

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 626.82

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106

Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта

**Дмитрий Алексеевич Рогачев¹, Ирина Федоровна Юрченко²,
Алексей Фруминович Рогачев³**

^{1, 2}Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Российская Федерация

³Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Российская Федерация

¹Rogachev.soft@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>

²Irina.507@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2390-1736>

³Rafr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3077-6622>

Аннотация. Цель: научное обоснование методического обеспечения и информационной поддержки принятия решений по водораспределению на межхозяйственных оросительных системах. **Материалы и методы.** Исследования проводились на Городищенской оросительной системе, которая типична для условий засушливой Волгоградской области. Методическую основу исследования составляли системный, сравнительный, эвристический и математико-статистический подходы. Реализованные методы формализованной поддержки принятия решений включают математическую оптимизацию, а также прогнозирование ожидаемого результата, в т. ч. на основе методов искусственного интеллекта. **Результаты.** Рассмотрены методические подходы к планированию системного водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов или при ограничении производственно-хозяйственных условий. Выполнен анализ методологии по поддержке принятия управленческих решений на основе методов искусственного интеллекта. Определены основные требования к приоритетным методам информационной поддержки управляющих воздействий, включая их практическую применимость, рациональность планируемых результатов, а также обеспечение достаточной точности решения оптимизационной задачи. Систематизированы критерии оптимизации планирования водораспределения в условиях маловодности источника орошения или при ограничении производственно-хозяйственных условий. Установлено, что использование методов математического моделирования и искусственного интеллекта способствует разработке информационных технологий оптимизации водораспределения. Разработана и апробирована базовая экономико-математическая модель, включающая в качестве целевой функции валовой объем производства продукции. **Выводы.** Тестирование модели на материалах Городищенской оросительной системы показало возможность увеличения производства продукции до 78,8 тыс. руб./га. Это достигается за счет повышения качества планирования и управления водораспределением в условиях дефицита водных ресурсов в Нижнем Поволжье.

Ключевые слова: сельскохозяйственное производство, водосбережение, системное водораспределение, поддержка решений, математическое моделирование, искусственный интеллект

Для цитирования: Рогачев Д. А., Юрченко И. Ф., Рогачев А. Ф. Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и

методов искусственного интеллекта // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 87–106. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

System water distribution control based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods

Dmitry A. Rogachev¹, Irina F. Yurchenko², Aleksey F. Rogachev³

^{1,2}All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

³Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

¹Rogachev.soft@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>

²Irina.507@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2390-1736>

³Rafr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3077-6622>

Abstract. Purpose: scientific substantiation of methodological and information support for decision-making on water distribution in inter-farm irrigation systems. **Materials and methods.** The studies were carried out at the Gorodischenskaya irrigation system, which is typical for the conditions of the arid Volgograd region. The methodological basis of the study was systematic, comparative, heuristic and mathematical-statistical approaches. The implemented methods of formalized decision-making support include mathematical optimization, as well as forecasting the expected result, including on the basis of artificial intelligence methods. **Results.** Methodological approaches to planning system water distribution under conditions of water scarcity or under limited production and economic conditions are considered. The analysis of the methodology on managerial decision-making support based on artificial intelligence methods is carried out. The main requirements for the priority methods of information support of control actions are determined, including their practical applicability, rationality of the planned results, as well as ensuring sufficient accuracy of solving the optimization problem. Criteria for optimizing water distribution planning under conditions of low-water irrigation source or with limited production and economic conditions are systematized. It has been determined that using mathematical modeling and artificial intelligence contributes to the development of information technologies for optimizing water distribution. A basic economic-mathematical model including the gross output as a target function has been developed and tested. **Conclusions.** Testing the model on the materials of the Gorodischenskaya irrigation system data showed the possibility of increasing production up to 78.8 thousand rubles/ha. This is achieved by improving the quality of planning and management of water distribution under the conditions of water scarcity in the Lower Volga region.

Keywords: agricultural production, water saving, system water distribution, decision support, mathematical modeling, artificial intelligence

For citation: Rogachev D. A., Yurchenko I. F., Rogachev A. F. System water distribution control based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):87–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106>.

Введение. Дефицит пресной воды в ближайшей перспективе может стать одним из наиболее острых глобальных вызовов человечеству. Несмотря на то, что Россия обладает огромными запасами пресной воды, ее

рациональное использование становится крайне важным не только в экологическом, но и в экономическом аспектах.

Решение задачи рационального распределения водных ресурсов, как между секторами экономики, так и между отдельными предприятиями и водопользователями в рамках каждого сектора, наиболее востребовано в регионах рискованного земледелия, в которых без использования орошения эффективное сельскохозяйственное производство невозможно.

Планирование рационального водораспределения должно осуществляться с учетом экологической безопасности окружающей природной среды, поддержания оптимальных режимов мелиорируемых земель, сохранения и воспроизводства почвенного плодородия, создания новых форм управления эксплуатацией систем [1].

Негативные экологические последствия нерационального использования водных ресурсов при орошении изучались В. В. Бородычевым, Н. Н. Дубенком, Л. В. Кирейчевой, И. П. Кружилиным, Е. Б. Колбачевым, А. В. Колгановым, Н. В. Кузнецовой, В. И. Ольгаренко, В. Н. Щедриным и другими авторами [2–4]. Вопросы применения эколого-экономического и математического моделирования для учета экологических ограничений в сельскохозяйственном производстве изучались О. Ю. Воронковой, Г. Я. Барышниковым, Е. А. Ельчищевым [5], А. С. Овчинниковым, В. И. Петровым, Н. А. Пронько, А. С. Фальковичем [6], А. Н. Салугиным [7] и другими исследователями. Реализация различных подходов к стратегии экологической безопасности, в т. ч. с применением методов дистанционного зондирования Земли, исследуется в публикациях Д. Е. Кучера, С. Г. Харченко, Е. А. Пичугина, Б. Е. Шенфельда и др. [8, 9].

