

УДК 556.048

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ВОЗМОЖНЫЕ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО УРОВЕННЫМ РЕЖИМОМ

© 2017 г. М.В. Болгов<sup>1</sup>, А.Л. Бубер<sup>2</sup>, Е.А. Коробкина<sup>1</sup><sup>1</sup> ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Москва, Россия<sup>2</sup> ФГНБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова», Москва, Россия

**Ключевые слова:** оз. Байкал, уровень воды, управление водными ресурсами, экстремальная водность, экологические ограничения.

В последние годы в бассейне оз. Байкал и на самом озере развивается сложная водохозяйственная ситуация в результате затяжного маловодья и недостаточного обоснованных ограничений на



М.В. Болгов



А.Л. Бубер



Е.А. Коробкина

диапазон колебаний уровня воды. Водные ресурсы оз. Байкал используются в целях выработки электроэнергии и водоснабжения, потому зачастую возникновение негативных экологических явлений увязывается с возможными нарушениями естественного гидрологического режима.

Рассмотрены существующие подходы к управлению водными ресурсами оз. Байкал и рекомендации по их «экологизации». В качестве набора экологических показателей (ограничений) использованы даты наступления максимальных и минимальных уровней, амплитуда колебаний уровня, скорость наполнения озера и другие параметры, существенное изменение которых может влиять на состояние экосистемы Байкала. Выбор стратегии управления уровнем оз. Байкал выполнен на основе анализа результатов водохозяйственных расчетов по экологическим показателям. Представлены результаты расчета обеспеченности водными ресурсами различных водопользователей и выполнения экосистемных требований, выраженных в виде распределений вероятностей соответствующих показателей режима колебаний уровня оз. Байкал. Сделаны выводы о предпочтении одной из рассмотренных схем регулирования стока.

Озеро Байкал (Иркутское водохранилище), гидроузел и нижний бьеф Иркутской ГЭС представляют единую взаимосвязанную природно-техническую и социально-экономическую систему. При этом Иркутский гидроузел, располагая необходимыми техническими средствами, играет роль технического регулятора уровня озера (водохранилища) и расходов воды в нижний бьеф.

Сбросы воды в нижний бьеф Иркутской ГЭС и уровенный режим оз. Байкал регулируются основными правилами использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского) [1] и Постановлением Правительства Российской Федерации от 26.03.2001 № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» [2] (далее – Постановление), ограничивающим максимальные и минимальные уровни воды в оз. Байкал предельными отметками 456,0 и 457,0 м соответственно. Основная научная проблема в этих условиях заключалась в обосновании возможных границ диапазона колебаний уровня воды в оз. Байкал, исходя из компромисса противоречивых интересов водопользования и требований экосистемы в условиях значительной изменчивости гидрометеорологических условий бассейна, в первую очередь, в условиях экстремально высокой и экстремально низкой водности. Представленные в данной статье исследования обоснования стратегии управления уровенным режимом озера являются частью комплексного проекта, по результатам которого принято Постановление Правительства Российской Федерации от 1 июля 2016 г. № 626 [3], установившее на период 2016–2017 гг. расширенный диапазон колебаний уровня Байкала в зависимости от уровня водности в бассейне озера.

#### **ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Особенностью водных ресурсов бассейна оз. Байкал является разнообразие условий их формирования (весеннее снеготаяние и дождевой сток). Основной объем притока формируется в третьем квартале года за счет дождевого стока, в т. ч. и на территории Монголии. Изменчивость водных ресурсов бассейна Селенги в значительной мере определяется особенностями формирования атмосферных осадков, для которых характерны затяжные сухие и влажные периоды, а также большая изменчивость во времени [4]. Долгосрочное прогнозирование притока с точностью, позволяющей принимать оптимальные водохозяйственные управленческие решения, в таких условиях практически невозможно.

Проблема снижения уровня Байкала является следствием тесной связи уровней с притоком воды в озеро. По данным уровенных наблюдений выделяется несколько периодов колебаний уровня после начала регу-

лирования стока в 1958 г. Повышение уровня озера после строительства гидроузла сменилось в период 1976–1982 гг. затяжным катастрофическим маловодьем, когда уровни озера опускались на 27 см ниже проектной минимальной отметки. Период 1983–1995 гг. характеризуется повышенными уровнями водной поверхности с неоднократным превышением нормального подпорного уровня. Начиная с 1996 г., в бассейне оз. Байкал наблюдается рекордное по продолжительности маловодье, в связи с чем и возникла необходимость обоснования возможной стратегии управления водными ресурсами в целях поддержания установленных (допустимых) границ диапазона колебаний уровня воды в озере.

