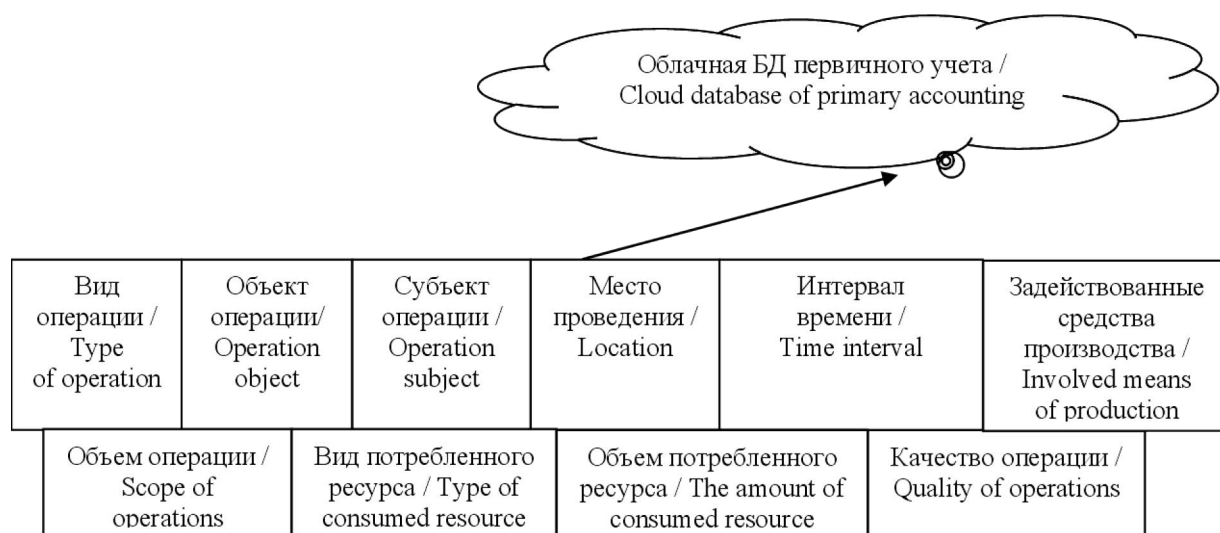
Научная новизна – впервые осуществлена формализация универсальной САПР СО на базе ЦПУ аграрной отрасли с едиными для нее цифровыми стандартами сбора, накопления и применения в управлении первичной и технологической информации, что, с одной стороны, обеспечивает системе ведущую роль во всех технологиях ТЗ, с другой стороны, совместно с ЦПУ является основой эффективности воплощения национального проекта «Экономика данных» в производственных отраслях.

¹Статья 13. Охрана земель и повышение плодородия почв. Закон от 13 декабря 1968 г. «Об утверждении основ земельного законодательства Союза ССР и союзных республик».

URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=37756>

Материал и методы. В целях устранения указанных выше проблем и противоречий исследованиями автора [10] предложена математическая модель формирования единой ЦПУ экономикой, на основе которой были получены: облачная подплатформа (наиболее общий цифровой стандарт) сбора и хранения первичной учетной информации в единой базе данных (ЕБДПУ) (рис. 1); облачная подплатформа (отраслевой цифровой стандарт) технологи-

ческих БД (на рис. 2 представлена в виде укрупненной концептуальной информационной модели растениеводства в составе 946 атрибутов-показателей, в скобках указано число их в каждом блоке); облачная подплатформа базы знаний (также отраслевой цифровой стандарт) в виде согласованных алгоритмов управленческих задач. Так, в растениеводстве для управления подотраслью было выделено 240 таких типовых задач.



**Рис. 1. Структура облачной подплатформы первичного учета и хранения информации [10] /
Fig. 1. Structure of the cloud subplatform for primary accounting and storage of information [10]**

Приведем список части задач, относящихся к растениеводству в целом.

1. Учет:

1.1. Автоматизированное ведение книги истории полей.

1.2. Учет фактического размещения культур в севооборотах.

2. Планирование:

2.1. Расчет оптимальной структуры производства отрасли растениеводства с учетом внесения соответствующих условий по объемам производства и ограничений по ресурсам.

2.2. Планирование обеспечения животноводства кормами:

2.2.1. Зелеными кормами.

2.2.2. Продукцией растениеводства.

2.3. Расчет оптимальной структуры площадей кормовых культур по видам их использования.

2.4. Расчет оптимальной структуры севооборотов.

2.5. Расчет оптимального размещения культур в севооборотах при изменяющихся внешних условиях.

2.6. Расчет потребностей и составление заявок на приобретение тары и других материальных средств для растениеводства.

2.7. Планирование обеспечения агрома-териалами.

3. Прогнозирование:

3. 1. Прогнозирование развития отрасли растениеводства.

4. Анализ:

4. 1. Расчет бонитета почв.

