

А.Л. БУБЕР

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова», Москва, Российская Федерация

Л.Д. РАТКОВИЧ, А.И. РЯБИКОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В РЕЖИМЕ ОПТИМИЗАЦИИ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ПРАВИЛ УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ УНИКАЛЬНОГО ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ОЗЕРО БАЙКАЛ – ИРКУТСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ»

Исследования связаны с обоснованием режима работы Иркутского водохранилища, в значительной степени определяющего колебания уровня озера Байкал. Иркутское водохранилище является первой ступенью Ангарского каскада гидроэлектростанций. В статье сформулирована инженерная и математическая постановка задачи, описана имитационная математическая модель и вычислительная технология (ВТ), разработанные для выполнения водохозяйственных и водно-энергетических расчетов (ВХР) с применением диспетчерских правил управления. Строго определен порядок назначения режимов работы водохранилища (отдача, попуск) по диспетчерским графикам (ДГ) для водохозяйственного комплекса «озеро Байкал – Иркутское водохранилище». Приведены результаты использования ВТ, как процедуры, при решении задачи поиска оптимальных координат ДГ при заданной иерархии приоритетов требований водопользователей, обеспечивающих максимально возможную надежность функционирования водохозяйственного комплекса (ВХК).

Водохозяйственные расчеты, правила управления, диспетчерский график, режим работы водохранилища, перебойные линии, приоритеты водопользования, безопасность, попуски из водохранилища, регулирование стока в водохранилище, линии диспетчерского графика.

Введение. Работа выполнена в рамках научной тематики «Обоснование возможных границ диапазона колебаний уровня воды в озере Байкал» и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (номер проекта 17-29-05108 OF_M).

Цель и задачи исследований. Доминирующая цель исследований состоит в создании инструментария для построения оптимального режима регулирования стока в Иркутском водохранилище (1959 год). Критерии оптимальности увязываются с уровненным режимом Байкала, а также с водохозяйственными и энергетическими показателями водохранилища наряду с противопоаводковой функцией.

Соответственно сформулированы задачи исследований:

- проанализировать существующие подходы к управлению водными ресурсами в условиях сложных водохозяйственных систем;

- построить алгоритм и разработать имитационную математическую модель регулирования притока в Иркутское водохранилище;

- сгенерировать многолетние гидрологические ряды притока;

- наметить сценарии для апробации новой вычислительной технологии;

- выполнить цикл имитационных экспериментов для выявления наиболее приемлемой структуры и границ характерных зон диспетчерского графика.

Постановка задачи и методы исследований. Представленные научные разработки базируются на классической методике водохозяйственных и водно-энергетических расчетов, методике имитационного моделирования и наборе компьютерных технологий, заложенных в среде Excel. Используются математические и статистические встроенные функции, аппарат «анализа данных» и процедуры «поиска решения», система макросов, в качестве языка про-

граммирования применяется visual basic. Водохозяйственные расчеты выполняются по многолетним наблюденным гидрологи-

ческих рядов, а также на основе замоделированных рядов большой продолжительности.

