

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

УДК 631.67:004.8



ОПТИМИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Д.А. Рогачев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, стр. 2, Россия

Аннотация. Цель исследований – разработка конструктивного решения выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ с использованием методов искусственного интеллекта в условиях ограниченного бюджетного финансирования эксплуатационных мероприятий оросительных систем. В работе использованы методы системного анализа и математического моделирования включая бинарные переменные для проведения дискретной оптимизации методами эволюционно-генетического программирования. На основе анализа поддержки управленческих решений средствами математического обеспечения обосновано использование методов оптимизации прогнозируемых воздействий включая выбор дискретных вариантов для повышения функциональности и эффективности планируемых мероприятий технической эксплуатации. Распределение ограниченных финансовых ресурсов осуществляется на модели многокритериальной оптимизации, включающей в себя минимизацию потерь поливной воды при увеличении площади орошаемых земель и повышении финансовых показателей водохозяйственной организации, что повышает качество управленческих воздействий. Практическая значимость НИР определяется разработкой инновационного инструментария для решения задачи распределения ограниченных ресурсов на проведение ремонтно-восстановительных работ мелиоративного водохозяйственного комплекса с использованием методов искусственного интеллекта. Апробация предлагаемых решений, осуществленная на материалах службы эксплуатации Государственного бюджетного учреждения Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации», показала целесообразность масштабного внедрения методов количественной оценки управленческих решений. Техничко-экономические показатели планируемых мероприятий соответствуют ожидаемым значениям и обеспечивают выполнение таких требований, как полнота, гарантирующая получение с их помощью необходимой и достаточной для принятия решений информации, и наличие надежных источников получения достоверных и доступных данных для информационного наполнения показателей и критериев.

Ключевые слова: гидромелиоративная система, техническая эксплуатация, ремонтно-восстановительные работы, распределение ресурсов, моделирование, многокритериальная оптимизация, эволюционно-генетическое программирование

Формат цитирования: Рогачев Д.А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта // Природообустройство. 2024. № 4. С. 12-19. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Original article

OPTIMIZATION OF MEASURES FOR THE TECHNICAL OPERATION OF IRRIGATION SYSTEMS BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

D.A. Rogachev

All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is to develop a constructive solution for choosing priority objects of repair and restoration works using artificial intelligence methods in conditions of limited budget financing of operational measures of irrigation systems. The paper uses methods of system analysis and mathematical modeling, including binary variables for discrete optimization using evolutionary genetic programming methods. Based on the analysis of management decision support by means of mathematical support, the use of optimization methods for predicted impacts is justified, including

the choice of discrete options to increase the functionality and effectiveness of planned technical operation measures. The allocation of limited financial resources is carried out on the model of multi-criteria optimization, including minimizing irrigation water losses, while increasing the area of irrigated land and increasing the financial indicators of the water management organization, which improves the quality of management impacts. The practical significance of research is determined by the development of innovative tools to solve the problem of allocating limited resources for carrying out repair and restoration work of the municipal water management complex using artificial intelligence methods. The approbation of the proposed solutions, carried out on the materials of the operation service of the State Budgetary Institution of the Republic of Crimea "Crimean Department of Water Management and Melioration", proved the expediency of large-scale implementation of methods for quantitative assessment of management decisions. The technical and economic indicators of the planned activities correspond to the expected values and ensure the fulfillment of the following requirements: completeness, ensuring that they provide the necessary and sufficient information for decision-making; availability of reliable sources of reliable and accessible data for the information content of indicators and criteria.

Keywords: hydro-reclamation system, technical operation, repair and restoration work, resource allocation, modeling, multi criteria optimization, evolutionary genetic programming

Format of citation: Rogachev D.A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods // Prirodoobustrojstvo. 2024. No.4. P. 12-19. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Введение. Потребность в увеличении объемов производства отечественной сельскохозяйственной продукции обусловлена необходимостью обеспечения продовольственной безопасности, уменьшения импортозависимости и увеличения экспортного потенциала России. В большой мере этого можно достичь за счет расширения площади мелиорируемых земель, увеличения эффективности использования мелиоративных систем и повышения уровня их технической готовности к эксплуатации.

