ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-41

THEORY AND TECHNOLOGIES OF IRRIGATION CONTROL FOR CROPS BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES DECISION SUPPORT AND MATHEMATICAL MODELING

K.E. Tokarev¹, N.I. Lebed², V.A. Kuzmin¹, A.N. Chernyavsky¹

¹ Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

² Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation
of the Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

Received 21.05.2020

Submitted 15.08.2020

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 19-116-50009

Abstract

According to «Strategy for scientific and technological development of the Russian Federation» and within the framework of the «Digital agriculture» program, in the coming years, one of the priority areas of development is the transition to highly productive agro-aquatic farming. The main direction of scientific and technical development in agriculture is the management of the process of reclamation and crop formation on irrigated lands based on the development and implementation of information technologies for decision support, mathematical and simulation models that reflect the real processes of crop cultivation. The theoretical and methodological basis of the research is the works of domestic and foreign scientists in the field of technical operation of hydro-reclamation systems, information technologies, including decision support systems, fundamental principles of system analysis, mathematical programming and modeling, optimization theory. The relevance of the review of the theory and computerized irrigation management technologies with the use of mathematical models and decision-making technologies at the present stage of development of reclamation science is due to the need to create a new generation of reclamation systems that use modern scientific and technological progress, which will allow to practically implement the ideas of highly efficient and environmentally friendly agriculture on irrigated lands. The purpose of the research is to review the scientific foundations and technologies of crop irrigation management based on information technologies for decision support and mathematical modeling. The scientific significance of the research consists in the analysis of the current state of mathematical modeling of irrigation processes of agricultural crops in order to improve resource-saving technologies of cultivation, as well as the possibilities of developing and implementing computerized technologies for managing crop formation and decision-making procedures for cultivation, taking into account the technological capabilities of reclamation systems. It is assumed that the review and analysis of the current state of mathematical modeling of agricultural irrigation processes and computer technologies for their implementation will help to identify the problem and formulate a concept, obtain a generalized scheme for further research, give a qualitative and quantitative assessment of the level of resource conservation, as well as ensure stable high yields in various soil and climatic conditions of the regions of the Russian Federation.

Key words: crop irrigation, information technology, mathematical modeling, decision making, precision farming, optimization, resource conservation.

Citation. Tokarev K.E., Lebed N.I., Kuzmin V.A., Chernyavsky A.N. Theory and technologies of irrigation control for crops based on information technologies decision support and mathematical modeling. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 4(60). 433-448 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-41.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.67:004.9

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРОШЕНИЕМ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

К. Е. Токарев¹, кандидат экономических наук, доцент

Н. И. Лебедь², доктор технических наук

В. А. Кузьмин¹, кандидат экономических наук

А. Н. Чернявский¹, ассистент

¹ФГБОУ ВО Волгоградский государственный аграрный университет, г. Волгоград

²ФНЦ агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 21.05.2020

Дата принятия 15.08.2020

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта
№ 19-116-50009***

Аннотация. Согласно «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» и в рамках реализации программы «Цифровое сельское хозяйство» в ближайшие годы одним из приоритетных направлений развития является переход к высокопродуктивному агро-аквахозяйству. Ключевым вектором развития научно-технологического прогресса в агро-промышленном комплексе является совершенствование управления орошаемым земледелием, повышение урожайности на мелиорируемых землях и ресурсосбережения на основе разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений, цифровых информационных технологий и математических моделей сельскохозяйственного воспроизводства. Теоретико-методологической базой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых в области информационных технологий поддержки принятия решений, математического моделирования и программирования, оптимизации технических параметров эксплуатации мелиоративных систем. Актуальность обзора теории и технологий управления орошением сельскохозяйственных культур с применением математических моделей и интеллектуальных технологий на этапе цифровизации с.-х. производства обусловлена необходимостью создания мелиоративных систем нового поколения, использующих современные достижения научно-технического прогресса, что позволит практически реализовать идеи высокоэффективного и экологически чистого земледелия на орошаемых землях. Целью настоящего исследования является обзор научных основ и технологий управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования. Научная значимость исследования состоит в анализе современного состояния математического моделирования процессов орошения с.-х. культур с целью совершенствования ресурсосберегающих технологий возделывания, а также возможностей практической реализации компьютерных технологий и процедур принятия решений по управлению формированием урожая и выращиванию, с учетом технологических возможностей мелиоративных систем. Предполагается, что обзор и анализ современного состояния математического моделирования процессов орошения сельскохозяйственных культур и компьютерных технологий их реализации позволят выявить проблему и сформулировать концепцию, получить обобщенную схему для последующих исследований, дать качественную и количественную оценку уровня ресурсосбережения, а также обеспечить стабильное получение высоких урожаев в различных почвенно-климатических условиях регионов Российской Федерации.

Ключевые слова: орошение сельскохозяйственных культур, информационные технологии, точное земледелие, управление орошением.

Цитирование. Токарев К. Е., Лебедь Н. И., Кузьмин В. А., Чернявский А. Н. Теория и техноло-

гии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования. *Известия НВ АУК*. 2020. 4(60). 433-448. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-41.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Агропромышленный комплекс России в значительной степени подвержен как природным, так и хозяйственно-экономическим рискам. Большим бедствием для юго-востока европейской части России являются засухи и дефицит водных ресурсов, а для северо-западных территорий – недостаток тепловых ресурсов и избыточное увлажнение. Для Северо-Кавказского региона, Среднего и Нижнего Поволжья, Южного и Среднего Урала частота проявления засух составляет 30-42 % случаев. На продуктивность сельскохозяйственных угодий также существенное влияние оказывают переувлажнение и заболачивание территории (12,3 %), водная и ветровая эрозия (26,2 %), засоление и осолонцевание почв (20,1 % площади), дегумификация почв (37 %) и прочие негативные факторы. Все это снижает устойчивость сельскохозяйственного производства и приводит к потерям продукции, оценивающимся, по данным Минсельхоза Российской Федерации, от 3,7 до 41,8 млрд руб. в год в зависимости от сложившихся климатических условий. Стабилизирующим фактором сельскохозяйственного производства становится комплексная мелиорация земель сельскохозяйственного назначения, позволяющая не только повысить продуктивность земель до природно-ресурсного потенциала агроландшафта, но и обеспечить снижение ущерба в неблагоприятные для сельского хозяйства годы. Ключевым фактором обеспечения продовольственной безопасности и стабильности сельскохозяйственного производства во всем мире являются орошаемые земли. Проблему обеспечения высокопродуктивности производства сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации, где более 75 % всех сельскохозяйственных угодий расположены в зонах недостаточного или неустойчивого естественного увлажнения, возможно благодаря орошению земель сельскохозяйственного назначения. Одним из базовых активов повышения эффективности управления орошением является повышение эффективности оперативного планирования поливов путем оптимизации технико-эксплуатационных параметров дождевальных машин и режимов орошения с.-х. культур с учетом почвенно-климатических факторов [16, 17, 38].