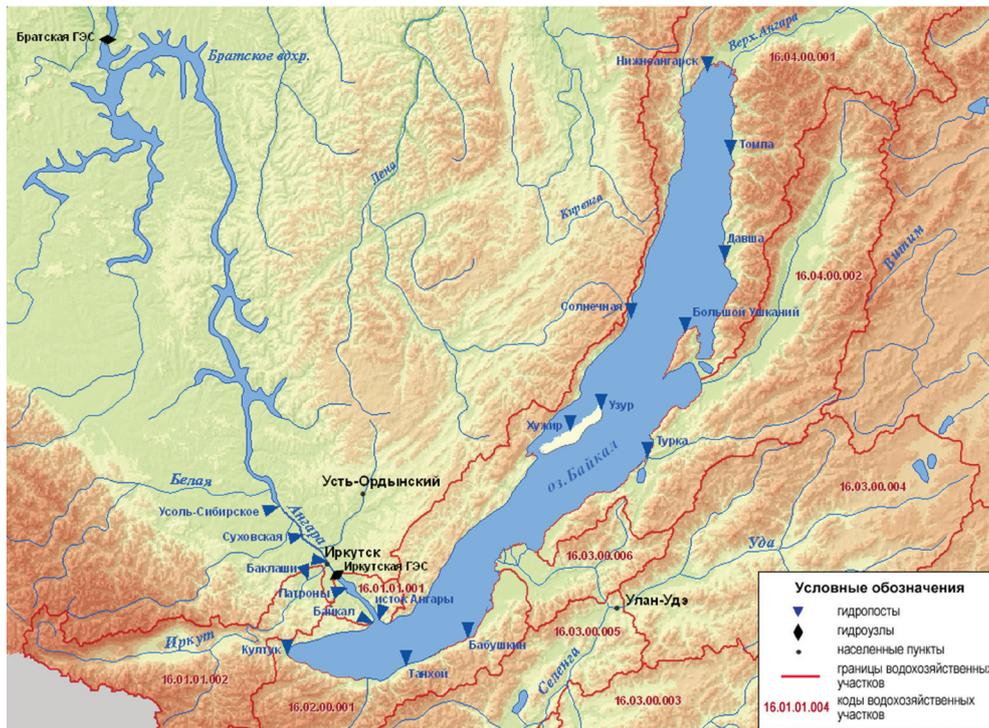


Рис. 1. Схема Иркутского водохранилища и размещения гидропостов

Постановка задачи и математическая модель выполнены в соответствии с Методическими указаниями по разработке ПИВР 2011 г и проектами ПИВР 2013 г [1-4]. Инженерная постановка основной задачи исследований заключается в том, чтобы подобрать режим регулирования стока, обеспечивающий заданный диапазон колебаний уровня озера Байкал, а также комплекс водохозяйственных и водно-энергетических показателей ГЭС. В процессе расчетов по разработанной вычислительной технологии определяются пуски на гидроузлах, ход уровней в верхнем и нижнем бьефах Иркутской ГЭС, развиваемая мощность и выработка электроэнергии, многолетняя последовательность изменения уровней озера Байкал. Все указанные водохозяйственные и водно-энергетические показатели согласуются с правилами регулирования стока и соответствующими диспетчерскими графиками. Имитационная модель приспособлена для использования гидрологических рядов произвольной продолжительности, как наблюденных (1903-2015), так и искусственных. Допускается 24 расчетных интервала. Количество зон диспетчерского графика для каждого расчетного интервала может быть произвольным.

Для анализа результатов модельных экспериментов разработана специальная вычислительная оболочка, позволяющая оценить количество и глубину интервальных и годовых перебоев, отследить обеспеченность и надежность удовлетворения отраслевого водопотребления. В применяемой технологии допускается произвольное количество критериев, каждый из которых задается в виде функции параметров управления системой: объем и уровень воды оз. Байкал, пуски в нижний бьеф Иркутского гидроузла, уровни в бьефах Иркутского гидроузла, мощность и выработка электроэнергии ГЭС.

Ядро правил управления – диспетчерский (ДГ) формируется в информационной базе модели в виде таблицы на рисунке 2 (соответствует представлению ДГ в ПИВР 2013 года). Каждая линия диспетчерского графика (перебойная линия) характеризуется тремя позициями. В первой строке указываются сбросные расходы $Q_{\text{над}}$ (пуски), соответствующие нижней границе вышележащей зоны (для верхней перебойной линии – расходы, соответствующие пропускной способности сооружений гидроузла), а в третьей строке – сбросные расходы $Q_{\text{под}}$ для верхней границы нижележащей зоны

(для нижней перебойной линии – расходы санитарного попуска). Во второй строке приводятся отметки, характеризующие положение перебойной линии на конец интервала.

Расчётный попуск из Иркутского водохранилища назначается таким, чтобы в про-

цессе балансовых итераций он соответствовал диапазону уровней в данной зоне ДГ в конце интервала. Расходы воды пересчитываются в объёмы $W(i)$ с учетом продолжительности расчетного интервала времени. Аналогичные подходы изложены в работах [5-15].

	11.05	21.05	01.06	11.06	21.06	01.07
	7	7	7	7	7	7
Qнад	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
Z	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86	457.86
Qпод	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
Qнад	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600	3 600
Z	456,50	456,50	456,50	456,55	456,60	456,67
Qпод	2 700	2 700	2 700	2 700	2 700	2 700
Qнад	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400
Z	456,22	456,28	456,37	456,45	456,51	456,57
Qпод	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800

Рис. 2. Фрагмент диспетчерского графика в табличной форме

Сбросной расход в данном интервале рассчитывается по следующим исходным данным: $W_{нач}$ – объём в водохранилище на начало интервала; $W_{прит}$ – объём прогнозируемого притока за интервал; $D_{нач}$ – дата начала интервала; $D_{кон}$ – дата начала следующего интервала.