Следует отметить, что действующее нормативно-методическое обеспечение планирования водораспределения не включает способы количественной оценки многовариантных решений, анализа и выбора из них эффективного на основе оптимизации. Это резко повышает риск ошибки

управленческого решения, снижает его качество и, как следствие, влечет за собой повышение непроизводительных трат поливной воды, электроэнергии и других ресурсов производства. Особой критичности ситуация достигает в условиях дефицита водообеспеченности оросительной системы (ОС), а также в новых (непривычных, незнакомых и т. п.) условиях принятия решений.

Методические подходы к планированию водораспределения на межхозяйственных ОС в настоящее время базируются преимущественно на обеспечении заявок потребителей в пределах общего лимита ресурсов, предусмотренного производственно-финансовым планом.

В условиях дефицита водных ресурсов водоподача, в первую очередь, осуществляется потребителям, обеспечивающим основное поступление денежных средств, затем потребителям в соответствии с приоритетами лица, принимающего решение (ЛПР), после чего по остаточному принципу выделяется остальным водопользователям.

При таком подходе критерии оптимальности распределения водных ресурсов строго не формулируются, последствия результатов принятого решения не прогнозируются, технико-экономическая эффективность его реализации не оценивается.

Сложившуюся методологию поддержки принятия решений (ППР) в сфере системного подхода к водораспределению можно характеризовать как решение на основе индивидуальных предпочтений ЛПР, а выбор альтернатив основан на знаниях и компетенциях эксперта. При этом используется информация о ранее имевших место результатах, определяющих последствия выбора аналогичных вариантов. Здравый смысл ЛПР позволяет выбирать ту альтернативу, которая способствовала успешному решению в прошлом.

Преимуществом интуитивного подхода является краткий срок и низкая затратность реализации. Но это может оказаться недостаточным для

эффективного решения в нестандартной или сложной многофакторной ситуации. Источником проблемы является несоответствие суждения ЛПР в условиях принципиально новой ситуации ввиду отсутствия предшествующего опыта, который и обуславливает логику ЛПР. Решение может оказаться неоптимальным из-за значительного количества влияющих на него и подлежащих учету факторов. Срабатывает так называемое «проклятие размерности», широко распространенный бич принятия управленческих решений.

Ориентация ЛПР на предшествующий опыт делает приоритетными те решения, которые были известны ЛПР ранее, что препятствует генерации новых, более эффективных альтернатив, чем ранее апробированные воздействия.

ЛПР, приверженное к традиционному суждению и предшествующему опыту, может даже подсознательно избегать использования новых решений, практикующихся в смежных секторах, например, моделирующих оценки социально-экономических последствий управляющих воздействий. Часто интуитивное решение представляет собой выбор, сделанный исключительно на основе его очевидной правильности. В реальной сложной организационно-экономической ситуации возможны множества технических альтернатив, поэтому вероятность успешного выбора ЛПР плана водораспределения при наличии дефицита водных и иных ресурсов на основе интуитивного подхода, без какого-либо привлечения логики знаний невысока.

Сейчас в период изменившихся форм собственности на землю и внутрихозяйственные ОС, обусловивших резкий рост числа водопользователей и требований к качеству управленческих решений, особенно актуальны задачи совершенствования методов планирования и реализации процессов водораспределения. основополагающими принципами трансформации нормативно-методической базы водопользования должны стать: экологичность, бесперебойность водоподачи и равноправность водопользователей.

Цель работы – научное обоснование методического обеспечения и информационной поддержки принятия решений по водораспределению на межхозяйственных оросительных системах на основе технико-экономической оптимизации управленческих воздействий, гарантирующих экологическую безопасность орошения.

Методы и материалы. Для реализации поставленной цели и создания эффективной системы ППР по планированию межхозяйственного водопользования были проанализированы базовые информационные потоки, включая структурные связи, функциональные блоки, и взаимодействия между ними в процессе управления межхозяйственным водораспределением. Исследования проводились на примере типичной для условий Волгоградской области Городищенской ОС. На верхнем концептуальном уровне выявлялись основные аспекты процесса функционирования системы ППР, а также реализующие их процедуры, от сбора входной информации до подготовки обобщающих отчетов, содержащих ответы на запросы, иллюстрированные графическими и текстовыми материалами.

Методическую основу исследования составляли системный, сравнительный, эвристический и математико-статистический подходы. Реализованные методы формализованной ППР включают математическую оптимизацию, а также прогнозирование, в т. ч. на основе методов искусственного интеллекта (ИИ).

Результаты и обсуждение. Ключевое решение проблемы рационального водораспределения обеспечивается методологией оптимизационного экономико-математического моделирования, позволяющего получить распределение ограниченных водных ресурсов по хозяйствам-водопользователям, гарантирующее получение экстремальных значений планируемых экономических результатов устойчивого агропроизводства.

В качестве критерия оптимальности планов водораспределения при заданном лимите водоподдачи могут применяться:

- минимум потерь урожая от недополива;
- минимальное отклонение фактической удельной продуктивности агроценозов от планируемых значений;
- максимум чистого дохода от орошения;
- минимум недополитых площадей;
- максимум площадей полива при заданном лимите водоподачи;
- равномерность недополитых площадей в хозяйствах;
- минимум потерь воды;
- минимальное отклонение фактической водоподачи и коэффициента использования оросительной воды от условно нормативных значений;
- минимум затрат на электроэнергию.