В рамках магистрального направления развития отечественного мелиоративного комплекса разрабатывается программа развития мелиорации с 2021 по 2030 гг., в основу которой положено решение следующих основных задач [31, 38]:

- восстановление существующего мелиоративного комплекса (мелиорируемых земель, мелиоративных систем и гидротехнических сооружений), включая техническое перевооружение функционирующих в настоящее время мелиоративных систем, реконструкцию морально устаревших и физически изношенных мелиоративных систем, консервацию и (или) ликвидацию систем и сооружений, непригодных к эффективному использованию;

- дальнейшее развитие мелиоративного комплекса за счет приоритетного строительства мелиоративных систем нового поколения с использованием наукоемких инновационных технологий, обеспечивающих минимизацию удельных расходов воды и энергии на единицу продукции;

- обеспечение безопасности функционирования гидротехнических сооружений, предотвращение возможности возникновения чрезвычайных ситуаций в зоне влияния крупных гидротехнических сооружений;

- ввод в сельскохозяйственный оборот выбывших мелиорированных земель путем проведения агротехнических, культуртехнических, химических, агролесомелиоративных и фитомелиоративных мероприятий для повышения плодородия почв и устойчивости агроландшафтов;

- повышение водообеспеченности территорий путем использования на орошение местного стока, подземных вод, животноводческих стоков и сточных вод с учетом их очистки, и последующей утилизации отходов, а также местное перераспределения речного стока;

- обеспечение экологической безопасности и сохранности природной среды на основе создания и реализации инновационных природоохранных технологий повышения плодородия земель сельскохозяйственного назначения;

- повышение в управлении мелиоративной деятельностью роли цифровых технологий, базирующихся на современных технологиях интеллектуального анализа данных и методах компьютерного моделирования, способствующих качеству и скорости принятия управленческих решений.

Результаты и обсуждение. Анализ теоретических подходов, технологий и научно-технических разработок в области применения информационных технологий и интеллектуальных систем управления водопользованием показывает, что отечественными учеными разработано немалое количество информационных технологий и реализующих их программных систем, а также моделей оперативного планирования орошения, качество управления в которых зависит от уровня технического оснащения, коммуникационных систем и вычислительных мощностей с учетом конкретных почвенно-климатических условий. В частности, исследователями научной школы ГНУ ВНИИ-ГиМ Россельхозакадемии Е. П. Галяминым, В. Г. Головатым, Ю. П. Добрачевым разработана система моделей оперативного планирования и управления распределением водных ресурсов с учетом их дефицита [8, 12]. Специалистами главного информационно-вычислительного центра Россельхозакадемии разработана система программированного выращивания урожаев, включающая модули расчета влажности почв и режимов орошения [45]. Проблемами управления орошением в региональной системе оперативного планирования поливов активно занимается ФГБНУ «РосНИИПМ», в частности, впервые проблема управления орошением осуществляется с помощью созданной автоматизированной системы управления оросительными системами, реализованной на основе динамической модели водного режима и урожайности сельскохозяйственных культур. Кроме того, А.С. Яновским, А.В. Колгановым и др. впервые реализованы программные системы, позволяющие осуществлять информационную и технологическую поддержку служб, осуществляющих эксплуатацию оросительных систем, а также управлять процессами водораспределения и водопользования [50].

В результате исследований В. Н. Щедрина, С. М. Васильева, А. А. Чураева разработан математический инструментарий, позволяющий на современном уровне оптимизировать состав различного технологического оборудования с учетом технико-экономических показателей для внедрения информационных технологий и создания унифицированных программных средств оптимизации управления прецизионным орошением, на базе которого реализован комплекс унифицированных программных средств оптимизации выбора технологического оборудования относительно заданных параметров оросительных систем, что позволит повысить экономическую эффектив-

ность и уровень ресурсосбережения [51, 52]. Во ВНИИ комплексной автоматизации мелиоративных систем активно проводились работы по оперативному управлению поливами, в том числе разработана программная система для обеспечения комплекса задач по оперативному планированию водопользования на оросительных системах и управлению технологическими процессами [22].

Система стохастических и детерминированных математических моделей, предложенная В. В. Шабановым [11, 49], позволила оценить влияние водного и радиационного режимов посевов, почвенных влагозапасов на развитие растений, а также выявить проектный режим орошения путем решения уравнения водного баланса. Разработанные подходы к решению проблем оперативного планирования мелиоративных режимов на крупных орошаемых участках с использованием вычислительных машин разработаны В. П. Остапчиком и В. А. Костроминым [15], успешно прошли производственную проверку в различных регионах. Математическая модель расчета эксплуатационных режимов орошения в условиях Центрально-Черноземной зоны, предложенная А. Ю. Черемисиновым, позволила учитывать влияние изменчивости климатических факторов на суммарное испарение. Кроме того, им разработана информационно-советующая система «климат – орошение», являющаяся инструментом снижения неопределенности при принятии решений, связанных с оценкой влияния изменения климата на потребность в орошении земель в различных агроклиматических условиях РФ [14, 48].

В работах Е. П. Галямина, П. М. Барановского, М. С. Филимонова [8, 9, 47] описана разработанная математическая модель процессов формирования урожайности в условиях орошаемого земледелия, базирующаяся на методах теории оптимального управления. Х. Г. Тоомингом [46] рассмотрены перспективы использования математического моделирования и численных методов для реализации экспериментов по прогнозированию эффективности изменения параметров растений, разработана карта распределения прогнозируемых урожаев за весь вегетационный период на территории Российской Федерации в условиях оптимального минерального питания и водного режима, а также обосновано применение информационных технологий и систем интеллектуальной поддержки принятия решений, реализующих эффективное оперативное управления режимами орошения при программном выращивании урожаев.

Существенный вклад в разработку теоретических основ оптимизации мелиоративного режима орошаемых и осушаемых сельскохозяйственных земель внесли результаты исследований А. И. Голованова и И. П. Айдарова [1, 2, 11], широко используемые при создании оросительных систем с учетом природно-климатических условий регионов Российской Федерации Л. Г. Балаевым, Ю. П. Добрачевым, А. И. Живновым обосновано применение информационных технологий и интеллектуальных систем оперативного управления режимами орошения, что позволило повысить эффективность использования мелиоративных мероприятий в рамках программного выращивания урожаев [13, 30].

В рамках системных исследований И. Б. Новика и Л. М. Рекса разработана методология моделирования вещественно-энергетических и экономических процессов для природно-территориальных комплексов, а также разработана структура системы автоматизированной системы проектирования мелиоративных и гидромелиоративных систем [39-41].