Объём отдачи по ДГ между перебойными линиями вычисляется линейной интерполяцией между объёмами $W_{под}(i-1)$ и $W_{над}(i)$ (линии нумерованы сверху вниз), т.е. в координатах «объём отдачи» – абсцисса / «объём ресурса» (объём воды в водохранилище плюс объём притока) – ордината (номинал) выражается отрезком прямой линии (в общем случае наклонной). Совокупность этих наклонных отрезков и горизонтальных отрезков перебойных линий от $W_{над}(i)$ до $W_{под}(i)$ образует линию диспетчера. Горизонтальные отрезки при $W_{над}(i) < W_{под}(i)$ не входят в линию диспетчера; она в этих местах претерпевает разрыв.

Уравнение баланса $W_{кон} = W_{нач} + W_{прит} - W_{сбр}$ отображается в этих координатах наклонной прямой под углом 45° к осям – линией баланса. Пересечение линии баланса с линией диспетчера (на рисунке 3 между перебойными линиями 1 и 2) даёт сбалансированное решение: расход сброса соответствует номинальному расходу (расходу, установленному ДГ); проекция точки пересечения на ось ординат даёт конечный объём (объём воды в водохранилище на конец интерва-

ла). При $W_{над}(i) > W_{под}(i)$ на линии диспетчера возникает горизонтальный участок; если линия баланса пересекает его, то результирующим конечным объёмом является объём $W_{лин}$, соответствующий объёму на перебойной линии (линия 2 на рисунке 3).

Такой же горизонтальный участок возникает и при $W_{над}(i) < W_{под}(i)$, но он не является частью линии ДГ поскольку в этом месте происходит её разрыв. Пересечение линией баланса такого участка (перебойная линия 3 на рисунке 3) приводит к двойственности решения – выше и ниже перебойной линии. Для однозначности принимается то решение, которое находится по одну сторону с начальным объёмом (верхнее, если начальный объём не ниже перебойной линии, иначе – нижнее).

Специальная функция «Between» в структуре модели определяет, где линия баланса пересекает данную перебойную линию: слева от перебойной линии (возвращает -1), справа (1) или на горизонтальном участке (0). Расчёт выполняется перебором по всем перебойным линиям, входящим в текущий временной интервал, начиная с первой (нумерация линий сверху вниз).

Для верхней и нижней перебойных линий расчёт имеет некоторые особенности, поскольку они являются граничными и отрезки линий диспетчера в граничных полуоткрытых зонах являются вертикальными (рис. 3).



Рис. 3. Технологический график определения отдачи водохранилища по диспетчерскому графику (один расчетный интервал)

Запишем выражение для объема пропуска $W_{cs}(i)$, необходимого для достижения i -ой перебойной линии.

$$W_{cs}(i) = W_{нач} + W_{прит} - W_{лин}(i) \quad (1),$$

где $W_{нач}$ – объем воды в водохранилище на начало текущего интервала; $W_{прит}$ – ожидаемый объем притока за интервал; $W_{лин}(i)$ – объем водохранилища, соответствующий i -ой перебойной линии.

Для верхней противоперебойной линии если значение «Between» ($W_{cs}(1), W_{над}(1), W_{под}(1)$) = 0, то пропускной способности хватает, и конечный объем будет $W_{кон}(1)$, т.е. объем водохранилища на конец текущего интервала равен объему водохранилища, соответствующему первой перебойной линии.

$$W_{кон} = W_{лин}(1) \quad (2)$$

Если же значение «Between» ($W_{cs}(1), W_{над}(1), W_{под}(1)$) = 1, то есть пропускной способности не хватает, и ожидается переполнение выше первой перебойной линии. В этом случае

$$W_{кон} = W_{нач} + W_{прит} - W_{над} \quad (3)$$

Для конкретной перебойной линии с номером i если значение «Between» ($W_{cs}(i), W_{над}(i), W_{под}(i)$) = 1, то выполняется процедура «Пересечение» с параметром $L = i$ и расчёт на этом заканчивается.

Процедура «Пересечение» вычисляет конечный объем $W_{кон}$, находящийся между перебойными линиями с номерами $L - 1$ и L , исходя из линейной зависимости объема сброса по диспетчеру от положения объема водохранилища между этими линиями. Иными словами, ищется точка пересечения линии баланса с линией диспетчера.