4. 2. Анализ использования природно-климатического и производственного потенциала в растениеводстве.

4. 3. Анализ фактической структуры посевных площадей в севооборотах.

Практическая отработка основ идей ЦПУ была опробована упомянутым ВНИИК в рамках программы «Электронизация сельского хозяйства», когда вынужденная кастомизация программного обеспечения при внедрении в каждом хозяйстве в силу онтологической и алгоритмической несовместимости решаемых задач потребовала разработки единых информационных моделей и алгоритмов для всех отраслей АПК, которые и были сформированы ведущими специалистами во всех подотраслях [15].

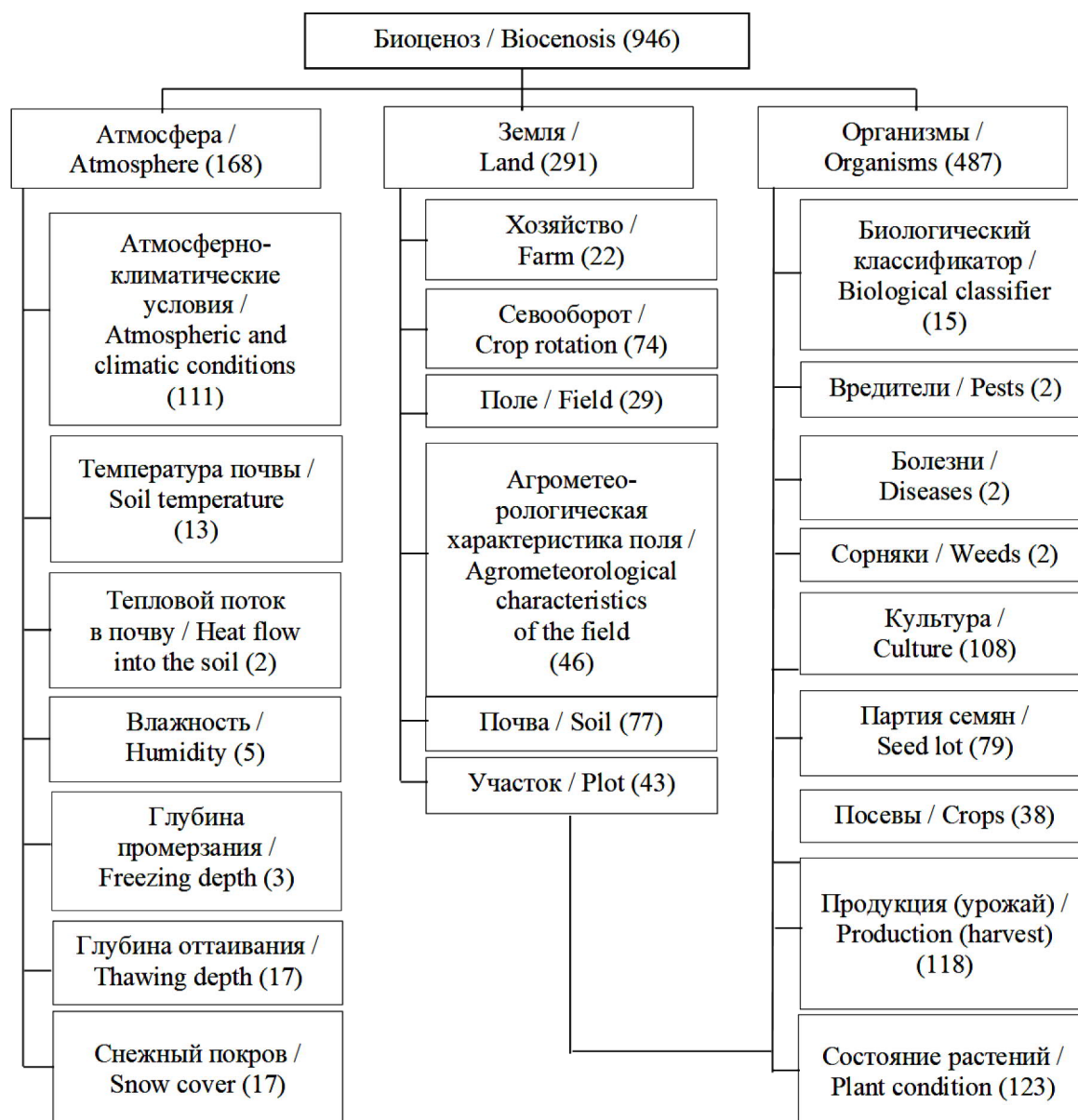


Рис. 2. Агрегированная информационная модель растениеводства [10] /
Fig. 2. Aggregated information model of crop production [10]

Обратим внимание на утверждение российского аналитического агентства ООО «Джейсон энд Партнерс Консалтинг» (J'son & Partners Consulting), что только за несколько последних лет у американских аграриев начинают проявляться в разработках часть из представленных выше цифровых стандартов (подплатформ), в частности: подплатформы-агрегаторы первичной информации и подплатформы приложений [5]. Данное утверждение подтверждает правильность нашего системного подхода к цифровой трансформации АПК.