Согласно современным представлениям ведущих отечественных ученых и научных школ Л. В. Кирейчевой [20, 21, 31], В. М. Яшина [21, 28, 31, 63], Г. В. Ольгаренко [38], Угрюмовой А. А. [38], Бандурина М. А. [75], И. Ф. Юрченко [54, 75], А. Л. Бубер [6] и др., сфера мелиорации предполагает разработку мероприятий для сохранения и

повышения возобновляемого природно-ресурсного потенциала агроландшафта и охрану окружающей среды, а также формирование адекватного комплекса агромелиоративных мероприятий, обеспечивающих повышение продуктивности сельскохозяйственных угодий и сохранение природной среды. Комплексные мелиорации призваны формировать и поддерживать высокий уровень биопродуктивности, воспроизводства плодородия почв и экологической устойчивости в системах мелиорации.

В ходе междисциплинарных исследований научных школ В. В. Бородычева и А. С. Овчинникова ведущими учеными М. Н. Лытовым и В. С. Бочарниковым разработаны математические и компьютерные модели оптимизации водным режимом почвы, в частности, предложена оптимизационная модель управления водным режимом почвы в условиях орошения, что позволило оценить необходимость проведения очередного вегетационного полива, вероятную дату следующего полива, составить графики поливов и разработать план водопользования на кратко-, средне и долгосрочный периоды. В отличие от известных решений, предложенная авторами модель предусматривает возможность определения текущего состояния влажности почвы путем расчетов, а также с использованием информационно-управляющей системы, особенностью которой является использование разных методов определения эвапотранспирации при проведении прогнозных и ретроспективных расчетов [33, 34].

В последние годы наблюдается прогрессирующая деградация почвенного покрова и истощение ресурсно-ассимиляционного потенциала природы. Эта проблема связана с резким ухудшением материально-технического и ресурсного обеспечения сельскохозяйственного производства, необоснованного применения региональных систем адаптивно-ландшафтного земледелия и режимов эксплуатации мелиоративных систем.

Использование современных информационных технологий и высокотехнологичных компьютерных средств интеллектуального анализа данных природно-экологического состояния орошаемых земель открывает широкие перспективы в сфере регулирования технологий возделывания сельскохозяйственных культур, повышения эффективности земледелия на мелиорируемых землях и рационального использования водных ресурсов.

Научное обоснование применения интеллектуальных информационных систем на базе известных и разрабатываемых математических моделей управления орошением сельскохозяйственных культур повысит качество эксплуатации мелиоративных систем, предотвратит деградацию орошаемых земель, а также позволит эффективно и рационально использовать природные ресурсы. Решение проблем деградации мелиоративных агроландшафтов и обеспечения их стабильного эколого-мелиоративного состояния требует учета особенностей каждого орошаемого участка, что диктует необходимость применения автоматизированных информационных технологий контроля управления плодородием на орошаемых участках [35, 36, 68].

Информационное обеспечение математических моделей включает в себя геоинформационные системы, системы управления базами данных (СУБД) и интеллектуальные системы поддержки принятия решения (информационно-справочные, информационно-советующие и информационно-управляющие), среды имитационного моделирования и разнообразные служебные модели [18, 19, 29, 32, 77], позволяющие определить выбор вида и параметров технологических операций с учетом изменения логических и технико-экономических ограничений, а также определить необходимость разработки автоматизированных технологий управления возделыванием сельскохозяйственных культур в условиях орошения на основе искусственного интеллекта.

Отдельного внимания заслуживает применение автоматизированных ГИС-технологий, использующих данные спутникового мониторинга и дистанционного зондирования. Применение геоинформационных систем для мелиоративной области обусловлено территориальной рассредоточенностью объектов, возможностью построения цифровых моделей, учитывающих пространственно-распределенные факторы, расчета и измерения геометрических характеристик объектов сельскохозяйственного водоснабжения, а также анализа фактических и модельных расчетных данных с последующей визуализацией на карте, что позволит выполнить ситуационный анализ и мониторинг состояния орошаемых и осушенных земель. С. М. Васильевым проводились исследования проблем мониторинга сельхозугодий агропромышленного комплекса России с помощью спутникового сервиса «БЕГА-Science», позволяющего устанавливать границы и решать задачи исследования для каждого конкретного поля, выделять участки изменения свойств почвы для тех или иных сельскохозяйственных культур, а также следить за состоянием орошаемых земель, выявлять и контролировать развитие деградационных процессов и вырабатывать меры борьбы с ними [7]. М. Н. Лытовым разработана система мониторинга и управления орошением, предполагающая частичную или полную автоматизацию процесса выработки, принятия и реализации управляющих решений, с возможностью сбора, трансляции и обработки мониторинговых данных в автоматическом режиме [26, 27].

Исследования А. Ф. Рогачева и Е. В. Мелиховой посвящены проблемам применения беспилотных летательных аппаратов и искусственных нейронных сетей в сельскохозяйственном производстве. В рамках исследований ими разработаны и внедрены программные комплексы бинарной классификации состояния посевов сельскохозяйственных культур по цветным аэрофотографическим изображениям высокого разрешения, управления программируемым аграрным производством на основе многолетних ретроспективных данных урожайности сельскохозяйственных культур в засушливых условиях, получения, обработки результатов, а также последующего анализа совокупности изображений и расчета вегетационных индексов [43, 44, 76]. Применение специализированных ГИС для реализации технологий точного земледелия позволяет рассмотреть каждое сельскохозяйственное поле как неоднородный массив, разделяя его на условное количество однородных участков (единиц управления), на каждом из которых формируется свой мелиоративный режим, вносятся дифференцированная и строго нормированная доза удобрений с учетом заданных показателей качества и объема с.-х. продукции.

В научных работах В. В. Бородычева и М. Н. Лытова исследованы возможности управления мелиорацией с.-х. культур с использованием современных ГИС-технологий мониторинга работы оросительной техники в режиме реального времени, подразумевающие формирование специализированного перечня сегментов интерактивного взаимодействия, а также применения многофункциональных программных комплексов анализа данных и интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений. Кроме того, авторами осуществлены проектирование и реализация информационной системы мониторинга и оперативного управления орошением на основе технологий глобального спутникового позиционирования и препроцессингового определения области оптимальных управленческих решений, позволяющей имитировать присутствие оператора непосредственно у объекта управления и принимать решения, анализируя поведение объекта [3-5, 25].

