

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ГРАФИКА УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ КОМПЛЕКСА “ОЗ. БАЙКАЛ – ИРКУТСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ” НА ОСНОВЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ТЕОРИИ КОМПРОМИССОВ¹

© 2025 г. А. Л. Бубер^{a, b}, М. В. Болгов^{b, *}, В. Б. Бубер^a

^aФедеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова

^bИнститут водных проблем РАН

*e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 07.06.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Рассмотрены подходы к формированию оптимальных компромиссных диспетчерских графиков управления водными ресурсами Иркутского водохранилища (оз. Байкал) на основе методов многокритериальной оптимизации. Сформировано множество альтернативных решений в соответствии с перечнем различных вариантов иерархии приоритетов водопользователей. Определено множество недоминируемых по используемым критериям решений.

Ключевые слова: озеро Байкал, Иркутское водохранилище, компромиссное управление, многокритериальная оптимизация, диспетчерские правила, недоминируемые решения.

DOI: 10.31857/S0321059625030145 EDN: SYB1WX

ВВЕДЕНИЕ

Сложные водохозяйственные системы (ВХС) включают речную сеть с каскадами водохранилищ, системы каналов и гидротехнических сооружений, предназначенных для обеспечения использования и охраны водных ресурсов. ВХС, как правило, имеют многоцелевое назначение и служат для обеспечения водой водопользователей различного профиля. ВХС выполняют синхронизированную подачу воды, обеспечивающую водопользователей в различные сезоны года. Основными водопользователями являются: сельское и рыбное хозяйство, коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение, экология, судоходство, рекреация, производство гидроэнергии и т. п. Особыми водопользователями являются организации, ответственные за реализацию мероприятий по защите от нега-

тивного воздействия вод и ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций. Требования к функционированию ВХС носят, как правило, сезонный характер, что учитывается при разработке правил управления и определяет режимы работы водозаборных сооружений.

Решения, принимаемые в области управления водными ресурсами, неизбежно связаны с поиском компромиссов среди конкурирующих возможностей или целей. Одной из задач, которые решаются при управлении водными ресурсами, является оценка альтернативных планов и выявление компромиссов среди конкурирующих возможностей, целей или задач. Технически обоснованные варианты компромиссных решений используются лицами, принимающими решение (ЛПР), а “наилучшее” компромиссное решение вырабатывается и принимается в процессе дискуссий и переговоров с участием всех заинтересованных водопользователей. Площадка для проведения таких дискуссий в Российской Федерации – Бассейновые советы, а для

¹ Часть работы, связанная с обработкой нестационарных рядов, выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема № FMWZ-2022-0001).

проведения переговоров – межведомственные рабочие группы, которые оперативно формируют режимы работы гидротехнических сооружений, входящих в ВХС.

Работа с многовариантными предложениями и альтернативными решениями предполагает получение количественных оценок различных управленческих решений, для чего используются критерии эффективности, которые рассчитываются исходя из целевых функций (ЦФ). Функции, определяющие цели, могут включать понятия максимизации или минимизации, т. е. минимизация затрат, максимизация чистой прибыли, максимизация надежности, максимизация качества воды, максимизация биологического разнообразия экосистем, сведение к минимуму дефицита водных ресурсов, максимальных отклонений от заданного объема водохранилищ и заданного распределения водных ресурсов (минимизация количества перебоек при подаче воды водопользователям), минимизация вредного воздействия вод.

Для формирования альтернативных компромиссных планов разрабатываются, как правило, математические модели, основанные на оптимизационных методах. Результативность функционирования оптимизационных моделей зависит от алгоритма, используемого для решения. Некоторые алгоритмы гарантируют нахождение наилучшего решения, другие могут гарантировать только нахождение локального оптимума. Некоторые из них включают в себя алгебраические методы “математического” программирования, в других же используются методы детерминистического или случайного эмпирического поиска. Применимость каждого метода зависит от математической структуры модели. В настоящее время ни один тип моделей не может считаться наилучшим для всех вопросов и проблем, встречающихся в планировании и управлении водными ресурсами [10].

Оптимизационные модели позволяют идентифицировать компромиссы между требованиями водопользователей, но они не могут определить наилучшее решение. Модели способны помочь выявить и оценить альтернативные варианты, но они не могут занять место человека

при принятии решения. Поэтому окончательное наилучшее компромиссное решение принимается на основе обсуждения множества представленных профессионалами альтернативных планов, разработанных на основе многокритериальной оптимизации и теории компромиссов. Для формирования множества альтернативных планов (сценариев) должен быть сформирован перечень различных вариантов иерархии приоритетов водопользователей, обычно связанный с лексикографическим упорядочением (группы водопользователей с наивысшим приоритетом, нормальным приоритетом, менее значимые, не-существенные и т. д.).

Регулирование режимов работы ВХС, включающей Иркутскую ГЭС и оз. Байкал, является многокритериальной задачей. В соответствии с методическими указаниями по разработке ПИВР [3], формирование режимов работы водохранилищ основано на применении диспетчерских графиков (ДГ), и данная статья посвящена разработке “оптимальных” компромиссных ДГ методами многокритериального анализа и теории компромиссов. На основе оптимизационных методов формируется множество альтернативных решений (координат оптимальных ДГ) в соответствии с перечнем различных вариантов иерархии приоритетов требований водопользователей (критериев). В качестве целевых функций (критериев) используется обеспеченность по числу бесперебойных интервалов или лет [10]. Множество недоминируемых решений определяется на основе визуализации матрицы решений методами многокритериального анализа (методом достижимых целей).

Спецификой рассматриваемого водного объекта является преобладание дождевого питания в общем притоке воды к водохранилищу, что делает очень сложным его долгосрочное прогнозирование. Чувствительность формирования стока к климатическим факторам определяет высокую вероятность группировок маловодных и многоводных лет, что сказывается на характеристиках регулирования стока. Эти и многие другие вопросы влияния климатических факторов на гидрологический режим подробно освещены в современных публикациях ([1, 2, 5] и др.). В данной статье в качестве характеристики водных ре-

сурсов принят временной ряд полезного притока за более чем 100-летний период.

МЕТОДЫ

Многокритериальный анализ

Эффективные решения, — это решения, которые не могут быть изменены без ухудшения одного или нескольких целевых значений. Многокритериальные методы, или методы многокритериального анализа, не предназначены для определения лучшего решения, они обеспечивают информацией о компромиссах между данными множествами количественных критериев эффективности [10]. Любое окончательное решение будет принято в процессе обсуждения на основе качественной и количественной информации. Определение допустимых и эффективных планов является более простой задачей, чем решение, какой из этих эффективных планов лучший.

Когда различные цели планирования или управления водными ресурсами не могут быть объединены в единичную скалярную функцию цели, должна применяться многоцелевая модель. Векторная проблема оптимизации формулируется следующим образом. Пусть вектор X представляет множество неизвестных величин переменных решения, которые требуется определить, а $Z_j(X)$ есть эффективный критерий или цель, которая должна максимизироваться. Каждый эффективный критерий или цель j есть функция от этих неизвестных величин переменных решения. Допустим, что все цели $Z_j(X)$, $j = 1, 2, \dots, J$, максимизируются, тогда модель может быть записана следующим образом:

максимизировать

$$[Z_1(X), Z_2(X), \dots, Z_j(X), \dots, Z_J(X)] \quad (1)$$

при ограничениях:

$$q_i(X) = b_i, i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Цель в выражении (1) есть вектор, состоящий из J отдельных целей. Область допустимых решений определяет m ограничений $q_i(X) = b_i$.

Вектор модели оптимизации есть выразительный способ формулировки многоцелевой (многокритериальной) проблемы, но он бесполезен для ее решения. В реальности вектор может быть максимизирован, если он может быть преобразован (свернут) в скаляр. Таким образом, проблема многокритериального планирования и управления, определенная выше, не может в общем случае быть решена без дополнительной информации. Целью многокритериального моделирования является генерация множества технологически достижимых и эффективных планов. В данном случае оценкой “оптимальности” решения является обеспеченность требований водопользователя.