Вместе с тем отечественный мелиоративный комплекс имеет значительный (до 90%) физический и моральный износ основных фондов, что требует обоснования и проведения мероприятий по его модернизации и реновации. Ремонт и обновление мелиоративного фонда – сложная задача, требующая финансовых ресурсов, технических знаний и координации действий различных заинтересованных сторон. Ограниченность средств, выделяемых на техническую эксплуатацию, обуславливает высокую цену принимаемых управленческих решений и необходимость научно обоснованных инновационных технологий их поддержки.

От традиционно практикующихся в указанной сфере методов принятия решений по распределению ресурсов, основанных на суждениях и/или предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), выгодно отличается активно развивающийся рациональный подход, базирующийся на методах количественной оценки, практически не зависящей от ретроспективного опыта ЛПР [1, 2]. Это особенно важно в случаях изменившихся/новых условий назначения

управляющих воздействий и прогнозирования их последствий.

В сфере агропроизводства действенным направлением указанного решения проблемы распределения ограниченных ресурсов становится методология оптимизационного экономико-математического моделирования, обеспечивающая достижение рациональных экономических результатов управляющих воздействий [3, 4]. На смену наиболее распространенному подходу к оптимизации распределения ограниченных ресурсов – методам линейного программирования – все чаще приходят технологии искусственного интеллекта, которые находят широкое практическое применение [5-7].

Таким образом, эффективность орошаемого земледелия во многом обусловлена работоспособностью сооружений и оборудования оросительных систем (ОС), что определяет актуальность поиска решений по оптимизации распределения, как правило, ограниченных ресурсов технической эксплуатации.

Цель исследований: разработка конструктивного метода выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ с использованием искусственного интеллекта в условиях ограниченного бюджетного финансирования эксплуатационных мероприятий оросительных систем.

Материалы и методы исследований. Очевидным фактором повышения работоспособности ОС, изменяющейся в процессе их функционирования, являются планово-предупредительные работы. К структурным элементам технической эксплуатации относятся противоаварийные

и противопоаводковые работы, текущий и капитальный ремонт, восстановление, модернизация, техническое перевооружение, реконструкция.

Теоретические основы и практика современной эксплуатации сельскохозяйственной и мелиоративной техники, а также гидротехнических сооружений отражены в трудах М. Бандурина, М. Власова, Л. Кирейчевой, В. Ольгаренко, И. Ольгаренко, И. Юрченко и других исследователей [8-12].

По результатам обобщения существующих подходов, а также специальных исследований автора в данной работе в качестве приоритетного метода повышения эффективности тактического и стратегического уровней управления эксплуатируемыми оросительными системами в условиях ограниченных инвестиций принята многокритериальная оптимизация выбора первоочередных объектов технической эксплуатации.

Математическая модель решаемой задачи распределения ресурсов на ремонтно-восстановительные работы ОС представляет частный случай более общей задачи математической оптимизации – транспортной [5].

Алгоритм дискретной задачи назначения ресурсов по объектам технической эксплуатации, которые могут включаться или исключаться из планируемых мероприятий, оптимизирует параметр x_{ij} , характеризующий назначение ресурса A_i на объект технической эксплуатации B_j :

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad (1)$$

где единица означает назначение ресурса i на объект j , ноль – его отсутствие.

Качество распределения ресурсов для искомого плана технической эксплуатации $Z(X)$ выражается зависимостью (2):

$$Z(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}, \quad (2)$$

где c_{ij} – технико-экономические показатели, определяющие «ценность» j объекта при назначении i ресурса для прогнозируемого результата управляющих воздействий.

Отметим, что представленная в работе постановка задачи о назначениях ресурсов несколько упрощается по сравнению с общей транспортной задачей за счет сокращения перечня распределяемых ресурсов до одного – объема бюджетного финансирования ремонтно-восстановительных работ на ОС.