Проблемам информационной поддержки принятия решений по управлению сельскохозяйственной мелиорацией и водохозяйственным комплексом посвящены тру-

ды И. Ф. Юрченко, в рамках которых:

- исследованы возможности использования интеллектуальных систем, методов технической кибернетики, автоматизации управления и математического моделирования для оптимизации управления технологическими процессами в орошаемом земледелии [56, 60];
- проанализированы классические и современные подходы к разработке, внедрению и адаптации информационно-управляющих систем в агропромышленном производстве [58];
- предложены приоритетные направления эволюции автоматизированных систем управления технологическими процессами в мелиорации [62];
- выделены важнейшие направления развития автоматизированных интеллектуальных систем управления процессами сельскохозяйственного производства на основе облачных технологий, обработки больших массивов данных, применение компьютерных систем нейросетевого моделирования и глубокого машинного обучения [57];
- разработаны инновационные направления развития дальнейших научных исследований в области автоматизации прецизионного управления агросистемами в рамках программы «Цифровое сельское хозяйство» [55, 61].

В настоящее время для реализации технологии точного земледелия используется множество специализированных геоинформационных систем, инструментальный аппарат которых позволяет хранить данные об агрофизических свойствах почв, рельефе, климатических условиях, содержании калия, азота, гумуса, фосфора. Системы поддержки принятия решений, реализующие математический и инструментальный аппарат, заложенный в них, используя данные геоинформационных систем способны генерировать операционную карту на выполнение каждого агротехнологического мероприятия. Задача бортового компьютера, установленного на сельскохозяйственной машине, заключается в анализе полученных от космических аппаратов GPS координат положения машины с данными карты состояния поля, что позволит команду на выполнение операции в определенной точке с учетом запланированной схемы работ [10, 37, 41]. Детальный анализ полученной информации позволяет установить корреляционную связь между содержанием азота в почве и дренируемым, выделить границы однородных участков и др.

Анализ достигнутого уровня автоматизации операций по регулированию мелиоративного режима с использованием информационных технологий и цифрового управления орошаемыми агросистемами выявил потребность в активном развитии теории и технологий применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений для управления агропроизводством на мелиорируемых землях в соответствии с лучшими мировыми достижениями. В свете возрастающей конкуренции на водопотребление с другими секторами развивающейся экономики и необратимости требований к экологизации и устойчивости агропроизводства приоритетными направлениями эволюции систем цифрового управления мелиоративным режимом агроэкосистем настоящего периода признаются технологии точного орошения, контроля процедур полива и автоматизации процессов орошения [53, 59, 80].

Зарубежные разработки в области контроля процедур полива, обеспечивающих реализацию рационального ирригационного процесса, контроль параметров почвы и метеорологических условий в онлайн-режиме, широко представлены компаниями JohnDeere, Acromag SM, LindsayCorp.'s и др. [64, 70, 71]. Передачу данных о влагообеспеченности агроценозов на смартфон успешно осуществляют датчики влажности компании CropX [66]. Оснащение дождевальных систем контроллерами от компании

Sprinkl позволяет экономить воду за счет дифференцированного подхода к орошению, обеспечивая мониторинг потребности в поливе для конкретных участков поля по данным почвенной влажности [69]. Обзор зарубежных разработок показывает, что сельхозтоваропроизводителям предлагаются многочисленные технологии информационной поддержки регулирования процедур полива, обеспечивающие передачу на мобильные устройства в режиме онлайн соответствующих рекомендаций, формирование которых реализовано на основе интеллектуального анализа и обработки данных геоинформационного мониторинга и дистанционного зондирования.

В целях развития круглогодичного производства овощных культур японская компания Spread занимается производством и внедрением вертикальных ферм с полностью роботизированным процессом выращивания растений. Стремительно приобретает популярность оснащение производств роботизированными механизмами, оснащенными системой датчиков контроля за полным циклом производства и состоянием растений, а также выполняющими весь цикл работ от посева до сбора урожая [23].

Проекты по переоснащению промышленных производств в тепличные плантации с тщательно контролируемой средой, с использованием облачного программного обеспечения, позволяющего в режиме реального времени осуществлять обработку показателей с датчиков, отслеживающих рост растений, адаптировать подкормку и освещение к потребностям каждого отдельного сорта, реализует известный производитель электроники Fujitsu [24].

Активным продвижением инновационных технологий ирригации, экономии водных ресурсов, особенно в регионах с недостаточным водообеспечением, занимаются ученые из различных стран. Водным департаментом США разработан проект водосохраняющих ферм Water Tech Farms, направленный на пропаганду ресурсосберегающих технологий и восстановление водных ресурсов. В частности, фермерам предоставлялась возможность использовать дождевальную технику с системой PMDI (Precision Mobile Drip Irrigation – точное мобильное капельное орошение). Использование трубок капельного орошения на поливных машинах кругового или фронтального типов позволило повысить эффективность использования водных ресурсов в системах PMDI до 95 % [73, 79].

Испытанием и анализом систем спринклерного типа с интеграцией технологий точного мобильного капельного орошения занимается компания T&O Farms. В ходе испытаний осуществляется контроль влажности почв, влагообмена и развития корневой системы в режиме реального времени. В ходе исследований отмечается, что использование оросительной техники с интеграцией PMDI-систем позволяет снизить расходы на орошение с почти на 30 % и повысить урожайность не менее чем на 20 %. Кроме того, применение технологии мобильного капельного орошения позволило уменьшить испарение воды на 27-35 %, что равносильно 75 мм осадков [67].

Широкое распространение в Индии получил инновационный подход к энерго- и водосбережению, заключающийся в использовании фотогальванических панелей для покрытия ирригационного канала, позволяющий ежегодно предотвращать испарение воды, а генерируемую энергию поставлять в близкорасположенные сельские поселения [65].

Интеллектуальные технологии точного орошения предполагают автоматизацию учета конфигурации полей, анализа потребностей в поливе различных участков, оптимизацию способов водоподачи, что способствует рационализации потребления воды и общему ресурсосбережению. Разработанная система точного мобильного орошения PMDI и технология полива с переменной скоростью [72] позволяют ликвидировать пробуксовку дождевальной машины, сокращение времени хода и непроизводительных затрат воды, а также решить проблему достижения равномерности полива с учетом

различий структуры и влажности почвы. Компанией Trimble для совершенствования полива углов и выступов поля разработана система автоматического включения/отключения дождевателей, что исключает непроизводительный расход воды и переполнив проблемных участков поля [78].

Разработки в области интеллектуального мониторинга состояния почвы, погодных условий, управление круговыми и фронтальными дождевальными машинами, водяными пушками, а также формирования статистических данных по расходу ресурсов систем полива представлены компаниями Tevatronik и FieldNET [74]. В состав автоматизированных информационных систем входит модуль управления орошением с реализованными технологическими операциями, позволяющими снизить эксплуатационные затраты за счет эффективного использования времени, оптимизации трудовых ресурсов, электроэнергии и повысить уровень ресурсосбережения.

