



Научная статья

УДК 631

doi: 10.55186/25876740\_2024\_67\_2\_233

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОГРАНИЧЕННЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ МЕТОДАМИ ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Л.В. Кирейчева<sup>1</sup>, Д.А. Рогачев<sup>1</sup>, И.Ф. Юрченко<sup>1</sup>, А.Ф. Рогачев<sup>2</sup><sup>1</sup>Всероссийский научно — исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, Москва, Россия<sup>2</sup>Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

**Аннотация.** Цель настоящей работы — совершенствование системного водораспределения на орошение в условиях дисбаланса спроса и предложения поливной воды на основе многокритериальной оптимизации методом эволюционно-генетического программирования. Методика исследований включала информационно-аналитический подход, оптимизационное моделирование, методы искусственного интеллекта (генетические алгоритмы эволюционного программирования). Разработана и апробирована универсальная многокритериальная, нелинейная целевая функция оптимизации, включающая критерии эффективности эксплуатационной организации и хозяйств — водопользователей. К ним относятся: максимум площади орошаемых земель, дохода водохозяйственной организации и стоимости валового объема продукции растениеводства с орошаемых земель. Рассмотрены научно-методические направления использования генетических алгоритмов в задачах оптимизации системного распределения ограниченных водных ресурсов на орошении. Установлена возможность и эффективность применения генетического алгоритма для оптимизации многокритериальной целевой функции. Выбор решения по показателям многократных имитаций конкуренции и улучшений повышает масштабы сложно устроенного пространства поиска решений и, вследствие универсальности позволяет получить результат, когда традиционные методы не работают или их реализация требует неприемлемо много времени. Тестирование модели на данных Городищенской оросительной системы Волгоградской области, выявило прогнозируемое увеличение эффективности управленческого решения на 10% в сравнении с традиционно практикующимся подходом. Результат достигается за счет повышения качества планирования и управления водораспределением в условиях маловодья, чрезвычайной ситуации, иных форс-мажорных обстоятельств на основе информационной поддержки решений инновационными методами теории управления: многокритериальным моделированием с использованием генетического программирования, базирующегося на методах искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** межхозяйственная оросительная система, многокритериальная оптимизация водораспределения, экономико-математическое моделирование, искусственный интеллект, эволюционно-генетическое программирование

Original article

## OPTIMIZATION OF THE DISTRIBUTION OF LIMITED WATER RESOURCES BY METHODS OF EVOLUTIONARY GENETIC PROGRAMMING

L.V. Kireicheva<sup>1</sup>, D.A. Rogachev<sup>1</sup>, I.F. Yurchenko<sup>1</sup>, A.F. Rogachev<sup>2</sup><sup>1</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow, Russia<sup>2</sup>Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

**Abstract.** The purpose of this work is to improve the system of water distribution for irrigation in conditions of water scarcity on the basis of multi-criteria optimization by the method of evolutionary genetic programming. The methodological basis of the research was the information -analytical approach; optimization modeling; artificial intelligence methods (genetic algorithms of evolutionary programming). A universal multi-criteria, nonlinear optimization objective function has been developed and tested, including criteria for the effectiveness of the operational organization and water user farms. These include: the maximum area of irrigated land, the income of the water management organization and the gross volume (in monetary terms) of crop production from irrigated land. The scientific and methodological directions of the use of genetic algorithms in the optimization of the distribution of limited water resources on inter-farm irrigation systems are considered. The possibility and effectiveness of using a genetic algorithm to optimize a multi-criteria objective function is established. Choosing a solution based on the indicators of multiple imitations of competition and improvements increases the scale of a complex solution search space and, as a result, universality allows you to get results when traditional methods do not work or their implementation requires an unacceptably long time. Testing of the developed model, carried out on the data of the Gorodishchenskaya irrigation system of the Volgograd region, revealed a projected increase in the effectiveness of the management decision by 10% in comparison with the traditionally practiced approach. The result is achieved by improving the quality of planning and management of water distribution in conditions of water scarcity on the basis of information support of decisions by innovative methods of management theory: multi-criteria modeling using genetic programming based on artificial intelligence methods.

**Keywords:** inter-farm irrigation system, multi-criteria optimization of water distribution, economic and mathematical modeling, artificial intelligence, evolutionary genetic programming

**Введение.** Актуальность научных исследований по повышению эффективности водопользования обусловлена его сильнейшим влиянием на состояние ресурсного потенциала страны: водные ресурсы и почвенное плодородие, экологически устойчивые, высокопродуктивные агроэкосистемы.

Проблемы и задачи планирования, реализации, совершенствования и развития водопользования на орошении в разное время и с различным успехом издавна рассматривались в трудах многих советских и российских ученых, что, в целом, способствовало становлению

эффективного агропроизводства на мелиорированных землях в соответствии с возможностями конкретного периода его развития.

Сейчас планирование водоподдачи пользователям межхозяйственных оросительных систем (ОС) выполняется эксплуатационной водохозяйственной организацией на основе декадных заявок в границах общего лимита ресурсов производственно-финансового плана водохозяйственной организации.

При дефиците поливной воды приоритеты отдаются водопользователям, гарантирующим максимальное поступление денежных средств,

затем водораспределение осуществляется в соответствии с предпочтениями ЛПР (лица, принимающего решение), и только потом — всем остальным по остаточному принципу. Как следствие, оптимизация распределения водных ресурсов не выполняется, последствия принятого решения не рассматриваются, эффективность планируемых мероприятий не оценивается, а экологические ограничения игнорируются.

Все это способствует формированию проблемы нарушения базовых принципов, декларируемых плановым водопользованием — равноправности водопотребителей и непрерывности



водоподачи, усугубляющейся в периоды дефицита водообеспеченности орошения. Выполненные исследования выявили наряду с высоким потенциалом и актуальностью решения задач по повышению уровня научного обоснования принимаемых решений в сфере оптимизации системного водораспределения необходимость совершенствования, модернизации и трансформации методов и способов ее реализации.