Для решения задачи оптимизации использовался метод эволюционно-генетического программирования, поскольку ввиду нелинейности целевой функции задача оптимизации не может

быть решена методами линейного программирования. Применялась эффективная модификация ГА с помощью изменения объема популяции между двумя соседними эпохами (поколениями), что эффективно влияет на функционирование оператора отбора.

Функциональные возможности разработанной модели обеспечивают построение трех уровней планирования:

1. Перспективный (стратегический) – для обоснования нового строительства, реконструкции и планов капитального ремонта водопроводящих гидротехнических сооружений (ГТС).

2. Годовой (тактический) – для согласования мероприятий технической эксплуатации с планами системного водопользования.

3. Текущий (оперативный) – для проведения аварийного ремонта оборудования и срочного перераспределения воды между хозяйствами-потребителями в текущем периоде (декаде, месяце).

Результаты и их обсуждение. В соответствии с целевыми установками исследований в работе:

– установлены технико-экономические показатели и сформирована функция «ценности» объекта ОС, определяющая его приоритеты для включения в план технической эксплуатации;

– обоснована и реализована модель оптимизации решений по распределению инвестиций на объекты технической эксплуатации оросительной системы на основе методов искусственного интеллекта.

Выбор показателей и критериев, обеспечивающих принятие решения в части повышения работоспособности оросительных систем мероприятиями технической эксплуатации, является основополагающим фактором качества принимаемых управленческих решений и успешного функционирования объектов мелиоративного водохозяйственного комплекса.

В качестве технико-экономических показателей, характеризующих «ценность» объекта ОС для планируемых ремонтно-восстановительных работ, приняты покомандные площади орошения, сокращение потерь поливной воды, финансовый результат водохозяйственной организации при реализации мероприятий.

Указанный подход обеспечивает учет интересов непосредственно водохозяйственной организации, способствуя ее конкурентоспособности, и мелиоративного сектора экономики АПК в целом, реализуя его роль в части глобального развития и экологизации мелиоративной деятельности.

Математическая постановка задачи в этом случае имеет вид (3) при ограничениях (4):

$$Z = \sum_{i=1}^m c_i x_i \rightarrow \max \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m k_j x_j \leq K;$$

$$x_i \in \{0; 1\}, i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где k_i – затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ i объекта технической эксплуатации; m – количество объектов технической эксплуатации; c_i – функция «ценности» i объекта технической эксплуатации (ОТЭ);

$$c_i = S_i / S + (1 - V_i / V) + D_i / D,$$

где S_i – площадь орошения покомандная ОТЭ, га; S – общая площадь орошения покомандная ОТЭ, га; V_i – снижение потерь воды на системе при реализации i объекта технической эксплуатации, тыс. м³; V – снижение потерь воды при реализации мероприятий технической эксплуатации для всех ОТЭ, тыс. м³;

$$V = \sum_{i=1}^m V_i, \quad (5)$$

где D_i – финансовый результат водохозяйственной организации при реализации i объекта технической эксплуатации, тыс. руб.; D – финансовый результат водохозяйственной организации при реализации мероприятий технической эксплуатации для всех ОТЭ, тыс. руб.;

$$D = \sum_{i=1}^m D_i, \quad (6)$$

где K – суммарный объем финансирования мероприятий ОТЭ.

Апробация модели выполнена на материалах службы эксплуатации Красногвардейской оросительной системы ГБУ Республики Крым «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации». На рисунке 1 приведена по материалам годового отчета по технической эксплуатации за 2022 г. Красногвардейского филиала «Крымского управления водного хозяйства и мелиорации» Республики Крым карта-схема водных объектов Красногвардейского района [13]. Большая часть сооружений оросительной системы Красногвардейского района серьезно изношена, сумма износа сопоставима с балансовой стоимостью (табл. 1).

В качестве примера решалась задача оптимизации плана ремонтно-восстановительных работ для 7 насосных станций при ограниченном финансировании мероприятий технической эксплуатации. Исходными данными для формирования целевой функции служили следующие технико-экономические показатели ОТЭ (табл. 2).