Выводы. Проведенный обзор отечественных и зарубежных исследований в сфере поддержки принятия решений для управления орошением сельскохозяйственных культур с использованием информационных технологий и математического моделирования показал, что приоритетными тенденциями развития техник и интеллектуальных технологий сельскохозяйственной мелиорации для Российской Федерации в рамках «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» и программы «Цифровое сельское хозяйство», в том числе в сфере цифрового орошения, являются:

- обеспечение разработки инновационных информационно-управляющих систем управления мелиоративной ситуацией в режиме реального времени;
- программная реализация интеллектуальных систем поддержки принятия решений, реализующих информационную поддержку производства с.-х. продукции на орошаемых землях, биотической мелиорации, технологии точного земледелия;
- модернизация цифровых оболочек для использования облачных технологий, систем обработки больших массивов данных и машинного обучения;
- разработка программных комплексов, базирующихся на технологиях нейросетевого моделирования и глубокого машинного обучения;
- использование универсальных мобильных телекоммуникационных средств для решения вспомогательных задач сельскохозяйственного производства на основе интеллектуальных информационных систем и технологий имитационного моделирования;
- разработка программных комплексов имитации развития сельскохозяйственных растений с учетом почвенно-климатических и агробиологических условий, оснащенных эргономичным Web-интерфейсом;
- применение результатов дистанционного зондирования и спутникового мониторинга с использованием мультиспектральных камер для оперативного контроля состояния агроценозов на основе вегетационных индексов NDVI;
- совершенствование методов повышения продуктивности земель с.-х. назначения с учетом почвенно-климатических, агроэкологических факторов в условиях мелиорации, базирующихся на оперативных результатах спутникового мониторинга территорий и данных дистанционного зондирования;
- использование данных дистанционного зондирования, полученных с использованием беспилотных летательных аппаратов, для мониторинга мелиоративного состояния агроценозов в режиме онлайн;
- разработка интеллектуальных моделей и методов обработки информации, учитывающих специфику сохранения земель, ресурсосбережения и повышение воспроизводства с.-х. культур в условиях оптимизации режимов орошения.

Библиографический список / References

1. Ol'garenko G.V., Ugrjumova A.A., Bulgakov V.I. i dr. // Razvitie oroshaemogo zemledelija po regionam Rossii: tendencii i perspektivy. inform. Izdanie. M.: FGBNU «Rosinformagroteh». 2019. 250 s.
2. Kirejcheva L.V. Kompleksnaja melioracija agrolandshaftov // Melioracija i vodnoe hozjajstvo. 1999. № 5. S. 24–27.
3. Itogi realizacii (2014-2017 gody) federal'noj celevoj programmy «Razvitie melioracii zemel' sel'skohozjajstvennogo naznachenija Rossii na 2014-2020 gody»: inform. Izdanie. M.: FGBNU «Rosinformagroteh». 2018. 108 s.
4. Kirejcheva L.V., Jurchenko I.F., Jashin V.M. i dr. Nauchnye osnovy sozdaniya i upravlenija meliorativnymi sistemami v Rossii // M.: Vseros. nauch.-issled. in-t gidrotehniki i melioracii im. A. N. Kostjakova. 2017. 296 s.
5. Ol'garenko G.V., Ugrjumova A.A., Bulgakov V.I. i dr. Razvitie oroshaemogo zemledelija po regionam Rossii: tendencii i perspektivy // Inform. IZDANIE. M.: FGBNU «Rosinformagroteh». 2019. 250 s.
6. Galjamin E.P. Optimizacija operativnogo raspredelenija vodnyh resursov v oroshenii. L.: Gidrometeoizdat. 1981. S. 272.
7. Golovatyj V.G., Dobrachsv Ju.P., Jurchenko I.F. Modeli upravlenija produktivnost'ju melioriruemyh agrocenozov. M.: RASHN, VNIIGiM. 2001. 166 s.
8. Sistema programmirovannogo vyrashhivaniya urozhaev: rekl. prosp. - Kalinin: GIVC VRO VASHNIL, 1987. S. 4.
9. Shhedrin, V.N., Balakaj G.T. Sostojanie i perspektivy razvitija melioracii zemel' na juge Rossii // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2014. № 3 (15). S. 1-15.
10. Shhedrin V. N., Vasil'ev S.M., Churaev A.A. Kompleksnyj podhod k ocenke pokolenij orositel'nyh sistem na osnove sredstv imitacionnogo modelirovaniya slozhnyh sistem // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa. 2013. № 4(32). S. 189–193.
11. Shhedrin V.N., Vasil'ev S.M., Churaev A.A. Optimizacija sostava pribornogo obespechenija kontrolja agrometeoroparametrov kak jetap razrabotki tehnologii precizionnogo oroshenija // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2016. № 3 (23). S. 1-18.
12. Kompleksnaja avtomatizacija meliorativnyh sistem: (Sb. nauch. st.) / VNII kompleks. avtomatizacii melior. sistem. Frunze :VNIKA melioracija, 1985. 123 s.
13. Shabanov V.V., Sharsheev Je.S. Ispol'zovanie matric perehodnyh verojatnostej pri podgotovke ishodnyh dannyh dlja modelirovaniya rezhima oroshenija (na primere predgornoj zony ozera Issyk-kul') // Prirodoobustrojstvo. 2009. № 5. S. 24-31.
14. Golovanov A.I., Shabanov V.V. Sistema matematicheskikh modelej raschetnogo monitoringa melioriruemyh zemel' // Melioracija i vodnoe hozjajstvo. 2004. № 4. S. 46-48.
15. Ostapchik V.P., Kostromin V. A., Koval' A.M. i dr. Informacionno-sovetujushhaja sistema upravlenija orosheniem. // Kiev: Izd-vo «Urozhaj», 1989.
16. Cheremisinov A.A., Radcevic G.A., Cheremisinov A.Ju., Tolstyh A.A. Informacionnaja sistema ocenki vlijaniya klimata na estestvennuju teplo- i vlogoobespechennost' s cel'ju opredelenija potrebnosti v oroshenii sel'skohozjajstvennyh zemel' evropejskoj chasti Rossijskoj Federacii // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta . 2018. № 4 (59). S. 59-70.
17. Cheremisinov A.A., Cheremisinov A.Ju., Radcevic G.A., Cheremisinov A.A. Informacionno - sovetujushhaja sistema "Klimat - oroshenija" kak instrument snizhenie neopredelennosti pri prinjatii reshenij // Kadastrovoe i jekologo-landshaftnoe obespechenie zemleustrojstva v sovremennyh uslovijah. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii fakul'teta zemleustrojstva i kadastrov VGau. 2018. S. 264-267.
18. Filimonov M.S., Syhinina M.K. Opredelenie srokov poliva raschetnym metodom sispolzovaniem zonal'nyh bioklimaticheskikh koeficientov // Rezhimy oroshenija sel'skohozjajstvennyh kul'tur v Nizhnem Povolzh'e. Volgograd. 1981. S. 12-20.
19. Galjamin, E.P. Optimizacija operativnogo raspredelenija vodnyh resursov oroshenii // L.: Gidrometeoizdat. 1981. 272 s.
20. Galjamin, E.P., Sokolov, A.L. Ispol'zovanie raschetnyh metodov dlja ocenki rezhimov oroshenija sel'skohozjajstvennyh kul'tur v uslovijah deficita vodnyh resursov // Voprosy sovershenstvovaniya meliorativnyh sistem. 1985. S. 33-42.
21. Tooming H. G. Jekologicheskie principy maksimal'noj produktivnosti posevov // L.:

Gidrometeoizdat. 1984. 264 s.

