

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

УДК 627.81:556.013:004.94



ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ГРАФИКОВ

Л.Д. Раткович^{1✉}, С.А. Соколова¹, Муалла Манхаль^{1,2}

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Сирийская Арабская Республика

Аннотация. Правила использования водных ресурсов водохранилищ (ПИБР) нуждаются в постоянном обновлении с учетом значительного числа факторов, влияющих на эффективность управления. Антропогенное изменение морфометрических функций, частичное заиление мертвого объема, изменение основных гидрологических характеристик оказывают существенное влияние на параметры водохранилищ и режим регулирования стока. Обоснование режима регулирования остается актуальной и традиционно сложной инженерной задачей ПИБР, дискутируемой на профессиональных совещаниях и в научных публикациях. В статье обсуждается методический подход, основанный на введении заданного алгоритма управления в процесс назначения интервального запроса к ресурсам водохранилища. Запрос при этом формулируется как двухпараметрическая степенная функция прогнозируемого ресурса за расчетный интервал времени (месяц). Варьируются показатель степени и относительная длина диапазона бесперебойного покрытия требований к водным ресурсам. Построены номограммы, иллюстрирующие влияние показателя степени на очертание зависимости требований к водохранилищу. На наш взгляд, данный подход существенно сокращает область Парето, исключая значительную часть множества формальных оптимумов. Алгоритм предлагаемой модели ориентирован на двухкритериальную оптимизацию, где в качестве критериев рассматриваются относительные величины суммарной годовой водоотдачи и суммы относительных интервальных ординат водопотребления. Единый функционал формируется путем линейной свертки критериев. Модель иллюстрируется на примере ресурсов реки Жиздра для серии из двух маловодных лет. В процессе моделирования баланса и оптимизации используются инструменты Excel включая процедуры «поиска решений» и VBA. Отмечается необходимость привлечения более мощных алгоритмов оптимизации для расчетов по длительным многолетним гидрологическим рядам.

Ключевые слова: имитационное моделирование, алгоритм модели, многокритериальная оптимизация, линейная свертка критериев, функция запроса, параметры водохранилища, процедура «поиска решения», область Парето

Формат цитирования: Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль. Оптимизационный алгоритм управления водными ресурсами водохранилищ для обоснования диспетчерских графиков // Природообустройство. 2024. № 4. С. 99-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

Original article

OPTIMIZATION ALGORITHM OF RESERVOIR WATER RESOURCES MANAGEMENT TO SUBSTANTIATE DISPATCH SCHEDULES

L.D. Ratkovich^{1✉}, S.A. Sokolova¹, Mualla Manhal^{1,2}

¹ Russian state agrarian university – Moscow Timiryazev agricultural academy, Institute of land reclamation, water management and construction named after A.N. Kostyakov; 127434, Moscow, Timiryazevskaya str., 49, Russia

² Syrian Arab Republic

Abstract. The rules for the use of reservoir water resources need to be constantly updated, considering a significant number of factors affecting the effectiveness of management. Anthropogenic changes in morphometric functions, partial siltation of dead volume, and changes in basic hydrological characteristics have a significant impact on reservoir parameters and flow regulation regime. Justification

of the regulatory regime remains an urgent and traditionally difficult engineering task of the IRP, discussed at professional meetings and in scientific publications. The article discusses a methodological approach based on the introduction of a given control algorithm into the process of assigning an interval request to the reservoir. In this case, the request is formulated as a two-parameter power function of the predicted resource for the estimated time interval (month). The degree indicator and the relative length of the range of uninterrupted water requirements coverage are the arguments of the query function. Nomograms illustrating the influence of the degree indicator on the outline of the dependence of requirements on the reservoir are constructed. In our opinion, this approach significantly reduces the Pareto set, excluding a significant part of the set of formal optima. The algorithm of the proposed model is focused on two-criteria optimization, where the relative values of the total annual water output and the sum of the relative interval ordinates of water consumption are considered as criteria. The unified functional is formed by linear convolution of criteria. The model was tested on the example of the resources of the Zhizdra River for a series of two low-water years. In the process of balance modeling and optimization, Excel tools are used, including "solution search" and VBA procedures. It is noted that it is necessary to use more powerful optimization algorithms for calculations based on multiyear hydrological series.