В настоящее время уровни воды в оз. Байкал в среднем превышают естественные значения (до зарегулирования озера) на 80 см. Современный режим сезонных колебаний уровня Байкала максимально приближен к наблюдавшемуся в естественных условиях для уменьшения неблагоприятного воздействия колебаний уровня воды в озере на его экосистему в условиях регулирования стока. Сезонные колебания уровня по форме аналогичны имевшим место в естественных условиях, но реализуются на более высоких отметках.

### **Управление уровнем режимом оз. Байкал**

Регулирование стока водохранилищами различного назначения осуществляется, как правило, на основе диспетчерских правил и графиков, позволяющих устанавливать режимы работы водохозяйственных установок. Обоснование эффективности разрабатываемых диспетчерских правил выполняется различными способами, включая многовариантные водохозяйственные и водноэнергетические расчеты, в результате которых определяются режимы сработки и наполнения водохранилищ, величины расходов воды в нижний бьеф гидроузлов, объемы подачи воды потребителям (на водоснабжение, орошение, обеспечение судоходства, переброску стока в другие бассейны и др.). Статистическая обработка полученных характеристик уровня режима позволяет сделать вывод об обеспеченности различных показателей работы водохранилища и охарактеризовать надежность водообеспечения или выполнения других показателей, например, предотвращение затопления территорий в случае создания водохранилища противопаводочного назначения или нарушения динамики наполнения/сработки уровня при рассмотрении как экологических требований, так и требований по безопасности сооружений гидроузла или устойчивости склонов, подверженных переработке или оползневой опасности.

Для обоснования возможных границ диапазона колебаний уровня воды в оз. Байкал разработана вычислительная технология, которая позволяет использовать временные ряды полезного притока произвольной продолжи-

тельности и диспетчерские графики различной конфигурации. На основе предложенной методики выполняются расчеты обеспеченности водными ресурсами различных водопользователей и удовлетворения экосистемных требований, выраженных в виде распределений вероятностей соответствующих показателей режима колебаний уровня оз. Байкал. Реализованный в вычислительной технологии расчет показателей надежности обеспеченности требований водопользователей позволяет оценить надежность по числу бесперебойных периодов (расчетных интервалов) и лет в количественном и процентном выражении для любого вида требований, выраженных в виде функций от основных выходных показателей водохозяйственного расчета (уровни оз. Байкал, верхнего и нижнего бьефов Иркутского гидроузла, водоотдачи Иркутского водохранилища, мощности и выработки ГЭС).

В результате анализа различных требований водопотребителей и условий, необходимых для стабильного функционирования и развития экосистемы озера, сформулированы основные принципы регулирования стока с учетом экологических ограничений.

Экологические требования представляют собой ограничения на следующие показатели режима сработки и наполнения Байкала: даты наступления минимального и максимального уровней воды, скорость наполнения/сработки, диапазон внутригодовых колебаний хода уровня. Формируются экологические требования в виде набора абиотических показателей (характеристик уровня режима озера), условия выполнения которых формулируются на основе принципа надежности (расчетных обеспеченностей или доверительных интервалов). В вычислительной технологии экологические требования реализуются на основе методов многокритериальной оптимизации и теории компромиссов (оптимизационные подходы), основанных на поиске недоминируемых решений (координат диспетчерских графиков) в соответствии с принятой иерархией требований водопользователей.

В целях обоснования и выбора возможной стратегии управления уровнем режимом оз. Байкал рассматривались три возможных схемы регулирования: 1) по действующим диспетчерским правилам 1988 г. [1]; 2) по диспетчерским правилам из не утвержденных правил использования водных ресурсов (ПИВР) 2013 г., ограничивающих колебания уровня метровым диапазоном; 3) по диспетчерским правилам, полученным авторами в результате оптимизации имеющихся требований и условий водопользователей, в т. ч. и экологических требований.

Разработанное программное обеспечение и результаты выполненных календарным методом водохозяйственных и водноэнергетических расчетов по оценке гарантированной отдачи и качества регулирования стока оз. Байкал (водохранилищем Иркутской ГЭС) позволили сделать выводы о предпочтении одной из рассмотренных схем регулирования стока.

