

*На правах рукописи*



**Чернышов Максим Сергеевич**

**ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕРА БАЙКАЛ**

1.6.21 – Геоэкология (географические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Иркутск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, в лаборатории гидрологии и гидрофизики.

**Научный руководитель:**

**Синюкович Валерий Николаевич,**  
кандидат географических наук, с.н.с  
лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИН  
СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Науменко Михаил Арсеньевич,**  
доктор географических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник, заведующий  
лабораторией географии и гидрологии  
Института озераведения РАН –  
обособленного структурного подразделения  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки «Санкт-Петербургский  
федеральный исследовательский центр»,  
г. Санкт-Петербург

**Сутьрина Екатерина Николаевна**  
кандидат географических наук, доцент, зам.  
декана по НИР, доцент кафедры гидрологии и  
природопользования Географического фа-  
культета Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Иркутский  
государственный университет», г. Иркутск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Иркутский государственный  
аграрный университет имени А.А. Ежевс-  
кого», г. Иркутск

Защита состоится «12» мая 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН) по адресу: 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Факс: (3852) 240396. E-mail: iwer@iwer.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем СО РАН и на сайте организации <http://iwer.ru>

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу Института на имя ученого секретаря Совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

доктор географических наук, доцент



Рыбкина И.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Уровненный режим водоемов является основным показателем их водного режима (ГОСТ 19179-73; Чеботарев, 1978). Изменения уровня озера определяются размерами водоемов и соотношением приходных и расходных статей их водных балансов. В приходной части водного баланса оз. Байкал преобладает приток речных вод. В соответствии с изменениями притока формируется и сток из озера, в определенной степени повторяя его динамику и сглаживая колебания уровней. На тесную связь колебаний уровня Байкала с притоком исследователи озера указывали еще до начала организации наблюдений за стоком байкальских рек. Со второй половины XX в. благодаря работам А.Н. Афанасьева, Б.С. Цейтлина, З.А. Викулиной и Т.Д. Кашиновой, а также в связи с проектированием Иркутской ГЭС, была подтверждена главенствующая роль притока в формировании уровня озера и получены количественные выражения соответствующей зависимости, нашедшие практическое применение в воднобалансовых расчетах.

После строительства Иркутской ГЭС (1956 г.) и зарегулирования озера связь его уровня с поверхностным притоком ухудшилась, но в силу преимущественно сезонного регулирования стока через Иркутский гидроузел остается достаточно значимой. Вместе с тем, характер колебаний притока поверхностных вод в оз. Байкал также претерпевает определенные изменения, связанные, в первую очередь, с неустойчивостью климата. Повышение глобальной температуры воздуха с начала 1970-х гг. (Доклад об особенностях ..., 2010; Второй оценочный доклад ..., 2014) особенно заметно проявляется в регионе Сибири и сопровождается перестройкой различных гидрологических процессов, в особенности, стока рек. Все это вызывает определенную трансформацию межгодовых и сезонных колебаний суммарного притока речных вод в озеро, определяет новые условия формирования уровенного режима Байкала и вызывает необходимость более детальных исследований различных характеристик стока байкальских рек. В практику гидрологических расчетов уже сравнительно давно внедряются новые приемы, учитывающие определение расчетных характеристик стока в условиях неоднородности данных наблюдений и нестационарности стока, но они не всегда эффективны из-за большого разнообразия и больших пространственных различий происходящей трансформации водности рек, что делает целесообразным региональный подход к решению рассматриваемой проблемы. В пользу таких подходов говорят локальные гидрологические события в смежных регионах, как, например, катастрофические паводки в начале XXI в. с аномальными, не наблюдаемыми ранее, расходами воды на реках с преобладающим дождевым питанием в бассейне Амура и Дальневосточном Приморье.

В бассейне Байкала, где максимальный сток рек формируется как за счет дождевых паводков, так и весеннего половодья, изменения расчетных характеристик стока нередко носят разнонаправленный характер. Этому способствуют как сложные природные условия байкальской водосборной территории, так и ее расположение на пересечении ведущих процессов атмосферной циркуляции. Вместе с тем, сток байкальских рек не зарегулирован водохранилищами, для них незначительны объемы безвозвратного водопотребления, поэтому изменение условий формирования стока здесь практически полностью являются следствием меняющихся климатических условий, вследствие чего интерпретируются более достоверно.

Исходя из этого, при рассмотрении роли изменчивости речного стока в формировании уровенного режима оз. Байкал, наряду с показателями среднего стока рек, должны учитываться и другие важнейшие его характеристики: максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков, минимальный зимний и летний сток, внутригодовое распределение водности.

**Цель диссертационной работы.** Исследовать формирование уровенного режима оз. Байкал в зависимости от составляющих прихода-расхода воды в озеро, сохранивших климатическую природу, или испытывающих влияние хозяйственной деятельности человека. Основное внимание при этом уделяется изменчивости характеристик стока рек, впадающих в озеро, как слагающих общего притока поверхностных вод.

**Задачи исследования:**

- в условиях неустойчивости климата и изменения порядка использования водных ресурсов Байкала оценить роль основных природно-климатических и антропогенных факторов в формировании уровня режима озера;
- исследовать изменчивость характеристик среднего, максимального и минимального стока рек, впадающих в озеро и влияние происходящих изменений речного стока на динамику уровня водоема;
- проанализировать современные проблемы регулирования уровня режима озера и возможные пути их решения.

**Объект исследования.** Озеро Байкал и его основные притоки.

**Предмет исследований.** Формирование уровня режима оз. Байкал под воздействием природно-климатических и антропогенных факторов и многолетняя изменчивость характеристик речного стока впадающих в озеро рек.

**Фактический материал.** Работа выполнена на основании данных гидрометрических наблюдений Росгидромета. Исследования уровня режима базируются как на фактических сведениях о средних уровнях Байкала, так и приведенных к естественным условиям после зарегулирования озера (1959-2019 гг.). При исследовании трансформации характеристик речного стока в качестве искомым показателей были приняты: среднегодовой сток, максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков, минимальные летние и зимние расходы воды в замыкающих створах 26 рек за все годы наблюдений (преимущественно по 2017 г.). Кроме того, использованы данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам на отдельных станциях, а также по элементам водного баланса озера (1950-2019 гг.).