Доминирование

Определим план X как доминирующий над всеми другими, если его целевые значения равны значениям или превышают их для всех целей других планов и существует по крайней мере одна целевая величина, которая строго больше, чем у всех других планов. Допустим, что все цели j максимизируются, тогда альтернативный план i , X_i доминирует, если

$$Z_j(X_i) \geq Z_j(X_k) \text{ для всех целей } j \text{ и планов } k \quad (3)$$

и для каждого плана $k \neq i$ есть по крайней мере одна цель j^* , такая, что

$$Z_{j^*}(X_i) > Z_{j^*}(X_k). \quad (4)$$

Доминируемые планы могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Эффективные решения, которые не могут быть “худшими” или над которыми нет доминирующих решений, часто называются оптимальными Паретовскими решениями, потому что они удовлетворяют условиям, предложенным В. Парето (Pareto), а именно — чтобы улучшить величину одной цели, необходимо ослабить по крайней мере одну из других целей.

Методы весов, ограничений и достижимых целей — это три наиболее эффективных общих подхода для определения недоминантных планов, которые вместе определяют эффективные компромиссы среди всех целей

$Z_j(X)$. Для того, чтобы сгенерировать точки на границе производственной целевой функции для этих методов требуется численное решение одноцелевой оптимизационной модели управления.

Визуализация процесса принятия “оптимального” компромиссного решения на основе анализа всех недоминируемых решений выполняется на разработанном в вычислительном центре им. А.А. Дородницына (автор Лотов А.В.) программном комплексе Pareto Front Viewer, реализующим метод достижимых целей [7].

Метод весов

В данном исследовании для поиска оптимальной конфигурации ДГ использован метод весов. Весовой подход включает назначение относительных весов каждой цели для того, чтобы перевести вектор цели в модели (1)–(2) в скаляр [10]. Этот скаляр является взвешенной суммой относительных целевых функций (критериев). Веса назначаются в соответствии с выбранными приоритетами требований водопользователей. Многокритериальная модель (1)–(2) приобретает следующий вид:

максимизировать

$$Z = w_1 Z_1(X) + w_2 Z_2(X) + \dots + w_j Z_j(X) + \dots + w_J Z_J(X) \quad (5)$$

при ограничениях:

$$q_i(X) = b_i, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где неотрицательные веса определены как константы. Для того чтобы сгенерировать множество технически эффективных (не ухудшаемых) планов, величины весов w_j систематически варьируются и модель решается для каждой комбинации значений этих весов.

Описание требований водопользователей, определяющих критерии оптимизации

В случае когда требования водопользователей конфликтуют друг с другом, возникает задача поиска компромиссных управленческих решений, позволяющих формировать согласованные с заинтересованными лицами режимы работы ВХС. Определение оптимальных компромиссных управленческих решений – сложная задача, которая, как правило, решается методами многокритериальной оптимизации и теории компромиссов. В соответствии с [4], попуски из водохранилищ формируются на основе использования принципа диспетчеризации по текущим уровням верхних бьефов и краткосрочному прогнозу притока к водохранилищам. В данной работе выполнен поиск ряда компромиссных диспетчерских графиков (ДГ), позволяющих Лицу, принимающему решение (ЛПР), на основе переговоров с заинтересованными водопользователями выбрать “оптимальную” в смысле Парето конфигурацию ДГ.

Множество альтернативных диспетчерских графиков для многокритериального анализа

Таблица 1. Перечень критериев и требования водопользователей к их величине

№	Критерий	Минимум	Максимум
1	Допустимый диапазон, м	455.8	457.3
2	Максимальный уровень Байкала, м		457.3
3	Минимальный уровень Байкала, м	455.8	
4	Максимальный сброс в зимний период, м ³ /с		2500
5	Санитарно-транспортный попуск (май–октябрь), м ³ /с	1500	
6	Водоснабжение, сниженный транспортный попуск с марта по ноябрь, м ³ /с	1300	
	Санитарный зимой (декабрь–февраль), м ³ /с	1250	
7	Противопаводковый попуск, м ³ /с		3200
8	Гарантированная мощность зимой, МВт	347	
9	Нормальная работа водозаборов – уровень верхнего бьефа ИГЭС, м	454	
10	Напор на плотине, м	26	
		456	456.2
11	Предполоводная сработка к 1 мая, м; рыбный, экологический уровень, сентябрь, м	456.9	457.1

Таблица 2. Сценарии оптимизации со штрафными коэффициентами для принятых критериев

Код сценария	Штрафы по критериям (из табл. 1)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sc001	0.4	0.4	0.4	0.8	1	1	8	1	1	1	0.4
Sc002	4	4	4	0.8	1	1	8	1	1	1	4
Sc003	40	40	40	0.8	1	1	8	1	1	1	40
Sc004	0.4	0.4	0.4	8	1	1	8	1	1	1	0.4
Sc005	4	4	4	8	1	1	8	1	1	1	4
Sc006	40	40	40	8	1	1	8	1	1	1	40
Sc007	0.4	0.4	0.4	80	1	1	8	1	1	1	0.4
Sc008	4	4	4	80	1	1	8	1	1	1	4
Sc009	40	40	40	80	1	1	8	1	1	1	40
Sc010	0.4	0.4	0.4	0.8	10	10	8	1	10	1	0.4
Sc011	4	4	4	0.8	10	10	8	1	10	1	4
Sc012	40	40	40	0.8	10	10	8	1	10	1	40
Sc013	0.4	0.4	0.4	8	10	10	8	1	10	1	0.4
Sc014	4	4	4	8	10	10	8	1	10	1	4
Sc015	40	40	40	8	10	10	8	1	10	1	40
Sc016	0.4	0.4	0.4	80	10	10	8	1	10	1	0.4
Sc017	4	4	4	80	10	10	8	1	10	1	4
Sc018	40	40	40	80	10	10	8	1	10	1	40
Sc019	0.4	0.4	0.4	0.8	100	100	8	1	100	1	0.4
Sc020	4	4	4	0.8	100	100	8	1	100	1	4
Sc021	40	40	40	0.8	100	100	8	1	100	1	40
Sc022	0.4	0.4	0.4	8	100	100	8	1	100	1	0.4
Sc023	4	4	4	8	100	100	8	1	100	1	4
Sc024	40	40	40	8	100	100	8	1	100	1	40
Sc025	0.4	0.4	0.4	80	100	100	8	1	100	1	0.4
Sc026	4	4	4	80	100	100	8	1	100	1	4
Sc027	40	40	40	80	100	100	8	1	100	1	40
Sc028	0.4	0.4	0.4	0.8	1	1	80	1	1	1	0.4
Sc029	4	4	4	0.8	1	1	80	1	1	1	4
Sc030	40	40	40	0.8	1	1	80	1	1	1	40
Sc031	0.4	0.4	0.4	8	1	1	80	1	1	1	0.4
Sc032	4	4	4	8	1	1	80	1	1	1	4
Sc033	40	40	40	8	1	1	80	1	1	1	40
Sc034	0.4	0.4	0.4	80	1	1	80	1	1	1	0.4
Sc035	4	4	4	80	1	1	80	1	1	1	4
Sc036	40	40	40	80	1	1	80	1	1	1	40
Sc037	0.4	0.4	0.4	0.8	10	10	80	1	10	1	0.4
Sc038	4	4	4	0.8	10	10	80	1	10	1	4
Sc039	40	40	40	0.8	10	10	80	1	10	1	40
Sc040	0.4	0.4	0.4	8	10	10	80	1	10	1	0.4
Sc041	4	4	4	8	10	10	80	1	10	1	4
Sc042	40	40	40	8	10	10	80	1	10	1	40
Sc043	0.4	0.4	0.4	80	10	10	80	1	10	1	0.4
Sc044	4	4	4	80	10	10	80	1	10	1	4
Sc045	40	40	40	80	10	10	80	1	10	1	40
Sc046	0.4	0.4	0.4	0.8	100	100	80	1	1	1	0.4
Sc047	4	4	4	0.8	100	100	80	1	1	1	4
Sc048	40	40	40	0.8	100	100	80	1	1	1	40

Таблица 2. Окончание

Код сценария	Штрафы по критериям (из табл. 1)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sc050	4	4	4	8	100	100	80	1	1	1	4
Sc051	40	40	40	8	100	100	80	1	1	1	40
Sc052	0.4	0.4	0.4	80	100	100	80	1	1	1	0.4
Sc053	4	4	4	80	100	100	80	1	1	1	4
Sc054	40	40	40	80	100	100	80	1	1	1	40

формировалось путем оптимизации диспетчерского графика Иркутской ГЭС 1988 г. [4]. Оптимизация проводилась по 11 критериям, требованиям различных водопользователей. Перечень критериев и соответствующие требования водопользователей представлены в табл. 1.