Базовая экономико-математическая модель, включающая в качестве максимизируемой целевой функции валовой объем продукции в денежном исчислении Z_{\max} со всей площади орошаемых земель, имеет вид (1) с ограничениями (2):

$$Z_{\max} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_i x_{ij} y_{ij} \Rightarrow \max, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – индекс орошаемой культуры;

c_i – закупочная цена i -й орошаемой культуры (с единицы орошаемой площади), руб./т;

x_{ij} – посевная площадь i -й культуры на j -м участке водопользования, га;

y_{ij} – урожайность i -й культуры на j -м участке водопользования, т/га;

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n y_{ij} x_{ij} &\geq V_i, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} &= S, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\geq S_i, \\ \sum_{j=1}^n w_{ij} &= W_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n M_{ij} x_{ij} = W_i,$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} = W,$$

где W_i – планируемый суммарный объем производства i -й культуры, т;

S – общий размер орошаемых площадей, га;

S_i – размер орошаемых площадей i -й культуры, га;

w_{ij} – потребность j -го участка для орошения i -й культуры, м³;

W_i – потребность всех водопользователей для орошения i -й культуры, м³;

M_{ij} – оросительная норма i -й культуры на j -м участке, м³/га;

W – общий объем водоподачи по ОС, м³.

Задача оптимизации решается методом линейного программирования для целевой функции Z_{\max} (1), при этом максимизируется эффект ОС от выполнения плана водораспределения. Социальный результат выражается в увеличении совокупного производства продукции сельскохозяйственных культур в хозяйствах потребителей, а экологический – за счет рациональных оросительных норм.

Однако фактическое значение урожайности y_{ij} для климатических условий хозяйственного года (осадки, температуры, суховеи) на этапе планирования представляет собой стохастическую величину, достоверная оценка прогнозного значения которой представляет собой отдельную задачу. Стохастичность значений фактической водоподачи, также определяющей урожайность, может быть учтена с использованием методики профессора В. А. Кардаша [10], основанной на учете отзывчивости сельскохозяйственных культур на орошение.

Использование компьютерной поддержки при планировании системного водораспределения позволяет повысить качество управления за счет оперативного обеспечения ЛПР актуальной и агрегированной информации

ей с использованием методов статистического анализа и ИИ, а также средств математического моделирования.

Архитектура системы ППР в области планирования водораспределения должна объединять три подсистемы – информационную, подсистему анализа и подсистему поддержки решения (рисунок 1). Информационные базы данных и знаний актуализируются и администрируются средствами СУБД.



Рисунок 1 – Схема взаимодействия подсистем поддержки принятия решений

Figure 1 – Scheme of decision-making support subsystem interaction

Алгоритмическим ядром системы может быть блок моделирования, основанный на методологии ИИ, позволяющей повысить качество планирования объемов водоподачи потребителям с учетом многолетних данных фактического водопользования. Если принять во внимание значительное число факторов, анализируемых для принятия управленческих решений по водораспределению, представляется действенным использование моделей глубоких нейронных сетей (DNN) как инструментария ИИ [11].

Хотя в настоящее время ИИ не в состоянии полностью заменить умственный труд человека, применение методов ИИ может поднять качество управленческих решений на новый уровень за счет анализа различных сценариев управления водораспределением на ОС. Методами ИИ успешно решаются задачи извлечения из множеств данных и информации существенных признаков и закономерностей. Таким образом, для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от изменяющихся природно-хозяйственных условий агропроизводства конкретных водопользователей перспективны методы интеллектуального анализа данных различных типов (Data Mining), включая графические изображения [12, 13].

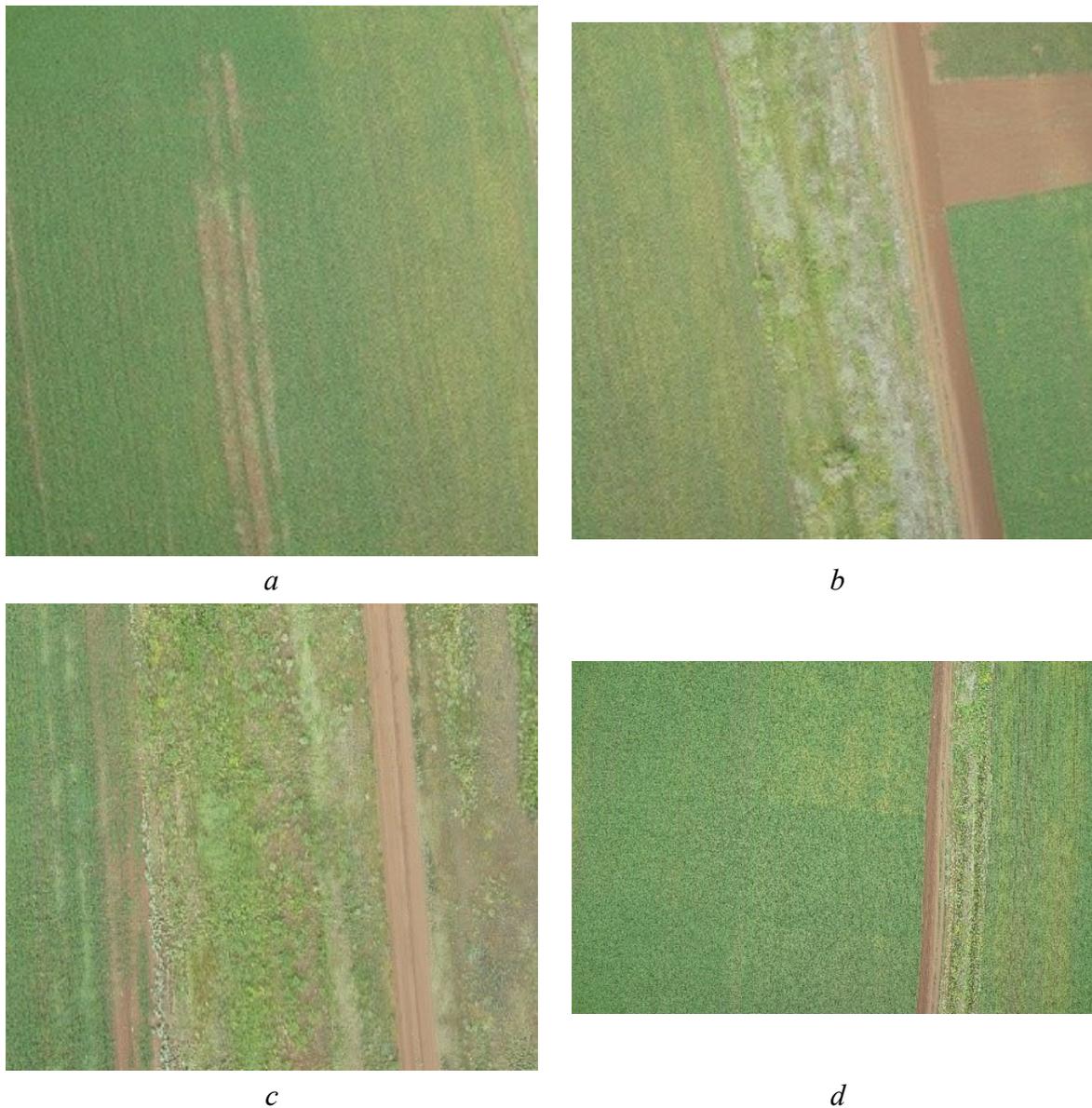
Целесообразность использования методов ИИ и машинного обучения (МО) в задачах управления системным водораспределением определяется также:

- отсутствием четкого алгоритма ввиду высокой вариабельности решения;
- неопределенностью поведения модели;
- повышением экономической эффективности применения информационно-аналитических систем.

К приоритетным сферам использования методов ИИ в орошаемом земледелии относятся также оценка мелиоративного состояния и продуктивности орошаемых агроэкосистем, прогнозирование совокупности технико-экономических показателей, включая урожайность и отзывчивость на орошение сельскохозяйственных культур, а также качества управленческих решений (экономическая эффективность, соотношение фактической и потенциальной продуктивности орошаемых участков) [14–17], которые подлежат учету в процедурах планирования водораспределения.

С этой целью эффективно также использование спутниковых снимков и изображений сельскохозяйственных полей, созданных посредством применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Цветные RGB-

изображения, полученные с помощью БПЛА для проведения интеллектуальной оценки мелиоративного состояния сельскохозяйственных угодий, представлены на рисунке 2.



a – изображение участка с незначительными дефектами развития растений;
b, c – существенные дефекты развития растений, требующие проведения мелиоративных мероприятий; *d* – изображение эталонного участка
a – image of a plot with minor defects in plant development; *b, c* – significant defects in plant development, requiring reclamation actions; *d* – image of the reference area

Рисунок 2 – Изображения мелиорируемых участков сельскохозяйственных полей для интеллектуальной оценки их мелиоративного состояния

Figure 2 – Images of reclaimed plots of agricultural fields for intellectual assessment of their reclamation state

Для выявления участков сельскохозяйственных полей с различными дефектами (недостаточное увлажнение посевов, вымочки, дефицит минерального питания, поражение агроценозов болезнями или вредителями) эффективным является решение классификационной задачи с использованием глубоких интеллектуальных нейронных сетей (ИНС), архитектура которых построена на основе сверточных и полносвязных слоев нейронов [18]. Получаемые результаты интеллектуального выявления дефектов развития растений могут оперативно использоваться для проведения агротехнологических мероприятий либо для оперативной корректировки прогнозных значений урожайности по орошаемым участкам.

Интеллектуальные цифровые технологии могут стать эффективным инструментарием решения многокритериальных задач планирования водораспределения, так как использование ИИ позволяет работать с территориально и темпорально распределенными информационными массивами с более высоким уровнем информационно-аналитического обеспечения ЛПР [9, 19].

Несмотря на высокую стоимость решений на основе ИИ, их окупаемость для задачи планирования водораспределения составит, по экспертным оценкам, от 1 до 3 лет за счет значимого (до 80 %) роста качества управленческих решений. С учетом отмеченных специфических особенностей решаемой задачи была разработана информационно-аналитическая система оптимизации планирования системного водораспределения на ОС, структурно-функциональная схема которой представлена на рисунке 3.

Информационно-аналитическая система включает математические модели оценки и выбора варианта при заданных критериях на основе анализируемых планов водораспределения с учетом баланса эколого-экономических параметров. Характерной особенностью данной подсистемы является учет метрики сопоставления вариантов методами ИИ.