Для сравнительной оценки вариантов регулирования стока по абиотическим факторам (условиям) нормального сохранения (воспроизводства) водных экосистем, рассмотрены эмпирические распределения (в виде кривых обеспеченности и выборочных распределений) параметров сезонного хода уровня озера: даты наступления минимумов и максимумов уровня, годовых амплитуд колебаний уровня, приращений уровня за май-июнь. Упомянутые распределения построены для условий естественного и зарегулированного режимов, а также трех перечисленных выше случаев водохозяйственного расчета (по правилам 1988 г., по не утвержденным ПИВР 2013 г., по оптимальным диспетчерским правилам). Путем сравнения формы распределений изучаемых параметров для различных случаев регулирования можно сделать вывод о предпочтении той или иной схемы, и, соответственно, о допустимом диапазоне колебаний уровня воды.

Сравнительные оценки «качества» регулирования стока получены по ряду значений притока, уточненному с учетом последних маловодных лет. Статистические выводы сделаны на рядах расчетных величин наполнений оз. Байкал продолжительностью 112 лет.

#### **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ**

Рассмотрим результаты водохозяйственных расчетов, выполненных для трех схем регулирования (диспетчерских графиков 1988, 2013 гг. и «оптимального»), в виде выборочных гистограмм распределений дат наступления минимального и максимального уровней воды оз. Байкал, годовой амплитуды колебаний уровня и приращения уровня воды за апрель–июнь. Регулирование стока во всех трех случаях водохозяйственных расчетов выполняли по месячным и декадным расчетным интервалам (табл. 1).

#### **Распределение дат наступления минимального уровня воды**

Построенная по данным равномерных наблюдений на водомерном посту Байкал гистограмма распределения дат минимального значения уровня воды (рис. 1) показывает, что сроки наступления экстремума, важного для удовлетворения экологических требований, характеризуются значительным разбросом во времени. При средней дате наступления минимума 21 апреля доверительный 90 % интервал приходится на период с 10 апреля по 7 мая, т. е. составляет 28 суток, что представляет климатическую норму. Гистограмма распределения показывает, что с вероятностью 76 % минимальное значение уровня приходится на апрель, а с вероятностью 24 % – на первую декаду мая.

Следует отметить, что минимальное значение уровня выражено довольно слабо во временном ходе уровня: в течение нескольких дней уровень

может колебаться в зоне минимальных значений, и при построении различных статистик имеет смысл оперировать осредненными за декаду значениями. При регулировании стока в соответствии с рассматриваемыми правилами происходит сдвиг во времени максимальной ординаты гистограммы распределения дат минимальных значений (моды). В 65 % случаев дата минимума приходится на первую декаду мая практически независимо от принятых правил регулирования стока. В 20 % случаев минимум уровня приходится на апрель, а оставшиеся 15 % – на вторую и третью декады мая. Средняя дата начала заполнения Байкала при регулировании стока – середина первой декады мая, этот параметр практически не зависит от принятой схемы регулирования стока.