22. Ajdarov I.P. Perspektivy razvitija kompleksnyh melioracij v Rossii // (monografija). - M.: Izd. MGUP. 2014.

23. Ajdarov I.P., Golovanov A.I., Nikol'skij Ju.N. Optimizacija meliorativnyh rezhimov oroshaemyh i osushaemyh sel'skohozjajstvennyh zemel' // M.: Agropromizdat, 1990. 69 s.

24. Dobrachev Ju.P., Sokolov A.L. Modeli rosta i razvitija rastenij i zadacha povyshenija urozhajnosti // Prirodoobustrojstvo. 2016. № 3. S. 90-96.

25. Dobrachev Ju.P., Buber A.L., Kirejcheva L.V. i dr. Metodologija obosnovanija obespechenija vodnymi resursami ob'ektov gidromelioracii pri razrabotke SKIOVO // V sborn.: Kompleksnye melioracii - sredstvo povyshenija produktivnosti sel'skohozjajstvennyh zemel'. FGBNU VNIIGiM im. A.N.Kostjakova. 2014. S. 54-66.

26. Reks L.M., Jakirevich A.M. Raschet processov perenosa vlagi, tepla i solej v nenasyshhennoj i nasyshtennoj zonah pochvogrunt [Elektronnyj resurs]: Rezhim dostupa <http://rex.vniigim.ru/HTML/Rex5.htm> (Data 05.04.2020)

27. Reks, L.M. Metodologicheskie aspekty avtomatizirovannogo rabocheho mesta o dejatel'no-tehno-prirodnih sistemah / L.M. Reks, A.E. Bessonov, E.A. Kalmykova // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2007. - № 26. - S. 115-126.

28. Rezhimy kompleksnyh melioracij zemel' (rekommendacii) / pod red. Kizjaeva B.M. Moskva, 2000. 63 s.

29. Kirejcheva L.V., Jashin V.M. Formirovanie informacionnogo obespechenija pri sozdanii orositel'nyh sistem novogo pokolenija // Osnovnye rezul'taty nauchnyh issledovanij instituta za 2017 god. Sbornik nauchnyh trudov. Moskva, 2018. S. 201-207.

30. Kirejcheva L.V., Lentjaeva E.A., Jalalova G.H., Jashin V.M. Meliorativnye rezhimy na oroshaemyh zemljah i meroprijatija po ih regulirovaniju // Jekologija rechnyh bassejnov. Trudy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. S. 593-600.

31. Jurchenko I.F. Algoritmy upravljajushhijh vozdeystvij i struktura sistem precizionnogo regulirovanija meliorativnogo sostojanija agrojekosistem // Problemy razvitija sel'skohozjajstvennyh melioracij i vodohozjajstvennogo kompleksa na baze cifrovych tehnologij. Materialy mezhdunarodnoj jubilejnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. S. 327-336.

32. Jurchenko I. F., Bandurin M. A., Vanzha V. V., Volosukhin V. A., Bandurina I. P. Risk assessment to land reclamation in investment projects // Advances in social science, education and humanities research // Proceedings of the International Conference Communicative Strategies of Information Society (CSIS 2018). 2019. C. 216-221.

33. Kirejcheva L.V., Jurchenko I.F., Jashin V.M. i dr. Nauchnye osnovy sozdaniya i upravleniya meliorativnymi sistemami v Rossii // M.: FGBNU "Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrotehniki i melioracii im. A. N. Kostjakova". 2017. 296 s.

34. Ol'garenko G. V., Ugrjumova A. A., Bulgakov V. I. i dr. Razvitie oroshaemogo zemledelija po regionam Rossii: tendencii i perspektivy // Inform. izdanie. M.: FGBNU «Rosinformagroteh». 2019. 250 s.

35. Jurchenko I. F. 2017 Automatization of shhater distribution control for irrigation International // Journal of Advanced and Applied Sciences 4 (2) 72-77.

36. Kirejcheva L.V., Jashin V.M. Povysenie ustojchivosti sel'skohozjajstvennogo proizvodstva v volgogradskoj oblasti za schet bolee polnogo ispol'zovaniya prirodno-resursnogo potentsiala sel'skohozjajstvennyh // Nacional'naja bezopasnost' Rossii: aktual'nye aspekty. Sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. S. 236-243.

37. Jashin V. M. Vodnyj rezhim oroshaemyh soloncovyh kompleksnyh pochv i osobennosti ego regulirovanija // Nacional'naja bezopasnost' Rossii: aktual'nye aspekty. Sbornik izbrannyh statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. SPb. 2020. S. 63-69.

38. Buber A.L., Dobrachev Ju.P. Zadacha planirovanija i upravleniya vodnymi resursami v interesah vodopol'zovatelej APK // Melioracija i vodnoe hozjajstvo. 2019. № 5. S. 36-40.

39. Borodychev V.V., Lytov M.N., Ovchinnikov A.S., Bocharnikov B.C. Optimal'noe upravlenie

polivami na osnove sovremennyh vychislitel'nyh algoritmov // *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2015. №4(40) S. 21-28.

40. Ovchinnikov A.S., Bocharnikov V.S., Tronev S.V., Meshherjakov M.P., Bocharnikova O.V., Nesmijanov I.A., Vorob'eva N.S. Optimizacija osnovnyh parametrov trubchatyh orositel'nyh sistem // *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2018. № 2 (50). S. 303-309.

41. Pron'ko N.A., Korsak V.V. Upravlenie oroshaemym zemledeljem na osnove ispol'zovaniya informacionnyh tehnologij // *Nauchnaja zhizn'*. 2012. № 2. S. 80.

42. Abel Henrijaue, Santos Gomes, Lucia Helena Garofalo Chaves, Hugo Orlando Carvalho, Guerra Abel Henrijaue Drip Irrigated Sunflosheer Intercropping // *American Journal of Plant Sciences*. 2015. 1816-1821.