Решение получено с использованием надстройки «Поиск решения» программного комплекса MS Excel, разработанной Microsoft для оптимизации решений различными методами, включая генетический эволюционный алгоритм, и адаптированной автором для рассматриваемой модели. Параметры оптимизации эволюционно-генетического

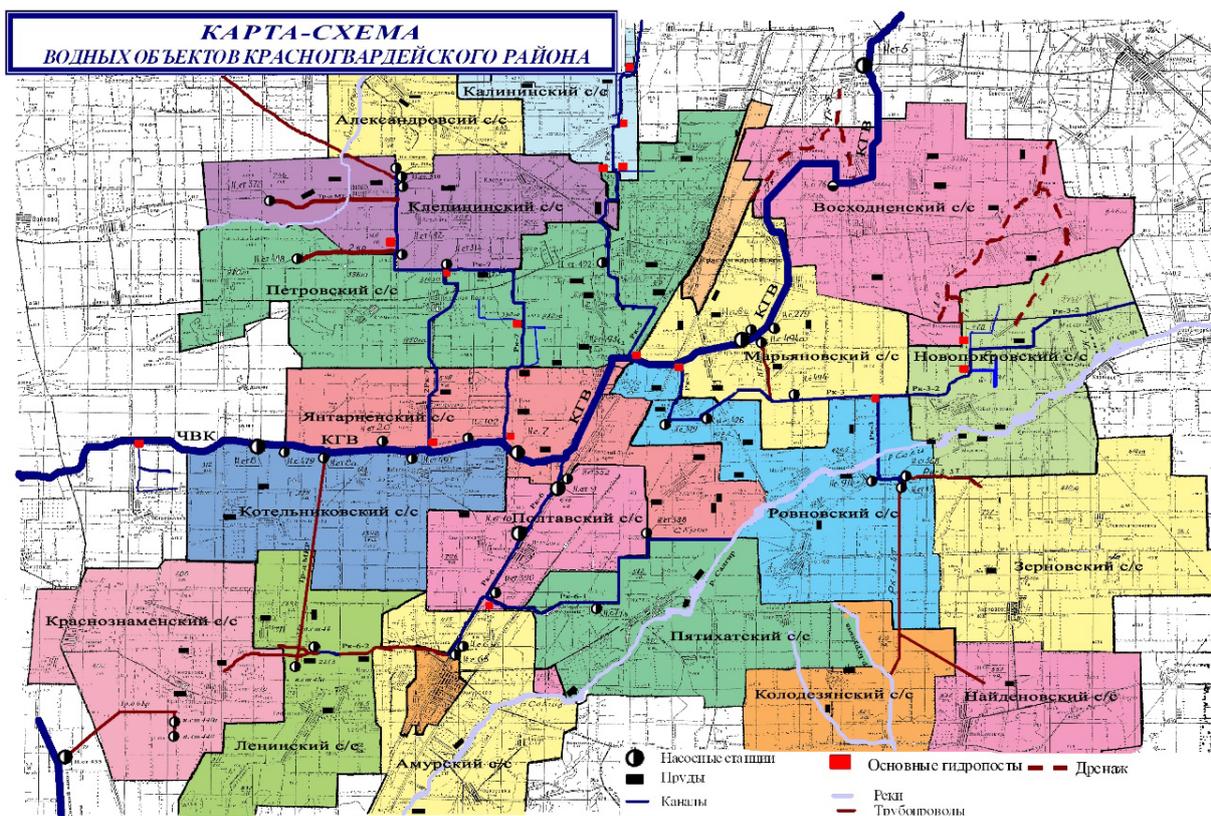


Рис. 1. Карта-схема Красногвардейского района [13]

Fig. 1. Map-scheme of the Krasnogvardeisky district [13]

алгоритма надстройки «Поиск решений» MS Excel представлены на рисунке 2.

В таблице 3 приведены результаты многокритериальной оптимизации.

Выполненные исследования показали преимущество разработанной модели в сравнении с решениями на основе однокритериальной оптимизации [14, 15].