**Методы исследования.** Анализ данных осуществлялся с соблюдением требований СП-33-101-2003, дополняющих его рекомендаций (Пособие по определению, 1984; Методические рекомендации по..., 2005, 2010а; Стандарт ГГИ, 2017 и др.) и других нормативных документов и общепринятых методов.

**Научная новизна:**

- описаны механизмы формирования многолетних и внутригодовых колебаний уровня оз. Байкал с позиций обусловленности колебаниями основных элементов его водного баланса, формирующихся под действием природно-климатических и антропогенных факторов;
- на основе воднобалансовой схемы реконструкции естественно-условных уровней в годы зарегулирования получен количественный показатель степени нарушения уровня режима оз. Байкал;
- впервые для притоков Байкала, на основе последних данных гидрометрических наблюдений, выполнена оценка трансформации характеристик стока рек, впадающих в озеро, произошедшей с начала 1970-х гг. в результате усиления глобального потепления и выражающейся в существенном уменьшении среднегодовой водности большинства исследуемых рек, максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков, при росте минимального стока, в особенности в зимний период.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные результаты, безусловно, имеют значимый научный и практический интерес. В научном плане - расширяются имеющиеся представления о механизмах формирования различных характеристик водного режима оз. Байкал и впадающих в него рек. В практическом - разница наблюдаемых и реконструированных условно-естественных уровней служит информативным показателем нарушений уровня режима озера после зарегулирования. Сопоставление же характеристик стока на реках, где осуществляются гидрометрические наблюдения, с их значениями, полученными по нормативным методам расчетов (СП-33-101-2003), позволит предложить рекомендации к корректировке их определения в байкальском регионе.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Изменчивость притока поверхностных вод в оз. Байкал служит главным природно-климатическим фактором формирования его уровня режима. Основные показатели стока

впадающих в озеро рек, за исключением минимальной зимней водности, с начала 1970-х гг. характеризуются пониженными значениями и совпадают с повышением температуры воздуха в регионе.

2. Искусственное перераспределение стока из оз. Байкал, осуществляемое Иркутской ГЭС, является основным антропогенным фактором формирования уровня водоема. Масштабы происходящих нарушений уровня режима озера объективно оцениваются восстановлением условно-естественных уровней по предложенной воднобалансовой схеме.

3. Основные проблемы регулирования уровня режима и использования водных ресурсов Байкала связаны с экстремальными по водности периодами, с недостатками в нормативно-правовой базе по управлению водными ресурсами и со сложностями соблюдения предельных уровней озера и новых ограничений стока р. Ангара.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием большого объема натуральных данных, полученных из достоверных и официальных источников и применением гостированных методов исследования.

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на совещаниях и конференциях: III Международной научно-практической конференции «Современные проблемы географии и геологии» с элементами школы-семинара для студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 2014); VI Международной Верещагинской Байкальской конференции (Иркутск, 2015); IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологический риск» (Иркутск, 2017); Международной научно-практической конференции «Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития» (Иркутск, 2017); Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», приуроченной ко Всемирному дню метеорологии и Всемирному дню водных ресурсов, 100-летию Иркутского государственного университета, 70-летию географического факультета и 55-летию кафедры метеорологии и охраны атмосферы (Иркутск, 2018); Международной конференции «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (Иркутск, 2018); Международной научно-практической конференции «Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования», посвященной памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова (Иркутск, 2019); II Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» (Иркутск, 2019).

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 129 страниц, включая 15 таблиц, 25 рисунков, 136 источников в списке литературы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассматриваются природные условия водосборной территории оз. Байкал, составляющей 540 тыс. км<sup>2</sup>. Площадь водного зеркала озера составляет 31 500 км<sup>2</sup>. Охарактеризованы особенности географического положения бассейна, его рельефа и геологии, климатических и почвенных условий. Гидрографическая сеть бассейна включает более 5000 рек, из которых 1053 имеет длину 10 и более км, а остальные водотоки представлены небольшими речками и ручьями. К основным притокам озера относятся, прежде всего, Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин. Селенга – самый крупный приток озера, поставляющий около половины объема стока речных вод (~ 30 км<sup>3</sup> в год).

Модуль годового стока рек в бассейне Байкала изменяется от 0,62 до 27,8 л/с·км<sup>2</sup> (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976; Экологический атлас бассейна ..., 2015). Как и в случае с климатом, распределение стока по территории во многом отражает картину рельефа и направления преобладающего переноса влаги с воздушными массами. Северные и горные реки, которые берут своё начало на склонах Хамар-Дабана, характеризуются наибольшей водностью, находящейся в пределах от 12,7 до 27,8 л/с·км<sup>2</sup>.

**Во второй главе** описываются используемые методы исследования и исходные данные.

Изучение уровня режима Байкала выполнено с учетом исследований разных лет (Лопатин, 1924; Шостакович, 1926; Афанасьев, 1960, 1976; Федоров, 1981; Бычков, Никитин, 2015; Синюкович, 2016; Гармаев и др., 2017 и др.). Произошедшие нарушения отмеченных ранее закономерностей в колебаниях уровня озера после строительства Иркутской ГЭС оцениваются через сопоставление различных его характеристик в годы естественного режима и после зарегулирования. В диссертации для этих целей используется доработанная воднобалансовая схема восстановления условно-естественных уровней, разница которых с их фактически наблюдаемыми значениями служит объективным показателем искусственного повышения уровня озера.

В сравнении с исходной схемой (Синюкович, 2005) расчетное выражение дополняется величиной невязки баланса, которая в отдельные месяцы достигает  $2,59 \text{ км}^3$ , или 8 см уровня. Тогда, изменение уровня ( $\Delta H$ ) за некоторый расчетный интервал находится как

$$\Delta H = X + Y - Y_A - E - S,$$

где  $X$  – атмосферные осадки на поверхность озера;  $Y$  – приток речных вод;  $Y_A$  – поверхностный сток из озера через р. Ангару;  $E$  – испарение с водной поверхности;  $S$  – невязка.