Если значение «Between» ($W_{cs}(i), W_{над}(i), W_{под}(i)$) = 0, то линия баланса пересекла горизонтальную линию диспетчера. В этом случае, если $W_{над}(i) \geq W_{под}(i)$, то конечный объем должен быть на этой линии (4):

$$W_{кон} = W_{лин}(i) \quad (4)$$

В противном случае при $W_{над}(i) < W_{под}(i)$ имеет место разрыв линии диспетчера, когда следует искать пересечение в зависимости от начального объема; если он выше перебойной линии, то пересечение над i -й линией, иначе – под ней. Параметр L программной процедуры «Пересечение» определяется условным оператором:

$$\text{если } W_{нач} > W_{лин}(i), \text{ то } L = i, \text{ иначе } L = i + 1 \quad (5)$$

Таким образом, в зависимости от значения функции «Between» реализуется алгоритм управления водными ресурсами системы. При $\text{Between}(W_{cs}(1), W_{над}(1), W_{под}(1)) = 0$ воды хватает для удержания объема в водохранилище в норме и $W_{кон} = W_{лин}(i)$. Если же $\text{Between}(W_{cs}(i), W_{над}(i), W_{под}(i)) = 1$, то сброс минимально допустимых расходов опустит уровень ниже нормы:

$$W_{кон} = W_{нач} + W_{прит} - W_{под}(i) \quad (6)$$

Результаты исследований. Входная и выходная информация в модели формируется на листингах Excel. Пользователь легко может добавить свою статистику по любому критерию, порог для которого определяется функцией, зависящей от переменных, полученных при выполнении водохозяйственных расчетов. Разработанная вычислитель-

ная технология позволяет в автоматическом режиме построить для каждого расчетного интервала номограммы для определения гарантированной отдачи Иркутского водохранилища в зависимости от уровня воды озера Байкал и прогноза притока в систему.

Предлагаемая вычислительная технология предусматривает поиск оптимальных координат диспетчерского графика, который минимизирует количество и глубину перебоев при заданной иерархии приоритетов требований водопользователей. В качестве первого приближения искомого диспетчерского графика был принят вариант, утвержденных основных правил [2], ориентированных на следующую иерархию приоритетов требований водопользователей.

Ограничения высшего приоритета:

- Максимальная амплитуда годовых колебаний оз. Байкал [0.8; 0.9] м (требования рыбного хозяйства);
- Напор на Иркутском ГУ больше или равен 26 м (требования энергетики);
- Максимальный расход в нижнем бьефе Иркутской ГЭС не превышает 4420 м³/с (противоаварийный контроль);
- Транспортный попуск в летне-осеннюю межень не меньше 1500 м³/с.

Ограничения второго приоритета:

- Уровень озера Байкал должен быть в диапазоне отметок [457.23, 455.8] м ТОС (максимальный уровень при полезном притоке в озеро Байкал 1% обеспеченности по объему);

Нижний приоритет:

- Прирост уровня оз. Байкал в сутки в период с апреля по июнь должен быть не более 1 см;
- Минимальный попуск в летне-осеннюю межень не менее 1300 м³/с; в зимнюю межень не меньше 1250 м³/с;
- Мощность ГЭС в зимнюю межень больше или равна 376 Мвт;
- Работа водозаборов ВБ ИГЭС, УВБ больше или равна 454 м ТОС.

Реализованы две модификации оптимизационного алгоритма:

- Поиск оптимального решения без изменения «топологии» ДГ (используется принцип подобия, разрешающий одновременное перемещение координат перебойных линий ДГ в зависимости от коэффициентов подобия);
- Поиск оптимального решения, основанного на независимом (произвольном) изменении координат ДГ.

На основе двух модификаций оптимизационных алгоритмов были получены два диспетчерских графика: оптимальный подобный и оптимальный произвольный (оба с геометрией ДГ 1988 г.). В таблице сведены показатели надежности для каждого ДГ (статистика удовлетворения требований к водным ресурсам по расчетным интервалам и годам для отраслевых водопользователей и водных объектов системы). На рисунках 4, 5 представлены расчетные версии диспетчерских графиков.