### **Дата наступления максимального уровня воды в оз. Байкал**

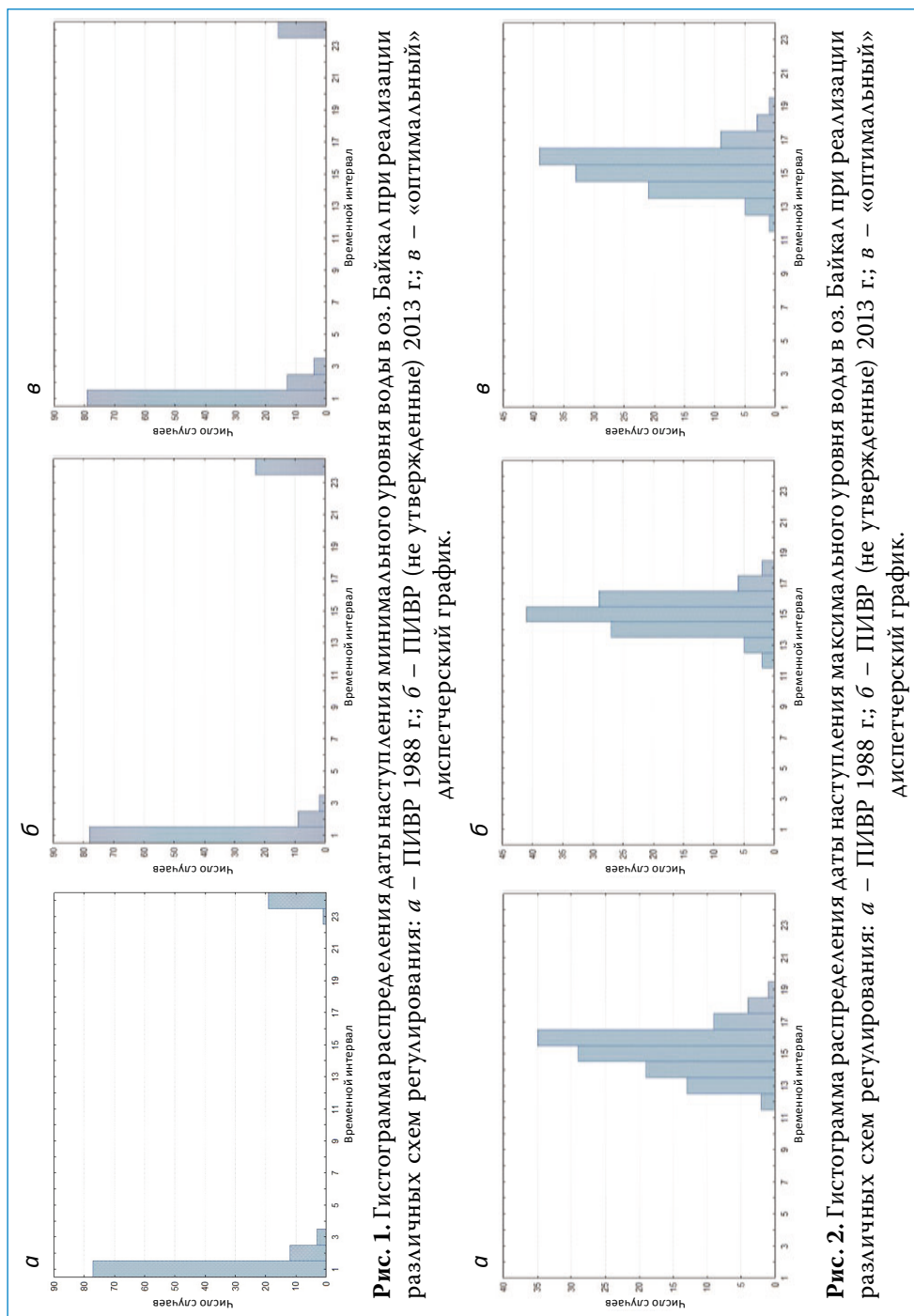
Максимальные уровни в Байкале существенно зависят от водности года и принятых подходов к регулированию стока (рис. 2). Сроки наступления экстремума в совокупности с амплитудой колебания уровня определяют важнейший экологический параметр – скорость подъема уровня воды в оз. Байкал.

Форма гистограммы распределения дат наступления максимальных уровней носит сложный, многомодальный характер. Средняя дата наступления максимальных уровней в естественных условиях приходится на конец второй – начало третьей декады и в среднем может быть принята 25 сентября. Доверительный 90 % интервал даты наступления максимального уровня составляет период от 1 сентября до 10 октября. В условиях регулирования стока форма распределения даты максимума носит более компактный характер.

Мода распределения даты максимума, рассчитанная по данным наблюдений за период регулирования стока (1961–2015 гг.), сдвинута на существенно более поздние сроки (последняя декада октября), что определяется тем, что в этот период управление водными ресурсами не подчинялось единым правилам.

Анализ даты максимумов, определенных по результатам водохозяйственных расчетов, выполненных в соответствии с тремя схемами регулирования, показал, что по сравнению с естественным режимом происходит сдвиг на декаду даты наступления максимального значения уровня вне зависимости от принятой схемы регулирования. При ограничении уровня метровым диапазоном наступление максимального уровня наблюдается раньше, чем при реализации правил 1988 г. По дисперсии сроков наступления максимума, управление в соответствии с диспетчерскими графиками правил 1988 г. (как и с «оптимальным» диспетчерским графиком) дает результаты ближе к естественному режиму.