Сложность использования данной схемы состоит в нахождении неизвестного стока из озера ( $Y_A$ ), который мог быть после зарегулирования при естественном (более низком) уровне. Для этого используется связь стока с уровнем озера  $Y_A = f(H)$  в бытовых условиях, стабильность которой обеспечивается устойчивостью русла в истоке р. Ангары, прорезающего коренные породы.

В работе по известным значениям элементов водного баланса и трем вариантам искомых зависимостей  $Y_A = f(H)$  выполнены помесечные расчеты уровней, с верификацией полученных результатов за 1950-1957 гг. Средняя квадратическая ошибка восстановления составила от 2,2 до 2,6 см, что позволило в качестве расчетной принять зависимость, построенную нами по сведениям о расходах воды р. Ангары в истоке и уровнях оз. Байкал за 1950-1957 гг.

Многолетняя изменчивость различных показателей речного стока в диссертации исследуется с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. В 1972 г. опыт применения статистических методов в исследовании стока позволил сформировать «Указания по определению расчетных гидрологических характеристик», которые в дальнейшем уточнялись и дополнялись в основном усилиями ГГИ (Пособие по определению..., 1984; Методические рекомендации по..., 2005, 2010а; Стандарт ГГИ, 2017 и др.).

На современном этапе в связи с тенденцией потепления климата, наблюдающейся с последних десятилетий XX столетия, разработан ряд рекомендаций для оценки рядов гидрологической информации с нарушенной стационарностью (однородностью) в результате влияния климатических факторов (СП 33-101-2003; Методические рекомендации по..., 2010а, 2010б; Стандарт ГГИ, 2017).

С учетом всех обстоятельств расчеты исследуемых характеристик в работе в основном проводились в соответствии с последним нормативным документом – СП 33-101-2003 и дополняющих его рекомендаций (Пособие по определению..., 1984; Методические рекомендации по..., 2005, 2010а; Стандарт ГГИ, 2017 и др.). Для оценок распределения рассматриваемых рядов гидрологических данных использовалось трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля и Пирсона III типа. Однородность выборочных оценок средних значений ( $Q_1, Q_2$ ) или дисперсий ( $\sigma^2_1, \sigma^2_2$ ) оценивалась по критериям Стьюдента ( $t$ ) и Фишера ( $F$ ) с уровнем значимости  $\alpha = 5\%$  для разделенных на две части исходных рядов относительно потепления – от начала наблюдений по 1970 г. ( $n_1$ ) и за период 1971 – 2017 гг. ( $n_2$ ). В случае неоднородности по одному или обоим критериям распределение исследуемых характеристик рассчитывалось по двум частям ряда с построением общей (составной) кривой.

При оценке значимости внутрирядных трендов использовалась оценка достоверности соответствующего коэффициента корреляции по критерию Стьюдента (Румшицкий, Смирнов, 1973; Ганджумян, 1990; Рождественский, Чеботарев, 1974; Сикан, 2007) для уровней значимости 5 и 10 %. Для оценки внутрирядной связи данных рассчитывался коэффициент корреляции стока в смежные годы  $r(1)$ .

Материалами для исследования уровня оз. Байкал послужили результаты регулярных гидрометрических наблюдений за уровнем на постах Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет, ранее Гидрометслужба СССР). Помимо наблюдаемых данных по уровню использованы сведения по воднобалансовым составляющим Байкала А.Н. Афанасьева (1960, 1976) и ФГБУ «Иркутское УГМС» Росгидромета, а также информация о температуре воздуха и атмосферных осадках по отдельным станциям Росгидромета и из архива глобальной базы реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center for Atmospheric Research).

В качестве характеристик стока используются многолетние данные по среднему, максимальному и минимальному стоку притоков оз. Байкал в замыкающих створах. Помимо главных притоков озера (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин) к исследованию привлечены данные по стоку еще 23 рек, освещенных гидрометрическими наблюдениями (период наблюдений от 31 до 85 лет).

**Третья глава** содержит общие сведения об уровне оз. Байкал и его формировании под действием природных и антропогенных факторов. По результатам наблюдений многолетних наблюдений в первую очередь выделяется наличие двух периодов с разной высотой уровня, связанных со строительством Иркутской ГЭС и фактическим превращением озера в водохранилище сезонного и частично многолетнего регулирования. После зарегулирования уровень Байкала в среднем на 0,8 м стал выше, чем в естественных условиях, а его изменения регламентируются Основными правилами использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (ПИВР), а с 2001 г. и отдельными постановлениями Правительства РФ.

В период естественного режима наивысший уровень озера достигал отметки 456,95 м ТО (1932 г.), а минимальный – 454,93 м (1904 г.), т.е. многолетняя амплитуда естественных колебаний уровня составляла 2,02 м. С учетом максимума, установленного по нивелировке засечки исторического уровня 1869 г., составляющего 457,10 м, она возрастает до 2,17 м.

Нормальный подпорный уровень (НПУ) Байкала по проекту Иркутской ГЭС составляет 457,00 м ТО с форсировкой до 457,50 м в годы повышенного притока воды. С начала регулирования и до 2001 г. уровень озера изменялся фактически с тем же (2,15 м) размахом – от 455,27 (1982 г.) до 457,42 м (1988 г.). При этом внутригодовые его колебания также были близки к соответствующим значениям в естественных условиях – от 0,56 до 1,81 м. Некоторое увеличение амплитуды колебаний зарегулированных уровней до 2000 г. связано с неоправданно частыми форсировками вопреки действующим ПИВР, предусматривающим превышение НПУ только в годы с обеспеченностью притока менее 10 %.

В 2001 г. постановлением Правительства РФ допустимый диапазон регулирования уровня Байкала сузился до одного метра (456-457 м), после чего его форсировки не допускались вплоть до 2020 г. Однако в маловодные периоды имела место и, наоборот, сработка уровня озера ниже УМО, с рекордным снижением в апреле 1982 г. до 455,27 м. Несмотря на форсировки и уход за УМО, внутригодовые изменения уровня в годы естественного режима и после зарегулирования в целом остаются достаточно синхронными, с наибольшими различиями в зимние месяцы.