Таблица 1. Балансовые показатели объектов оросительной системы [13]

Table 1. Balance indicators of irrigation system facilities [13]

№ п/п	Наименование показателей <i>Indicators</i>	Ед. измерения <i>Measurement unit</i>	Всего <i>Total</i>				
			К-во <i>Quantity</i>	Из них требует <i>Some of them require</i>		Балансовая стоимость, тыс. руб. <i>Balance sheet value, ths rbl</i>	Сумма износа, тыс. руб. <i>The amount of depreciation, ths rbl</i>
				Кап. ремонта <i>Major repairs</i>	Восстановления <i>Restoration</i>		
Межхозяйственная сеть и сооружения на ней / Inter-economic network and facilities on it							
1	Межхозяйственные каналы, включая магистральные, всего <i>Inter-economic canals including main canals, total</i> в т.ч. закрытые / <i>including closed canals</i> в т.ч. облицов. / <i>including facing canals</i>	Км	187,67			239848,202	239848,197
		km	5,86 165,65	25,368 23,495		9284,232 206696,436	9284,232 206696,436
2	Сооружения на МК и межхозяйственных каналах (кроме выделов воды в хозяйства) <i>Facilities on MC and inter-economic canals (except of water allocation to farms)</i>	шт. <i>pcs</i>	145	21		1288,265	1232,501
3	Сооружения в точках выдела в хозяйства <i>Facilities in the points of water allocation to farms</i>	шт. <i>pcs</i>	21				
4	Напорный трубопровод <i>Head pipeline</i>	Км <i>km</i>	65,69	5,02		66132,176	63068,251
5	Насосные станции – всего <i>Pump stations – total</i>	шт. <i>pcs</i>	36	7		100397,542	91363,190
6	Трансформаторные подстанции <i>Transformer substations</i>	шт. <i>pcs</i>	22			2349,601	2068,431
7	Мосты и переезды <i>Bridges and crossroads</i>	шт. <i>pcs</i>	52	3		1921,266	1921,266
8	Водосборно-сбросная сеть <i>Water catchment-discharge network</i>	Км <i>km</i>	7,4			162,313	162,313
ИТОГО по межхозсети <i>TOTAL on the inter-economic network</i>						412099,365	399664,149

Таблица 2. Технико-экономические показатели объектов технической эксплуатации

Table 2. Technical and economic indicators of technical operation facilities

	НС1	НС2	НС3	НС4	НС5	НС6	НС7
Покомандная площадь орошения, га <i>Command area of irrigation, ha</i>	652,8	1396,6	151,3	155	350,0	35,0	43,5
Водоподача после ремонта, тыс. м³ <i>Water supply after repair, ths m³</i>	2611,2	5586,4	605,2	620,0	1400,0	140,0	174,0
Сокращение потерь поливной воды, тыс. м³ <i>Reduction of losses of irrigation water, ths m³</i>	785,3	579,1	90,3	124,6	186,3	30,0	25,3
Удельные затраты на водоподачу, руб./тыс. м³ <i>Specific expenditures for water supply, rbl / ths m³</i>	1,8	1,4	1,0	1,9	1,3	1,85	1,8
Удельная стоимость водоподачи, руб./тыс. м³ <i>Unit cost of water supply, rbl / ths m³</i>	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

В таблице 4 приведены результаты моно- и многокритериального подхода к оптимизации мероприятий технической эксплуатации, наглядно иллюстрирующие приоритеты последнего. Это позволяет рекомендовать использование указанной модели для решения задач математической оптимизации при выборе дискретных вариантов и функциональных и эффективных

управленческих решений по распределению ограниченных ресурсов на ремонтно-восстановительные работы. Модель может применяться как автономно, так и в составе автоматизированных систем управления, необходимость в разработке которых актуализируется в свете масштабного развития цифровизации отечественной экономики.