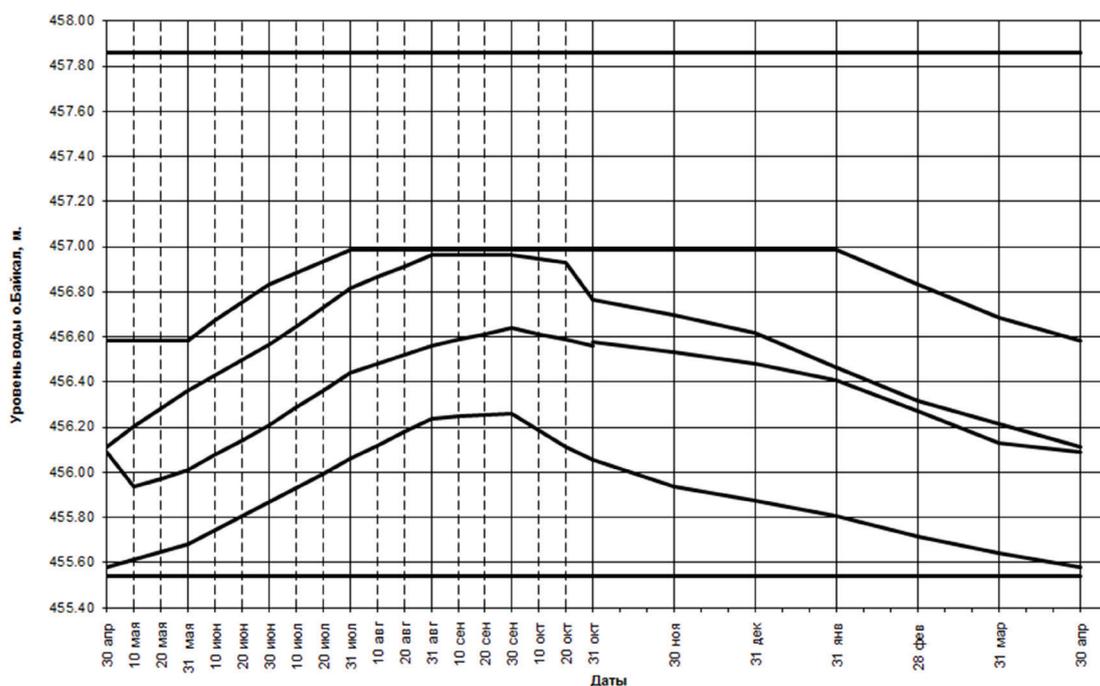


Рис. 4. Оптимальный подобный с геометрией утвержденного ДГ 1988 г.

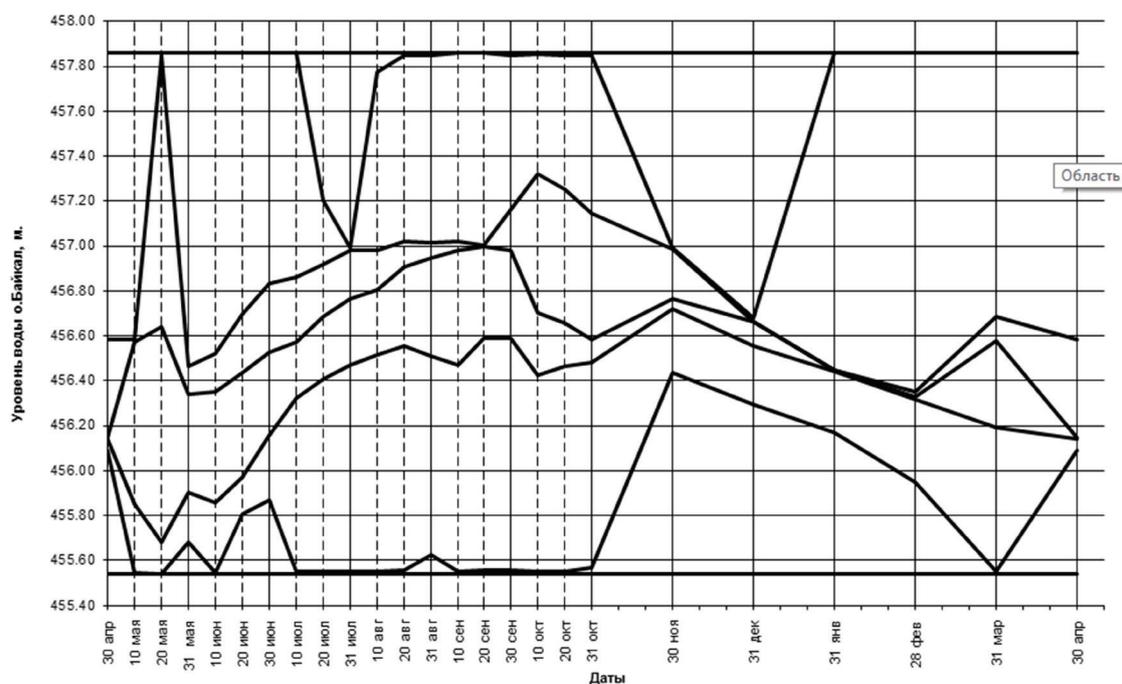


Рис. 5. Оптимальный произвольный с топологией утвержденного ДГ 1988 г.