До зарегулирования колебания уровня оз. Байкал определялись в основном изменениями соотношения приходно-расходных статей его водного баланса, формирующихся в соответствии с физико-географическими и климатическими условиями территории, т.е. региональными природно-климатическими факторами. Прямая связь между среднегодовыми уровнями озера и суммарным притоком рек (80-88 % общего прихода) до зарегулирования (1901-1958 гг.) по коэффициенту корреляции ( $r$ ) составляет 0,86, а с учетом притока двух лет (текущего и предшествующего) увеличивается до 0,98. Связь с уровнем других составляющих водного баланса, осадков и испарения значительно ниже ( $r = 0,51$  и  $0,22$  соответственно).

Внутригодовые флуктуации уровня также тесно связаны с колебаниями притока поверхностных вод (Рисунок 1), отставая от них на 2-3 месяца. Их взаимокорреляционная

функция на этом сдвиге достигает максимума 0,74-0,75, тогда как без сдвига величина  $r$  между ними составляет только 0,23.

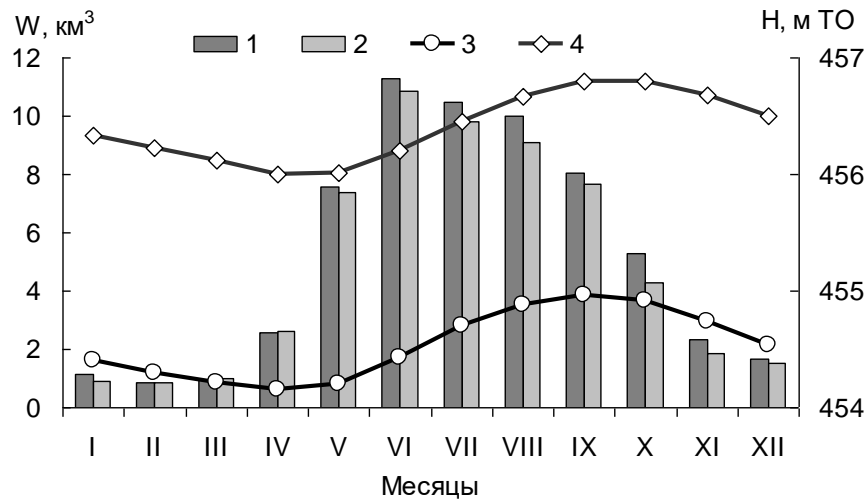


Рисунок 1. – Осредненный внутригодовой ход притока и уровня до и после зарегулирования. Приток: 1 - до зарегулирования; 2 – после зарегулирования; уровень: 3 - до зарегулирования, 4 – после зарегулирования.

Связь уровня в разрезе месячных значений с осадками и испарением также значительно слабее, однако в начале зимней межени, когда приток интенсивно снижается, существенно повышается роль испарения с водной поверхности Байкала, которое в ноябре-декабре в два раза может превышать речной приток (Рисунок 2) и, таким образом, становится главным фактором сработки уровня, обеспечивающим его снижение до 10-15 см в месяц.

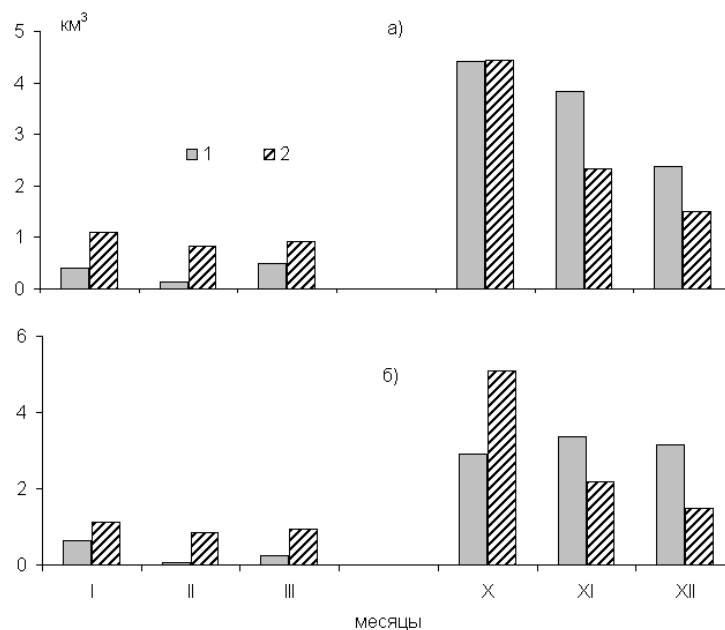


Рисунок 2. – Испарение с поверхности озера (1) и речной приток (2) в холодный период года. а – 2016 г., б – осредненные данные за 1971-2017 гг.

Для внутригодовых колебаний уровня Байкала большое значение имеют также морфометрические особенности озера, которые также выступают в качестве естественных обуславливающих факторов. К ним относятся ограниченная пропускная способность истока Ангары и большие размеры (31500 км<sup>2</sup>) водной поверхности Байкала, обеспечивающие



сглаживание колебаний уровня озера и стока р. Ангары. Если коэффициент естественной зарегулированности притока в период естественного режима (1901-1958 гг.) составляет 0,64, то для стока из озера уже 0,89, т.е. за счет сглаживающего влияния озера коэффициент зарегулированности стока Ангары увеличивается на 0,25, или 39 % (в маловодные годы после строительства Иркутской ГЭС зарегулированность стока достигала 0,99).

После строительства Иркутской ГЭС уровень Байкала испытывает влияние хозяйственной деятельности, связанной с перераспределением стока из озера (Рисунок 3). Если в годы естественного режима максимальный сток из озера приходился на август-октябрь, то теперь он сместился на ноябрь-декабрь.