Согласно мировому опыту и отечественной практике приоритетным направлением снижения риска планирования и оперативной реализации водоподачи на ОС в современных реалиях становится использование компьютерных систем управления технологическими процессами и производством. Они базируются на методологическом подходе, гарантирующем оптимизацию управленческих решений, принимаемых в конкретных условиях неполноты и неопределенности сведений и информации, требующих обработки больших массивов данных.

Эффективное решение проблемы системного водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов гарантирует методология оптимизационного экономико-математического моделирования, обеспечивающая достижение оптимальных (рациональных) экономических результатов агропроизводства на орошении. Состав и структура конкретной модели определяется характером решаемой задачи и выбором целевой функции.

Ввиду многокритериальности задачи планирования водораспределения, обусловленной необходимостью учета интересов всех его участников и/или нелинейности целевой функции, для решения оптимизационной задачи требуется использование специальных инновационных алгоритмов.

**Литературный обзор.** Аналитическими и прикладными проблемами автоматизации планирования водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов в последнее время занимались И. Бегимов, А. Бубер, С. Васильев, Ю. Добрачев, В. Духовный, Ю. Домашенко, Л. Кирейчева, С. Найденов, Г. Ольгаренко, И. Ольгаренко, И. Юрченко и другие исследователи [1-4].

Показано, что в задачах планирования водораспределения при заданном лимите водоподачи, в качестве целевой функции рекомендуются многочисленные критерии монофункциональной оптимизации, не отличающиеся общностью подхода к специфике объекта моделирования и решаемой задачи, таких как стохастичность, многокритериальность, большой объем данных и масштабность распределения по территории. Вместе с тем отсутствуют эффективные решения, способствующие практическому применению уже имеющихся предложений по ликвидации назревшей проблемы повышения эффективности водопользования на орошении.

Достаточно широко тематика оптимизации управления водными ресурсами освещается и в зарубежных публикациях [5-8]. Изучение и анализ материалов выявил актуальность решения таких задач, как:

- оптимизации водораспределения в условиях климатической неопределенности;
- принятия решений для выбора наилучших стратегий управления водными ресурсами;
- учет заинтересованности участников в планировании управленческих решений;
- предотвращение конфликтных ситуаций потенциально противоречивых плановых решений.

В настоящее время на смену традиционному поиску решений при многокритериальности и/или нелинейности целевой функции управления все чаще приходят активно развивающиеся алгоритмы эволюционно-генетического метода искусственного интеллекта [9,10].

Основы организации эволюционных вычислений исследовались в статьях А.И. Имамудинова, Т. Н. Кондратьева [11, 12]. Отдельные методические вопросы использования генетических алгоритмов (ГА) и специфики их программной реализации представлен в публикациях С. Родзина, А. Звезинцева, И. Квятковской [13].

Методологические вопросы программной реализации эволюционно-генетических алгоритмов, не требующих вычисления производных целевой функции (ЦФ), описаны в публикациях А. Иванова, Ф. Беляева, А. Волкова [14].

Природоподобные генетические алгоритмы обеспечивают решение большого ряда сложных задач в условиях, когда традиционные математические подходы недостаточно эффективны. Они позволяют оптимизировать расписания, упростить оптимизацию, не дифференцировать функции, выполнять реконструкцию изображений и многое другое. По аналогии с тем, как природные организмы эволюционируют посредством двух основных процессов — естественного отбора и размножения — ГА обеспечивает глобальный эволюционный поиск оптимального сочетания параметров совершенствуемой системы, что определяет универсальность его использования.

В то же время, возможности и эффективность реализации эволюционно-генетических алгоритмов для решения специфической многокритериальной задачи — оптимизации распределения воды с учетом ограничений требует дополнительных исследований.

Целью настоящей работы является совершенствование системного водораспределения на орошение в условиях превышения спроса поливной воды над предложением с использованием многокритериальной оптимизации методами эволюционно-генетического программирования.

**Методы и материалы.** Материалом исследований служили: данные научно — исследовательских работ, публикации о теории и практике формирования, внедрения и использования управленческих решений по оптимизации технологических процессов производства, включая оптимизацию системного водораспределения в мелиоративном секторе АПК, а также результаты собственных разработок авторов.

В качестве методического направления планирования системного водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов использовались: информационно — аналитический подход; теория оптимизационного моделирования; методы искусственного интеллекта (эволюционно-генетическое программирование, генетические алгоритмы).

Представленная в составе настоящих исследований многокритериальная экономико-математическая модель оптимизации планирования водораспределения обеспечивает поиск компромиссного решения по выполнению целевых установок участников процесса системного водопользования: водохозяйственной организации и хозяйства — водопользователей. Функция цели модели максимизирует площадь

орошения, объем производства сельскохозяйственной продукции на орошении и доход от реализации плана водораспределения.

Для поиска решения целевая функция приводится к безразмерному виду, для чего ее компоненты нормируются своей максимальной величиной, соответствующей параметрам водопользования, заявленным потребителями.

Оптимизация нелинейной целевой функции (ЦФ) осуществляется методом эволюционно-генетическим программированием, одним из важнейших направлений теории искусственного интеллекта. Генетические алгоритмы (ГА) позволяют исследовать гораздо большее разнообразие возможных решений проблемы по сравнению с методами линейного программирования за счет пересчета элементов формируемой совокупности ЦФ с использованием операторов отбора, скрещивания и мутации, что определяет пригодность анализируемых элементов [15]. Структурная схема классического генетического алгоритма приведена на рисунке 1 по данным [15].