Keywords: simulation modeling, model algorithm, multi-criteria optimization, linear convolution of criteria, query function, reservoir parameters, "solution search" procedure, Pareto set

Format of citation: Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Mualla Manhal. Optimization algorithm of reservoir water resources management to substantiate dispatch schedules // Prirodoobustroystvo. 2024. № 4. P. 99-107. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-99-107>

Введение. Традиционное представление о диспетчерских графиках [1], являющихся ядром правил использования водных ресурсов водохранилищ (ПИБР) [2], ориентировано на послойную структуру зон ограничения гарантированной нормальной и пониженной водоотдачи. Теоретическое обоснование данного инструмента управления водохранилищами все еще недостаточно разработано, поскольку представления авторов о правомерности того или иного подхода [3-6] нередко связаны с их собственными представлениями об этой актуальной инженерно-математической задаче.

Исследования направлены не на рецензирование существующих методов, а на ряд аспектов, которые, на наш взгляд, не нашли достаточного отражения в безусловно высокопрофессиональных публикациях разных авторов. Практически отсутствует связь проектных решений с критериями удовлетворения требований потребителей, их связи с эксплуатационными условиями. Кроме того, оптимальное решение однозначно соответствует базовому гидрологическому ряду. Этот ряд, каким бы репрезентативным он ни был, является одной из возможных выборок. Поэтому управляющий алгоритм по возможности должен быть менее «зависимым» от выборки, но более связанным с критериями удовлетворения водопотребления.

Цель исследований заключается в совершенствовании алгоритма управления водными ресурсами водохранилищ на основе имитационного моделирования водохозяйственного

баланса с применением многокритериальной оптимизации.

Материалы и методы исследований.

Построение диспетчерских графиков – сложная многофакторная задача, что существенно ограничивает возможности построения стройной и строгой методики. По-видимому, имеет смысл работать над частными случаями, не слишком увлекаясь математическими построениями, но стремясь к убедительной простоте. Как правило, многолетний ретроспективный гидрологический ряд стока принимается за прототип будущего режима реки. Это привычно, хотя и не всегда обосновано по причинам, связанным с неоднородностью данных, недостаточной репрезентативностью информации, нестационарностью ЭВБ.

Опираясь на традиционные подходы, предположим, что существует ДГ, обеспечивающий наиболее выигрышный вариант многолетнего регулирования стока. Рассматриваем одно водохранилище с рассчитанной ранее полезной емкостью, не затрагивая мертвый объем, который в данном случае не влияет на ход рассуждений. Формализуем обычно имеющуюся исходную информацию:

• $S_{j, i}$ – многолетняя последовательность величин притока (многолетний гидрологический ряд, естественный или условно восстановленный с учетом репрезентативности и однородности) в каждом интервале расчетной разрезки года, предположим, помесечно. Возможно использование искусственных смоделированных рядов [5, 7].

Здесь j – месяц; i – индекс года в многолетней хронологической последовательности.

- $V_{j,i}$ – многолетний ход наполнения водохранилища – последовательность текущих значений наполнения полезной емкости на начало и конец расчетных интервалов соответственно, однозначно определяемая некоторой (искомой) функцией регулирования стока $\Delta V_{j,i}$ – например, сработка (+), аккумуляция (–).

- $V_{плз}$ – полезный объем водохранилища, известная величина, найденная ранее с помощью традиционных методов.

- $A_{н,j}$ – расчетные (нормативные) требования к водным ресурсам, поинтервальные – гидрограф водопотребления, сформированный комплексом водопотребителей и водопользователей. Запрос включает в себя отраслевое водопотребление и целевые попуски.

- $A_{м,j}$ – минимальные интервальные требования, сформулированные на стадии согласования структуры водохозяйственного комплекса.

- A_j – назначаемый запрос в соответствии с реализуемой методикой.

Формулируем постановку задачи: *найти функцию регулирования $\Delta V_{j,i}$, которая приводит к максимальной гарантированной водоотдаче или (что то же самое – к минимуму суммы дефицитов за многолетие) за расчетный период в абсолютных цифрах (первый критерий) и в долях нормативного водопотребления (второй критерий)*. Долевые требования, по сути, вводят весовые коэффициенты на интервальные цифры водопотребления. Это означает, что все интервальные ординаты гидрографа водопотребления будут одинаково значимыми. Последнее является принципиальным, иначе получается валовое значение водопотребления без привязки к внутригодовому режиму. В то же время абсолютными цифрами водоотдачи тоже нельзя пренебречь. В связи с этим нами была использована двухкритериальная оптимизация. Разумеется, критериальная система может усложняться с учетом специфики водопользователей (гидроэнергетика, навигация, экологические требования). Стремление к максимуму гарантированной водоотдачи не является новым [2, 8] – проблема заключается в том, чтобы корректно сформулировать критерии назначения запроса, определяющего эффективность регулирования [9-11]. Идея предлагаемого подхода состоит в том, чтобы формулировать запрос в каждом интервале времени в зависимости от прогнозируемого ресурса R (сумма наполнения водохранилища

на начало интервала и прогноза притока за расчетный интервал времени):

$$R_j = V_{j-1} + S_j, \quad (1)$$

где V_{j-1} – наполнение водохранилища на начало расчетного интервала времени.