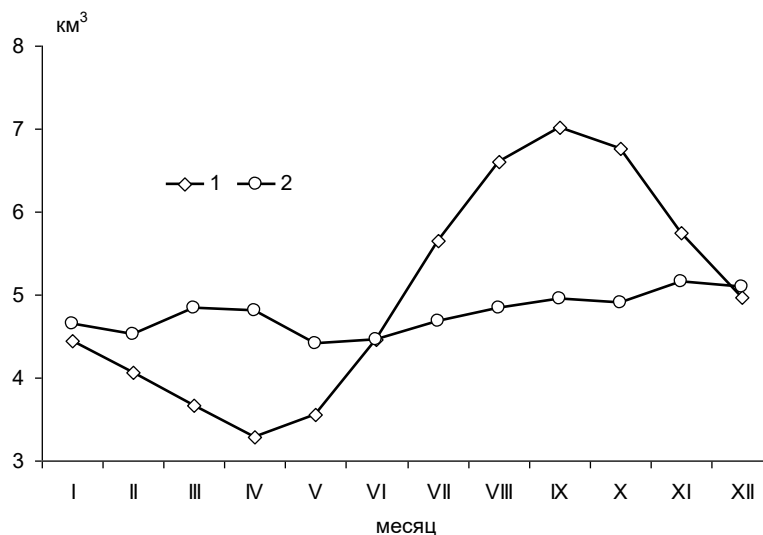


Рисунок 3. – Внутригодовые изменения стока из озера в годы естественного водного режима (1) и после зарегулирования (2)

В соответствии с ПИВР и текущей гидрологической обстановкой режим стока через Иркутскую ГЭС, а, следовательно, и формирование уровня оз. Байкал, зависят от времени года, водохозяйственной обстановки, долгосрочных гидрометеорологических прогнозов и т.д. Меняющаяся ситуация сопровождается и сменой стратегии использования водных ресурсов озера, в особенности в условиях аномально высокой или низкой водности. Исполнение постановления Правительства РФ в части метрового диапазона колебаний уровня соблюдалось до 2015 г., однако затем, в связи с аномальным снижением притока, уровень Байкала опускался ниже установленного минимального значения 456 м, что определило принятие Правительством краткосрочных постановлений со снижением нижней предельной отметки уровня до 455,54 м. Несмотря на это Федеральное Агентство водных ресурсов РФ (ФАВР) воздерживается от сработки Байкала в маловодный период 2014-2017 гг. до таких пределов, практикуя постоянные попуски через Иркутский гидроузел в размере 1250-1300 м³/с, в связи с чем колебания уровня озера в этот период приобретали присущий непроточным (бессточным) водоемам характер.

Таким образом, влияние на формирование уровня Байкала режима стока через Иркутскую ГЭС усиливается в аномально маловодные и многоводные периоды. Для количественной оценки степени наблюдаемых после зарегулирования нарушений уровня озера используем его условно-естественные уровни (Рисунок 4), характеризующие наиболее вероятную картину уровня озера в отсутствие подпора от плотины Иркутской ГЭС. Заметно, что гидрографы наблюдаемых и восстановленных уровней сближаются в маловодные периоды и расходятся в многоводные (и в годы форсировок).

По результатам расчетов высота антропогенного повышения уровня оз. Байкал от подпирающего воздействия Иркутского водохранилища за 1962-2020 гг. изменялась от 0,13 до 1,22 м и в среднем составила 0,71 м. Превышение наблюдаемых уровней над условно-естественными зимой на 20-30 см больше, чем летом, что также является следствием стратегии

регулирования гидроэнергетики, направленной на предотвращение холостых сбросов в многоводные годы. До 2001 г. зарегулированные уровни в среднем были выше условно-естественных на 70 см, а в сравнении с наблюдаемыми до 1958 г. – на 80 см.