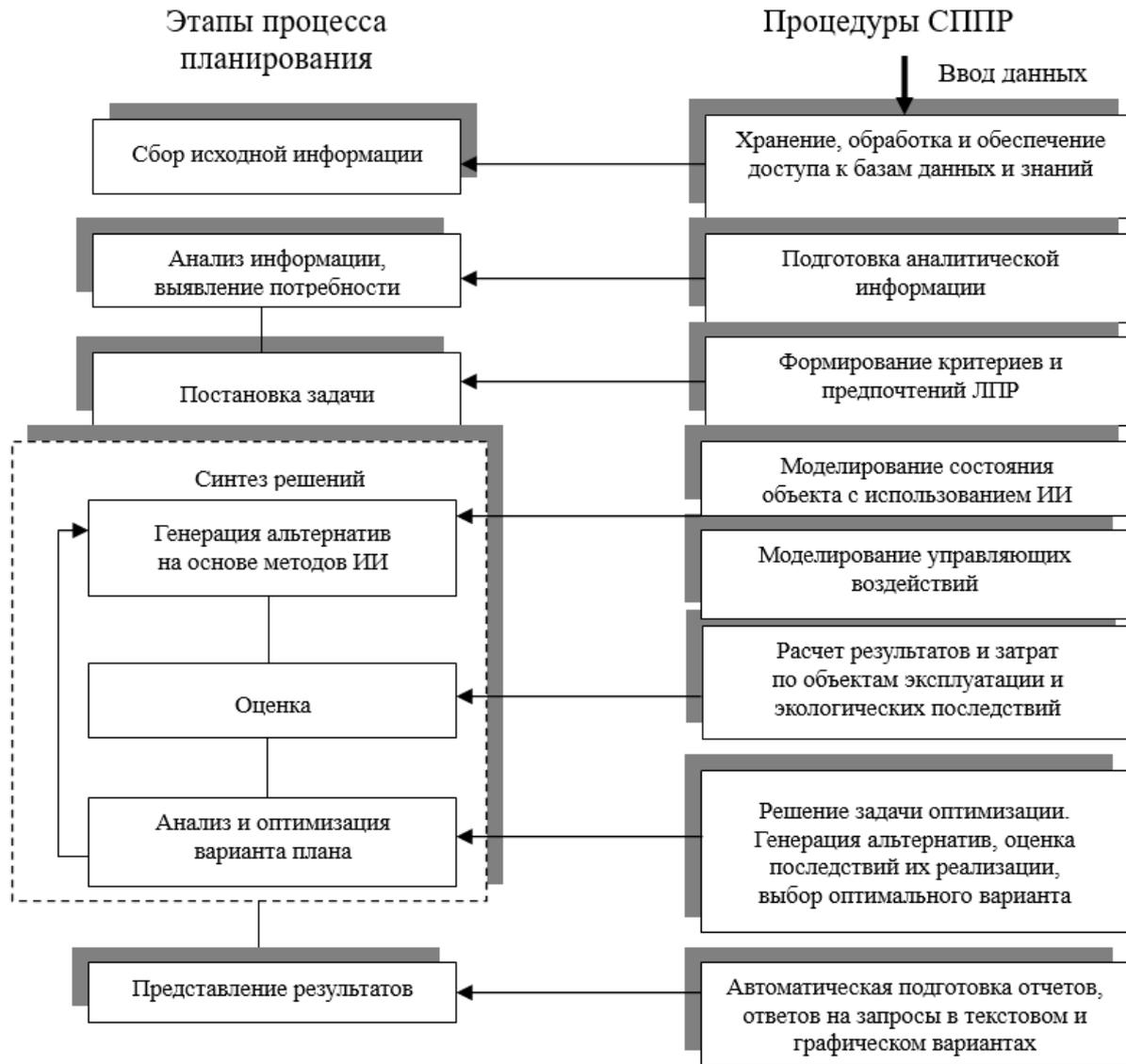


Рисунок 3 – Обобщенная схема информационно-аналитической системы
Figure 3 – Generalized scheme of the information and analytical system

Результаты разработки концептуальной схемы формирования планов подачи воды на основе планирования сельскохозяйственного производства представлены на рисунке 4. На схеме выделены блоки ИИ, использующие модели глубоких ИНС для прогнозирования гидрометеорологических показателей и урожайности.

Входными данными для этих блоков являются многолетние данные о подекадных осадках, температуре воздуха, скорости ветра, а также ретроспективные значения урожайностей возделываемых сельскохозяйственных культур (рисунок 4).

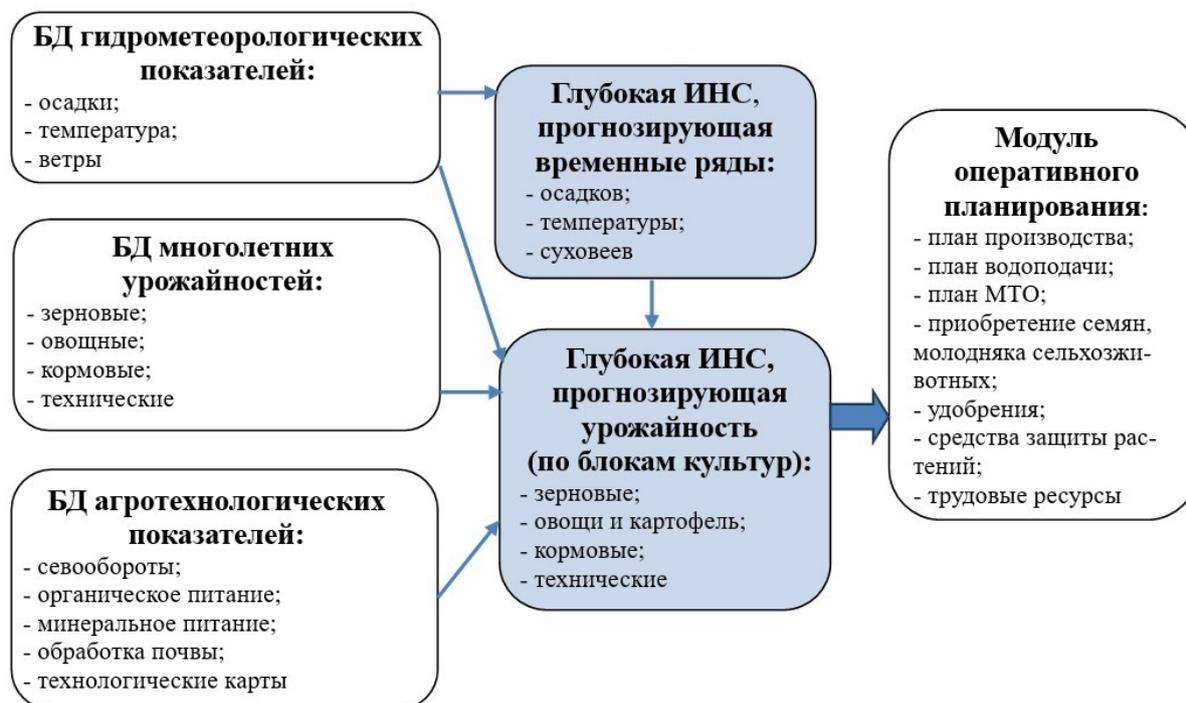


Рисунок 4 – Схема разработки плана водоподачи и агропроизводства на основе прогнозирования урожайности с использованием глубоких интеллектуальных нейронных сетей