Основой формирования множества альтернативных решений для выбора оптимальных компромиссных диспетчерских графиков в соответствии с перечнем различных вариантов иерархии приоритетов водопользователей явился набор сценариев, в которых предпочтение отдается той или иной группе критериев. Перечень сценариев для оптимизации и значения соответствующих штрафных коэффициентов приведены в табл. 2.

С помощью разработанного программного обеспечения для всех приведенных сценариев была выполнена оптимизация действующего диспетчерского графика Иркутского гидроузла. При оптимизации использовался 117-летний ряд полезного притока к оз. Байкал за 1903–2020 гг. Под полезным притоком понимается общая величина притока на границах водохранилища за вычетом всех видов потерь и безвозвратного водопотребления. Статистические характеристики использованного ряда при этом не существенны. Поскольку в работе проводится сравнение эффективности управления при различных конфигурациях диспетчерских графиков, важно лишь то, что вычисления проводятся с использованием одних и тех же данных приточности.

Методы поиска оптимальной конфигурации диспетчерского графика

При формировании оптимальных компромиссных диспетчерских графиков необходимо

методами многокритериальной оптимизации сформировать множество альтернативных решений в соответствии с перечнем различных вариантов иерархии приоритетов требований водопользователей. Это множество решений формируется путем конструирования множества ДГ, каждый из которых получен на основе поиска оптимальных координат по заданным критериям со штрафными коэффициентами из табл. 2. Такой подход сформулирован в работе [9], где в качестве оптимизатора использовался эвристический генетический алгоритм. В данной работе множество решений (матрица решений) получено на основе поиска оптимальных координат ДГ специальными детерминистическими методами, разработанными и описанными в [7, 8].

Пусть для рассматриваемого водохранилища задано K требований водопользователей, которые должны быть удовлетворены с гарантированной надежностью для заданного гидрологического ряда приточности при управлении по оптимизируемому ДГ.

Обозначим:

Π_k – число перебоев (отклонений от требований водопользователей) для k -го требования за рассматриваемый период;

P_k – штрафной множитель, определяющий место k -го требования в иерархии приоритетов требований водопользователей.

Тогда можно определить штрафную функцию перебоев F_k для требования k :

$$F_k = P_k \Pi_k \quad (7)$$

и суммарную (по всем требованиям) штрафную функцию F

$$F = \sum_{k=1}^K F_k. \quad (8)$$

Функция (8) может использоваться как целевая функция (ЦФ) для определения качества управления по данному диспетчерскому графику. Чем меньше значение F , тем выше качество управления по рассматриваемому диспетчеру с точки зрения упомянутых выше обеспеченностей. Диспетчер состоит из набора узловых точек, которые задаются на границах интервалов года и образуют непересекающиеся кусочно-линейные перебойные линии, упорядоченные по уровням. Для каждой зоны между двумя соседними перебойными линиями задается диапазон допустимых для этой зоны сбросных расходов воды.

Задача оптимизации диспетчерского графика может быть сформулирована следующим образом: найти такую конфигурацию ДГ (координаты перебойных линий), при которой целевая функция (8) будет минимальна.

Поскольку линии диспетчера не пересекаются, для каждой узловой точки Z_i на некоторой границе интервала оптимальное значение $Z_{i\text{opt}}$ может лежать только между узловой точкой Z_{i-1} , находящейся выше, и узловой точкой Z_{i+1} , находящейся ниже Z_i на этой границе. Тогда алгоритм поиска оптимального значения $Z_{i\text{opt}}$ может быть построен следующим образом – для переменной $\alpha \in [0; 1]$ методом золотого сечения вычисляются последовательно значения $Z_{i\text{opt}}^*(\alpha)$ и $Z_{i\text{opt}}^{**}(\alpha)$, доставляющие минимумы соответствующим величинам целевой функции F^* и F^{**} при смещении узловой точки Z_i вверх и вниз соответственно.

Из двух значений $Z_{i\text{opt}}^*(\alpha)$ и $Z_{i\text{opt}}^{**}(\alpha)$, найденных последовательно при смещениях узловой точки вверх-вниз, выбирается то, для которого значение целевой функции F меньше. Оно и определяет окончательно оптимизированное положение $Z_{i\text{opt}}$ i -й узловой точки. Поскольку узловые точки первой (верхней) и n -й (нижней) линий ДГ являются предельными, их координаты не участвуют в процессе оптимизации, оставаясь неизменными. Выполнив процедуру оптимизации последовательно для всех узловых точек диспетчера, можно получить оптимизированный вариант диспетчерского графика. При

этом на каждом шаге оптимизации (для каждой следующей узловой точки) значение целевой функции по крайней мере не ухудшается.

Можно рассмотреть две модификации описанного алгоритма. Первая модификация – когда вычисление координат оптимальных уровней узловых точек выполняется одновременно для всех линий ДГ на каждой границе интервала поочередно для всех границ интервалов. В этом случае все узловые точки каждого интервала смещаются одновременно и пропорционально в одну и ту же сторону (вверх или вниз), причем точки границ соседних интервалов могут смещаться в противоположные стороны. Назовем эту модификацию “вертикальной” оптимизацией. При вертикальной оптимизации количество оптимизационных проходов для диспетчера равно количеству интервалов, на которые разбит водохозяйственный год.

Вторая модификация алгоритма оптимизации предполагает, что вычисление координат оптимальных значений узловых точек диспетчера выполняется поочередно для каждой линии, причем одновременно для всех ее точек на всех границах интервалов. Все узловые точки одной линии смещаются в одном направлении (вверх или вниз). При этом сохраняется определенное самоподобие линий диспетчера. Назовем эту модификацию “горизонтальной” оптимизацией. При горизонтальной оптимизации количество оптимизационных проходов для диспетчера равно количеству перебойных линий, исключая верхнюю и нижнюю линии.

В обоих случаях координаты точек первой (верхней) и последней (нижней) перебойных линий остаются неизменными.

Программное обеспечение (ПО), реализующее алгоритмы вертикальной и горизонтальной оптимизации диспетчерских графиков, разработано в среде *VBА* в виде процедур, запускаемых управляющим модулем. Работа управляющего модуля определяется командной строкой, которая задает последовательность запуска процедур вертикальной и горизонтальной оптимизации, комбинируя их в любом порядке с любым количеством повторений. При этом ре-