Возвращаясь к ЦД, заметим, что в эпоху ЦЭ, развитые технологии которой позволили в концепцию ЦД внести существенное дополнение в его жизненный цикл: после завер-

шенных этапов по проектированию изделий (систем) ЦД не кладется на полку («умирает»), а начинает новую жизнь – оперативный сбор в реальном времени и хранение в своей базе данных (БД) информации о состоянии физического объекта посредством разнообразных датчиков с помощью технологии интернета вещей для дальнейшего использования. Формат первого цифрового стандарта ЦПУ в наибольшей степени удовлетворяет этим целям, поскольку на основе собранной информации по данному стандарту цифровая модель объекта в состоянии разработать рекомендации либо управляющие команды по оптимизации режима эксплуатации или обслуживания уже физического объекта.

Однако накопленный опыт успешного внедрения разнообразных ЦД приводит к неутешительному выводу, что практическая реализация их ведет к значительным затратам разнообразных ресурсов. Так, в [2] приводится оценка финансовых затрат на разработку ЦД, описываемого, правда, тысячами показателей и ограничений, порядка 100\$ млрд.

Данный опыт показывает, что в силу таких результатов по оценке финансовых затрат практически невозможна разработка оригинальных ЦД для каждого отдельного предприятия в любой отрасли. Поэтому выход необходимо искать в разработке механизмов совместного использования сформированного типового ЦД для их большого числа в целях снижения стоимостных показателей. Однако для воплощения такого подхода должна быть проделана аналогичная работа, как и в случае с ЦПУ, по созданию единых понятийных, информационных и алгоритмических пространств. Таким образом, напрашивается вывод о полной идентичности понятий между ЦПУ и ЦД.

В представленной работе использован математический аппарат теории графов² в виде задачи об упаковке в контейнеры с одновременным поиском кратчайшего пути, а также оптимизационная математическая модель производственно-логистической цепочки как выращивания, так и дальнейшего перемещения продукции внутри хозяйства и за его пределами.

Результаты и их обсуждение. Исходя из изложенного выше анализа ЦПУ и ЦД, а также их характеристик, удалось формализовать САПР СО, как наиболее актуальную и перспективную на данном этапе цифровизации сельского хозяйства технологию ТЗ. Критерием применения САПР СО является максимизация прибыли предприятия с эффективным сочетанием всех четырех факторов производства в виде ресурсов: трудовых, информационных, материальных, финансовых, учитывая также технологические производственные характеристики предприятий, а также необходимость достаточной степени конкурентоспособности производимой продукции. Учет качественных характеристик в описании конкурентоспособности возможен лишь при условии накопления в единой ЕБДПУ ЦПУ (рис. 1) соответствующих данных, причем за достаточно длительный период их регистрации. При

этом для модели САПР СО в качестве экзогенной информации будем использовать расчетные выходные данные условных СО при моделировании без географической привязки к полям оптимальной структуры СО, исследования которой приведены в [16], и являющейся обобщением совместных разработок ВНИИК и Кубанского НИИСХ еще в период выполнения программы «Электронизация сельского хозяйства» (1986–1990 гг.). Для преемственности изложения и в данной статье продолжим применять в описании модели те же самые обозначения, что и в [16]:

S_{mn} – план размещения земель под n_m -й СО, с обозначениями

m – показатель агроэкологической группы земель (АЭГЗ), $m \in M$;

n_m – показатель вхождения СО в m -ю АЭГЗ, $n_m \in N^m$;

k – показатель культуры для выбора СО, $k \in K^{mn}$, где K^{mn} – верхнее ограничение культур в n_m -м СО;

y_{kmn}^1 – урожайность k -й культуры по плану производства в n_m -м СО m -й АЭГЗ;

T_{mn} – ротационный показатель n_m -го СО;

S_m – имеющийся земельный ресурс m -й АЭГЗ;

S_m^j – имеющийся земельный ресурс j -го участка ресурса m -й АЭГЗ, $j \in J$,

$S_m = \sum_j S_m^j$;

SP_{mn} – средний размер поля n_m -го СО, где $SP_{mn} = S_{mn}/T_{mn}$. Данное равенство объясняется необходимостью выполнения следующего требования:

$$y_k^2 = \sum_{nm} y_{kmn}^1 S_{mn} / T_{mn}, \quad (1)$$

где y_k^2 – валовой сбор k -й культуры, диктуемый среднегодовыми производственными потребностями по необходимой уже ежегодной стабильности продукции, как для внутрихозяйственного потребления, так и для выполнения договоров с переработчиками, торговлей и прочими агентами. В противном случае пришлось бы прибегнуть к сложным методам поиска решения математической проблемы, для которой существуют разработанные варианты задачи об упаковке в контейнеры [17, 18], осложненные дополнительно поиском при этом кратчайшего пути. Данные методы решаются алгоритмами теории графов.