**Таблица 1.** Соответствие номеров расчетных интервалов и календарных дат при выполнении водохозяйственных расчетов

Номер интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Месяц/день	V/ 1–10	V/ 11–20	V/ 21–31	VI/ 1–10	VI/ 11–20	VI/ 21–30	VII/ 1–10	VII/ 11–20	VII/ 21–31	VIII/ 1–10	VIII/ 11–20	VIII/ 21–31
Номер интервала	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Месяц/день	IX/ 1–10	IX/ 11–20	IX/ 21–30	X/ 1–10	X/ 11–20	X/ 21–31	XI	XII	I	II	III	IV

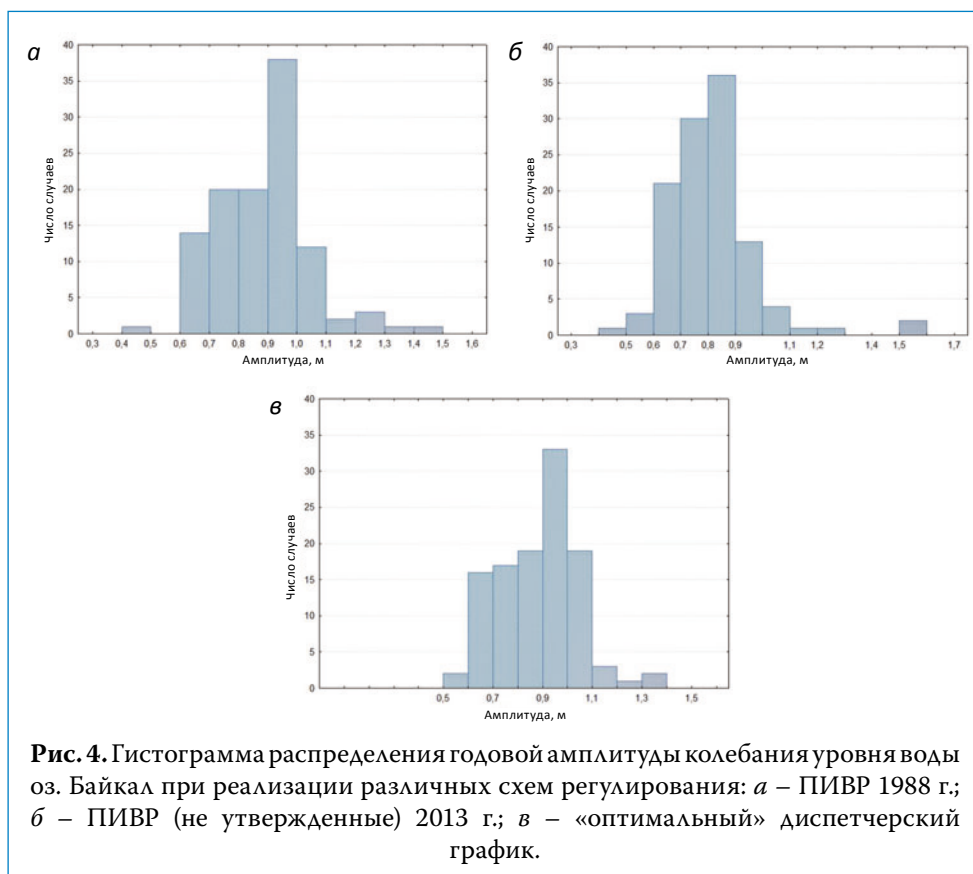
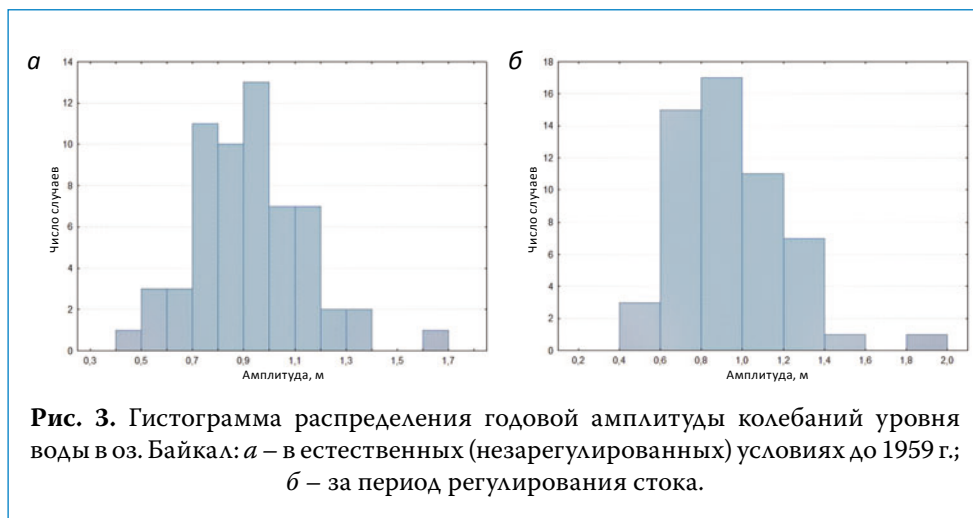
### Диапазон сезонных колебаний уровня и скорости подъема уровня воды