Простое суммирование даже относительных дефицитов при большом объеме варьируемых переменных без какой-либо систематизации может оказаться формальной малоэффективной процедурой. Целесообразно внести определенные закономерности управления посредством введения функции запроса $A = f(V)$. Для этой цели предлагается формула (1), которая после раскрытия выражения в квадратных скобках принимает форму (2):

$$A_j = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{R_j}{k_j \cdot R_{j,max}} \right]^{m_j}; \quad (1)$$

$$A_j = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{V_{j-1} + S_j}{k_j \cdot (V_{плз} + A_{н,j})} \right]^{m_j}, \quad (2)$$

где m_j – показатель степени; k – коэффициент, разделяющий диапазоны бесперебойной и сниженной водоотдачи.

В числителе дроби (1) – величина располагаемого прогнозируемого ресурса, а знаменатель – произведение достаточно большой величины $R_{j,max}$ на разделяющий зоны коэффициент k . Эскизные номограммы графика функции $A = f(R_j, m)$ представлены на рисунке 1. Показатель степени m характеризует кривизну кривых в интервале значений отдачи $[A_{м,j}, A_{н,j}]$ и прогнозируемого потенциального ресурса R_j . На выражение (1) накладывается следующее ограничение: если числитель дроби R_j оказывается больше некоторого переходного значения $R_{пер} = k_j \cdot R_{j,max}$, то требования к водным ресурсам назначаются в объеме нормальной гарантированной отдачи $A_{н,j}$. Величина $R_{пер}$ – переходное значение потенциального ресурса – не должна превышать $R_{max,j} = V_{плз} + A_{н,j}$. Значение коэффициента k_j , вернее $(1 - k_j) \cdot 100\%$, характеризует внутригодовую бесперебойность (обеспеченность покрытия требований). В условиях описанных ограничений и структуры формул (1) и (2) очевидно, что $A_j \in [A_{м,j}, A_{н,j}]$.

Принимаем вид функции (1) одинаковым для всех интервалов, а значения $A_{м,j}$, $A_{н,j}$, $R_{пер,j}$, m_j – неизменными для всех лет расчетного гидрологического ряда. Меняются, естественно, значения объемов стока за интервал. Балансовые уравнения отслеживают режим регулирования притока $\Delta V_{j,i}$ (сработка +; наполнение –), а также наполнение водохранилища