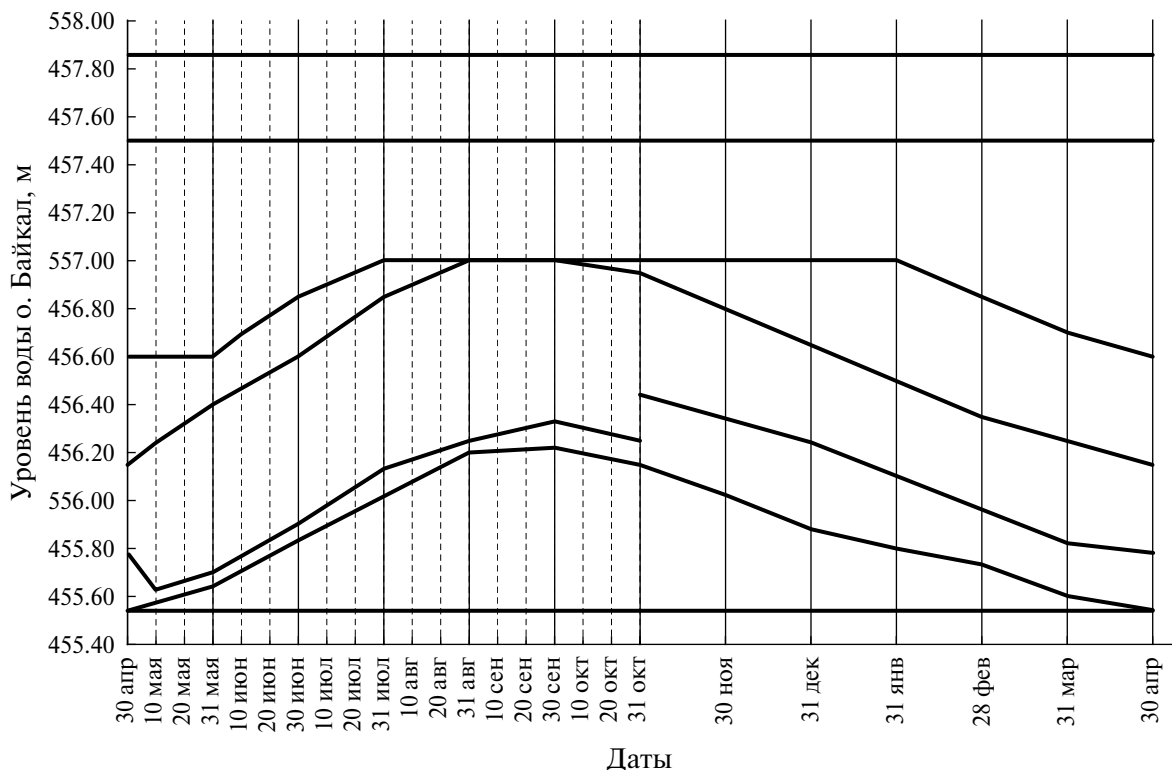


Рис. 1. Диспетчерский график Иркутского водохранилища из ПИВР 1988 г.

зультаты расчетов на предыдущем шаге передаются в качестве исходных данных в последующий расчет.

Наряду с дискретной штрафной функцией (7), вычисляемой по количеству перебоев, в разработанном ПО предусмотрена также возможность использования непрерывной штрафной функции. Для этого в (7) вместо взвешенного количества отклонений $P_k \Pi_k$ вычисляется взвешенная сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений критерия D_k от соответствующего требования водопользователей для k -го критерия D_{k0}

$$F_k = P_k \sum (D_k - D_{k0})^2, \quad (9)$$

где суммирование ведется по всем интервалам гидрологического ряда. Суммарная штрафная функция при этом также вычисляется по формуле (8).

Особенность такой штрафной функции заключается в том, что она оказывается чувствительна не только к количеству отклонений, но и к их величине (уменьшается «глубина» перебоев).

Поскольку критерии в (9) являются, как правило, различными физическими величинами и, соответственно, имеют разные размерности, перед оптимизацией они приводились к безразмерному виду путем нормировки на их начальную величину. Операция сложения в формуле вычисления целевой функции (8) в результате нормировки становится математически корректной. Кроме того, в начале цикла оптимизации все ненулевые слагаемые целевой функции оказываются равными 1, и вклад каждого из них в величину целевой функции определяется только величиной соответствующего штрафного коэффициента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение оптимальных координат перебойных линий диспетчерского графика

Как указано выше, оптимизация выполнялась для действующего ДГ Иркутского гидроузла 1988 г. Диаграмма ДГ приведена на рис. 1.

Оптимизация ДГ в каждом сценарии проводилась в пять проходов с последовательным

применением обоих описанных в [6] алгоритмов (горизонтального Н и вертикального V) по схеме: Нормировка–ННV–Нормировка–НV.

При оптимизации для каждого из перечисленных выше критерия в каждом сценарии (табл. 2) вычислялись следующие величины:

1) интервальная перебойность – количество интервалов гидрологического ряда, в которых нарушаются требования соответствующего критерия;

2) интервальная обеспеченность, соответствующая интервальной перебойности;

3) годовая перебойность – количество лет, в которых нарушаются требования соответствующего критерия;

4) годовая обеспеченность, соответствующая годовой перебойности;

5) глубина отклонений (перебоев) – максимальная по гидрологическому ряду величина отклонения соответствующего критерия от требования.

Последняя величина – глубина отклонений – позволяет выбрать лучший вариант в случае равенства остальных величин или, например, отдать предпочтение несколько худшему по обеспеченности варианту, если он дает существенный выигрыш по “глубине перебоев”.

По каждому сценарию, приведенному в табл. 2, были выполнены оптимизационные расчеты по программе, описанной выше. На основе этих данных по всем 54 сценариям получена матрица решений, содержащая значения годовых обеспеченностей и глубины перебоев.

Полученная матрица решений была исследована с помощью многокритериального анализа, реализованного в программе Pareto Front Viewer. На рис. 2 визуализирована матрица решений в среде программы Pareto Front Viewer.

На рис. 2 по оси X показаны обеспеченности по критерию 1 (предельные уровни оз. Бай-

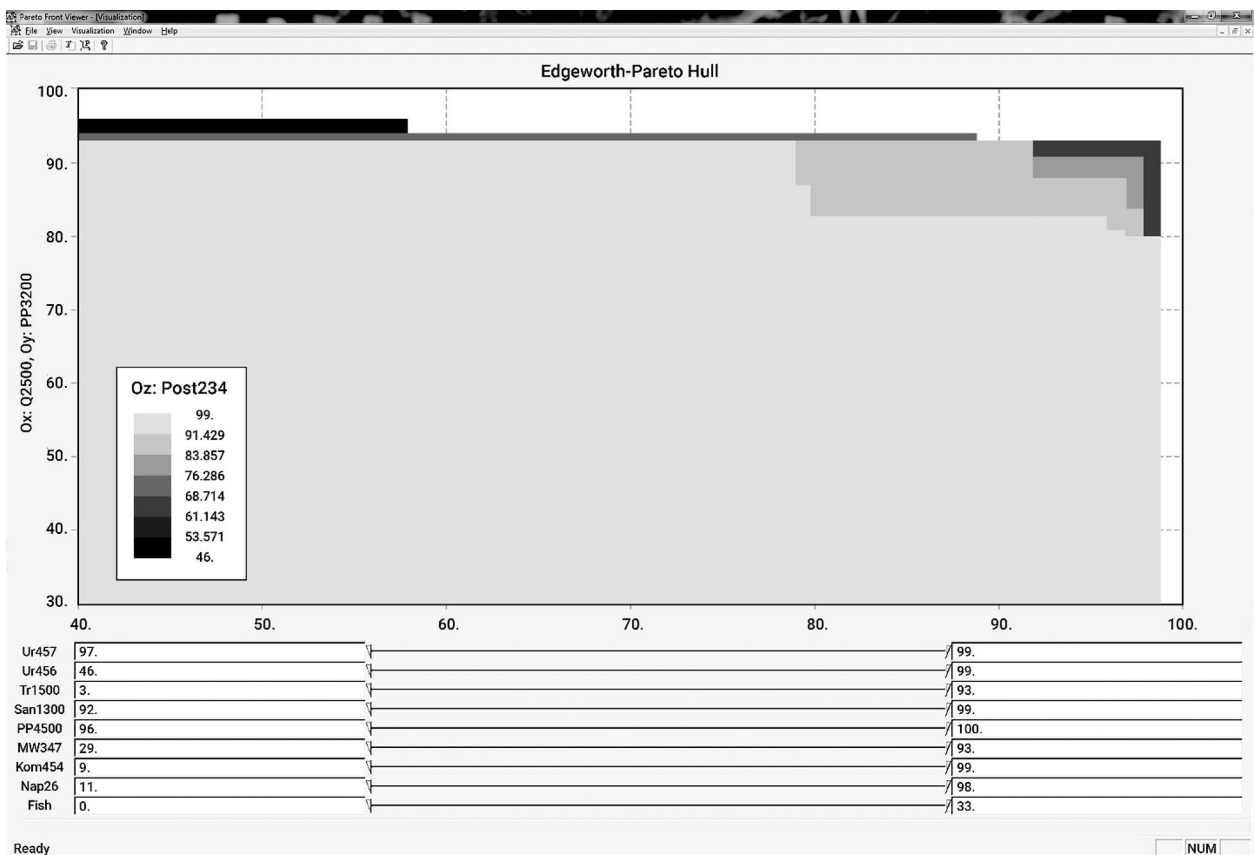


Рис. 2. Визуализация матрицы решений в среде Pareto Front Viewer.