²Рогов А. Ю., Халимон А. Ю., Проститенко О. В. Графовые методы анализа в дискретной математике: учебное пособие. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2012. 88 с.

Адаптируем формулировку задачи об упаковке в контейнеры относительно САПР СО. Итак, имеется множество контейнеров одинакового объема V и множество предметов уже различного объема a_1, a_2, a_n . Стоит задача выбрать целочисленное значение контейнеров B и такое разбиение указанного множества a_i , где $i \in (1, 2 \dots n)$, на искомое значение B подмножеств $S_1 \cup \dots \cup S_B$ таким способом, при котором бы выполнялось соотношение $\sum_{i \in S_k} a_i \leq V$ для любых величин k от 1 до B . Формализация данного описания в целочисленном математическом программировании будет записана в следующем виде:

$$\min B = \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

при выполнении соотношения $\sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq V y_i$ для всех $i \in (1, 2 \dots n)$, где $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1$ для всех $j \in (1, 2 \dots n)$ при $y_i \in (0, 1)$, $x_{ij} \in (0, 1)$ для всех $i \in (1, 2 \dots n)$ и $j \in (1, 2 \dots n)$. Решение задачи будет найдено при выполнении еще условия $y_i = 1$, если i -й контейнер заполняется, и $x_{ij} = 1$ в случае, когда j -й предмет помещается в контейнер i .

В математической литературе описано большое число разновидностей постановки и решения данных задач в различных сферах деятельности, например, упаковка с учетом веса предметов, их стоимостных характеристик и ряду других показателей, в частности, загрузка автомашин с весовыми и объемными ограничениями. Зачастую для решения указанных задач приходится использовать эвристические алгоритмы. Хотя при небольших размерностях задачи рекомендован и точный переборный метод.

Применим точный переборный метод с обоснованием использования его в конце статьи при разработке САПР СО с использованием сплошного или разбросного метода размещения полей СО³. Сплошной метод применяют, когда существуют земли, пригодные и достаточные для рассматриваемого СО для размещения единым однородным массивом. А разбросной применяют в случае размещения полей СО на участках земли, которые территориально изолированы друг от друга. Определим в этом случае следующие необходимые множества:

J_m^1 – участки земли, для которых выполняются условия $S_m^j \subset (SP_{mn} \pm \varepsilon)$, где под ε

понимается допустимое от норматива отклонение площади СО;

J_m^2 – участки земли, для которых выполняются условия $S_m^j > (SP_{mn} + \varepsilon)$;

J_m^3 – земельные участки с выполнением условия $S_m^j < (SP_{mn} - \varepsilon)$;

L_{mn} – величина нераспределенных полей n_m -го СО;

J_m^{*1} – номера географически непривязанных полей СО из J_m^1 ;

J_m^{*2} – номера географически непривязанных полей СО из J_m^2 ;

J_m^{*3} – номера географически непривязанных полей СО из J_m^3 .

Исходя из введенных выражений, опишем алгоритм географической привязки условных полей СО S_{mn} к участкам земли S_m^j . Для чего определим начальное состояние множества $L_{mn} = T_{mn}$:

1. $m = 0$, $J_m^{*1} = J_m^1$, $J_m^{*2} = J_m^2$, $J_m^{*3} = J_m^3$, $S_m^{*j} = S_m^j$ и к этапу 2.

2. $m = m + 1$. Если $m = M + 1$, то алгоритм завершен, иначе к этапу 3.

3. Рассматриваются земельные участки с выполнением условия $S_m^j \subset (SP_{mn} \pm \varepsilon)$, $n = 0$ и к этапу 4.

4. $n = n + 1$. Если $n = N + 1$, то к этапу 2, иначе к этапу 5.

5. Используется следующий j из J_m^{*1} , если $J_m^{*1} = \emptyset$, то к этапу 7, иначе к этапу 6.

6. $L_{mn} = L_{mn} - 1$. Если $L_{mn} = 0$, то к этапу 4, иначе $J_m^{*1} = J_m^{*1} \setminus j$, $S_m^j \subset S_{mn}$ и к этапу 5.

7. Опишем сплошной метод, то есть $S_m^j > (SP_{mn} + \varepsilon)$. Переход к этапу 8.

8. Используется следующий j из J_m^{*2} , если $J_m^{*2} = \emptyset$, то к этапу 12 (3-й случай), иначе к этапу 9.

9. Если $L_{mn} = 0$, то к этапу 10, иначе $S_m^{*j} = S_m^j - SP_{mn}$. Площадь SP_{mn} , входящая в S_m^j , включается в S_{mn} . $L_{mn} = L_{mn} - 1$. Если $S_m^j \geq (SP_{mn} - \varepsilon)$, то к этапу 8, иначе $J_m^{*2} = J_m^{*2} \setminus j$, $j \in J_m^3$ и к этапу 11.