Figure 4 – Scheme for developing a water supply and agricultural production plan based on yield forecasting using deep intelligent neural networks

Интеллектуальная подсистема (ИАП) объединяет средства формирования знаний на основе общей БД, а также математических моделей и методов ИИ.

Подсистема обеспечивает визуализацию процессов формирования входных и выходных данных технологических процессов управления водораспределением, подготовки информации для ППР, а также вывода отчетов по данным, запрашиваемым ЛПР и пользователями (рисунок 5).

Полученный результат обеспечивает снижение упущенной выгоды от сокращения производства продукции растениеводства на орошении для варианта водораспределения, полученного на основе моделирования, в сравнении с традиционным методом планирования на 11,3 %.

Важным направлением продолжения исследований является обоснование соотношения и информационного взаимодействия оптимизационных

математических моделей с подсистемами ИИ. Для этого необходимо совершенствование архитектур комбинированных глубоких нейронных сетей, в т. ч. с несколькими входами, позволяющими сочетать информационные входы как оперативных, так и ретроспективных числовых и графических данных. Это повысит возможность и результативность использования в управленческих решениях по орошаемому земледелию требующейся совокупности «больших данных», обеспечивающих технико-экономическую, социальную и экологическую эффективность реализуемых воздействий.

ИАС Водораспределение 1.0 (1С:Предприятие)

Главное Справочники Документы Моделирование Отчеты

C:\1C_Bases\1C_РабочиеМатериалы\SPPR_VDR\План водораспределения_2022_2.xlsx *

Водораспределение по хозяйствам водопользователям													
Суммарное водораспределение по ОС													
Водозабор, тыс. м.куб	Заявок от потребителей, тыс. м.куб	Фактическая водоподача, тыс. м.куб	Выполнение плана подачи воды	Период планирования, год									
1500	2 099	1 500	71,46%	2 022									
Экономическая эффективность водораспределения по хозяйствам-водопользователям													
Потребитель / заявоч / факт / Выполнение плана %	Заявка м.куб	Факт	Исходные данные по хозяйствам-потребителям							Валовая стоимость			
			Группа орошаемых культур	Оросительная норма, тыс. м.куб/га	Площадь орошения заявка, га	Площадь орошения факт, га	Базовая урожайность, т/га	Кэф.отзы вчивости на полив	Урожайность на поливе, т/га	Закупочная цена продукции, руб./т	План	Факт	
ООО "Кузмичи" - договор №0108													
619	250	250	Овощные	5	50,00	50,00	20	1,8	36,00	51 200	92 160 000	92 160 000	
478	225	200	Зерновые	2,5	90,00	80,00	2	2,5	5,00	14 756	6 640 200	5 902 400	
77,22%	144	28	Кормовые	4	36,00	7,00	15	1,7	25,50	7 256	6 661 008	1 295 196	
ИП Круглова М.Е.- договор №0204													
428	150	150	Овощные	5	30,00	30,00	20	1,8	36,00	51 200	55 296 000	55 296 000	
294	150	100	Зерновые	2,5	60,00	40,00	2	2,5	5,00	14 756	4 426 800	2 951 200	
68,69%	128	44	Кормовые	4	32,00	11,00	15	1,7	25,50	7 256	5 920 896	2 035 308	
ИП Элькес Е.Д.- договор №1410													
477	200	150	Овощные	5	40,00	30,00	20	1,8	36,00	51 200	73 728 000	55 296 000	
310	125	110	Зерновые	2,5	50,00	44,00	2	2,5	5,00	14 756	3 689 000	3 246 320	
64,99%	152	50	Кормовые	4	38,00	12,50	15	1,7	25,50	7 256	7 031 064	2 312 850	
ИП Ложкин Я.Д.- договор №2606													
575	175	126	Овощные	5	35,00	25,20	20	1,8	36,00	51 200	64 512 000	46 448 640	
418	200	192	Зерновые	2,5	80,00	76,80	2	2,5	5,00	14 756	5 902 400	5 666 304	
72,70%	200	100	Кормовые	4	50,00	25,00	15	1,7	25,50	7 256	9 251 400	4 625 700	
					591,00	431,50				ИТОГИ:	335 218 768	277 235 918	
											Выполнение финансового плана,%		82,70%

Рисунок 5 – Фрагмент плана водораспределения по хозяйствам-водопользователям на примере Городищенской оросительной системы
Figure 5 – Fragment of the water distribution plan for water user farms on the example of the Gorodischenskaya irrigation system

Выводы. Выполненный анализ методических подходов к планированию системного водопользования в условиях дефицита водообеспеченности выявил необходимость повышения качества управленческих решений, в настоящее время принимаемых на основе индивидуальных предпочтений ЛПР. По результатам исследований обосновано использование методов математического моделирования и ИИ в составе программного обеспечения систем информационно-аналитической поддержки планирования водораспределения. Представлены результаты апробации по материалам службы эксплуатации Городищенской ОС.