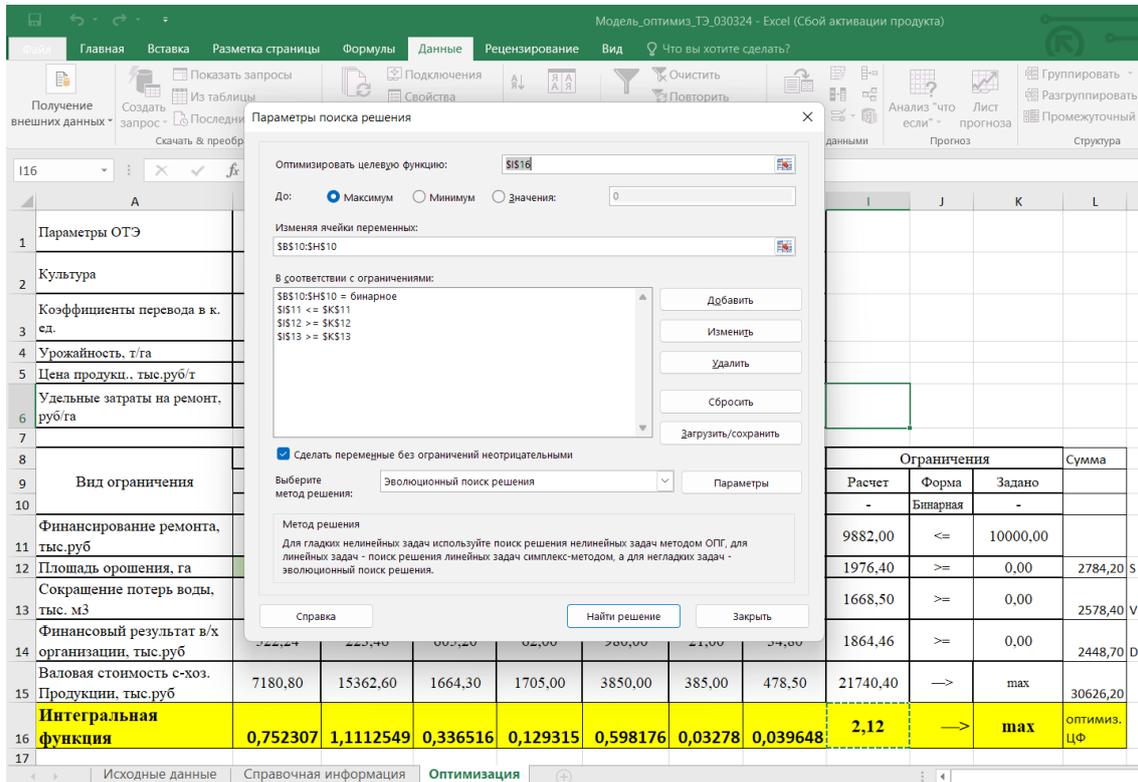


Рис. 2. Параметры оптимизации эволюционно-генетического алгоритма надстройки «Поиск решений» MS Excel

Fig. 2. Optimization parameters of the evolutionary-genetic algorithm of the “Search for solutions” add-in MS Excel

Таблица 3. Результаты многокритериальной оптимизации
Table 3. Results of multi-criteria optimization

Вид ограничений <i>Type of restrictions</i>	Переменные оптимизационной модели <i>Optimization model variables</i>							Ограничения <i>Restrictions</i>		
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Расчет <i>Calculation</i>	Форма <i>Form</i>	Задано
	0	1	1	0	1	1	1		Бинарная	-
Финансирование ремонта, тыс.руб <i>Financing of the repair, ths rbl</i>	3264	6983	757	775	1750	175	217,5	9882	<=	10000
Площадь орошения, га <i>Irrigation area, ha</i>	652,8	1397	151	155	350	35	43,5	1976,4	>=	0
Сокращение потерь воды, тыс. м ³ <i>Reduction of water losses, ths m³</i>	785,3	1337	90,3	125	186	30	25,3	1668,5	>=	0
Финансовый результат в/х организации, тыс. руб <i>Financial result of water economic organizations, ths rbl</i>	522,2	223,5	605	62	980	21	34,8	1864,5	>=	0
Интегральная функция <i>Integral form</i>	0,75	1,11	0,34	0,13	0,60	0,03	0,04	2,12	→	max

Таблица 4. Сводные данные оптимизации выбора первоочередных переменных оптимизационной модели