В настоящей работе реализован генетический алгоритм оптимизации нелинейных многокритериальных целевых функций на базе библиотеки DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) [12]. Фреймворк DEAP (Распределенные эволюционные алгоритмы на Python) наряду с другими известными библиотеками, разработанными для реализации генетических алгоритмов на языке Python (GAFT, Pyevolve, PyGMO), удобен в использовании, обладает широким спектром функций, поддерживает расширяемость и снабжен подробной документацией (<http://deap.readthedocs.io/en/master>).

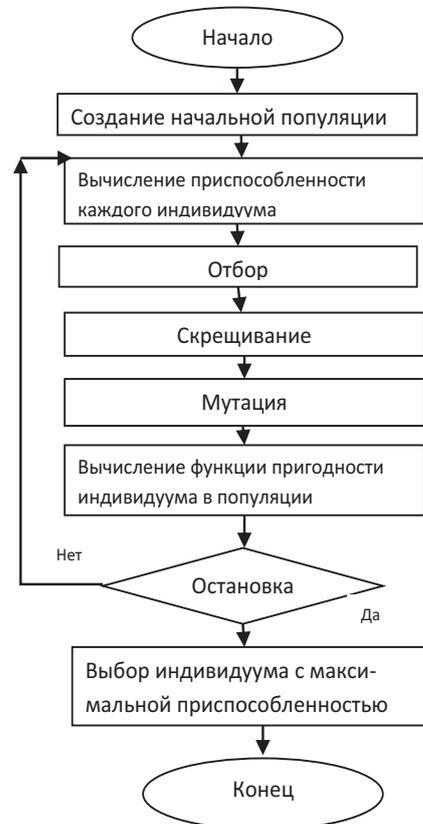


Рисунок 1. Структурная схема генетического алгоритма [15]  
Figure 1. Block diagram of the genetic algorithm [15]



**Результаты.** Оросительная вода является не только ресурсом, но и специфическим продуктом оросительных систем (ОС), гарантирующим устойчивость агропроизводства, организацию сельскохозяйственного водоснабжения, работу промышленных предприятий региона обслуживания. Значение воды в экономике ее потребителей очевидно и постоянно возрастает, что требует перманентного повышения эффективности деятельности мелиораторов.

По результатам выполненного анализа теории и практики моделирования процессов орошаемого агропроизводства установлено, что в качестве целевой функции в задачах планирования водораспределения при заданном лимите водоподдачи рекомендуется применять следующие критерии монофункциональной оптимизации [16]:

- максимум орошаемых площадей при заданном объеме поливной воды;
- наилучший финансовый результат водохозяйственной организации;
- минимум потерь урожая от недополива;
- максимальное соответствие прогнозируемой в условиях дефицита водных ресурсов продуктивности агроценозов заявленной;
- максимум прибыли сельхозтоваропроизводителей;
- минимум и/или равномерность недополива посевных площадей;
- минимум потерь воды;
- минимальные отклонения фактической водоподдачи и коэффициента использования оросительной воды от условно-нормативных значений;
- минимум затрат электроэнергии.

Представленная выше выборка критериев обуславливает сугубо дифференцированный подход к учету интересов участников водопользования. Преимущественно предлагаемые критерии ориентированы на обеспечение целей водопотребителей и, в гораздо меньшей степени, вплоть до их полного игнорирования на решение задач водохозяйственной организации. Формализованная постановка задачи оптимизации системного водораспределения с непосредственным учетом интересов эксплуатационной службы ОС в практике мелиоративного водохозяйственного комплекса отсутствует.

Для конструктивного решения проблемы повышения эффективности системного водораспределения выполнена постановка задачи его оптимизации на основе многокритериального моделирования, учитывающая интересы всех участников водопользования.

В качестве составляющей критерия оптимальности системного водораспределения, обеспечивающего эффективность функционирования водохозяйственной организации, принят его доход.

Учет интересов водопотребителей в представленных выше критериях оптимизации системного водораспределения, как правило, базируется на показателях эффективности использования орошаемых земель, которые в настоящее время не входят в состав оросительной системы. Сложившаяся ситуация, очевидно, обусловлена наследием «прошлого»: плановой экономикой и государственной собственностью на землю. В современных условиях частной собственности на землю результаты оптимизации водораспределения по указанным критериям приобретают только рекомендательный характер.

Вместе с тем ответственность за мелиоративное состояние земель, покомандных оросительной системе осталась за водохозяйственной организацией [17], а отчетность по эксплуатации оросительных систем включает данные об использовании орошаемых земель [18, 19].

Согласно [20] «мелиорация земель осуществляется в целях повышения продуктивности и устойчивости земледелия, обеспечения гарантированного производства сельскохозяйственной продукции на основе сохранения и повышения плодородия земель, а также создания необходимых условий для вовлечения в сельскохозяйственный оборот неиспользуемых и малопродуктивных земель и формирования рациональной структуры земельных угодий».

В соответствии с положениями «Правил эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений», утвержденных Минсельхозом России, водораспределение должно осуществляться с учетом рационального использования оросительной воды.

Таким образом, формируется причинно обоснованная направленность планирования системной водоподдачи, обеспечивающей повышение эффективности использования орошаемых земель. Последнее реализуется требованием максимизации, как площади полива для конкретных природно-хозяйственных условий функционирования оросительной системы, так и валового объема продукции растениеводства (в денежном исчислении) с орошаемых земель, что соответствует целям водопользователей.

При лимитированном (фиксированном) объеме водораспределения максимизируемая многокритериальная целевая функция  $Z_{max}$  имеет вид (1) с рассмотренными ниже организационно-технологическими ограничениями.

$$Z_{max} = f(F_{bx}, S(x_{ij}), F_{cx}) \Rightarrow \max \quad (1)$$

где  $F_{bx}$  и  $F_{cx}$  — финансовые показатели подачи оросительной воды и возделывания сельскохозяйственных культур, тыс. руб;  $x_{ij}$  — площадь орошения  $i$  культуры  $j$  водопользователя, га;  $j = 1, 2, \dots, m$  — индекс хозяйства водопользователя;  $S(x_{ij})$  — суммарная площадь орошения на системе, га.