Следующими характеристиками качества регулирования стока является диапазон сезонных колебаний уровня и скорости подъема уровня воды в период, важный по условиям воспроизводства водных биоресурсов и орнитофауны. В качестве таких характеристик исследовали амплитуды колебания уровня воды (в естественных условиях и в условиях регулирования стока), а также приращение уровня воды за двухмесячный период (май-июнь).

На рис. 3 представлены гистограммы распределения годовой амплитуды колебаний уровня озера за два периода наблюдений: до строительства Иркутской ГЭС (рис. 3а) и после ее ввода в эксплуатацию (рис. 3б). Амплитуда колебаний уровня озера в естественных условиях характеризуется большими диапазонами значений (от 0,4 до 1,7 м), формой распределения – близкой к нормальному закону. Распределение вероятностей амплитуд, построенное по данным для периода эксплуатации Иркутской ГЭС, начиная с 1961 г., имеет более сложную асимметричную форму, являющуюся следствием разных принципов управления на различных «исторических» периодах. Дисперсия распределения амплитуд стала больше, чем в естественных условиях.

Рассмотрим, как изменяются гистограммы амплитуд при реализации трех схем регулирования стока. На рис. 4 представлены гистограммы распределений годовых амплитуд колебаний уровня воды, определенных по результатам расчета наполнений водохранилища Иркутской ГЭС





(оз. Байкал). Сравнение графиков показывает, что распределение амплитуд колебаний уровня при реализации правил управления 1988 г. (рис. 4а) носит более «естественный» характер, по форме и параметрам ближе к распределению для условий незарегулированного режима (рис. 3а).

На рис. 4б приведена гистограмма распределения годовых амплитуд колебаний уровня при ограничении метровым диапазоном, т. е. рассматривается реализация диспетчерского графика 2013 г. Анализ гистограммы показывает, что в среднем амплитуды будут меньше, но избежать выхода за пределы метрового диапазона не удастся, несмотря на меньшую дисперсию распределения данного параметра. Гистограмма распределения годовой амплитуды колебаний при реализации «оптимального» диспетчерского графика (рис. 4в) по форме ближе к гистограмме, полученной с использованием диспетчерского графика 1988 г., но характеризуется более равномерным распределением значений.

#### **Приращение уровня воды в озере**

Характеристика приращения уровня воды в озере является важной с точки зрения воспроизводства водных биоресурсов. Желательно, чтобы скорость подъема уровня воды при назначении режимов регулирования не отклонялась от значений, имевших место в естественных условиях. Скорость роста уровня выступает показателем динамики изменения гидроморфологических условий (площадей мелководий) и гидрофизических условий, водообмена с основной водной массой, (температуры и т. д.), определяющих, в свою очередь, условия вызревания личинок омуля, нереста других видов рыб, гнездования водоплавающих птиц и т. п. На рис. 5 представлены гистограммы распределения приращения уровня воды за двухмесячный период (май-июнь), полученные в результате регулирования стока по трем схемам, а на рис. 6 приведено распределение того же параметра, но по данным наблюдений в естественных условиях на водомерном посту Байкал – ст. Байкал. Сравнение гистограмм распределений на рис. 5, 6 показывает, что ограничение диапазона колебаний уровня отметками 456,0–457,0 м приводит к более быстрому подъему уровня и с меньшей дисперсией, характеризующей межгодовую изменчивость этого параметра. Сказанное относится к эвстатическим колебаниям уровня озера. Реальные колебания уровня осложнены короткопериодными стонно-нагонными колебаниями, волнением, сейшами, поэтому оцененное по суточным данным приращение уровня характеризуется большей дисперсией и большим средним значением (рис. 6).