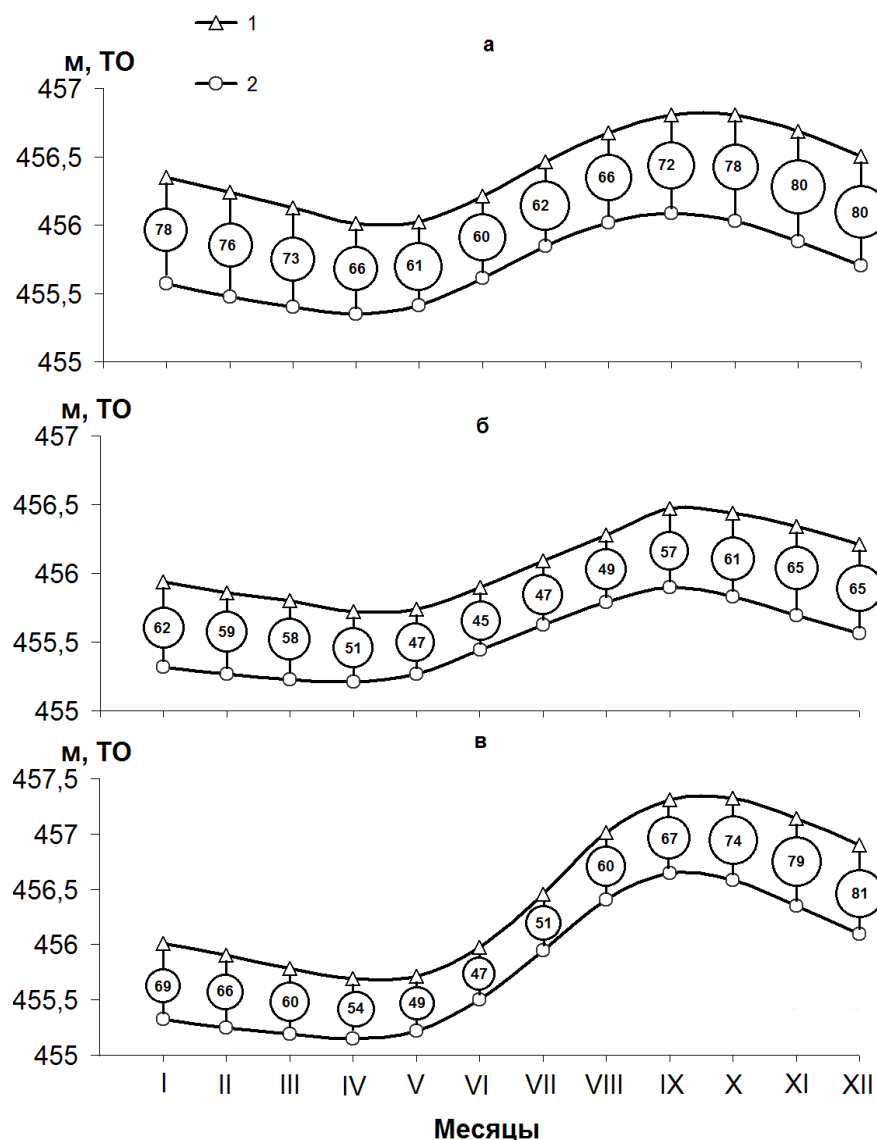


Рисунок 4. – Зарегулированные (1) и условно-естественные (2) уровни. а – среднее за 1962-2019 гг.; б – маловодный 2017 г.; в – многоводный 1973 г.; цифры в кружках – разница уровней в см.

В целом, сравнение динамики наблюдаемых и реконструированных уровней показывает, что в естественных условиях падение уровня в маловодные годы было бы не таким глубоким, чем имело место в действительности.

При регулировании стока из озера также должны быть учтены требования различных водопользователей как в верхнем бьефе Иркутской ГЭС (Иркутское водохранилище и оз. Байкал), так и в нижнем (р. Ангара ниже плотины). Минимальный расход воды через Иркутский гидроузел в действующих ПИВР составляет 1300 м<sup>3</sup>/с (во время ледостава 1250 м<sup>3</sup>/с), что продиктовано требованиями безопасной работы водозаборов, расположенных ниже по течению городов (Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово). В навигационный период (май-октябрь) расход должен быть не ниже 1500 м<sup>3</sup>/с, хотя по факту этот предел уже составляет 1600-1700 м<sup>3</sup>/с (Правила использования водных..., 2013).

Максимальный расход воды через Иркутскую ГЭС, составляющий 6000 м<sup>3</sup>/с, представляет серьезную угрозу для застроенной пойменной части Ангары, где затопление и

подтопление уже начинаются при расходах воды 2800-3000 м<sup>3</sup>/с (Бычков, Никитин, 2015). Масштабы затопления существенно возрастают при прохождении паводков на р. Иркут, впадающей в р. Ангару в пределах г. Иркутска (в июле 1971 г. расход воды Иркуты достигал 4800 м<sup>3</sup>/с).

В верхнем бьефе Иркутской ГЭС требования водопользователей в основном касаются предельных уровней Иркутского водохранилища и оз. Байкал. Вместе с этим, с 2001 г. к регулированию стока через Иркутский гидроузел предъявляются и экологические требования, рекомендованные Гидропроектом при обосновании постановления Правительства № 234 по уровню озера (Обоснование экстремальных уровней..., 2001). Основные рекомендации отражают предложения (Экологические требования к ..., 1996; Гидроэнергетика и состояние..., 2019) и сводятся к режиму регулирования, обеспечивающему определенный сезонный режим наполнения и сработки уровня оз. Байкал при различных условиях водности. Все перечисленные водохозяйственные и экологические ограничения и требования к режиму стока через Иркутскую ГЭС выступают дополнительными антропогенными факторами формирования уровня оз. Байкал.

Помимо регулирования стока на Иркутской ГЭС, влияние хозяйственной деятельности на уровень режим может проявляться через антропогенные нарушения стока байкальских рек. В бассейне оз. Байкал, где нет водохранилищ, основные нарушения стока отдельных рек могут быть связаны с хозяйственным водопотреблением.

На российской части территории бассейна годовой забор воды на хозяйственные нужды из поверхностных источников в начале XXI века составлял 503,1 млн. м<sup>3</sup>, при безвозвратных потерях 123,4 млн. м<sup>3</sup> (Гармаев, Христофоров, 2010). Близкие оценки приводятся и Федеральным агентством водных ресурсов (ФАВР) на 2016 г. – 488 и 95 млн. м<sup>3</sup> соответственно, а потребления речной воды на территории Монголии не превышают 120-130 млн. м<sup>3</sup> (Монгол улсын статистикийн ..., 2003).

Основное потребление воды на водосборной территории оз. Байкал приходится на бассейн Селенги, где сосредоточены основные промышленные и сельскохозяйственные объекты, проживает большая часть населения Бурятии и Монголии. Для других рек, в соответствии с масштабами хозяйственной освоенности, потери стока за счет безвозвратного водопотребления несоизмеримо меньше, даже на наиболее крупных водотоках. Общее водопотребление в бассейне Верхней Ангары, например, составляет 51,1 млн. м<sup>3</sup>/год, что в средний по водности год соответствует 0,39 % объема ее стока (Схема комплексного использования..., 2014). В бассейне р. Баргузин соответствующие показатели еще ниже - 8,96 млн. м<sup>3</sup>/год и 0,10 %.

Потери стока р. Селенги за счет хозяйственного использования воды в 1980-е гг. достигали 1,3 км<sup>3</sup>/год (Родионов, Нямжав, 1986). На конец 1990-х – начало 2000-х гг. потребление воды на орошение в российской части бассейна Селенги в сравнении с докризисным (до 1992 г.) периодом сократилось в 3-5 раз и в общем объеме водозабора составляло порядка 10 % (Гармаев, Христофоров, 2010). По сведениям ФАВР в 2016 г. общее водопотребление в бассейне составило 0,554 км<sup>3</sup> при объеме безвозвратных потерь 0,075 км<sup>3</sup>.

На монгольской части территории бассейна р. Селенги доля орошаемого земледелия в общем потреблении воды сохраняется на уровне 20 %. Планируемые к 2021 г. здесь затраты воды на орошение оценивались от 0,17 до 0,36 км<sup>3</sup>/год, при общем объеме водозабора от 0,48 до 0,91 км<sup>3</sup>/год (Гармаев и др., 2019). В этом случае безвозвратные потери воды Селенги увеличиваются до 0,2 км<sup>3</sup>/год и вместе с потерями на российской части территории обуславливают общее снижение притока поверхностных вод в оз. Байкал около 0,3 км<sup>3</sup>/год или 0,5-0,6 % от суммарного стока рек.