Суммарный доход водохозяйственной организации от подачи оросительной воды, определяется по разности значений выручки и затрат (2).

$$F_{bx} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_j - r_j) W_{ij} \quad (2)$$

$$W_{ij} = M_{ij} x_{ij}; \quad \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq S_i; \quad \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n W_{ij} = W;$$

где  $c_j$  — удельная стоимость водоподдачи для  $j$ -водопользователя, руб./тыс. м<sup>3</sup>;  $r_j$  — удельные затраты на водоподдачу  $j$ -водопользователю, руб./тыс. м<sup>3</sup>;  $W_{ij}$  — объем водоподдачи на полив  $i$  культуры  $j$  водопользователю, тыс. м<sup>3</sup>;  $M_{ij}$  — оросительная норма  $i$ -ой культуры  $j$  водопользователя, тыс. м<sup>3</sup>/га;  $W$  — общий объем водоподдачи на ОС, тыс. м<sup>3</sup>;  $S_i$  — площадь орошения  $i$  культуры на системе. Остальные обозначения ясны из предыдущего текста.

Валовой объем производства продукции растениеводства в денежном исчислении  $F_{cx}$  со всей площади орошаемых земель определяется зависимостью (3):

$$F_{cx} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_i x_{ij} y_{ij}, \quad (3)$$

где  $z_i$  — закупочная цена  $i$  орошаемой культуры, руб./т;  $y_{ij}$  — урожайность  $i$  культуры  $j$ -водопользователя, т/га. Остальные обозначения приведены выше.

Итоговая целевая функция  $Z_{max}$  экономико-математической модели, максимизирующей финансовые результаты подачи воды, производства сельскохозяйственной продукции и суммарную площадь орошаемых земель с учетом их имеет вид (4) при ограничениях (5).

$$Z_{max} = (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (c_j - r_j) * w_{ij}) / D_z + (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_i x_{ij} y_{ij}) / B_z + (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij}) / S_z \Rightarrow \max \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \geq S_i; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n w_{ij} = W_j;$$

$$\sum_{i=1}^n M_{ij} x_{ij} = W_j;$$

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

где  $D_z$ ,  $B_z$ ,  $S_z$  — соответственно доход от водоподдачи эксплуатационной организацией ОС, стоимость валового объема производства продукции на орошении и площадь орошения при заявленной водоподдаче;  $W_j$ ,  $W_j$  — объем водоподдачи на полив  $i$  культуры всех водопользователей,  $j$  водопользователю для полива всех культур, тыс. м<sup>3</sup>. Остальные обозначения ясны из предыдущего текста.

Задачу многокритериальной оптимизации целевой функции (4) предлагается решать методом эволюционно — генетического программирования, инвариантным к виду целевой функции и не требующим вычисления ее частных производных.

С целью реализации модели планирования водораспределения и оценки влияния ее параметров на результат оптимизации, в работе выполнена адаптация программной надстройки «Поиск решения» программы MS Excel, разработанной Microsoft для оптимизации решений различными методами, включая генетический эволюционный алгоритм (рисунок 2).

Тестирование модели выполнялось на материалах службы эксплуатации Городищенской оросительной системы Волгоградской области. Фрагмент полученной оптимизированной матрицы эволюционной оптимизации водораспределения представлен на рисунке 3.

Оптимизация с использованием многокритериальной ЦФ повысила эффективность управленческого решения на 10% по сравнению с традиционным вариантом водораспределения, практикующим снижение водоподдачи потребителям пропорционально изменяющейся водообеспеченности оросительной системы (таблица 1).

В таблице 2 приводятся данные сравнительной оценки моно и много критериального подходов к оптимизации водораспределения. Они со всей очевидностью указывают на приоритетность последних.

Основной проблемой применения генетических алгоритмов является значительное время вычислений, обусловленное необходимостью многократного вычисления целевой функции при эвристически меняемых значениях параметров с использованием генетических операторов.

В составе исследований получена зависимость времени вычислений заданной модели от числа эпох обучения оптимизатора методом генетических вычислений. Квадратичная аппроксимация полученной зависимости времени вычислений от числа эпох обучения имеет вид

$$t = -0.0001n^2 + 0.0666n + 0.507 \quad (6)$$

где  $n$  — число эпох генетической оптимизации.