10. $n = n + 1$. Если $n = N + 1$, то к этапу 11, иначе к этапу 8.

11. $m = m + 1$. Если $m = M + 1$, то алгоритм завершен, иначе к этапу 8.

12. Опишем разбросной метод, то есть $S_m^j < (SP_{mn} - \varepsilon)$, где для географической привязки СО применяют многоэтапную процедуру, которую как раз можно отнести к одной

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985. С. 43-44.

из задач об упаковке в контейнеры. В этом случае ее постановка принимает следующий вид: требуется определить такое разбиение множеств S_m^j , где $j \in J_m^3$ на K_{mn} подмножеств, размеры площадей которых наиболее близки к множествам SP_{mn} . Формализация в этом случае постановки выглядит так: для любого m ищется

$$\min_{j \in J_m^3} \left| \sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn} \right| \quad (3)$$

при ограничениях $\sum_{j,m,n} x_{jmn} = 1$ для любых m, n ,

а также при $j \in J_m^3$, где $x_{jmn} \in (0, 1)$,

$$\left| \sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn} \right| \leq \varepsilon.$$

Исходя из требований проведения многих технологических операций на полях СО, достаточно близкого расположения участков одного и того же СО друг к другу, в критерий модели введем еще одно слагаемое, отражающее расстояние между ними $r(S_m^{j_1}, S_m^{j_2})$ с очевидными условиями $j_1 \neq j_2$ и $(j_1, j_2) \in J_m^3$. Информация о расстоянии между участками должна быть в каждом хозяйстве, либо их можно найти на Яндекс Картах с суммарным расстоянием между всеми участками r_o . Тогда общий критерий задачи будет выглядеть:

$$\min_{j \in J_m^3} \left[\alpha \left| \left(\sum_{j \in J_m^3} S_m^j x_{jmn} - SP_{mn} \right) / S_m \right| + \right. \\ \left. + (1 - \alpha) r(S_m^{j_1}, S_m^{j_2}) / r_o \right], \quad (4)$$

где величина индекса α ($0 \leq \alpha \leq 1$) зависит от сложившегося соотношения площадей земель, для которых нужен сплошной или разбросной способы размещения полей СО.

Как уже отмечалось, при обсуждении задач об упаковке в контейнеры для решения многих из них в основном применяются эвристические методы, а наиболее точные переборные алгоритмы применяются лишь при небольших размерностях, хотя при растущих мощностях вычислительных средств границы таких возможностей постоянно отодвигаются. Оценим размерности нашей постановки задачи географической привязки СО. В среднем в одном хозяйстве число земельных участков не более 20. Число же АЭГЗ не более трех. Число полей в СО не превышает 10. Тогда оптимальное решение методом перебора будет найдено количеством итераций поиска, не превосходящим 600, что укладывается в разумное время решения на современной вычислительной технике.

В исследованиях [16] приведены аргументы существенного влияния транспортной составляющей на географическую привязку СО, в связи с чем дается описание математической модели, оптимизирующей производственно-логистическую цепочку, как выращивания, так и дальнейшего перемещения продукции внутри хозяйства и за его пределами, что особенно важно для агрохолдингов. Модель позволяет значительно снизить при этом транспортные затраты предприятий. По этой причине в САПР СО должен быть включен и логистический блок, расширенная постановка которого позволит при необходимых инвестициях модифицировать территориальное размещение дорог, производственных, жилых и складских помещений. Исходя из высказанных соображений, на рисунке 3 показано место САПР и логистического блока во всем жизненном цикле СО в рамках ЦПУ.

САПР СО была проверена на одном из агрохолдингов Воронежской области в имитационном режиме. Подготовка исходных данных подтвердила утверждение, что в стране стало обыденностью нарушение ведения СО, из-за чего не ведется история полей с фиксацией осуществленных технологических операций на полях. Вследствие чего пришлось решать проблемы со сбором всех необходимых исходных данных для расчетов. Пришлось статистическими методами с использованием части информации, взятой в Краснодарском крае, восстанавливать их с соответствующими поправками.

Заключение. В работе представлена САПР СО, обоснованная математическим моделированием. Универсальность системы является результатом реализации ее на единой цифровой платформе управления (ЦПУ) производственной экономикой, интегрирующей онтологически и функционально все управленческие задачи аграриев с единым научно обоснованным подходом к их проектированию. Концептуальные основы ЦПУ явились следствием анализа и обобщения работ по информатизации эталонных объектов на основе идеи построения цифрового государства в виде проекта общегосударственной автоматизированной системы учёта и обработки информации (ОГАС)⁴, что получило, начиная с 2020 г., дальнейшее развитие в рамках мероприятия: «Создание и развитие научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего» (НЦМУ)

⁴Глушков В. М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975. 160 с.