Таблица 3. Нормативные и сниженные предельные показатели годовых обеспеченностей по критериям (%)

Номер критерия	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Нормативные значения	95	95	75	95	85	97	95	97	90	97	90	25
Сниженные значения	–	95	75	–	85	97	–	97	80	95	90	10

кал), по оси Y – обеспеченности по критерию 4 (сбросы зимой ≤ 2500 м³/с), тоном – диапазон обеспеченностей по критерию 7 (максимальные сбросы с Иркутской ГЭС). Остальные критерии представлены ниже основного поля диапазоном допустимых обеспеченностей, которые варьируются при помощи “бегунков”.

В качестве допустимых границ для критериев были взяты нормативные показатели годовой обеспеченности, приведенные в Методических указаниях [3]. Поскольку нет ни одного допустимого решения, удовлетворяющего всем нормативным требованиям (требования водопользователей конфликтуют друг с другом), для выбора компромиссных решений были взяты

сниженные показатели предельно допустимых обеспеченностей. Соответствующие предельные показатели нормативных и сниженных обеспеченностей для всех критериев приведены в табл. 3.

Показатели сниженной обеспеченности по критериям 1, 4, 7 включены в систему поиска компромиссных решений в режиме ручного отбора. Компромиссные (недоминируемые) решения формируются программой Pareto Front Viewer в виде вершин конусов Парето. Программа позволяет визуализировать результаты анализа и на этой основе выбирать недоминируемые решения из множества решений, представленных в матрице.

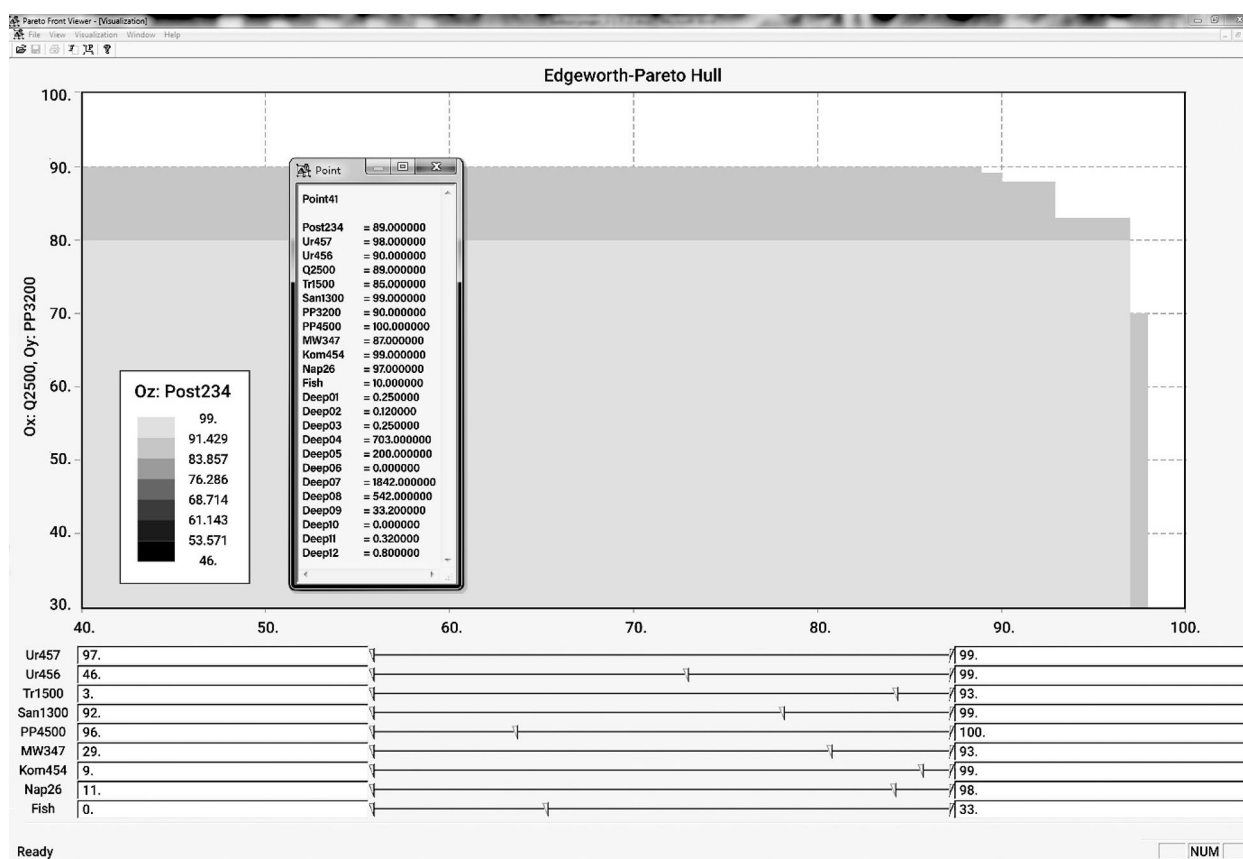


Рис. 3. Компромиссные решения в среде программы Pareto Front Viewer.

Набор полученных компромиссных решений в среде программы Pareto Front Viewer показан в виде вершин конусов Парето на рис. 3 (на рисунке приведены показатели для компромиссного решения Sc041).

В цифровом виде показатели обеспеченности и глубины перебоев для компромиссных решений приведены в табл. 4–6.

В табл. 5 полужирным шрифтом показаны нарушения нормативных показателей обеспеченности. В столбцах 71 всех приведенных выше таблиц показаны данные, полученные при увеличении значения требования по критерию 7 с 3200 до 4500 м³/с. В последней строке в табл. 4–6

приведены данные исходного диспетчерского графика 1988.

На рис. 4–9 приведены диаграммы соответствующих компромиссных ДГ.

Анализ показателей компромиссных решений

Все компромиссные решения имеют плохие показатели обеспеченности для критериев 1 (допустимый диапазон уровней оз. Байкал 455.8–457.3 м), 7 (противопаводковый) и 11 (экологический, рыбохозяйственный).

Ниже следует анализ показателей компромиссных решений (дополнительно к указанным выше).