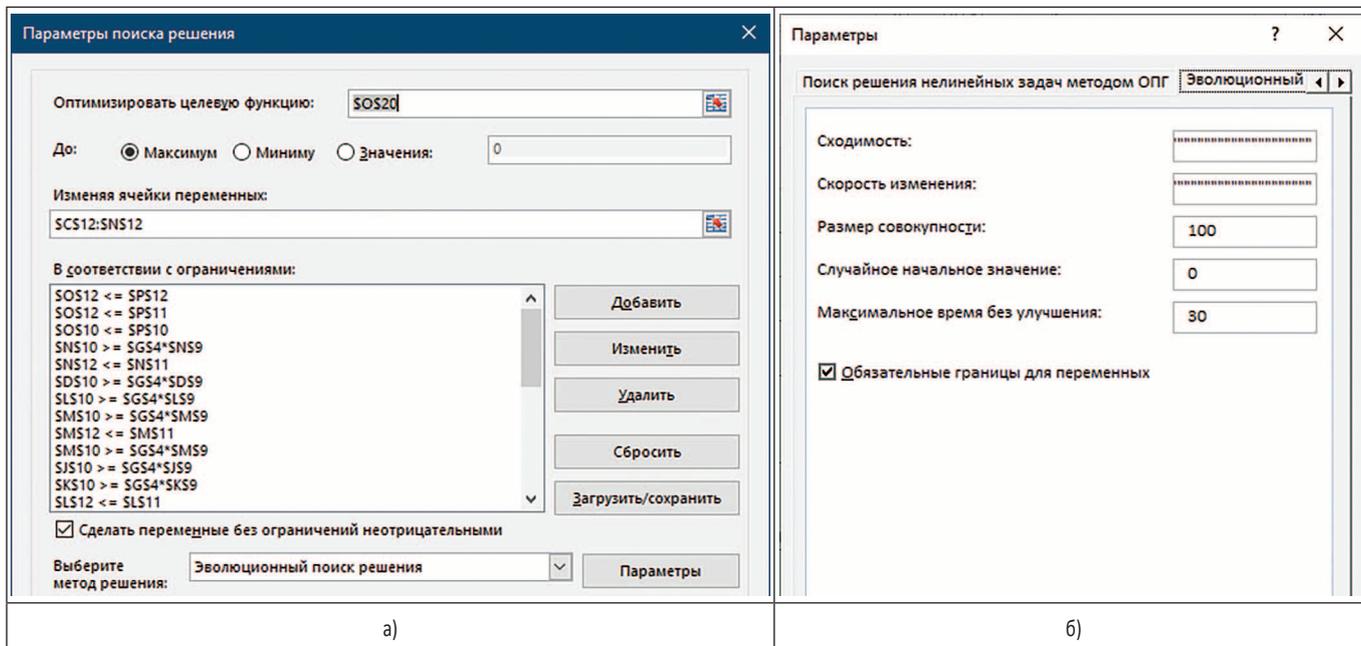


Рисунок 2. Задание ограничений (а) математической модели и параметров (б) процедуры эволюционной оптимизации в интерфейсе надстройки «Поиск решения»  
 Figure 2. Setting restrictions (a) of the mathematical model and parameters (b) of the evolutionary optimization procedure in the interface of the «Solution Search» add-in

Наименование показателя	ООО "Кузмичи" - Договор №0108			ИП Круглова М.Е. Договор №0204			ИП Эльяс Е.Д., Договор №1410			ИП Ложкин Я.Д., Договор №2606			Итого по ОС	
	Овощные	Зерновые	Кормовые	Овощные	Зерновые x5	Кормовые	Овощные	Зерновые	Кормовые	Овощные	Зерновые, x11	Кормовые	Оптимизированное значение	Предельное значение показателя
Водоподача заявка, тыс. м.куб	250	225	144	150	150	128	200	125	152	175	200	200		2099
Водоподача факт, оптимизир., тыс. м. куб	249.9998797	224.11	16.69	149.09	150.00	14.78	199.99	114.51	17.64	175.00	163.97	24.14	1499.93246	1500
Площадь орошения заявка, га	50	90	36	30	60	32	40	50	38	35	80	50		591
Площадь орошения оптимизир., га	50.00	89.65	4.17	29.82	60.00	3.70	40.00	45.80	4.41	35.00	65.59	6.03	434.17	591
Площадь орошения пропорц., га	35.73	64.31	25.73	21.44	42.88	22.87	28.58	35.73	27.15	25.01	57.17	35.73	422.32	102.80%
Выручка, руб.	500 000	448 228	33 374	298 189	300 000	29 564	399 976	229 022	35 287	350 000	327 950	48 276		
Удельные затраты, руб. /тыс.м3	950	880.00	890.00	875.00	900.00	940.00	900.00	900.00	900.00	900.00	900.00	720.00		
Затраты, руб.	237 500	197 220	14 851	130 458	135 000	13 895	179 989	103 060	15 879	157 500	147 577	17 379		
Фин.результат оптимизированный, руб.	262 500	251 008	18 523	167 731	165 000	15 669	219 987	125 962	19 408	192 500	180 372	30 897	1 649 556	
Фин.результат при пропорциональном распределении, руб.	187 581	180 078	114 221	120 588	117 908	96 956	157 211	98 257	119 480	137 559	157 211	182 936	1 669 984	98.78%
Фин.результат при полном удовлетворении заявок,руб	262 500	252 000	159 840	168 750	165 000	135 680	220 000	137 500	167 200	192 500	220 000	256 000	2 336 970	
Оросительная норма, тыс. м.куб/га	5	2.5	4	5	2.5	4	5	2.5	4	5	2.5	4		
Урожайность на поливе, т/га	36	5	25.5	36	5	25.5	36	5	25.5	36	5	25.5		
Базовая урожайность, т/га	20	2	15	20	2	15	20	2	15	20	2	15		
Кэф. отзывчивости на полив	1.8	2.5	1.7	1.8	2.5	1.7	1.8	2.5	1.7	1.8	2.5	1.7		
Закупочная цена продукции, руб./т	51200	14756	7256	51200	14756	7256	51200	14756	7256	51200	14756	7256		
Валов. стоим. продукц., план, руб.	92 160 000	6 640 200	6 661 008	55 296 000	4 426 800	5 920 896	73 728 000	3 689 000	7 031 064	64 512 000	5 902 400	9 251 400	335 218 768	
Вал. стоим. продукц., оптимизированная, руб.	92 159 956	6 614 057	771 893	54 962 224	4 426 796	683 771	73 723 500	3 379 441	816 143	64 511 991	4 839 224	1 116 549	308 005 546	
Вал. стоим. продукц., пропорциональная, руб.	65 856 968	4 745 046	4 759 915	39 514 181	3 163 364	4 231 036	52 685 574	2 636 137	5 024 355	46 099 878	4 217 819	6 610 993	239 545 265	128.58%

Рисунок 3. Фрагмент результирующей матрицы оптимизации плана водораспределения  
 Figure 3. Fragment of the resulting optimization matrix for the water distribution plan

Таблица 1. Результаты многокритериальной оптимизации  
 Table 1. Results of multi-criteria optimization