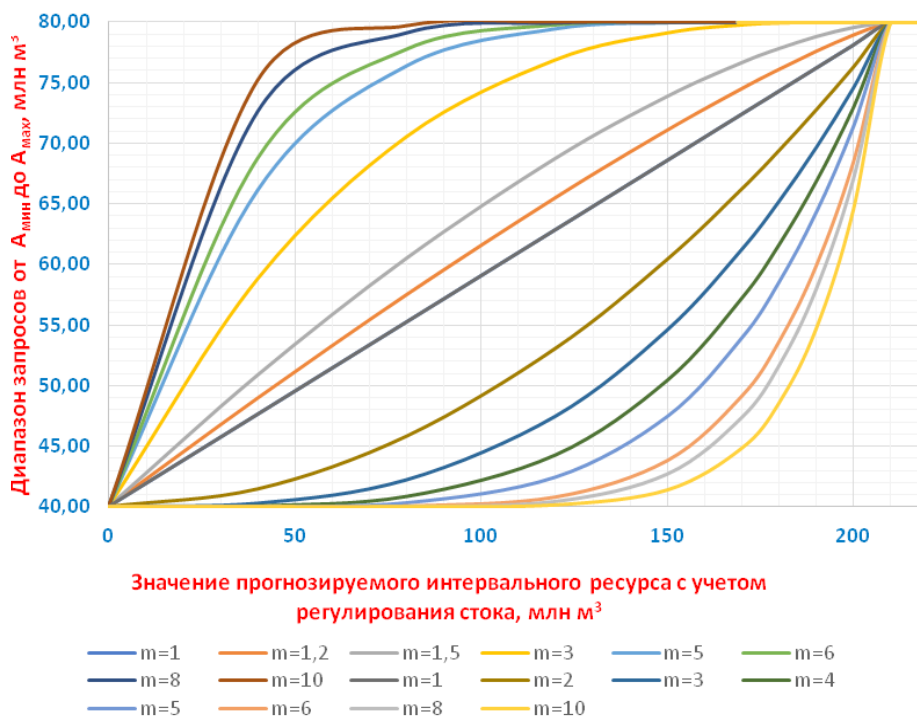


Рис. 1. Вид зависимости назначаемой интервальной отдачи водохранилища (A) от прогнозируемого ресурса

Fig. 1. Type of dependence of the assigned interval return of the reservoir (A) on the predicted resource

на начало и конец расчетного интервала времени: $V_{j-1,i}$; $V_{j,i}$. Неизвестными параметрами являются $R_{пер,j}$, m_j . Поскольку $R_{пер,j} = k_j \cdot (V_{плз} + A_{н,j})$, независимыми следует считать m_i и k_j .

Целесообразность разных m и k для каждого месяца можно обсуждать, однако введение большого числа переменных в данном случае вряд ли имеет смысл. Кроме того, используемый инструментарий пока недостаточен для таких задач в силу размерности. По той же причине мы сейчас не можем задействовать длительный гидрологический ряд, и в расчетном примере рассмотрена серия двух маловодных лет для иллюстрации предлагаемой методики.

С учетом вышеизложенного формулируем задачу двухкритериальной оптимизации:

первый критерий Kr_1 – сумма поинтервальных объемов гарантированной отдачи за исследуемый многолетний период;

второй критерий Kr_2 – сумма относительных значений гарантированной отдачи:

$$Kr_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (A_{н,j} - D_{j,i}) \rightarrow \max; \tag{3}$$

$$Kr_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{A_{н,j} - D_{j,i}}{A_{н,j}} \rightarrow \max, \tag{4}$$

где $D_{j,i}$ – дефицит.

Для решения многокритериальности используем линейную свертку критериев, в результате которой получаем единый функционал:

$$Kr = \frac{Kr_1}{N} \cdot \mu + \frac{Kr_2}{M \cdot N} \cdot (1 - \mu) \rightarrow \max. \tag{5}$$

Совмещая (3-5) с балансовыми уравнениями, приходим к смешанной системе уравнений, неравенств и целевой функции (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{j,i} \pm \Delta V_{j,i} \geq A_{j,i} - \text{минимальная водоотдача выдерживается всегда} \\ V_{j,i} = V_{(j-1),i} \mp \Delta V_{j,i} \\ V_{плз} \geq V(j,i) \geq 0 \\ A_{j,i} = A_{м,j} + (A_{н,j} - A_{м,j}) \cdot \left[\frac{V(j-1,i) + S(j,i)}{k \cdot (V_{плз} + A_{н,j})} \right]^{m_j}, m_j \in [0.1, 10] \\ A_{j,м} \leq A_{j,i} \leq A_{j,н} \\ Kr = \frac{Kr_1}{N} \cdot \mu + \frac{Kr_2}{M \cdot N} \cdot (1 - \mu) \rightarrow \max; \mu \in [0; 1]. \end{array} \right. \tag{6}$$

Результаты исследования. Теоретическая основа предлагаемой модели описана выше. Модель реализована в среде Excel с использованием процедуры «поиска решения» и VBA. В качестве объекта для демонстрации методики выбран створ на реке Жиздре, левом притоке Оки в Калужской области. Выбрана река со «средними» для категории средних рек показателями по норме стока и коэффициенту вариации. Параметры стока получены по восстановленному для внутреннего пользования гидрологическому ряду (1933-2019) прерывистых и неполных наблюдений в створе г. Козельска (площадь водосбора 6940 км², $Q_{\text{ср}} = 35,5 \text{ м}^3/\text{с}$).

Гидрологические характеристики речного стока с учетом последних десятилетий характеризуются кривой обеспеченности годового стока (рис. 3), построенной по расчетным значениям среднемноголетнего стока и коэффициента вариации применительно к распределению Пирсона III типа.

При заданных значениях полезного объема, наполнения на начало расчетного периода и параметра линейной свертки получены оптимальные значения m и Kr (табл. 1), где входные данные модели управления (зеленый цвет) даны вместе с результатом оптимизации (красный цвет). Расчетный листинг модели баланса приводится в таблице 2.