43. Pron'ko N.A., V.V. Korsak Informacionnye tehnologii v upravlenii plodorodiem oroshaemyh zemel' na lokal'nom urovne // *Melioracija i vodnoe hozjajstvo: problemy i puti reshenija Materialy mezhdunar. nauch.-pr. konf.* 2016. S. 308-312.

44. Tokarev K.E., Orlova Yu.A., Rogachev A.F., Chernyavsky A.N., Tokareva Yu.M. The intelligent analysis system and remote sensing images segmentation engineering by using methods of advanced machine learning and neural network modeling // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 12124.

45. Ol'garenko V.I., Jurchenko I.F., Ol'garenko I.V., Ol'garenko V.I. Primenenie metoda Monte-Karlo dlja modelirovaniya riskov planiruемого orosheniya // *Nauchnaja zhizn'*. 2017. № 2. S. 11-19.

46. Melihova E.V. Sozdanie sistemy podderzhki prinjatija reshenij pri vybore rezhima orosheniya sel'skohozjajstvennyh kul'tur // *Nauchnyj zhurnal «Melioracija» Respublika Belarus'*. 2019. №1(87). S. 28-22.

47. Kirejcheva L.V., Jurchenko I.F., Lentjaeva E.A. Komp'juternaja model' ocenki jeffektivnosti investicij v realizaciju meroprijatij federal'noj celevoj programmy «Razvitie melioracii zemel' sel'skohozjajstvennogo naznacheniya na period 2014-2020 gg.» // *Melioracija i vodnoe hozjajstvo*. 2015. № 4. S. 16-23.

48. Kirejcheva L.V., Jurchenko I.F., Jashin V.M. Modeli i informacionnye tehnologii upravleniya vodopol'zovaniem na meliorativnyh sistemah, obespechivajushhie blagoprijatnyj meliorativnyj rezhim // *Melioracija i vodnoe hozjajstvo*. 2014. № 5-6. S. 50-55

49. Vasil'ev S.M., L.A. Mitjaeva Ocenka processov degradacii oroshaemyh zemel' v ramkah kalibrovki servisov monitoringa sel'skohozjajstvennyh zemel' // *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii*. 2016. №4(24). S. 70-85.

50. Lytov M.N. Konceptual'nye podhody k upravleniju tehnologicheskim processom orosheniya po monitoringovym dannym // *Puti povysheniya jeffektivnosti oroshaемого zemledelija*. 2019. № 1 (73). S. 6-10.

51. Lytov M.N. K resheniju zadach upravleniya vodnym rezhimom pochvy na osnove geoinformacionnyh sistem real'nogo vremeni // В сборнике: Osnovnye rezul'taty nauchnyh issledovanij instituta za 2017 god. Sbornik nauchnyh trudov. Moskva, 2018. S. 222-227.

52. Rogachev A., Melikhova E. Creating a neural network system for forecasting and managing agricultural production using autocorrelation functions of time series // *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. C. 06005. DOI: 10.1051/e3sconf/202016406005*.

53. Rogachev A.F., Melihova E.V. Obosnovanie algoritmov i instrumentarija dlja nejrosetevogo prognozirovaniya urozhajnosti agrokul'tur s ispol'zovaniem retrospektivnyh dannyh // *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2020. № 1 (57). S. 290-302.

54. Rogachev A.F., Shubnov M.G. Ocenka prognoznogo urovnya urozhajnosti sel'skohozjajstvennyh kul'tur na osnove nejrosetevyh modelej dinamiki // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*. 2012. № 4. S. 226-231.

55. Borodychev V.V., Lytov M.N., Golovinov E.Je. Monitoring i upravlenie orosheniem v rezhime real'nogo vremeni // M.: Redakcija zhurnala «Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva». 2017. 154 s.
56. Borodychev V.V., Lytov M.N. Obobshhennaja model' avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy monitoringa i upravlenija orosheniem v rezhime real'nogo vremeni // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2017. №1 (45). S. 161-170.
57. Borodychev V.V., Lytov M.N. Sistema «Analiz – vizualizacija dannyh – prinjatие resh-enij» v sostave GIS upravlenija orosheniem // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2018. №2 (50). S. 161-170.
58. Kurbanov S.A., Borodychev V.V., Lytov M.N. Podhody k organizacii informacionno-tehnicheskikh kompleksov monitoringa i upravlenija orosheniem v rezhime real'nogo vremeni // Problemy razvitiya APK regiona. 2017. №3 (31). S. 131-136.
59. Jurchenko I.F. Perspektivy razvitiya avtomatizirovannyh sistem upravlenija agroproduktstvom na melioriruemym zemljah // Nauchnyj zhurnal Rossijskogo NII problem melioracii. 2019. № 4 (36). S. 164-177.]
60. Jurchenko I.F. Stanovlenie cifrovych platform meliorativnogo vodohozhajstvennogo kompleksa // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2020. № 1 (57). S. 380-395.
61. Jurchenko I.F. Razvitie innovacionnyh sistem upravlenija agroproduktstvom na meliorirovannyh zemljah // Biznes. Obrazovanie. Pravo. 2020. № 1 (50). S. 42-49.
62. Jurchenko I.F. Cifrovye sistemy regulirovaniya meliorativnogo rezhima agrojekosistem // International Agricultural Journal. 2020. T. 63. № 2. S. 21.
63. Jurchenko I.F. Prioritetnye napravlenija cifrovizacii tehnologicheskikh processov agroproduktstva na melioriruemym zemljah // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tehnologij Integral. 2020. № 2. S. 14.
64. Jurchenko I.F. Cifrovizacija meliorativnogo vodohozhajstvennogo kompleksa // Modern Science. 2020. № 5-4. S. 16-18.
65. Jurchenko I.F. Innovacionnaja infrastruktura cifrovizacii meliorativnogo vodohozhajstvennogo kompleksa // Original'nye issledovaniya. 2020. T. 10. № 3. S. 30-35.
66. N.V. Byshov, Byshov D.N., Bachurin A.N., Olejnik D.O., Jakunin Ju.V. Geoinformacionnye sistemy v sel'skom hozjajstve // Rjazan': FGBOU VPO RGATU, 2013. 169 s.
67. Rogachev A.F. Matematicheskoe obespechenie sistemy podderzhki prinjatija reshenij na osnove GIS-tehnologij // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2009. № 2. S. 144-151.
68. Pron'ko N.A., Fal'kovich A.S., Korsak V.V. Primenenie geoinformacionnyh tehnologij dlja prostranstvennogo modelirovaniya vodno-solevogo rezhima oroshaemyh zemel' suhostepnogo Povolzh'ja // Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2010. № 9. S. 13-16.
69. Bandurin M.A., Jurchenko I.F., Volosuhin V.A., Vanzha V.V., Volosuhin Ja.V. Jekologojekonomicheskaja jeffektivnost' diagnostiki tehnicheskogo sostojaniya vodoprovodjashhih sooruzhenij orositel'nyh sistem // Jekologija i promyshlennost' Rossii. 2018. T. 22. № 7. S. 66-71.
70. Jurchenko I.F. Razrabotka i sovershenstvovanie tehnologij avtomatizirovannogo upravlenija formirovaniem meliorativnogo rezhima agrojekosistem // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2017. № 2 (54). S. 354-363.
71. John Deere Field Connect.–[Electronic resource].–Access mode: <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/field-and-water-anagement>.
72. Lindsay Corporation. Plug & Play Add-Ons.– [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.growsmart.com>.
73. Acromag. SM-Autonomous Irrigation Control.– [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.acromag.com/content/sm-autonomous-irrigation-control>.
- 74 CropX -.[Electronic resource]. – Access mode: <https://www.cropx.com>
75. Heather Clancy Why smart irrigation startups are bubbling up.– [Electronic re-source]. –