Варианты оптимизации	Нормированные показатели			
	Фин рез. в/х организации	Валовая стоимость продукции	Площадь орошения	ЦФ
Многокритериальная оптимизация	0,7058	0,9188	0,7347	2,3594
Пропорциональное распределение оросительной воды	0,7145	0,7145	0,7145	2,1435



Таблица 2. Сводные данные оптимизации водораспределения  
Table 2. Summary of water distribution optimization data

Критерии оптимизации		Площадь, орошения, га	Фин. рез. водохозяйственной организации, руб.	Валовая стоимость продукции, руб.	Интегральный нормированный результат	% к показателю интегральной оптимизации
1	Интегральный	434,2	1649556	308005546		
	Нормированное значение	0,7347	0,7058	0,9188	2,3594	
2	Стоимость валового объема продукции растениеводства	394,64	1647694	312711647		
	Нормированное значение	0,6677	0,7051	0,9329	2,3057	98,77
3	Доход водохозяйственной организации	421,13	1683846	235379468		
	Нормированное значение	0,7126	0,7205	0,7022	2,1353	90,51
4	Мак. площадь орошения	462,65	1679555	168728407		
	Нормированное значение	0,7828	0,7187	0,5033	2,0049	84,97

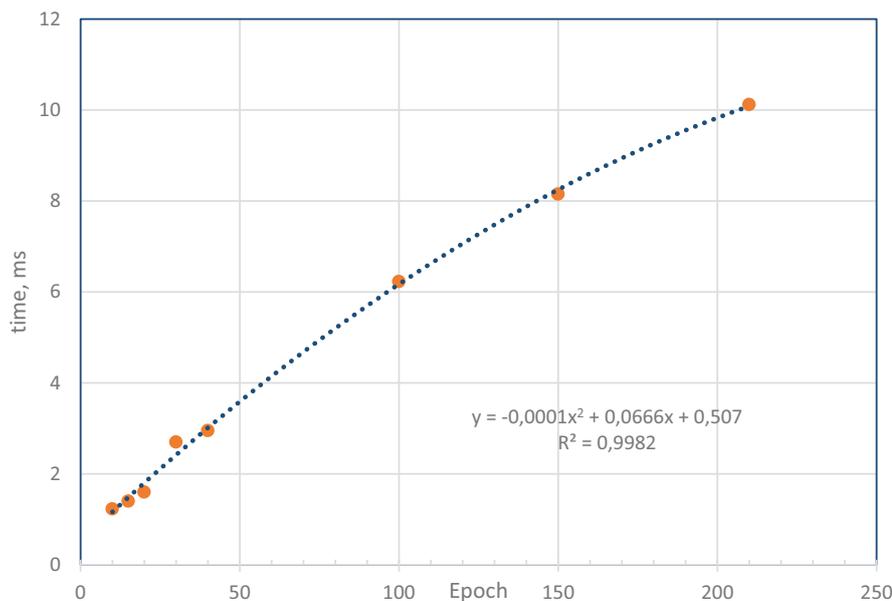


Рисунок 4. Зависимости времени оптимизации от числа эпох обучения генетического алгоритма  
Figure 4. Dependence of optimization time on the number of training epochs of the genetic algorithm

Анализ зависимости (6), график квадратичной аппроксимации которой приведен на рисунке 4, показывает, что при увеличении количества эпох ГА свыше 100...150, время вычисления изменится менее существенно, чем в начале процесса оптимизации.

Это можно использовать для повышения производительности процесса эволюционной оптимизации.

**Заключение.** Результаты анализа действующих в сфере отечественного водопользования научно — методических и практических подходов к распределению ограниченных водных выявили необходимость их совершенствования, модернизации и трансформации на основе оптимизационного экономико-математического моделирования, обеспечивающего достижение планируемых экономических результатов водохозяйственного комплекса в условиях устойчивого агропроизводства на орошении.

В работе предложена целевая функция оптимизации процесса водораспределения, включающая в качестве показателей эффективности площадь орошения, доход водохозяйственной организации и валовой объем производства продукции растениеводства с орошаемых земель (в денежном исчислении). В пользу структуры разработанной модели следует отметить ее универсальность, обеспечиваемую многокритериальностью.

При исключении функций контроля состояния мелиорируемых земель и/или рационального использования поливной воды из обязанностей службы эксплуатации ОС, наличие оптимизационной модели представленной структуры позволяет увеличить клиентскую базу организации за счет оказания консалтинговых услуг водопользователям

Реализация модели с использованием генетического программирования, базирующегося на методах искусственного интеллекта — эволюционного моделирования, расширяет возможности оптимизации принимаемого решения в условиях формирования новых форм взаимоотношений водохозяйственных организаций и водопользователей.

Выбор решения по показателям многократных имитаций конкуренции и улучшений повышает масштабы сложно устроенного пространства поиска решений и, вследствие, универсальности позволяет получить результат, когда традиционные методы не работают или их реализация требует неприемлемо много времени. Полученные результаты с достаточной убедительностью свидетельствуют о работоспособности и преимуществе использования разработанной многокритериальной оптимизационной модели в сравнении, как с практикующимся подходом к планированию водораспределения, базирующемся на предпочтениях лица,

принимающего решение, так и с однокритериальным оптимизационным моделированием.