Table 4. Summary data of optimization of priority selection variables of the optimization

Критерии оптимизации <i>Optimization criteria</i>	Площадь орошения, га <i>Irrigation area, ha</i>	Сокращение потерь воды, тыс. м ³ <i>Reduction of water losses, ths m³</i>	Финансовый результат в/х организации, тыс. руб <i>Financial result of the water economic organization, ths rbl</i>	Интегральный нормированный результат <i>Integral normalized result</i>	% к показателю многокритериальной оптимизации <i>% to the indicator of multi criterial optimization</i>
1 Многокритериальный <i>Multi criterial</i>	1976,4	1668,5	1864,5		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,65	0,76	2.12	
2 Площадь орошения <i>Irrigation area</i>	1980,1	1702,8	1321,2		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,66	0,54	1,91	90,15
3 Сокращение потерь воды <i>Reduction of water losses</i>	1980,1	1702,8	1321,3		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,71	0,66	0,54	1,91	90,15
4 Финансовый результат в/х организации <i>Financial result of water economic organization</i>	1387,6	1241,8	2225,24		
Нормированное значение <i>Normalized value</i>	0,50	0,48	0,91	1,89	89,15

Выводы

Таким образом, создание, внедрение и использование в практике водопользования мелиоративного водохозяйственного комплекса математических моделей многокритериальной

оптимизации на основе искусственного интеллекта обеспечат возможность эффективного решения проблемы распределения ограниченных ресурсов на проведение ремонтно-восстановительных работ оросительных систем.

Список использованных источников

- Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Горбачев М.И. Цифровые технологии в АПК. Учебник. М.: ООО «Мегаполис», 2022. 220 с. EDN: YLLCWI.
- Манжина С.А., Ванеева П.Д. Исследование возможности создания объектов цифровой мелиорации в Российской Федерации // Beneficium. 2019. № 2 (31). С. 34-46. DOI: 10.34680/BENEFICIUM.2019.2(31).34-46.
- Орлова И.В., Половников В.А. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2010. 366 с.
- Rogachev D.A., Yurchenko I.F., Rogachev A.F. Management and Optimization of Systematic Water Adjustment by Economic-Mathematic Modeling Methods and AI // International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, 10-16 сентября 2023 г. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. PP. 888-893. DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272907.
- Иванов П.И., Ткаченко И.В. Экономико-математическое моделирование в АПК: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 254 с.
- Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk,

Reference

- Khudyakova E.V. Digital technologies in agriculture. Textbook / E.V. Khudyakova, M.N. Stepanantsevich, M.I. Gorbachev. M.: Megapolis LLC, 2022. 220 p. ISBN978-5-6049097-9-9. – EDN YLLCWI.
- Manzhina S.A. Investigation of the possibility of creating digital land reclamation facilities in the Russian Federation / S.A. Manzhina, P.D. Vaneeva // Beneficium. 2019. No. 2(31). pp. 34-46. DOI 10.34680/BENEFICIUM.2019.2(31).34-46.
- Orlova I.V., Polovnikov V.A. Economic and mathematical methods and models: computer modeling. Textbook. Moscow: INFRA-M, 2010. 366 p
- Rogachev D.A. Management and Optimization of Systematic Water Adjustment by Economic-Mathematic Modeling Methods and AI / D.A. Rogachev, I.F. Yurchenko, A.F. Rogachev // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, September 10-16, 2023. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 888-893. – DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272907.
- Ivanov P.I. Tkachenko, I.V. Economic and mathematical modeling in agriculture. A study guide. Rostov on Don, Phoenix, 2013. 254 p.
- Olgarenko V.I. Technical condition diagnostics of the water supply facilities in the irrigation systems / V.I. Olgarenko, I.V. Olgarenko, V.I. Olgarenko // IOP

1-5 октября 2019 г. Vol. 698 (2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. Pp. 022060. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022060.

7. **Куприяновский В.П., Липунцов Ю.П., Гринько О.В., Намиот Д.Е.** Агрокультура 4.0: синергия системы – систем, онтологии, интернета вещей и космических технологий // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Т. 6, № 10. С. 46-67.