Рис. 2. Схема водосбора реки Жиздра

Fig. 2. Diagram of the Zhizdra River basin

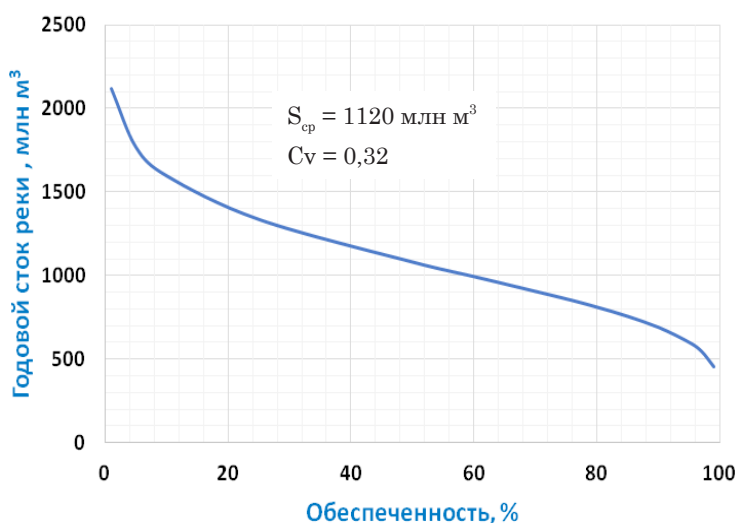


Рис. 3. Аналитическая кривая обеспеченности годового стока в створе возможного размещения гидроузла

Fig. 3. The analytical curve of the annual runoff in the range of the possible location of the hydraulic unit

Таблица 1. Параметры задачи, полученные в ходе имитационного моделирования

Table 1. Task parameters obtained during simulation

Параметры задачи	
M	0,50
M	0,31
K_r	0,50
$V_{\text{пла}}$	200,00
V_0	0,00
K_r	0,985

Соотношение гарантированной водоотдачи в условно расчетном створе реки Жиздры при отсутствии регулирования ($A_{\text{гар-бр}}$) и в условиях регулирования стока ($A_{\text{гар-рег}}$) на фоне минимального ($A_{\text{мин}}$) и нормативного гидрографа водопотребления ($A_{\text{норм}}$) показано на рисунке 4 в месячном разрезе.

На рисунке 5 приведены результаты регулирования притока в годовых объемах.

Обсуждение. Исследования в области управления водными ресурсами являются неизменно актуальными и находятся в центре внимания научного сообщества. При разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ и их главной составляющей,

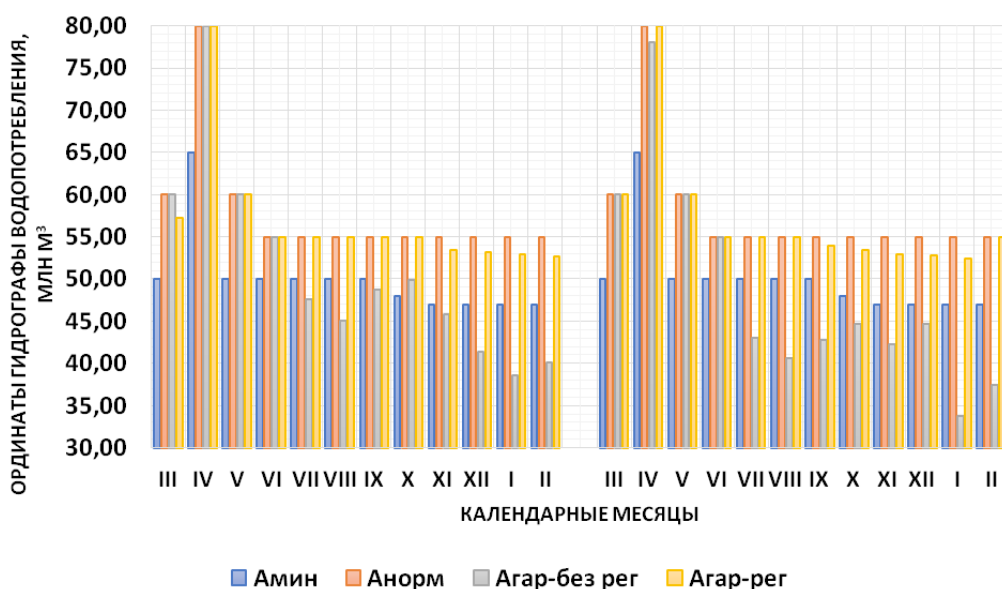


Рис. 4. Гидрографы гарантированного водопотребления двух смежных маловодных лет реки Жиздры 85%- и 90%-ной обеспеченности в створе потенциального гидроузла на фоне нормированных и минимальных требований включая санитарно-экологический попуск
 Fig. 4. Hydrographs of guaranteed water consumption of two related low-water years of the Zhizdra River of 85% and 90% availability in the range of a potential hydroelectric facility against the background of standardized and minimum requirements, including sanitary and environmental release