Таблица

Показатели надежности выполнения требований водопользователей

Критерии – Иркутское водохранилище									
вид показателя (перебои, обеспеченность)	диапазон уровней озера Байкал 457.23 455.8 м	требования р/х		Транспорт 1500 м ³ /с с мая по окт	Санитарный 1250 м ³ /с	Допустимый максимальный расход 4420 м ³ /с	Гарантированная мощность 376 Мвт	Нормальная работа водозаборов 454 м	напор, менее 26 м
		диапазон колебаний [0.8, 0.9] м	Прирост уровня в сутки, 0.01 м						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ДГ 1988 ПИВР									
Число интервальных перебоев по каждому критерию	43	66	108	43	1	25	55	11	15
То же в % от всего расчетного ряда	98%	98%	96%	98%	99%	100%	92%	100%	99%
Число годовых перебоев	9	66	56	6	1	6	14	4	3
То же в % расчетного ряда	91%	41%	50%	94%	98%	94%	87%	96%	96%
Глубина перебоев	0.30	0.52	0.01	217.13	17.13	1308.00	73.81	0.96	2.28
«Оптимальный» с топологией ДГ 1988 ПИВР									
Число интервальных перебоев по каждому критерию	23	55	104	110	0	16	178	2	2
То же в % от всего расчетного ряда	99%	98%	96%	94%	100%	100%	73%	100%	100%
Число годовых перебоев	5	55	55	13	0	3	51	2	2
То же в % расчетного ряда	95%	50%	50%	88%	99%	96%	54%	97%	97%
Глубина перебоев	0.25	0.51	0.01	200.00	0.00	714.07	69.18	0.75	0.29
«Оптимальный» произвольной конфигурации									
Число интервальных перебоев по каждому критерию	22	58	78	58	0	13	352	2	0
То же в % от всего расчетного ряда	99%	98%	97%	97%	100%	98%	48%	100%	100%
Число годовых перебоев	5	58	47	7	0	2	81	2	0
То же в % расчетного ряда	95%	48%	58%	93%	99%	97%	27%	97%	99%
Глубина перебоев	0.25	0.47	0.01	100.00	0.00	685.79	69.91	0.48	0.00

Выводы

1. В ходе исследований разработана вычислительная технология, которая позволяет выполнять множество вариантных водохозяйственных расчетов на основе многолетних рядов притока произвольной продолжительности и диспетчерских графиков различной конфигурации. ВТ в полной мере согласуется с утвержденными методическими указаниями по разработке ПИВР [1].

2. Реализация ВТ для природно-технического комплекса предлагает варианты диспетчерских графиков, обеспечивающих максимальное приближение водного режима к хозяйственно-экологическим требованиям водохозяйственного комплекса «оз. Байкал – Иркутское водохранилище».

3. Оптимальный диспетчерский график с произвольной конфигурацией достаточно сложно реализовать в реальном режиме управления водохранилищем. Поэтому принятие произвольной конфигурации диспетчерского графика для управления водными ресурсами нуждается в дополнительных исследованиях и научном обсуждении с участием специалистов по водохозяйственным расчетам и эксплуатации водохозяйственных систем.

Библиографический список

1. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ (приказ МПР РФ от 26 января 2011 года N17);

2. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского), 1988 г.;

3. Проект «Правила использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал» (2007 г.);

4. Проект «Правила использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал» (2013 г.);

5. **Асарин А.Е., Бестужева К.Н.** Водно-энергетические расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.;

6. Раткович Л.Д. Методические особенности водохозяйственных расчетов в современных условиях. Труды конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии» в институте Водных проблем РАН. – М.: РАН, 2001. – С. 166-170.

7. **Раткович Л.Д.** Водохозяйственные аспекты правил управления водохранилищами комплексных гидроузлов. / Материалы международной научно-практической кон-

ференции «Роль природообустройства в обеспечении устойчивого развития экосистем». – М.: МГУП, 2006. – С. 157-165.

8. **Раткович Л.Д.** Методология обосновывающих водохозяйственных расчетов. // Мелиорация и водное хозяйство. – 2007. – № 6 – С. 32-35.

9. **Loucks D.P, van Beek E.** Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. Paris: UNESCO Publishing, 2005. 680 pp.;

10. **Бубер А.Л.** Оперативное управление водными ресурсами водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада ГЭС: безопасность, поддержка принятия решений, оптимальное управление. / Роль мелиорации в обеспечении продовольственной и экологической безопасности России: материалы Междунар. науч. – практ. конф. – М.: МГУП, 2009. – С. 26-32.