В перспективе определенные потери и перераспределение стока р. Селенги может произойти в случае реализации планов гидроэнергетического строительства на территории Монголии. При создании наиболее крупных водохранилищ на р. Селенге (ГЭС Шурэн) и ее притоке Эгийн-Гол (ГЭС Эгийн-Гол) существенные изменения стока реки в нижнем течении (рзд. Мостовой), с учетом данных (Гречушникова, Эдельштейн, 2016; Бычков и др., 2017),

возможны в зимние месяцы, когда водность реки в результате эксплуатации одного из водохранилищ может увеличиваться в два-три раза. Суммарное снижение стока в теплое время года и его повышение зимой в результате работы Шурэнской ГЭС, например, составляет около  $2 \text{ км}^3$ , что эквивалентно изменению уровня Байкала на 6-7 см.

В годы начального заполнения каждого из водохранилищ, которое составит 3-5 лет, поступление селенгинских вод в оз. Байкал будет ниже ориентировочно на  $1 \text{ км}^3/\text{год}$ , что соответствует снижению уровня озера на 3 см.

Следовательно, за счет хозяйственного потребления воды в бассейне Байкала приток поверхностных вод в озеро в среднем снижается до  $0,3 \text{ км}^3/\text{год}$ , что не превышает 1 % от суммарного стока рек и равнозначно снижению уровня озера на 1 см. При реализации планов строительства ГЭС на территории Монголии в первые годы после начала эксплуатации водохранилищ приток поверхностных вод в озеро также будет ниже, обуславливая и более низкий уровень водоема. После заполнения водохранилищ их влияние на уровень Байкала будет проявляться во внутригодовом изменении его режима.

**В четвертой главе** рассматриваются многолетние изменения принятых характеристик стока байкальских притоков с определением значений расчетной обеспеченности.

Многолетние изменения *годового стока рек*, несмотря на разные размеры и различные природные условия их водосборных территорий, достаточно схожи. Для трех главных притоков заметно наличие разнонаправленных долговременных тенденций стока. Для р. Селенги они отличаются снижением водности, а для Верхней Ангары преобладающим был рост стока, тогда как Баргузин отличала относительная стабильность водности. Нарушение согласованности колебаний водности Селенги и Верхней Ангары стало проявляться с начала потепления (Синюкович и др., 2013; Чернышов, Синюкович, 2015).

В среднем скорость ежегодного снижения стока ( $dQ$ ) р. Селенги составила  $2,8 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, однако после 1996 г. она стала вдвое больше. Темпы роста стока Верхней Ангары были значительно ниже ( $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$  за год), однако в 2015-2016 гг. сток всех трех водотоков оказался минимальным за весь период наблюдений.

Параметры распределения годового стока трех рассматриваемых рек характеризуются значениями  $C_v$  0,17-0,26 и отношением  $C_s/C_v$  от 1,5 до 3,0. Лучшее всего эмпирическим точкам соответствуют аналитические кривые трехпараметрического гамма-распределения. Для р. Селенги весь период наблюдений в сравнении с данными (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) отличается увеличением диапазона колебаний, снижением среднего значения и ростом вариабельности. До потепления ее средний сток составлял  $939 \text{ м}^3/\text{с}$ , а за период с 1971 г. он снизился до  $831 \text{ м}^3/\text{с}$  (на 11 %). Тем не менее, по критерию Стьюдента указанные средние значения могут считаться однородными. Однако по критерию Фишера однородность данного ряда не подтверждается, хотя расчетные значения стока ( $Q_{p\%}$ ) Селенги обеспеченностью 5, 25 и 50 %, полученные за весь период наблюдений и по составному распределению практически не различаются (разница  $10\text{-}20 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Средние значения и дисперсии стока Верхней Ангары и Баргузина в годы до и после потепления не превышали критических значений соответствующих статистик Стьюдента и Фишера. Показатели распределения стока Верхней Ангары за полный период наблюдений, как и Селенги, характеризуются расширением диапазона колебаний в основном за счет многоводного 2008 г. и маловодья 2013-2015 гг. Несмотря на это, изменчивость стока стала существенно ниже, а средняя величина и основные расчетные значения стока в сравнении с оценками (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) изменились незначительно и преимущественно оказываются выше на  $10\text{-}15 \text{ м}^3/\text{с}$  (~4 %).

Для р. Баргузин, в соответствии с отмеченной выше стабильностью, изменения параметров распределения стока получились еще менее значительными – различия расчетных значений с оценками (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) не превышают  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Внутрирядная скоррелированность (инерционность) стока рассматриваемых рек соответствует их крупности – наибольшие значения  $r(1)$  характерны для р. Селенги, наименьшие – для р. Баргузин.

В отношении среднегодового стока остальных 23 притоков оз. Байкал можно отметить, что в первом приближении особенности его колебаний группируются в соответствии с гидрологическим районированием (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) в зависимости от преобладания снегового или дождевого питания.

В периоды до и после потепления однородность исходных данных по значениям дисперсий нарушена только для одной реки (Слюдянка), а по средним величинам стока – еще для трех водотоков. С учетом результатов дополнительной проверки однородности данных по этим рекам (критерий Вилькоксона) составное распределение, для определения стока расчетной обеспеченности использовано только для Слюдянки.

В соответствии с преобладающей общей тенденцией снижения стока рек с конца XX в. его значения заданной вероятности превышения в сравнении с данными (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976) в основном уменьшились.

Анализ многолетних колебаний *максимальных расходов воды* главных притоков Байкала в период половодья указывает на достаточно схожий характер их динамики с годовым стоком.

Для р. Селенги характерно снижение стока со скоростью  $\sim 10 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, для Верхней Ангары – рост с интенсивностью  $\sim 4 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, а для Баргузина – относительная стабильность с незначительным отрицательным трендом. Для всех трех рек за счет удлинения рядов на  $n_2$  произошло расширение диапазона колебаний расходов воды, но если для Верхней Ангары это обусловлено новым наибольшим значением (2007 г.), то для двух других водотоков новыми оказались наименьшие значения.