Таблица 4. Компромиссные (недоминируемые) решения – годовые перебои

Сценарий	Перебои годовые по критериям, шт.											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc010	12	2	10	3	13	0	23	2	10	0	1	94
Sc011	9	2	7	3	14	0	23	3	9	0	3	97
Sc013	11	1	10	3	14	0	19	2	12	3	5	100
Sc040	11	1	10	11	16	0	12	2	13	3	2	103
Sc041	12	1	11	12	17	0	11	2	14	0	3	105
Sc043	14	1	13	7	14	1	13	2	18	5	4	104
ДГ 1988	12	1	11	10	9	2	38	4	8	4	5	71

Таблица 5. Компромиссные (недоминируемые) решения – годовые обеспеченности

Сценарий	Обеспеченности годовые по критериям, %											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc010	89	97	91	97	88	99	80	97	91	99	98	19
Sc011	92	97	93	97	87	99	80	97	92	99	97	17
Sc013	90	98	91	97	87	99	83	97	89	97	95	14
Sc040	90	98	91	90	86	99	89	97	88	97	97	12
Sc041	89	98	90	89	85	99	90	97	87	99	97	10
Sc043	87	98	88	93	87	98	88	97	84	95	96	11
ДГ 1988	89	98	90	91	92	97	67	96	92	96	95	39

Таблица 6. Компромиссные (недоминируемые) решения – глубины перебоев

Сценарий	Глубины перебоев по критериям											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc010	0.26	0.19	0.26	1440	200	0	2016	716	31.7	0.00	0.21	0.81
Sc011	0.18	0.18	0.15	1 012	200	0.00	2279	979	29.27	0.00	1.09	0.69
Sc013	0.26	0.15	0.26	692	200	0	2224	924	31.8	0.13	1.11	0.81
Sc040	0.24	0.13	0.24	854	200	0	1803	503	33.1	0.05	0.83	0.80
Sc041	0.25	0.12	0.25	703	200	0	1842	542	33.2	0.00	0.32	0.80
Sc043	0.26	0.09	0.26	612	200	170	2042	742	68.8	0.24	1.25	0.81
ДГ 1988	0.27	0.13	0.27	658	200	250.0	2528	1 228	86.6	0.96	2.28	0.86

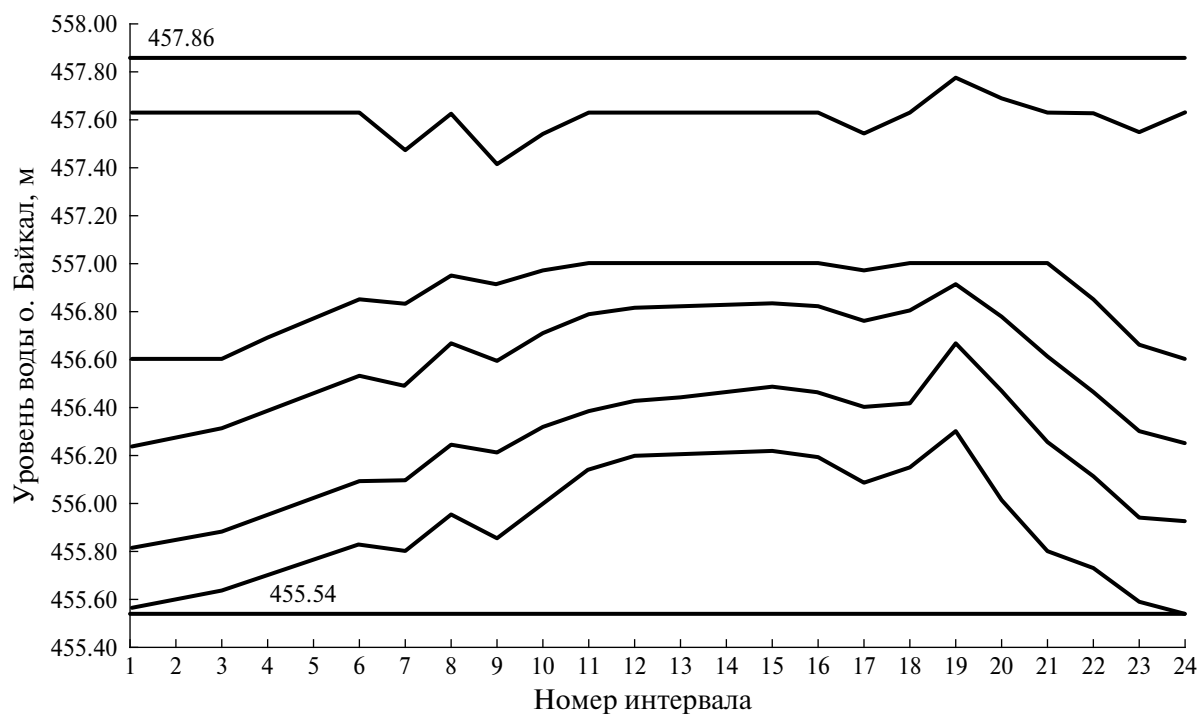


Рис. 6. Оптимизированный ДГ – Sc013.

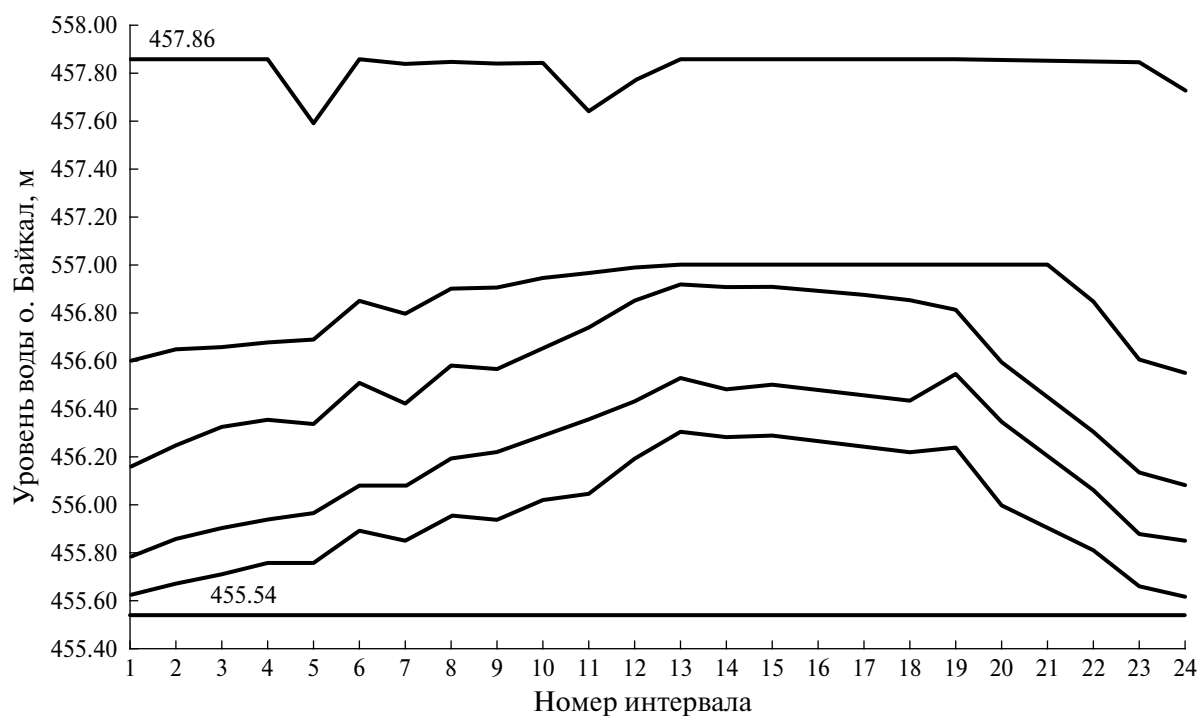


Рис. 7. Оптимизированный ДГ – Sc040.