**Список источников**

1. Духовный В.А., Муминов Ш.Х., Мирзаев Н.Н. Потенциал агропромышленных кластеров по внедрению рыночных механизмов управления и финансирования водного хозяйства Узбекистана // Мелиорация и водное хозяйство. 2021. № 1. С.5-12.
2. Ольгаренко И.В. Информационные технологии планирования водопользования и оперативного управления водораспределением на оросительных системах: специальность 06.01.02 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ольгаренко Игорь Владимирович. Новочеркасск, 2013. 448 с. EDN SVAPAZ.
3. Кирейчева Л.В. Модели и информационные технологии управления водопользованием на мелиоративных системах, обеспечивающие благоприятный мелиоративный режим / Л.В. Кирейчева, И.Ф. Юрченко, В.М. Яшин // Мелиорация и водное хозяйство. 2014. № 5-6. С. 50-55. EDN SZNXEV.
4. Найденов С.В. Оптимизация водораспределения на оросительных системах при дефиците водных ресурсов / С.В. Найденов, Ю.Е. Домашенко, С.М. Васильев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2018. № 1(69). С. 132-136
5. Park J., Bayraksan G. A multistage distributionally robust optimization approach to water allocation under climate uncertainty // European Journal of Operational Research. 2023. T. 306. № 2. С. 849-871.
6. Raška P. et al. Exploring local land use conflicts through successive planning decisions: a dynamic approach and theory-driven typology of potentially conflicting planning decisions // Journal of Environmental Planning and Management. 2023. T. 66. № 10. С. 2051-2070.
7. Uddin M.G. et al. A novel approach for estimating and predicting uncertainty in water quality index model using machine learning approaches // Water Research. 2023. T. 229. С. 119422.
8. Shafa N.S. et al. Multi-objective planning for optimal exploitation of surface and groundwater resources through development of an optimized cropping pattern and artificial recharge system // Ain Shams Engineering Journal. 2023. T. 14. № 2. С. 101847.
9. Рогачев Д.А. Эволюционные и генетические алгоритмы как природоподобные подходы к структурно-параметрической оптимизации / Д.А. Рогачев, Д.С. Захаров, И.С. Руднев // Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий : материалы Национальной научно-практической конференции, Волгоград, 09 ноября 2022 года / Волгоградский государственный аграрный университет. Том I. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2023. С. 313-318.
10. Лабинский А.Ю. Использование генетического алгоритма для многокритериальной оптимизации // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2018. № 4(28). С. 5-9.
11. Имамутдинов А.И. Анализ процесса эволюционно-генетических вычислений с точки зрения характеристик обобщения / А.И. Имамутдинов, Н.В. Слепцов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3(27). С. 84-91. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-10.





12. Кондратьев, Т.Н. Эволюционные вычисления: нейронные сети и генетические алгоритмы // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2019. Т. 1. С. 418-421.

13. Звезинцев А.И., Квятковская И.Ю. Применение модифицированного алгоритма генетического программирования для идентификации математических моделей путем расширения обучающего множества искусственной нейронной сетью // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 58-65.

14. Иванов А.М. и др. Применение метода Нелдера — Мида для оптимизации выбора констант модели Лихачёва — Волкова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2022. Т. 9, № 4. С. 693-704. DOI 10.21638/spbu01.2022.411.

15. Скобцов Ю.А. Сравнение традиционных и квантовых генетических алгоритмов // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 4. С. 91-95. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_4\_91.

16. Щедрин В.Н., Штанько А.С., Воеводин О.В. Методические указания по планированию водопользования на оросительных системах на основании данных ретро-спективного анализа и сценарных расчетов в зависимости от лет различной влагообеспеченности. Новочеркасск: Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, 2015. 61 с. EDN XWYFHN.

17. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 31 июля 2020 г. N 438 «Об утверждении Правил эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений».

18. Годовой отчет по технической эксплуатации за 2022 год Красногвардейского филиала Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации». Раздел II Водопользование и гидрометрия, таблица 10; Раздел VI Использование орошаемых земель.

19. Годовой технический отчет за 2017г. Городищенского филиала ФГБУ «Управление «Волгоградмелиоводхоз».

20. Федеральный Закон о мелиорации земель. Принят Государственной Думой 8 декабря 1995 года (редакция с поправками от 2022 г.).

## References

1. Dukhovnyi V.A., Muminov S.H.KH., Mirzaev N.N. (2021). *Potentsial agropromyshlennykh klasterov po vnedreniyu rynochnykh mekhanizmov upravleniya i finansirovaniya vodnogo khozyaistva Uzbekistana* [The potential of agro-industrial clusters to introduce market mechanisms for managing and financing the water sector in Uzbekistan]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, no. 1, pp. 5-12.

2. Ol'garenko I.V. (2013). *Informatsionnye tekhnologii planirovaniya vodopol'zovaniya i operativnogo upravleniya vodoraspredeleleniem na orositel'nykh sistemakh* (Thesis). Novocherkassk: NIMI Donskoy GAU.

3. Kireicheva L.V., Yurchenko I.F., Yashin V.M. (2014). *Modeli i informatsionnye tekhnologii upravleniya vodopol'zo-*

*vaniem na meliorativnykh sistemakh, obespechivayushchie blagopriyatnyi meliorativnyi rezhim* [Models and information technologies for water use management in reclamation systems, ensuring a favorable reclamation regime]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, no. № 5-6, pp. 50-55.

4. Naidenov S.V., Domashenko YU. E., Vasil'ev S.M. (2018). *Optimizatsiya vodoraspredeleleniya na orositel'nykh sistemakh pri defitsite vodnykh resursov* [Optimization of water distribution in irrigation systems when water resources are scarce]. *Puti povysheniya ehffektivnosti oroshayemogo zemledeliya*, no. 1(69), pp. 132-136.

5. Park J., Bayraksan G. (2023). A multistage distributionally robust optimization approach to water allocation under climate uncertainty. *European Journal of Operational Research*, vol. 306, no. 23, pp. 2320-2345.

6. Raška P. et al. (2023). Exploring local land use conflicts through successive planning decisions: a dynamic approach and theory-driven typology of potentially conflicting planning decisions. *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 66, no. 10, pp. 2051-2070.

7. Uddin M.G. et al. (2023). A novel approach for estimating and predicting uncertainty in water quality index model using machine learning approaches. *Water Research*, vol. 229, pp. 119422.

8. Shafa' N.S. et al. (2023). Multi-objective planning for optimal exploitation of surface and groundwater resources through development of an optimized cropping pattern and artificial recharge system. *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 101847.