по приоритету научно-технологического развития «Высокопродуктивное и экологически чистое агро- и аквахозяйство, создание безопасных, качественных и функциональных продуктов питания». В рамках плана работ НЦМУ был осуществлен анализ состояния цифровой трансформации АПК России, который позволил выявить существующие недостатки, проблемы и определить пути их преодоления с расчетом эффективности внедрения отраслевой ЦПУ

в размере 5606 млрд рублей. Поскольку севообороты являются основой эффективной организации всего производства и переработки продукции сельского хозяйства, была разработана универсальная САПР севооборотов с необходимыми информационными моделями исполнения годового производственного плана в растениеводстве с оперативным управлением, регистрации технологических операций и т. д.

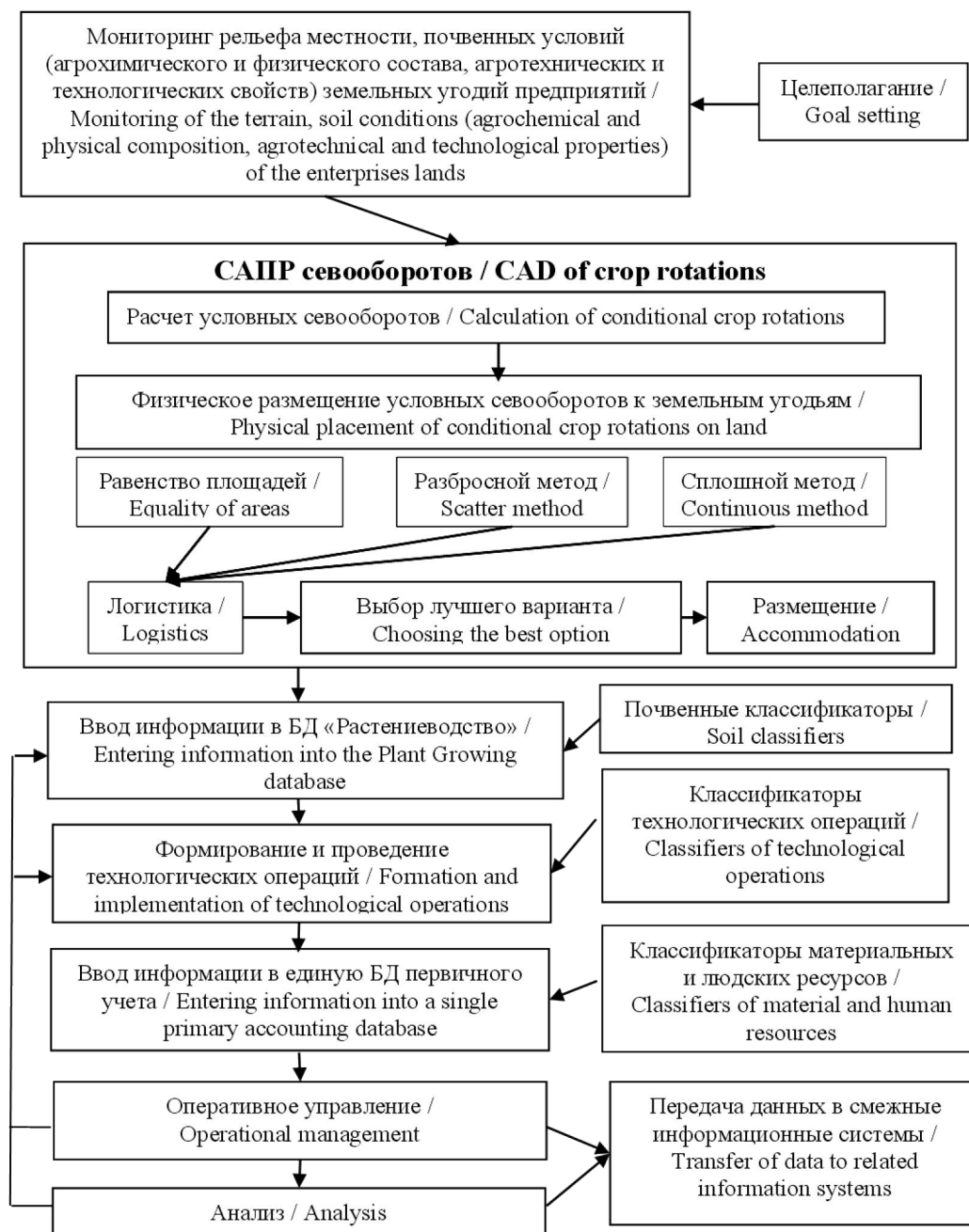


Рис. 3. Роль САПР с учетом логистики в жизненном цикле СО [16] /

Fig. 3. The role of CAD system with consideration of logistics in the life cycle of the CR [16]

Цифровая платформа управления позволит повысить эффективность внедрения экосистемного точного земледелия со снижением нарас-

тающих экологических проблем. Кроме того, системность архитектуры ЦПУ является наиболее эффективным цифровым инструментом комп-

лексного применения как ИИ, так и внедрения концепции прослеживаемости продукции, интеграции с технологиями дистанционного зондирования земли, интеграции с единой ЦП логистики, формирования экосистемной модели потребления общества, усовершенствования управления на всех уровнях и т. д.