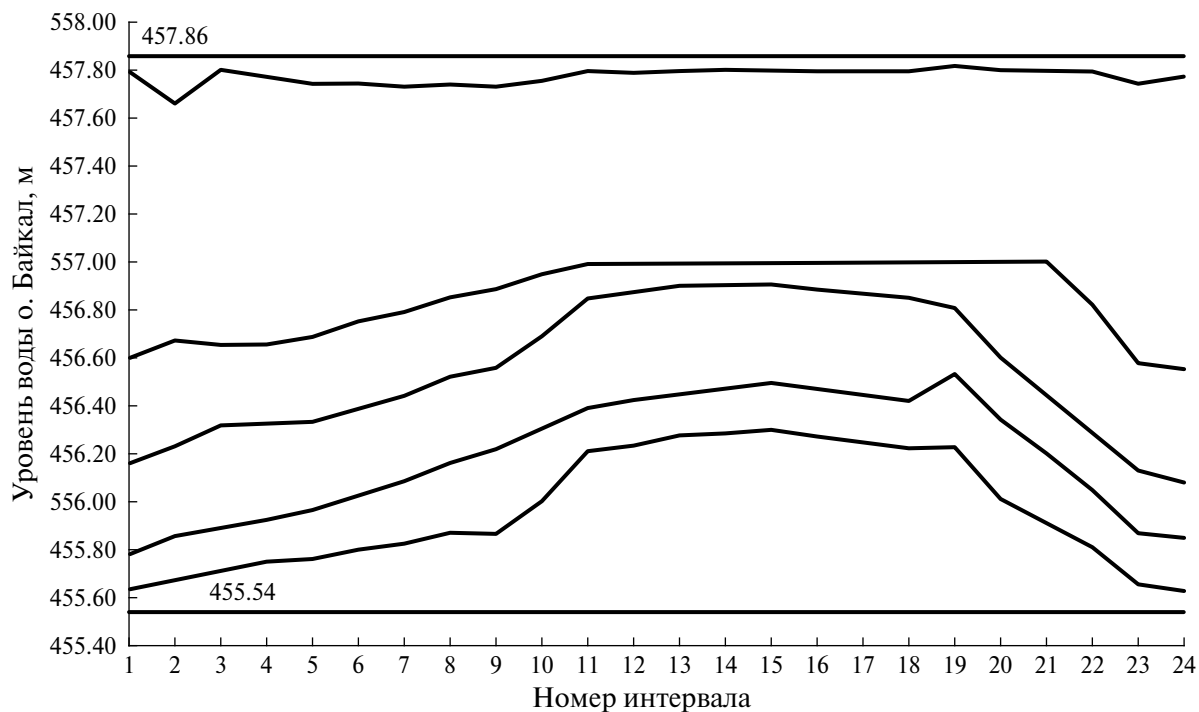


Рис. 8. Оптимизированный ДГ – Sc041.

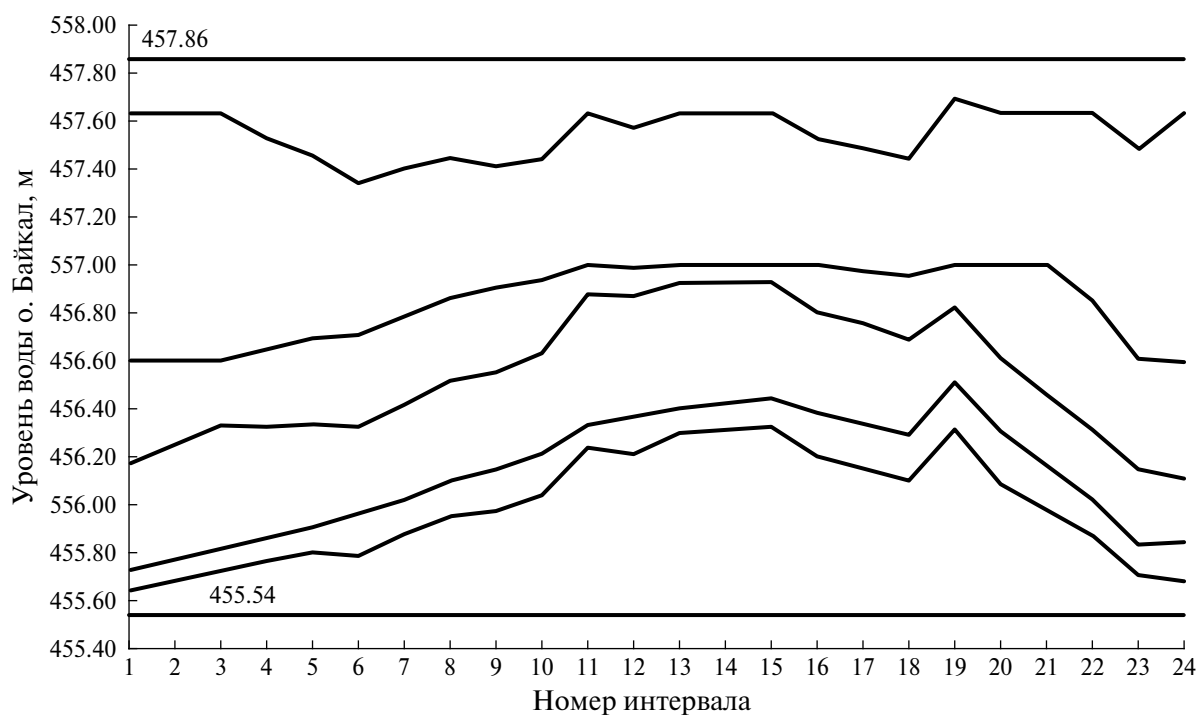


Рис. 9. Оптимизированный ДГ – Sc043.

ДГ, полученные по сценариям Sc010 и Sc011, имеют нормативные показатели обеспеченности по всем критериям. Поэтому группой информационного сопровождения эти ДГ рекомендуются ЛПР для обсуждения и утверждения в процессе переговоров с заинтересованными водопользователями (например, на площадке Бассейнового совета).

ДГ, полученные по сценариям Sc013 и Sc040, имеют нарушение по критерию 8 (энергетика), остальные критерии находятся в пределах нормативных показателей.

ДГ, полученный по сценарию Sc041, имеет нарушения по критериям 4 (сбросы зимой) и 8 (энергетика).

ДГ, полученный по сценарию Sc043, имеет нарушения по критериям 8 (энергетика) и 9 (воздух ИГЭС).

Хотя все компромиссные решения удовлетворяют сниженным показателям обеспеченности, принимать тот или иной ДГ необходимо в соответствии с поставленной целью. Например, если необходимо добиться наилучших показате-

лей по противопоаводковому критерию, то нужно рассмотреть сценарий Sc041. К сожалению, исходный ДГ 1988 г. имеет серьезное нарушение по критерию 7 (противоаводковый), поскольку он был рассчитан на не затапливающие в период его разработки (до 1988 г.) сбросы 4000–6000 м³/с. Современное требование 3200 м³/с с обеспеченностью 95% требует серьезной корректировки ДГ 1988.

Для определения максимально возможных показателей по обеспеченности для каждого критерия без учета влияния остальных критериев была выполнена оптимизация ДГ с форсированными значениями штрафных коэффициентов для заданного критерия. По критериям 1, 4, 8 форсированные штрафные коэффициенты принимались равными 1000, для критериев 5, 7, 11 равными 10000 (в расчетных сценариях максимальное значение штрафа было равно 100). В качестве базового сценария при этом принимался сценарий Sc014. Схема оптимизации применялась прежняя: Нормировка–ННВ–Нормировка–НВ.

Штрафные коэффициенты и результаты расчетов по пяти параметрам приведены в табл. 7–12.

Таблица 7. Форсированные штрафные коэффициенты

Сценарий	Штрафные коэффициенты по критериям											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	4	4	4	8	10	10	8	8	1	10	1	4
Sc014-1-1000	1000	4	4	8	10	10	8	8	1	10	1	4
Sc014-4-1000	4	4	4	1000	10	10	8	8	1	10	1	4
Sc014-5-10000	4	4	4	8	10000	10	8	8	1	10	1	4
Sc014-7-10000	4	4	4	8	10	10	10000	10000	1	10	1	4
Sc014-8-1000	4	4	4	8	10	10	8	8	1000	10	1	4
Sc014-11-10000	4	4	4	8	10	10	8	8	1	10	1	10000

Таблица 8. Форсированные решения – интервальные перебои

Сценарий	Перебои интервальные по критериям, шт.											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	43	5	38	5	125	0	91	14	41	4	16	293
Sc014-1-1000	0	0	0	1	257	0	214	49	23	51	70	190
Sc014-4-1000	31	0	31	0	166	0	123	25	44	55	49	259
Sc014-5-10000	22	16	6	1	20	0	432	57	49	6	25	218
Sc014-7-10000	927	0	927	48	555	62	6	0	261	894	542	463
Sc014-8-1000	20	20	0	2	678	0	542	59	0	2	29	114
Sc014-11-10000	0	0	0	69	752	0	265	72	201	125	145	95