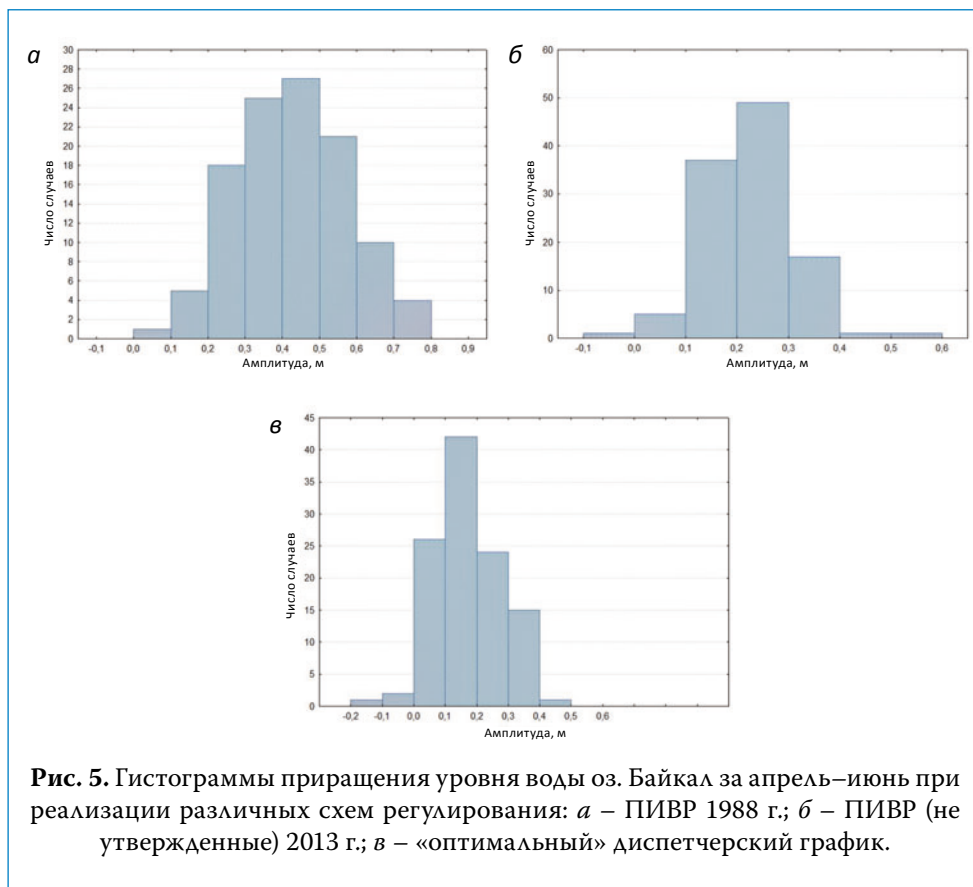


Рис. 5. Гистограммы приращения уровня воды оз. Байкал за апрель–июнь при реализации различных схем регулирования: а – ПИВР 1988 г.; б – ПИВР (не утвержденные) 2013 г.; в – «оптимальный» диспетчерский график.

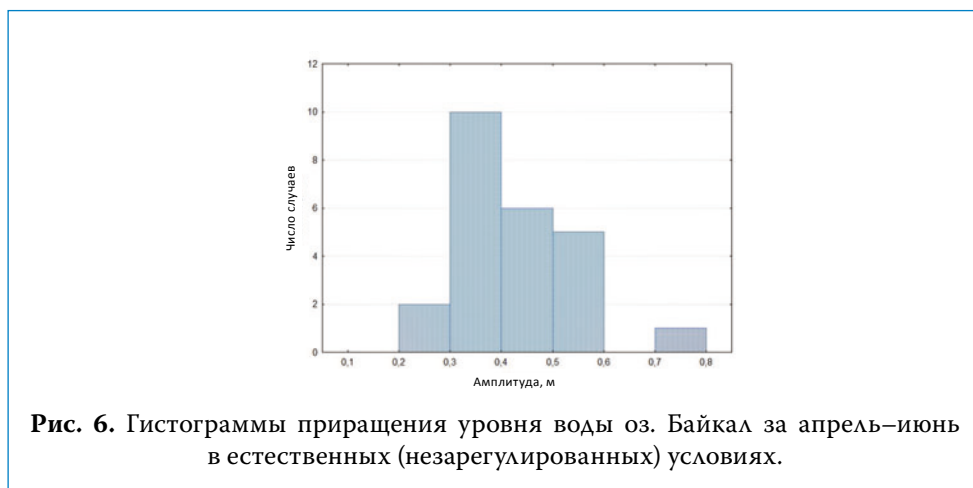


Рис. 6. Гистограммы приращения уровня воды оз. Байкал за апрель–июнь в естественных (незарегулированных) условиях.