Реализация предлагаемого подхода требует проведения исследовательских работ по онтологическому моделированию экономики страны для устранения существующих как межотраслевых, так и внутриотраслевых противоречий в понимании процесса цифровизации производства.

Список литературы

1. Chernov I., Dranko O., Guo M., Novikov D., Pan J., Raikov A. Scenario Modelling of Country's Region Development with Artificial Intelligence Support. 12th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT. Bhopal, India, 2023. pp. 653–660. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSNT57126.2023.10134656>
2. Боровков А. И., Рябов Ю. А., Кукушкин К. В., Марусева В. М., Кулемин В. Ю. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК. Вестник Восточно-Сибирской открытой академии. 2019;(32):2. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37180048> EDN: ZAXCOT
3. Grieves M. Digital Twin Certified: Employing Virtual Testing of Digital Twins in Manufacturing to Ensure Quality Products. Machines. 2023;11(8):808. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1758.v1>
4. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. System Analysis of Subject Identification of Digital Twin in Agriculture. In: Samsonovich A. V., Liu T. (eds) Biologically Inspired Cognitive Architectures 2023. BICA. Studies in Computational Intelligence. Vol 1130. Springer, Cham, 2023. pp. 135–142. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-50381-8_16
5. Medennikov V., Raikov A. Formation of the digital platform for precision farming with mathematical modeling. CEUR Workshop Proceedings. 2020;2790:114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45075916> EDN: BDWJUK
6. Васильев С. А. Интеллектуальная технология контроля качества обработки почвы в системе точного земледелия. Земледелие. 2022;(3):36–41. DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-3-36-41> EDN: ZGGQUG
7. Асатов Х. Г., Махмудова В. Х. Построение математической модели внесения удобрения в сельскохозяйственные поля в точном земледелии. Аграрный научный журнал. 2021;(11):8–11. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i11pp8-11> EDN: YNCGKR
8. Сергеева Н. В. Экономическое обоснование элементов точного земледелия. Экономика сельского хозяйства России. 2024;(5):2–7. DOI: <https://doi.org/10.32651/245-2> EDN: NKBQFX
9. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Автоматизированный комплекс управления агротехнологией в точном земледелии. Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024;(5):54–62. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208224050127> EDN: ZSNYLV
10. Меденников В. И. Моделирование формирования цифровой платформы управления АПК. Экономика сельского хозяйства России. 2022;(7):83–90. DOI: <https://doi.org/10.32651/227-83> EDN: FPOKJW
11. Зацаринный А. А., Меденников В. И., Райков А. Н. Интеграция приложений искусственного интеллекта в единую цифровую платформу АПК. Информационное общество. 2023;(1):127–138. DOI: https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127 EDN: NMKKLZ
12. Хабарова И. А., Непоклонов В. Б. Деградация земель юга Российской Федерации. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017;(2):111–115. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29186002> EDN: YORPPJ
13. Макаров О. А., Кузнецов М. С., Демидов В. В., Карпова Д. В., Шульга П. С., Абдулханова Д. Р., Есафова Е. Н., Кубарев Е. Н. Основные направления научных исследований на кафедре эрозии и охраны почв: современное состояние и перспективы развития. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023;(4):70–82. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-70-82> EDN: DGCDJ
14. Хомяков Д. М. Почва – незаменимый компонент биосферы и глобальной продовольственной системы (критическая оценка ситуации). Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2020;(4):3–16. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44097163> EDN: KCXCOW
15. Меденников В. И. Опыт и последствия разработки когнитивной карты для комплексной цифровизации сельского хозяйства. Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2025): тр. Восемнадцатой междунаро. конф. Москва, 24–26 сентября 2025 года. М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2025. С. 302–310. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88809623> EDN: LMJYVV
16. Меденников В. И., Кейер П. А. Географическая привязка формирования перспективных севооборотов на основе математической модели управления производственно-логистической цепочкой продукции растениеводства. Системы высокой доступности. 2023;19(4):73–81. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20729472-202304-06> EDN: NXMTKE
17. Барашов Е. Б., Егоркин А. В., Лемтюжников Д. В., Посыпкин М. А. Анализ эффективности алгоритма редукции в решении задачи об упаковке в контейнеры. Системы и средства информатики. 2023;33(3):61–75. DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527230305> EDN: QDUAMY
18. Фуремс Е. М. Приближенное решение обратной задачи об упаковке в контейнеры с учетом предпочтений лица, принимающего решения. Искусственный интеллект и принятие решений. 2018;(3):112–121. DOI: <https://doi.org/10.14357/20718594180321> EDN: YKVVAL