Экономический эффект от повышения удельной стоимости валовой продукции в рублях на 1 га расчетного варианта в сравнении с традиционным возрастает на 23,73 %. Продуктивность поливной воды расчетного варианта возрастает на 29,05 руб./м³, или на 18 %.

Список источников

1. Система мелиоративных мероприятий по регулированию почвенных процессов, способствующих повышению плодородия различных типов почв и улучшению экологического состояния орошаемых земель: монография / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова, В. Ц. Челахов, О. Ю. Шалашова. Новочеркасск, 2019. 77 с.
2. Менее водозатратная и экологически предпочтительная технология орошения риса периодическими поливами / И. П. Кружилин, М. А. Ганиев, К. А. Родин, Н. В. Кузнецова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 2(54). С. 49–55. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-4.
3. Кирейчева Л. В., Юрченко И. Ф. Роль мелиорации земель в решении проблемы продовольственной безопасности России // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2015. № 2. С. 13–15.
4. Кирейчева Л. В., Тимошкин А. Д., Аветисян А. Л. Информационно-коммуникационная система регулирования параметров мелиоративного состояния агроэкосистемы // Природообустройство. 2022. № 3. С. 13–18. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-13-18.
5. Воронкова О. Ю., Барышников Г. Я., Ельчищев Е. А. Особенности применения экологического блока критериальных ограничений в экономико-математическом моделировании развития органического сельскохозяйственного производства // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 1(159). С. 81–86.
6. Причины вторичного засоления орошаемых почв Нижнего Поволжья и его прогнозирование на основе математического моделирования влагопереноса / А. С. Овчинников, Н. А. Пронько, А. С. Фалькович, В. В. Бородычев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 2(50). С. 9–17.

7. Салугин А. Н., Петров В. И. Системная динамика в имитационном моделировании водного режима орошения // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 4. С. 141–146.
8. Кучер Д. Е., Харченко С. Г. Некоторые подходы к стратегии экологической безопасности // Экология и промышленность России. 2022. № 10. С. 66–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-66-71>.
9. Пичугин Е. А., Шенфельд Б. Е. Использование данных дистанционного зондирования Земли при экологической оценке объектов негативного воздействия на окружающую среду I и II категорий // Экология и промышленность России. 2022. № 10. С. 40–44. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-40-44>.
10. Кардаш В. А. Процессный анализ системной динамики // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 15, № 5. С. 807–818.
11. Шемякина Т. А. Математическое моделирование в обратных задачах экологии нейросетевым приближением и методом дополнительного аргумента // Нейрокомпьютеры и их применение: тез. докл. XVIII Всерос. науч. конф. М.: МГППУ, 2020. С. 269–270.
12. Rogachev A. F. Creating an artificial neural network for predicting the dynamics of retrospective yield series // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. 2060. 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012027.
13. Mishra P. Practical explainable AI using Python. Artificial intelligence model explanations using Python-based libraries, extensions, and frameworks. 1st ed. М.: ДМК Пресс, 2022. 298 с.
14. Bandurin M. A., Yurchenko I. F., Bandurina I. P. Computer technology to assess the capacity reserve of the irrigation facilities of the agro-industrial complex // 2019 International Multi Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. 8933970. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933970.
15. Dubenok N. N., Mayer A. V. Management of the technological process of irrigation of garden plants // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 786. Mathematical Modeling of Technical and Economic Systems in Agriculture III-2020. 2021. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012029.
16. Дубенок Н. Н., Майер А. В. Управление технологией орошения многолетних насаждений при дождевании // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 3(63). С. 311–318. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-32.
17. Обоснование эффективности планирования технологических процессов водопользования и оперативное управление водораспределением на базе использования метода Монте-Карло / В. И. Ольгаренко, И. Ф. Юрченко, И. В. Ольгаренко, Г. Г. Костюнин, М. С. Эфендиев, В. Иг. Ольгаренко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2018. № 1(29). С. 49–65. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=913> (дата обращения: 01.05.2023).
18. Нейросетевая классификация состояния посевов сельскохозяйственных культур по цветным изображениям высокого разрешения: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2020611604 / А. Ф. Рогачев, Е. В. Мелихова, Т. А. Рыжова, И. С. Белоусов. Зарег. 05.02.2020.
19. Ben-Shahar O. Data pollution // Journal of Legal Analysis. 2019. Vol. 11. P. 104–159. DOI: 10.1093/jla/laz005.

References

1. Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., Chelakhov V.Ts., Shalashova O.Yu., 2019. *Sistema meliorativnykh meropriyatiy po regulirovaniyu pochvennykh*

protsessov, sposobstvuyushchikh povysheniyu plodorodiya razlichnykh tipov pochv i uluchsheniyu ekologicheskogo sostoyaniya oroshaemykh zemel': monografiya [The System of Reclamation Measures to Regulate Soil Processes Contributing to Increasing the Fertility of Various Types of Soils and Improving the Ecological State of Irrigated Lands: monograph]. Novocherkassk, 77 p. (In Russian).

2. Kruzhilin I.P., Ganiev M.A., Rodin K.A., Kuznetsova N.V., 2019. *Menee vodozatravnaya i ekologicheski predpochtitel'naya tekhnologiya orosheniya risa periodicheskimi polivami* [Less water-consuming and environmentally preferable technology for irrigation of rice with periodic irrigation]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], no. 2(54), pp. 49-55, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-4. (In Russian).

3. Kireycheva L.V., Yurchenko I.F., 2015. *Rol' melioratsii zemel' v reshenii problemy prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossii* [The role of land reclamation in solving the food security problem of Russia]. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of Russian Agricultural Science], no. 2, pp. 13-15. (In Russian).