### Скорость роста уровня воды в оз. Байкал

Располагая распределениями дат минимального и максимального уровней, а также распределением амплитуды, можно оценить скорость изменения уровня воды при наполнении озера. Этот параметр представляется довольно важным с экологических позиций, поскольку непосредственно задает динамику затопления территорий, значимых с точки зрения биопродуктивности водоема. Тем не менее, необходимо иметь в виду, что при рассматриваемом методе обработки данных наблюдений за уровнем исследуются эвстатические колебания уровня, причем получаются осредненные за несколько месяцев значения.

В табл. 2 представлены сводная оценка параметров гидрологического режима и скорости подъема уровня. Статистическая обработка дает следующие результаты: средняя скорость роста уровня в естественных условиях составляет 0,6 см/сут, при регулировании стока по всем трем схемам скорость роста уровня 0,57–0,58 см/сут, т. е. примерно на 5 % меньше, что в целом позволяет говорить о приемлемости рассмотренных схем регулирования по отношению к данному параметру.

**Таблица 2.** Основные «экологические» параметры колебаний уровня воды в оз. Байкал в естественных условиях

№ п/п	Параметр	Среднее	90 % интервал
1	Дата минимального уровня	21/IV	10/IV – 07/V
2	Дата максимального уровня	20/IX	01/IX – 10/X
3	Амплитуда, м	0,90	0,61–1,3
4	Скорость подъема уровня, см/сут	0,60	0,45–1,1

### ВЫВОДЫ

Сравнительная оценка режимов регулирования уровня оз. Байкал выполнена на основе оценки параметров, характеризующих сезонные изменения уровня озера. Основное требование сформулировано следующим образом: за исключением среднего многолетнего уровня воды, параметры уровня озера при регулировании должны максимально возможно соответствовать естественному водному режиму. При этом, квазиестественный водный режим должен контролироваться по четырем параметрам, имеющим допустимый диапазон заданной вероятности: дата наступления минимального уровня, дата наступления максимального уровня, скорость роста уровня воды, которая не должна быть существен-

но больше, чем это имело бы место в естественных условиях; межгодовая изменчивость уровня (должна оставаться равной своим значениям до зарегулирования стока).

В настоящее время экологические требования к режиму уровня Иркутского водохранилища (оз. Байкал) сводятся, в основном, лишь к качественным выводам о необходимости придерживаться показателей, имевших место в естественном режиме, с различной степенью обеспеченности. Научно обоснованные рекомендации, обеспечивающие минимизацию негативного воздействия последствий регулирования на экосистему озера, отсутствуют. В этих условиях для определения требований к характеристикам гидрологического режима, которые требуется выдерживать в процессе регулирования стока, рекомендуется использовать набор функций распределения: распределение вероятностей максимальной суточной скорости роста уровня воды оз. Байкал за май-июнь в естественных условиях, распределения дат наступления максимумов и минимумов уровня воды и т. п.

Вывод о степени соответствия распределения указанных характеристик тем же распределениям в естественных условиях получен в процессе обработки данных водохозяйственных расчетов. Результаты водохозяйственных расчетов показали, что «искусственное» ограничение регулирования уровня озера диапазоном 1 м приводит к ухудшению рассмотренных критериев и, в целом, подтвердили вывод о невозможности выполнения Постановления № 234 вследствие особенностей гидрологического режима водосбора Байкала.

Оптимизация правил управления позволяет получать такие схемы, которые обеспечивают сохранение основных свойств гидрологического режима озера и удовлетворение нужд всех водопотребителей с заданным уровнем надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1988. 65 с.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.03.2001 № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» // Собр. законодат. Российской Федерации. 2 апреля 2001. № 14. ст. 1366.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 01.07.2016 № 626 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2016–2017 годах» // Собр. законодат. Российской Федерации. 18 июля 2016. № 29. ст. 4811.
4. Гидрологический режим рек бассейна р. Селенги и методы его расчета / под ред. В.А.Семенова и Б. Мягмаржава. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 235 с.

**Сведения об авторах:**

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Бубер Александр Леонидович, заведующий отделом, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова» (ВНИИГИМ), Россия, 127550, Москва, Большая Академическая, 44, корп. 2; e-mail: buber49@rambler.ru

Коробкина Елена Александровна, канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: elenakorobkina@mail.ru