References

1. Chernov I., Dranko O., Guo M., Novikov D., Pan J., Raikov A. Scenario Modelling of Country's Region Development with Artificial Intelligence Support. 12th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies, CSNT. Bhopal, India, 2023. pp. 653–660. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSNT57126.2023.10134656>
2. Borovkov A. I., Ryabov Yu. A., Kukushkin K. V., Maruseva V. M., Kulemin V. Yu. Digital twins and the digital transformation of defense industry enterprises. *Vestnik Vostochno-Sibirskoy otkrytoy akademii*. 2019;(32):2. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37180048>
3. Grieves M. Digital Twin Certified: Employing Virtual Testing of Digital Twins in Manufacturing to Ensure Quality Products. *Machines*. 2023;11(8):808. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202305.1758.v1>
4. Budzko V., Medennikov V., Keyer P. System Analysis of Subject Identification of Digital Twin in Agriculture. In: Samsonovich A. V., Liu T. (eds) *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2023*. BICA. Studies in Computational Intelligence. Vol 1130. Springer, Cham, 2023. pp. 135–142. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-50381-8_16
5. Medennikov V., Raikov A. Formation of the digital platform for precision farming with mathematical modeling. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020;2790:114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45075916>
6. Vasiliev S. A. Intelligent technology for quality control of tillage in the precision farming system. *Zemledelie*. 2022;(3):36–41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2022-3-36-41>
7. Asadov Kh. G., Makhmudova V. Kh. Construction of a mathematical model of fertilizer application in agricultural fields in precision agriculture. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2021;(11):8–11. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i11pp8-11>
8. Sergeeva N. V. Economic justification of precision farming elements. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii* = Economics of Agriculture of Russia. 2024;(5):2–7. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32651/245-2>
9. Mikhaylenko I. M., Timoshin V. N. Automated control complex of agrotechnology in precision farming. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2024;(5):54–62. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500208224050127>
10. Medennikov V. I. Modeling of the formation of a digital platform for managing the Agro-industrial complex. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii* = Economics of Agriculture of Russia. 2022;(7):83–90. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32651/227-83>
11. Zatsarinnyy A. A., Medennikov V. I., Raykov A. N. Integration of agricultural artificial intelligence applications into a single digital platform. *Informatsionnoe obshchestvo* = Information Society. 2023;(1):127–138. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52605/16059921_2023_01_127
12. Khabarova I. A., Nepoklonov V. B. Land degradation of the Russian South. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'emka* = Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying. 2017;(2):111–115. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29186002>
13. Makarov O. A., Kuznetsov M. S., Demidov V. V., Karpova D. V., Shul'ga P. S., Abdulkhanova D. R., Esafova E. N., Kubarev E. N. Main areas of scientific research at the department of soil erosion and conservation: current state and prospects of development. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* = Moscow University Soil Science Bulletin. 2023;(4):70–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-70-82>
14. Khomyakov D. M. Soil – an essential component of the biosphere and the global food system (critical assessment of the situation). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* = Lomonosov Soil Science Journal. 2020;(4):3–16. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44097163>
15. Medennikov V. I. The experience and implications of developing a cognitive map for the integrated digitalization of agriculture. *Management of Large-scale systems Development (MLSD'2025): Proceedings of the XVIIIth International conference*. Moscow, September 24–26, 2025. Moscow: *IPU im. V. A. Trapeznikova RAN*, 2025. pp. 302–310. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=88809623>
16. Medennikov V. I., Keyer P. A. Geographical reference of the formation of promising crops rotations based on a mathematical model of management of the production and logistics chain of plant products. *Sistemy vysokoy dostupnosti* = Journal Highly available systems. 2023;19(4):73–81. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18127/j20729472-202304-06>
17. Barashov E. B., Egorkin A. V., Lemtyuzhnikova D. V., Posypkin M. A. Efficiency of the reduction algorithms in the bin packing problem. *Sistemy i sredstva informatiki* = Systems and Means of Informatics. 2023;33(3):61–75. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527230305>
18. Furems E. M. Approximate solution scheme for inverse bin-packing problem subject to decision making preferences. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* = Artificial Intelligence and Decision Making. 2018;(3):112–121. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/20718594180321>

Сведения об авторе

✉ **Меденников Виктор Иванович**, доктор техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», ул. Вавилова 44-2, г. Москва, Российская Федерация, 119333, e-mail: frcsc@frcsc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4485-7132>, e-mail: dommed@mail.ru

✉ **Viktor I. Medennikov**, DSc in Engineering, associate professor, leading researcher, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Street, Moscow, Russian Federation, 119333, e-mail: frcsc@frcsc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4485-7132>, e-mail: dommed@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author