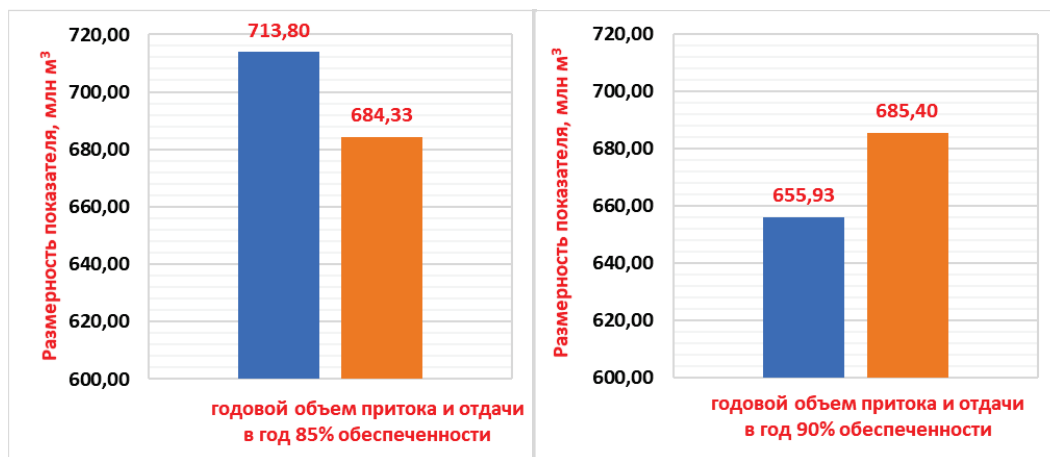


Рис. 5. Соотношение гарантированной отдачи и годового притока к водохранилищу
 Fig. 5. The ratio of guaranteed return and annual inflow to the reservoir

Таблица 2. Модель водохозяйственного баланса
Table 2. Water management balance model

$R_{\text{пер}}$	Календарные месяцы водохозяйствен- ного года	Приток, млн м ³	(+р, - нап)	объем водохранилища на начало интервала	объем водохранилища на конец интервала	Распотаемые ресурсы	Потенциальные ресурсы	$A_{\text{мин}}$	$A_{\text{норм}}$	Функция запроса, A	Дефицит, запланированный	Дефицит по отношению к $A_{\text{норм}}$	Планируемая отдача - 1 критерий	Планируемая отдача - 2 критерий	Дефицит по отношению к Амин (по факту)	Сборили резерв для повышения отдачи
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
130,00	III	92,13	-34,87	0,00	34,87	57,26	92,13	50,00	60,00	57,26	2,74	2,74	57,26	0,95	0,00	0,00
140,00	IV	109,24	-29,24	34,87	64,11	80,00	144,11	65,00	80,00	80,00	0,00	0,00	80,00	1,00	0,00	0,00
130,00	V	82,66	-22,66	64,11	86,77	60,00	146,77	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VI	72,62	-17,62	86,77	104,39	55,00	159,39	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VII	47,54	7,46	104,39	96,92	55,00	151,92	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VIII	45,09	9,91	96,92	87,01	55,00	142,01	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	IX	48,78	6,22	87,01	80,79	55,00	135,79	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	X	49,92	5,08	80,79	75,70	55,00	130,70	48,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	XI	45,75	7,62	75,70	68,09	53,37	121,45	47,00	55,00	53,37	1,63	1,63	53,37	0,97	0,00	0,00
127,50	XII	41,41	11,76	68,09	56,33	53,17	109,50	47,00	55,00	53,17	1,83	1,83	53,17	0,97	0,00	0,00
127,50	I	38,55	14,35	56,33	41,99	52,90	94,89	47,00	55,00	52,90	2,10	2,10	52,90	0,96	0,00	0,00
127,50	II	40,12	12,52	41,99	29,47	52,64	82,11	47,00	55,00	52,64	2,36	2,36	52,64	0,96	0,00	0,00
130,00	III	123,61	-63,61	29,47	93,07	60,00	153,07	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
140,00	IV	78,07	1,93	93,07	91,14	80,00	171,14	65,00	80,00	80,00	0,00	0,00	80,00	1,00	0,00	0,00
130,00	V	68,94	-8,94	91,14	100,08	60,00	160,08	50,00	60,00	60,00	0,00	0,00	60,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VI	56,06	-1,06	100,08	101,14	55,00	156,14	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VII	43,05	11,95	101,14	89,19	55,00	144,19	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	VIII	40,54	14,46	89,19	74,73	55,00	129,73	50,00	55,00	55,00	0,00	0,00	55,00	1,00	0,00	0,00
127,50	IX	42,70	11,23	74,73	63,50	53,94	117,44	50,00	55,00	53,94	1,06	1,06	53,94	0,98	0,00	0,00
127,50	X	44,72	8,66	63,50	54,85	53,37	108,22	48,00	55,00	53,37	1,63	1,63	53,37	0,97	0,00	0,00
127,50	XI	42,30	10,64	54,85	44,21	52,94	97,15	47,00	55,00	52,94	2,06	2,06	52,94	0,96	0,00	0,00
127,50	XII	44,64	8,14	44,21	36,07	52,78	88,85	47,00	55,00	52,78	2,22	2,22	52,78	0,96	0,00	0,00
127,50	I	33,81	18,56	36,07	17,52	52,37	69,88	47,00	55,00	52,37	2,63	2,63	52,37	0,95	0,00	0,00
127,50	II	37,48	17,52	17,52	0,00	54,99	54,99	47,00	55,00	51,99	3,01	0,01	54,99	1,00	0,00	3,01
	ГОДЫ	1369,73	0,00			1369,73	2961,67	1202,00	1390,00	1366,72	23,28	20,27	1369,73	23,64	0,00	3,01