8. **Бандури М.А.** Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса работоспособности водопроводящих сооружений оросительных систем. 2-е изд., перераб. и доп. Новочеркасск: ЛИК, 2021. 178 с.

9. **Бородычев В.В., Рогачев Д.А.** Оптимизация параметров оросительной системы в условиях сочетания в еЕ пределах орошаемого массива с богарным // Мелиорация и водное хозяйство. 2007. № 6. С. 23.

10. **Власов М.В., Васильев М.С., Григоров С.М.** Теоретическое обоснование совершенствования эксплуатации оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 3 (31). С. 23-38. DOI: 10.31774/2222-1816-2018-3-23-38.

11. **Рогачев Д.А., Юрченко И.Ф., Рогачев А.Ф.** Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 87-106. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106.

12. **Юрченко И.Ф.** Информационное обеспечение планирования мероприятий технической эксплуатации оросительных систем нового поколения // Основные результаты научных исследований института за 2017 год: Сборник научных трудов. М.: ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова, 2018. С. 352-363.

13. 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.

14. **Sharma S., Pathak B.K. & Kumar R.** Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Oper. Res. Forum 5, 43 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>

15. **Salotagi S., Mallapur J.D.** Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimed Tools Appl 83, 61139-61164 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>

Об авторе

Рогачев Дмитрий Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий; ORCID: 0009-0003-4014-4770, Rogachev.soft@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Рогачев Д.А. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись, имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 11.03.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 15.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 15.08.2024

Conference Series: Materials Science and Engineering, Kislovodsk, October 01-05, 2019. Vol. 698(2). Kislovodsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 022060. – DOI 10.1088/1757-899X/698/2/022060.

7. **Agroculture 4.0: synergy of system – systems, ontology, Internet of Things and space technologies / V.P. Kupriyanovsky Yu.P. Lipuntsov, O.V. Grinko, D.E. Namiot // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Vol. 6, No. 10. P. 46-67.**

8. **Banduri M.A.** Diagnostics of the technical condition and assessment of the residual life of the water supply facilities of irrigation systems / M.A. Bandurin. – 2nd edition, revised and supplemented. Novochoerkassk: LIK, 2021. 178 p. ISBN978-5-906932-03-8.

9. **Borodychev V.V.** Optimization of irrigation system parameters in conditions of combination of an irrigated massif with a rain forest within its limits / V.V. Borodychev, D.A. Rogachev // Melioration and water management. 2007. No. 6. P. 23.

10. **Vlasov M.V.** Theoretical justification for improving the operation of irrigation systems / M.V. Vlasov, M.S. Vasiliev, S.M. Grigоров // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Melioration Problems. 2018. No. 3(31). P. 23-38. – DOI 10.31774/2222-1816-2018-3-23-38

11. **Rogachev D.A.** Management of systemic water distribution based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods / D.A. Rogachev, I.F. Yurchenko, A.F. Rogachev // Melioration and hydraulic engineering. 2023. V. 13, No. 3. P. 87-106. – DOI 10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106.

12. **Yurchenko I.F.** Information support for planning measures for technical operation of irrigation systems of a new generation / I.F. Yurchenko // The main results of the Institute's scientific research in 2017: a collection of scientific papers. Moscow: A.N. Kostyakov Research Institute, 2018. P. 352-363.

13. Annual report on technical operation for 2022 of the Krasnogvardeysky branch. Section II. Water use and hydrometry. The State budgetary Institution of the Republic of Crimea "Crimean Department of Water Management and Land Reclamation".

14. **Sharma S., Pathak B.K. & Kumar R.** Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Oper. Res. Forum 5, 43 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>

15. **Salotagi S., Mallapur J.D.** Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimed Tools Appl 83, 61139-61164 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>

About the author

Dmitry A. Rogachev, CSc (Eng), leading researcher at the department of natural resources and information technology; ORCID: 0009-0003-4014-4770, Rogachev.soft@gmail.com

Rogachev D.A. carried out theoretical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. He has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.