11. **Castelletti A., Pianosi F., Soncini-Sessa R.** Water reservoir control under economic, social and environmental constraints // Automatica. 2008. Vol. 44. pp. 1595-1607.;

12. **Лотов А.В., Рябиков А.И. Бубер А.Л.** Визуализация границы Парето при разработке правил управления ГЭС. // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2013. – № 1. – С. 70-83.

13. **Бубер А.Л.** Разработка гармонизированных диспетчерских графиков управления каскадом ГЭС, удовлетворяющих компромиссным решениям заинтересованных водопользователей (на примере Ангарского каскада ГЭС). Всероссийская научная конференция «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования»: Сборник научных трудов Калининград, 25-30 июля 2011 г.: Калининград: Капрос 2011, – С. 67-74.

14. **Болгов М.В., Бубер А.Л., Коробкина Е.А., Лотов А.В., Рябиков А.И.** Об оценке надежности ангарской водохозяйственной системы. / Всероссийская научная конференция «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике»: Сборник научных трудов, Цимлянск, 23-28 июля 2012 г. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012, – С. 375-381.

15. **Болгов М.В., Бубер А.Л., Коробкина Е.А.** Водные ресурсы озера Байкал и возможные стратегии управления его уровневый режимом. // Водное хозяйство России. – 2017. – № . 3. – С. 89-102.

Материал поступил в редакцию
26.02.2018 г.

Сведения об авторах

Бубер Александр Леонидович, заведующий отделом Мелиоративно-водохозяйственного комплекса, ведущий научный сотрудник ФГНБУ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова; 127550, Москва, ул. Большая Академическая, д. 44., корп. 2; тел.: 8(499)1531678; e-mail: buber49@yandex.ru, buber@vniigim.ru

Раткович Лев Данилович, профессор, заведующий кафедрой Комплексного использования водных ресурсов и гидрав-

лики РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, улица Тимирязевская, 49, корпус 28, тел. 8(499)9762156, e-mail: levkivr@mail.ru

Рябиков Андрей Игоревич, младший научный сотрудник, отдел математического моделирования экономических систем, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН; 119333, Москва, улица Вавилова, 40, тел. 8(499)1351209; e-mail: ariabikov@gmail.com

A.L. BUBER

Federal state budget research institution «All-Russian research institute of hydraulic engineering and land reclamation named after A.N. Kostyakov (VNIIGiM)», Moscow, Russian Federation

L.D. RATKOVICH, A.I. RYABIKOV

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy», Moscow, Russian Federation

SIMULATION MODELING OF WATER ECONOMIC SYSTEMS IN THE OPTIMIZATION REGIME OF CONTROL RULES OF MANAGEMENT BY THE EXAMPLE OF THE UNIQUE NATURAL-TECHNICAL COMPLEX «LAKE BAIKAL – IRKUTSK RESERVOIR»

The targeted research is related to the justification of the Irkutsk reservoir operation mode which largely determines fluctuations in the level of the lake Baikal. The Irkutsk reservoir is the first step of the Angara cascade of hydropower stations. The article presents an engineering and mathematical formulation of the problem, simulation mathematical model, algorithm and computational technology (CT) for water economic and water-energy calculations using control rules of management. The procedure for assigning operating modes of the reservoir (yield, release) according to the operation schedules (OS) for the water economic complex «Lake Baikal – Irkutsk Reservoir» is strictly defined. There are given results of using CT as a procedure when solving the problem of finding the optimal OS coordinates under the given hierarchy of priorities of water users' requirements that ensure the maximum operation possible reliability of the water management complex.

Water management calculations, rules of management, operation schedule, operation mode of the reservoir, emergency lines, water use priorities, safety, release from reservoir, flow regulation in the reservoir, operations schedule lines.