диспетчерских графиков, должны сочетаться основные проектные решения и принятые критерии удовлетворения требований водопользователей. Представляется, что эта задача на сегодняшний день в полной мере не решена. По-прежнему спорными остаются вопросы имитационно-оптимизационного подхода в разработке стратегии регулирования стока, необходимости и корректности многокритериальной оптимизации, структуры водохозяйственных балансов в процессе определения параметров водохранилищ и алгоритме управления водными ресурсами.

Выводы

В статье предлагается методика назначения режима гарантированной отдачи

водохранилищ в зависимости от прогнозируемого ресурса за расчетный интервал времени и наполнения водохранилища на начало интервала. При этом достигается максимальная гарантированная водоотдача в рамках двухкритериальной оптимизации. Очевидно, решение задачи большой размерности в общем виде, с опорой на продолжительные гидрологические ряды, возможна только с привлечением мощных средств оптимизации. Пробная версия модели реализована в среде Excel с использованием средств VBA и алгоритма «поиска решения». В дальнейших исследованиях планируется использование расширенного пакета программ «Solver», позволяющего ставить задачи для многолетних гидрологических рядов и многокритериальной оптимизации.

Список использованных источников

1. Водохозяйственные системы и водопользование: учебник / Под ред. Л.Д. Ратковича и проф. В.М. Маркина. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 452 с.
2. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ. Приказ Минприроды РФ от 26.01.2011 N17 Об утверждении Методических указаний по разработке правил использования водохранилищ. <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-26012011-n-17/?ysclid=m1084ejhh0417635829>
3. Асарин А.Е., Бестужева К.Н., Христофоров А.В., Чалов С.Р. Водохозяйственные расчеты: учебное пособие. Географический факультет МГУ. М.: МГУ, 2012. 144 с.
4. Чокин Ш.Ч., Баишев Б.Б., Григорьев В.В. Расчеты водохранилищ многоцелевого назначения: Научное издание. Алма-Ата: Наука, 1983. 206 с.
5. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications – Unesco Publishing. Turin, 2005. 680 p.
6. Daniel P. Loucks and John S. Gladwell. Sustainability Criteria for Water Resource Systems: Cambridge University Press, 2008. 156 с.
7. Ratkovich L.D., Bakshtanin A.M., Glazunova I.V., Plokhikh N.E. Aspects of Multi – Year Flow Control. In Relation To Transboundary Rivers // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29, № S4. Pp. 2418-2439. EDN: HNIGCR.
8. Buber A., Bolgov M., Buber V. Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga-Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem // Applied Sciences (Switzerland). 2023. Vol. 13, № 8. P. 4768.
9. Муалла М., Раткович Л.Д. Оценка водообеспеченности в речном бассейне на основе обобщенных критериев покрытия водопотребления // Гидротехническое строительство. 2023. № 10. С. 42-47.
10. Перминов А.В., Ильинич В.В., Наумова А.А. Практикум по регулированию стока. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. 153 с. EDN: MXSCEN.