Access mode: <https://www.greenbiz.com/article/why-smart-irrigation-startups-are-bubbling>.

76. Krasil'nikova, YU. Na vertikal'noj ferme v Yaponii budut rabotat' tol'ko roboty [Elektronnyj resurs] / YU. Krasil'nikova. – Rezhim dostupa: https://high-tech.fm/2016/01/29/vertical_farms, 2018.

77. Krupnejshie kompanii Yaponii osvayayut vertikal'nye teplicy [Elektronnyj resurs]. – 2017, 26 maya. – Rezhim dostupa: <https://fruitnews.ru/technology/255-teplit-sy/48221-krupnejshie-kompanii-yaponii-osvayayut-vertikalnye-teplitsy.html>, 2018.

78. Precision mobile drip irrigation [Electronic resource]. – Mode of access: https://tlirr.com/products/precision_mobile_drip_irrigation, 2018.

79. Water Technology Farms [Electronic resource]. – Mode of access: <http://kwo.ks.gov/projects/water-technology-farms>, 2018

80. Dragon-Line's patented technology [Electronic resource]. – Mode of access: <https://dragonline.net/high-line-applications>, 2018.

81. Canal Solar Power Project [Electronic resource]. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Canal_Solar_Power_Project, 2018.

82. Mobile Drip Irrigation. – [Electronic resource].- Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=3yT9iyjB-4>

83. Trimble Geomatics Office. User manual / Trimble Navigation limited. – U.S.A., 2019. – 144 p.

84. Recent Advances in Remote Sensing for Crop Growth Monitoring [Tekst] / Cheng, T.; Yang, Z.; Inoue, Y.; Zhu, Y.; Cao, W. Preface // Remote Sens. – 2016. – № 8. – P. 116.

Conclusions. The review of domestic and foreign research in the field of decision support for crop irrigation management using information technologies and mathematical modeling showed that the priority trends in the development of agricultural reclamation techniques and intelligent technologies for the Russian Federation within the framework of the "Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation" and the "Digital Agriculture" program, including in the field of digital irrigation, are:

- ensuring the development of innovative information and control systems for managing the reclamation situation in real time;
- software implementation of intelligent decision support systems that provide information support for agricultural production on irrigated land, biotic reclamation, and precision farming technologies;
- modernization of digital shells for the use of cloud technologies, large data processing systems and machine learning;
- development of software systems based on neural network modeling and deep machine learning technologies;
- using universal mobile telecommunications tools for solving auxiliary tasks of agricultural production based on intelligent information systems and simulation technologies;
- development of software systems for simulating the development of agricultural plants, taking into account soil-climatic and agrobiological conditions, equipped with an ergonomic Web interface,
- application the results of remote sensing and satellite monitoring using multispectral cameras for operational monitoring of the state of agroecosystems based on vegetation indices NDVI;
- improvement of methods for increasing the productivity of agricultural land, taking into account soil-climatic, agroecological factors in the conditions of land reclamation, based on the operational results of satellite monitoring of territories and remote sensing data;
- using the remote sensing data obtained with unmanned aerial vehicles for monitoring reclamation condition of agricultural lands online;
- development of intelligent models and methods of information processing that take into account the specifics of land conservation, resource conservation and increasing the re-

production of agricultural crops in the conditions of optimizing irrigation regimes.

Author information:

Tokarev Kirill Evgenievich, associate Professor of the Department of Mathematical modeling and computer science, Volgograd state UNIVERSITY (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), candidate of economic Sciences, tel. 8 (8442) 41-17-10, e-mail: tke.vgsha@mail.ru.

Lebed Nikita Igorevich, head of the laboratory of the Federal tax service of Agroecology of the Russian Academy of Sciences (Russia, 400062, Volgograd, Universitetskiy Ave., 97), doctor of technical Sciences, tel. 8 (8442) 46-25-68, e-mail: vnialmi@bk.ru.

Kuzmin Vsevolod Alexandrovich, teacher of the Department of Mathematical modeling and computer science, Volgograd state UNIVERSITY (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26), candidate of economic Sciences, tel. 8 (8442) 41-17-10, e-mail: pniiemt.kuzmin@yandex.ru.

Chernyavsky Alexey Nikolaevich, assistant of the Department of electrical Equipment and electrical management of agricultural enterprises, tel. 8 (8442) 41-11-27, e-mail: alexei.tcherniawskij@yandex.ru.

Информация об авторах

Токарев Кирилл Евгеньевич, доцент кафедры Математическое моделирование и информатика, ФГБОУ ВО Волгоградского ГАУ (РФ, 400002, г. Волгоград, пр-т Университетский, 26), кандидат экономических наук, тел. 8 (8442) 41-17-10, e-mail: tke.vgsha@mail.ru.

Лебедь Никита Игоревич, заведующий лабораторией ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), доктор технических наук, тел. 8 (8442) 46-25-68, e-mail: vnialmi@bk.ru.

Кузьмин Всеволод Александрович, преподаватель кафедры Математическое моделирование и информатика, ФГБОУ ВО Волгоградского ГАУ (РФ, 400002, г. Волгоград, пр-т Университетский, 26), кандидат экономических наук, тел. 8 (8442) 41-17-10, e-mail: pniiemt.kuzmin@yandex.ru.

Чернявский Алексей Николаевич, ассистент кафедры Электрооборудование и электрохозяйство предприятий АПК, ФГБОУ ВО Волгоградского ГАУ (РФ, 400002, г. Волгоград, пр-т Университетский, 26), тел. 8 (8442) 41-11-27, e-mail: alexei.tcherniawskij@yandex.ru.