References

1. Metodicheskie ukazaniya po razrabotke pravil ispolzovaniya vodohranilishch (prikaz MPR ot 26 yanvarya 2011 goda N17). <http://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-26012011-n-17/>.
2. Osnovnye pravila ispolzovaniya vodnyh rsurov vodohranilishch Angarskogo kaskada GES (Irkutskogo, Bratskogo I Yst-Ilimskogo), 1988 g. – M.: Izd. M-va meliaratsii i vodnogo hozyajstva RSFSR, 1988. – 65 s.
3. Project «Pravila ispolzovaniya vodnyh resurov Irkutskogo vodohranilishcha i ozera Baikal» (2007 g.); <http://pivr.enbv.ru>.
4. Project «Pravila ispolzovaniya vodnyh rsurov Irkutskogo vodohranilishcha i ozera Baikal» (2013). <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102171773&intelsearch=410>
5. Asarin A.E., Bestuzheva K.N. Vodno-energeticheskie raschety. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 224 s.
6. Ratkovich L.D. Metodicheskie osobennosti vodohozyajstvennyh raschetov v sovremennyh usloviyah Trudy konferentsii «Sovremennye problem stohasticheskoy gidrologii» v institute Vodnyh problem RAN. – M.: RAN, 2001. – S. 166-170.
7. Ratkovich L.D. Vodohozyajstvennye aspekty pravil upravleniya vodohranilishchami kompleksnyh gidrouzlov. / Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rol prirodoobustrojstva v obespe-

chenii ustojchivogo razvitiya ekosistem». – M.: MGUP, 2006. – S.157-165.

8. **Ratkovich L.D.** Metodologiya obosnovyayushchih vodohozyajstvennyh raschetov. – 2007. – № 6 – S. 32-35.

9. **Loucks D.P. van Beek E.** Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. Paris: UNESCO Publishing, 2005. 680 pp.;

10. **Buber A.L.** Operativnoe upravlenie vodnymi resursami vodohranilishch Angaro-Yeniseskogo kaskada GES; bezopasnost, podderzhka prinyatiya reshenij, optimaljnoe upravlenie. / Rol melioratsii v obspechenii proizvodstvennoj i ekologicheskoj bezopasnosti Rossii: materialy mezhdunar. nauch. – prakt. konf. – M.: MGUP, 2009. – S. 26-32.

11. **Castelletti A., Pianosi F., Soncini-Sessa R.** Water reservoir control under economic, social and environmental constraints // Automatica. 2008. Vol. 44. pp. 1595-1607.;

12. **Lotov A.V., Ryabikov A.I., Buber A.L.** Vizualizatsiya granitsy Pareto pri razrabotke pravil upravleniya GES. // Iskusstvenny intellect I prinyatie reshenij. – 2013. – № 1. – S. 70-83.

13. **Buber A.L.** Razrabotka garmonizirovannyh dispetcherskih grafikov upravleniya kaskadom GES, udovletvoryayushchih kompromisnym resheniyam zainteresovannyh vodopolzovatelej (na primere Angarskogo kaskada GES). Vserossijskaya nauchnaya konferentsiya «Ustojchivost vodnyh objektov, vodosbornykh i probrezhnykh territorij; riski ih ispolzovaniya»: Sbornik nauchnyh trudov, Kaliningrad, 25-30 iulya 2011 g.: Kaliningrad: Kapros 2011, – S.67-74.

14. **Bolgov M.V., Buber A.L., Korobkina E.A., Lotov A.V., Ryabikov A.I.** Ob otsenke nadezhnosti angarskoj vodohozyajstvennoj sistemy. / Vserossijskaya nauchnaya konferentsiya «Voda I vodnye resursy: siste-

moobrazuyushchie funktsii v prirode i ekonomike»: Sbornik nauchnyh trudov, Tsimlyansk, 23-28 iyulya 2012 g. – Novocherkassk: YURGTU (NPI), 2012, – S. 375-381.

15. **Bolgov M.V., Buber A.L., Korobkina E.A.** Vodnye resursy ozera Bajkal I vozmozhnye strategii upravleniya ego urovennym rezhimom. // Vodnoe hozyajstvo Rossii, No. 3, 2017 g., S. 89-102

The material was received at the editorial office 26.02.2018

Information about the authors

Buber Alexander Leonidovich, Head of Department of Melioration and Water Management Complex, Leading Researcher of All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Russia, Moscow; Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building. 2; tel.: 8(499)1531678; mob. 9689429393 e-mail: buber49@yandex.ru, buber@vniigim.ru

Ratkovich Lev Danilovich, professor, head of the Department of the integrated use of water resources and hydraulics – Federal State Budgetary Institution – Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev, Russia, 127550, Timiryazevskaya street, 49, building 28, tel: 8(499)9762156, e-mail: levkivr@mail.ru

Ryabikov Andrey Igorevich, researcher, Department of Mathematical Simulation of Economic Systems, Computing Centre named after A.A. Dorodnitsyn of the Federal research institution «Computer science and management of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119333, Vavilov st. 40; tel.: 8(499)1351209; e-mail: ariabikov@gmail.com