4. Kireycheva L.V., Timoshkin A.D., Avetisyan A.L., 2022. *Informatsionno-kommunikatsionnaya sistema regulirovaniya parametrov meliorativnogo sostoyaniya agroekosistemy* [Information and communication system for regulating the parameters of the reclamation state of the agroecosystem]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 13-18, DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-13-18. (In Russian).

5. Voronkova O.Yu., Baryshnikov G.Ya., Elchishchev E.A., 2018. *Osobennosti primeneniya ekologicheskogo bloka kriterial'nykh ogranicheniy v ekonomiko-matematicheskom modelirovanii razvitiya organicheskogo sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [The features of the application of the environmental block of criterial limits in economic and mathematical modeling of the development of organic agricultural production]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], no. 1(159), pp. 81-86. (In Russian).

6. Ovchinnikov A.S., Pronko N.A., Falkovich A.S., Borodychev V.V., 2018. *Prichiny vtorichnogo zasoleniya oroshaemykh pochv Nizhnego Povolzh'ya i ego prognozirovaniye na osnove matematicheskogo modelirovaniya vlagoperenosa* [Causes of secondary salinization of irrigated soils of the Lower Volga region and its forecasting based on mathematical modeling of moisture transport]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], no. 2(50), pp. 9-17. (In Russian).

7. Salugin A.N., Petrov V.I., 2017. *Sistemnaya dinamika v imitatsionnom modelirovanii vodnogo rezhima orosheniya* [System dynamics in simulation modeling of irrigation water regime]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], no. 4, pp. 141-146. (In Russian).

8. Kucher D.E., Kharchenko S.G., 2022. *Nekotorye podkhody k strategii ekologicheskoy bezopasnosti* [Some of environmental safety strategy approaches]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], no. 10, pp. 66-71, <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-66-71>. (In Russian).

9. Pichugin E.A., Shenfeld B.E., 2022. *Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli pri ekologicheskoy otsenke ob'ektov negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu I i II kategoriy* [The use of Earth Remote Sensing Data in the environmental assessment of objects that have a negative impact on the environment, impact categories I and II]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], no. 10, pp. 40-44, <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-40-44>. (In Russian).

10. Kardash V.A., 2008. *Protsessnyy analiz sistemnoy dinamiki* [Process analysis of system dynamics]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], vol. 15, no. 5, pp. 807-818. (In Russian).
 11. Shemyakina T.A., 2020. *Matematicheskoe modelirovanie v obratnykh zadachakh ekologii neyrosetevym priblizheniem i metodom dopolnitel'nogo argumenta* [Mathematical modeling in inverse problems of ecology by neural network approximation and the method of additional argument]. *Neyrokomp'yutery i ikh primeneniye: tezisy dokl. XVIII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Neurocomputers and Their Application: Abstracts of Reports of the XVIII All-Russian Scientific Conference]. Moscow, MGPPU, pp. 269-270. (In Russian).
 12. Rogachev A.F., 2021. Creating an artificial neural network for predicting the dynamics of retrospective yield series. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2060, 012027, DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012027.
 13. Mishra P., 2022. Practical Explainable AI Using Python. Artificial Intelligence Model Explanations Using Python-Based Libraries, Extensions, and Frameworks. 1st ed., Moscow, DMK Press Publ., 298 p.
 14. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., Bandurina I.P., 2019. Computer technology to assess the capacity reserve of the irrigation facilities of the agro-industrial complex. 2019 International Multi Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon Vladivostok. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 8933970, DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933970.
 15. Dubenok N.N., Mayer A.V., 2021. Management of the technological process of irrigation of garden plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 786. *Mathematical Modeling of Technical and Economic Systems in Agriculture III-2020*. 012029, DOI: 10.1088/1755-1315/786/1/012029.
 16. Dubenok N.N., Mayer A.V., 2021. *Upravlenie tekhnologiyey orosheniya mnogoletnikh nasazhdeniy pri dozhdevanii* [Control of irrigation technology for permanent plants with sprinkling]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], no. 3(63), pp. 311-318, DOI: 10.32786/2071-9485-2021-03-32. (In Russian).
 17. Olgarenko V.I., Yurchenko I.F., Olgarenko I.V., Kostyunin G.G., Efendiev M.S., Olgarenko V.Ig., 2018. [Planning effectiveness substantiation of technological processes of water use and operating control of water distribution using the Monte Carlo method]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 1(29), pp. 49-65, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=913> [accessed 01.05.2023]. (In Russian).
 18. Rogachev A.F., Melikhova E.V., Ryzhova T.A., Belousov I.S., 2020. *Neyrosetevaya klassifikatsiya sostoyaniya posevov sel'skokhozyaystvennykh kul'tur po tsvetnym izobrazheniyam vysokogo razresheniya* [Neural network classification of the state of agricultural crops sowing on high-resolution color images]. Certificate of State Software Registration for Computer, no. 2020611604. (In Russian).
 19. Ben-Shahar O., 2019. Data pollution. *Journal of Legal Analysis*, vol. 11, pp. 104-159, DOI: 10.1093/jla/laz005.
-

Информация об авторах

Д. А. Рогачев – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук;

И. Ф. Юрченко – главный научный сотрудник, доктор технических наук, доцент;

А. Ф. Рогачев – профессор кафедры математического моделирования и информатики, доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

D. A. Rogachev – Leading Researcher, Candidate of Technical Sciences;

I. F. Yurchenko – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

A. F. Rogachev – Professor of the Department of Mathematical Modeling and Computer Science, Doctor of Technical Sciences, Professor.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата,
самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical
violations in scientific publications.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 22.05.2023; одобрена после рецензирования 02.08.2023;
принята к публикации 10.08.2023.*

*The article was submitted 22.05.2023; approved after reviewing 02.08.2023; accepted for
publication 10.08.2023.*