Таблица 9. Форсированные решения – интервальные обеспеченности

Сценарий	Обеспеченности интервальные по критериям, %											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	98	100	99	99	94	100	97	99	94	100	99	37
Sc014-1-1000	100	100	100	100	88	100	92	98	97	98	97	59
Sc014-4-1000	99	100	99	100	92	100	96	99	94	98	98	45
Sc014-5-10000	99	99	100	100	99	100	85	98	93	100	99	53
Sc014-7-10000	67	100	67	93	74	98	100	100	63	68	81	1
Sc014-8-1000	99	99	100	100	68	100	81	98	100	100	99	58
Sc014-11-10000	100	100	100	90	64	100	91	97	71	96	95	80

Таблица 10. Форсированные решения – годовые перебои

Сценарий	Перебои годовые по критериям, шт.											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	11	1	10	3	14	0	19	2	12	3	5	101
Sc014-1-1000	0	0	0	1	39	0	44	12	8	15	19	111
Sc014-4-1000	10	0	10	0	27	0	31	6	12	21	15	95
Sc014-5-10000	6	3	3	1	4	0	80	13	10	3	7	114
Sc014-7-10000	117	0	117	21	103	30	2	0	82	110	102	117
Sc014-8-1000	4	4	0	2	106	0	89	13	0	1	9	114
Sc014-11-10000	0	0	0	69	117	0	56	19	84	32	35	51

Таблица 11. Форсированные решения – годовые обеспеченности

Сценарий	Обеспеченности годовые по критериям, %											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	90	98	91	97	87	99	83	97	89	97	95	14
Sc014-1-1000	99	99	99	98	66	99	62	89	92	86	83	5
Sc014-4-1000	91	99	91	99	76	99	73	94	89	81	86	19
Sc014-5-10000	94	97	97	98	96	99	31	88	91	97	93	3
Sc014-7-10000	0	99	0	81	12	74	97	99	30	6	13	0
Sc014-8-1000	96	96	99	97	9	99	24	88	99	98	92	3
Sc014-11-10000	99	99	99	41	0	99	52	83	28	72	69	56

Таблица 12. Форсированные решения – глубины перебоев

Сценарий	Глубины перебоев по критериям											
	1	2	3	4	5	6	7	71	8	9	10	11
Sc014	0.26	0.15	0.26	692	200	0	2224	924	31.8	0.13	1.11	0.81
Sc014-1-1000	0.006	0.006	0.005	149	200	0	2800	1500	25.5	1.00	2.46	0.56
Sc014-4-1000	0.22	0.00	0.22	0	200	0	2800	1500	31.8	1.00	2.46	0.76
Sc014-5-10000	0.24	0.24	0.12	1516	100	0	2500	1200	28.4	0.42	1.69	0.66
Sc014-7-10000	0.46	0.00	0.46	670	450	250	1044	0	91.2	1.00	0.93	1.05
Sc014-8-1000	0.31	0.31	0.00	1610	200	0	2665	1365	0.8	0.05	1.44	0.51
Sc014-11-10000	0.00	0.00	0.00	526	200	0	2800	1500	23	1.0	2.46	0.40

Для всех параметров форсировка штрафных коэффициентов приводит к увеличению обеспеченности и выполнению нормативных требований по годовой обеспеченности для форсируемого критерия.

Улучшение обеспеченности по форсируемым критериям влечет за собой ее улучшение по ряду критериев, коррелирующих с форсируемым, и ухудшение по критериям, связанным с форсируемым отрицательной корреляцией.

Так, например, форсирование критерия 1 (диапазон уровней оз. Байкал) дает почти стопроцентное выполнение этого критерия, однако существенно ухудшаются критерии 5 (транспортный) и 7 (противоаводковый). Форсирование критерия 7 (противоаводковый) дает обеспеченность выше нормативной, однако существенно ухудшаются обеспеченности почти для всех критериев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача поиска оптимальной конфигурации ДГ является многокритериальной и решается методами теории компромиссов.

Хотя полученные оптимальные компромиссные ДГ и не устраняют конфликты интересов водопользователей, однако по многим критериям обеспеченность и глубина перебоев при водохозяйственных расчетах по заданному гидрологическому ряду приточности лучше, чем исходный ДГ 1988.

Предложенные алгоритмы горизонтальной и вертикальной оптимизации не только сходятся к локальному минимуму для заданной первоначальной топологии ДГ, но и дают приемлемые результаты по обеспеченности и глубине перебоев в процессе выполнения водохозяйственных расчетов.

Предельные по каждому критерию оптимизационные расчеты показывают, что существуют ДГ, которые могут удовлетворить требования любого водопользователя, однако при этом могут быть существенно нарушены требования остальных водопользователей. К сожалению, принятое постановление № 234 по оз. Байкал, ограничивающее уровень в пределах отметок 456 и 457 м, не может быть выполнено ни при каких форсированных значениях штрафных коэффициентов.

Полученные конфигурации оптимальных ДГ – технически обоснованные варианты компромиссных решений, и они могут быть предложены лицом, принимающим решения, для обсуждения и утверждения на переговорах с заинтересованными водопользователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Бубер А.Л., Коробкина Е.А., Любушин А.А., Филиппова И.А. Озеро Байкал: экстремальные уровни как редкое гидрологическое событие // *Вод. ресурсы*. 2017. Т. 44. № 3. С. 392–406.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Особенности временной изменчивости притока к озеру Байкал и водохранилищам Ангарского каскада ГЭС // *Вод. хоз. России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 4. С. 6–19.
3. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ. Утв. приказом Минприроды России от 26 января 2011 г. № 17.
4. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1988. 64 с.
5. Чернышов М.С., Синюкович В.Н. Особенности уровня оз. Байкал в XXI веке // *Материалы междунар. научно-практ. конф. “Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития”*. Иркутск: ИГУ, 2017. С. 59–62.
6. Buber A.L., Buber V. Search for the dispatch schedule optimal configuration for managing releases of the complex “Lake Baikal – Irkutsk Reservoir” // *Glob. J. Ecol.* 2022. 7 (1). 013–020. DOI: <https://dx.doi.org/10.17352/gje.0000154>
7. Buber A.L., Lotov A.V., Ryabikov A.I. Pareto frontier visualization in multi-objective water resources control rules development problem for the Baikal Lake and the Angara River cascade // *1st IFAC Workshop on Control Methods for Water Resource Systems (CMWRS 2019)* / Ed. R. van Nooijen. Delft, Netherlands: IFAC-PapersOnLine, 2019. 52 (23). P. 9–16. ISSN 2405-8963. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.002>
8. Castelletti A., Pianosi F., Soncini-Sessa R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints // *Automatica*. 2008. V. 44. P. 1595–1607.
9. Lotov A.V., Ryabikov A.I., Buber A.L. A Multi-Criteria Decision-Making Procedure with an Inherited Set of Starting Points of Local Optimization of the Scalarizing Functions // *Sci. Tech Information Processing*. 2019. 46 (5). P. 328–336. DOI: 0.3103/S0147688219050058.
10. Loucks D.P., van Beek E. *Water Resource Systems Planning and Management. An Introduction to Methods, Models, and Applications* // Springer. 2017. P. 624. DOI 10.1007/978-3-319-44234-1

Building the optimal configuration of the dispatcher schedule for water resources management of the Baikal – Irkutsk Reservoir complex based on a multi-criteria analysis and the theory of compromises

A. L. Buber^{a, b}, M. V. Bolgov^{b, *}, V. B. Buber^a

*^a Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov
Moscow, 127434 Russia*

^b IWP RAN, Moscow, 119333

**e-mail: bolgovmv@mail.ru*

Approaches to the formation of optimal compromise dispatching schedules for water resources management of the Irkutsk reservoir (Lake Baikal) based on multicriteria optimization methods are considered. Many alternative solutions have been formed in accordance with the list of different options for the hierarchy of priorities of water users. A set of solutions that are non-dominant according to the criteria used has been identified

Keywords: Lake Baikal, Irkutsk reservoir, compromise management, multi-criteria optimization, dispatch rules, non-dominant solutions.