References

1. Water management systems and water use: Textbook / Ed. by L.D. Ratkovich and Prof. V.M. Markin. Moscow, INFRA-M Scientific and Publishing Center Publ., 2019. 452 p.
2. Guidelines for the development of rules for the use of reservoirs. Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 26.01.2011 No. 17 On approval of the Guidelines for the development of rules for the use of reservoirs. <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-26012011-n-17/?ysclid=m1084ejhh0417635829>
3. Asarin A.E., Bestuzheva K.N., Khristoforov A.V., Chalov S.R. Water management calculations: Textbook. Faculty of Geography of Moscow State University. Moscow, MGU Publ., 2012. 144 p.
4. Sh.Ch. Chokin B.B. Baishev. V.A. Grigorjev. Calculations of multi-purpose water management: scientific publication / Ministry of energetics and electrification of the USSR, Kazakh research institute. Alma-Ata: Nauka, 1983. 206 p.
5. Loucks D.P. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications / D.P. Loucks, E. Van Beek. – Unesco Publishing, Turin, 2005. 680 p.
6. Daniel P. Loucks and John S. Gladwell. Sustainability Criteria for Water Resource Systems: Cambridge University Press, 2008. 156 s.
7. Aspects of Multi-Year Flow Control In Relation To Transboundary Rivers / L.D. Ratkovich, A.M. Bakshtanin, I.V. Glazunova, N.E. Plokhikh // International Journal of Advanced Science and Technology 2020. Vol. 29, No. S4. P. 2418-2439. – EDN HNIGCR.
8. Buber A. Statistical and Water Management Assessment of the Impact of Climate Change in the Reservoir Basin of the Volga-Kama Cascade on the Environmental Safety of the Lower Volga Ecosystem / A. Buber, M. Bolgov, V. Buber // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, No. 8. – P. 4768
9. Mualla M., Ratkovich L.D. Assessment of the of water availability in the river basin on the basis of the generalized criteria of covering water consumption // Hydro technical building. 2023. № 10. P. 42-47.
10. Perminov A.V., Pjinich V.V., Naumova A.A. Practicum on flow regulation. Moscow: Russian State

11. Ильинич В.В., Перминов А.В., Гавриловская Н.В. Использование байесовских технологий для оценки вероятностных характеристик функционирования водохранилища // Известия Алтайского государственного университета. 2023. № 1 (129). С. 95-99. DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-15. EDN: CEXPHC.

Об авторах

Лев Данилович Раткович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0002-6900-2640>; Scopus Author ID: 6506421682; SPIN-код: 5300-5669, AuthorID: 527541; levkivr@mail.ru

Светлана Анатольевна Соколова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; SPIN-код: 3004-0140, AuthorID: 939094; 57218659380 Scopus; AAE-3539-2022 WOS; sokolovasvetlana@mail.ru

Манхаль Муалла, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; manhal.moualla@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись.

Раткович Л.Д., Соколова С.А., Муалла Манхаль имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 06.05.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 19.08.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 19.08.2024

Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 2021. 153 p. EDN: MXSCEN.

11. Пjinich V.V., Perminov A.V., Gavrilovskaya N.V. Use of Bayesian technologies for assessing probabilistic characteristics of reservoir functioning. 2023. № 1 (129). P. 95-99. DOI: 10.14258/izvasu(2023)1-15. EDN: CEXPHC

About the authors

Lev D. Ratkovich, DSc (Eng), professor, professor of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; <https://orcid.org/0000-0002-6900-2640>; Scopus Author ID: 6506421682; SPIN-code: 5300-5669, AuthorID: 527541; levkivr@mail.ru

Svetlana A. Sokolova, CSc (Eng), associate professor of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; SPIN-код: 3004-0140, AuthorID: 939094; 57218659380 Scopus; AAE-3539-2022 WOS; sokolovasvetlana@mail.ru

Manhal Mualla, post graduate student of the department of hydraulics, hydrology and management of water resources; manhal.moualla@mail.ru

Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Manhal Mualla carried out practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote a manuscript.

Ratkovich L.D., Sokolova S.A., Manhal Mualla have a copyright to the article and are responsible for plagiarism.