9. Rogachev D.A. & Zakharov D. S., & Rudnev I.S. (2022). *Ehvolutsionnye i geneticheskie algoritmy kak prirodopodobnye podkhody k struktumno-parametricheskoi optimizatsii* [Evolutionary and genetic algorithms as nature-like approaches to structural-parametric optimization]. Proceedings of the *Nauchnoe obosnovanie strategii tsifrovogo razvitiya APK i sel'skikh territorii : materialy Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Volgograd, 09 noyabrya 2022 goda / Volgogradskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, vol. 1, Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet*, pp. 313-318.

10. Labinskii A. YU. (2018). *Ispol'zovanie geneticheskogo algoritma dlya mnogokriteriial'noi optimizatsii* [Using a Genetic Algorithm for Multi-Criteria Optimization]. *Prirodnye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)*, no. 4(28), pp. 5-9.

11. Imamutdinov A.I., Sleptsov N.V. (2019). *Analiz protsessa ehvolutsionno-geneticheskikh vychislenii s tochki zreniya kharakteristik obobshcheniya* [Analysis of the process of evolutionary genetic calculations from the point of view of generalization characteristics]. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, no. 3(27), pp. 84-91. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-10.

12. Kondrat'ev, T. N. (2019). *Ehvolutsionnye vychisleniya: neironnye seti i geneticheskie algoritmy* [Evolutionary Computation: Neural Networks and Genetic Algorithms]. Proceedings of the *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam, Saratov, Mart, vol. 1, Saratov*, pp. 418-421.

13. Zvezintsev A.I., Kvyatkovskaya I.YU. (2013). *Primenenie modifitsirovannogo algoritma geneticheskogo pro-*

*gramirovaniya dlya identifikatsii matematicheskikh modelei putem rasshireniya obuchayushchego mnozhestva iskustvennoi neironnoi set'yu* [Application of a modified genetic programming algorithm to identify mathematical models by expanding the training set with an artificial neural network]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, no. 2, pp. 58-65.

14. Volkova A.M., Ivanov F.S., Belyaev, Volkov A.E. [i dr.] (2022). *Primenenie metoda Neldera — Mida dlya optimizatsii vybora konstant modeli Likhacheva* [Application of the Nelder-Mead method to optimize the choice of constants of the Likhachev-Volkov model]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*, vol. 9, no. 4, pp. 693-704. doi 10.21638/spbu01.2022.411.

15. Skobtsov YU. A. (2023). *Sravnienie traditsionnykh i kvantovykh geneticheskikh algoritmov* [Comparison of traditional and quantum genetic algorithms]. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*, no. 4, pp. 91-95. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2023\_4\_91.

16. Shchedrin V.N., Shtan'ko A.S., Voevodin O.V. (2015). *Metodicheskie ukazaniya po planirovaniyu vodopol'zovaniya na orositel'nykh sistemakh na osnovanii dannykh retrospektivnogo analiza i ssternanykh raschetov v zavisimosti ot let razlichnoi vlagooobespechennosti* [Guidelines for planning water use in irrigation systems based on data from retrospective analysis and scenario calculations depending on years of different moisture availability]. Novocherkassk: Rossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut problem melioratsii.

17. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 31 июля 2020 г. N 438 «Об утверждении Правил эксплуатации мелиоративных систем и отдельно расположенных гидротехнических сооружений» [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated July 31, 2020 N 438 «On approval of the Rules for the operation of reclamation systems and separately located hydraulic structures»].

18. *Godovoi otchet po tekhnicheskoi ehkspluatatsii za 2022 god Krasnogvardeiskogo filiala Gosudarstvennogo byudzhethnogo uchrezhdeniya Respubliki Krym «Krymskoe upravlenie vodnogo khozyaistva i melioratsii». Razdel II Vodopol'zovanie i gidrometriya, tablitsa 10; Razdel VI Ispol'zovanie oroshayemykh zemel'* [Annual report on technical operation for 2022 of the Krasnogvardeisky branch of the State Budgetary Institution of the Republic of Crimea «Crimean Department of Water Management and Land Reclamation». Section II Water use and hydrometry, table 10; Section VI Use of irrigated lands].

19. *Godovoi tekhnicheskii otchet za 2017g. Gorodishchenskogo filiala FGBU «Upravlenie «Volgogradmeliovodkhoz»* [Annual technical report for 2017. Gorodishchensky branch of the Federal State Budgetary Institution «Management «Volgogradmeliovodkhoz»].

20. *Federal'nyi Zakon o melioratsii zemel'. Prinyat Gosudarstvennoi Dumoi 8 dekabrya 1995 goda (redaktsiya s popravkami ot 2022 g.)* [Federal Law on Land Reclamation. Adopted by the State Duma on December 8, 1995 (as amended in 2022)].

## Информация об авторах:

**Кирейчева Людмила Викторовна**, доктор технических наук, профессор, Всероссийский научно — исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7114-2706>, kireychevalw@mail.ru

**Рогачев Дмитрий Алексеевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно — исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, Rogachev.soft@gmail.com

**Юрченко Ирина Федоровна**, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, Всероссийский научно — исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2390-1736>, Irina.507@mail.ru

**Рогачев Алексей Фруминович**, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный аграрный университет, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3077-6622>, Rafr@mail.ru

## Information about the authors:

**L.V. Kireicheva**, doctor of technical sciences, professor, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7114-2706>, kireychevalw@mail.ru

**D.A. Rogachev**, candidate of technical sciences, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, Rogachev.soft@gmail.com

**I.F. Yurchenko**, doctor of technical sciences, Associate Professor, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2390-1736>, Irina.507@mail.ru

**A.F. Rogachev**, doctor of technical sciences, professor, Volgograd State Agrarian University, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3077-6622>, Rafr@mail.ru