В результате среднее значение максимальных расходов талых вод р. Селенги по полному ряду оказывается ниже на 8 %, чем по (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976), а по части ряда  $n_2$  – на 17 %. Несмотря на более низкую вариабельность стока во второй части ряда ( $\sigma_1 = 735 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\sigma_2 = 630 \text{ м}^3/\text{с}$ ), статистика Фишера по разделенному ряду здесь оказалась ниже соответствующего критического значения, но по критерию Стьюдента однородность средних значений для  $n_2$  и  $n_1$ , характеризующихся соотношением 0,84, не подтверждается.

Среднее значения стока по полному ряду для Баргузина также оказалось ниже, чем в (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976), а для Верхней Ангары, наоборот, выше. Средние значения и дисперсии до и после потепления для Верхней Ангары и Баргузина остаются однородными. Асимметрия же стока Баргузина и Верхней Ангары за все годы наблюдений стала выше, чем до 1971 г., а Селенги, наоборот, снизилась. Лучшим соответствием аналитических кривых максимальных расходов талых вод эмпирическим точкам отличается распределение Крицкого–Менкеля, однако для Верхней Ангары и Баргузина это достигается при использовании усеченного варианта гамма-распределения.

Расчитанное для Селенги составное распределение для обеспеченностей  $< 50 \%$  фактически совпадает с распределением по полному ряду (разница не превышает  $30 \text{ м}^3/\text{с}$ ), поэтому корректировка расчетных значений стока с использованием составной кривой для данного водотока не требуется.

Для Селенги и Баргузина снижение расходов воды обеспеченностью 1 %, рассчитанных за весь период наблюдений, составляет  $\sim 20 \%$ . Практически в таких же масштабах вырос соответствующий расчетный расход Верхней Ангары (17 %). Для вероятностей превышения 5 и 25 % отмеченные различия расчетных максимумов талых вод сохраняются по знаку, но снижаются и по абсолютным и относительным значениям.

Для остальных водотоков, в период потепления было характерно снижение максимальных расходов талых вод, в результате чего значения стока большинства рек для всех расчетных обеспеченностей уменьшились преимущественно на 10-20 %, но на отдельных реках эта разница оказалась более значительной.

С учетом оценки однородности используемых данных, подтвердившей неоднородность сопоставляемых периодов по двум критериям, полученные значения стока расчетных обеспеченностей для трех рек (Бол. Половинная, Похабиха, Безымянная) были скорректированы по составному распределению.

Корреляция стока в смежные годы для рассматриваемых рядов получилась невысокой и, в отличие от годового стока, не имеет явно выраженной связи с крупностью рек – для Селенги, самого крупного водотока,  $r(1)$  составляет только 0,04, а для таких небольших рек как Харлахта и Давша, имеющих сток в несколько сот раз меньше, достигает 0,24.

В межгодовой динамике *наибольших расходов воды летних дождевых паводков* для трех главных притоков оз. Байкал наблюдаются тенденции снижения. Для Верхней Ангары и Баргузина они выражены незначительно и характеризуются интенсивностью менее  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, а для Селенги средняя скорость снижения составляет около  $14 \text{ м}^3/\text{с}$  в год, но, как и в случае с годовым стоком, с конца 1990-х гг. она становится существенно выше.

По полным рядам наблюдений диапазон колебаний стока в сравнении с (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976) не изменился, за исключением р. Баргузин, где максимальный паводочный расход 1998 г. оказался наибольшим за весь период наблюдений.

В соответствии с отмеченными отрицательными трендами средние значения стока с учетом удлинения рядов на  $n_2$  для Верхней Ангары и Баргузина уменьшились на 2-4 %, а Селенги – на 11 %. Рассчитанные в соответствии со значениями  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  в рассматриваемых выборках статистики Стьюдента и Фишера не превышают критических значений. На это указывают также низкие значения  $r(1)$ , составляющие по абсолютному значению около 0,1.

Параметры распределения максимальных паводочных расходов воды трех рассматриваемых рек за все годы наблюдений характеризуются достаточно близкой изменчивостью ( $C_v$  от 0,41 до 0,46) и асимметричностью ( $C_s = 3-4C_v$ ).

Полученные значения  $Q_{p\%}$  для Селенги и Верхней Ангары получились на 10-15 % ниже, чем в (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976) или по первой части рядов ( $n_1$ ), а для Баргузина соответствующие различия оказались несущественными.

В отношении других рассматриваемых притоков озера также можно говорить об общем снижении стока, вследствие чего значения максимального дождевого стока большинства рек для всех расчетных обеспеченностей уменьшились преимущественно на 5-20 %. Данная тенденция указывает на изменение условий формирования паводков в байкальском бассейне в период потепления, что согласуется с результатами исследований по изменениям особенностей циркуляции атмосферы в регионе (Шимараев, Старыгина, 2010; Бережных, Марченко и др., 2012; Кононова, 2015; Antokhina et al., 2017; Сутырина, 2018) и др.

Диапазон колебаний максимальных значений дождевого стока остальных рек достаточно широк и находится в пределах от 0,93 (Давша) до 1910 (Снежная)  $\text{м}^3/\text{с}$ . Показатели распределения максимальных расходов воды для них по изменчивости отвечают значениям  $C_v$  от 0,36 (Давша) до 2,26 (Бол. Половинная), а по асимметрии – отношению  $C_s/C_v$  от 1,0 (Снежная) до 6,0 (Безымянная). Отрицательные значения  $r(1)$  отмечаются значительно чаще, чем положительные и превышают их по абсолютной величине (-0,33 против 0,13).

В соответствии с отмеченными тенденциями для всех исследуемых рядов характерно проявление отрицательных трендов, однако невысокие значения коэффициента достоверности (детерминации) их аппроксимации, за исключением р. Кика не превышающие 0,04, свидетельствуют о низкой статистической значимости этих долговременных тенденций.

В динамике *минимальных срочных расходов* за период открытого русла трех главных рек отмечается проявление долговременных тенденций. Для р. Селенги характерен устойчивый отрицательный тренд ( $dQ = -4,6 \text{ м}^3/\text{с}$  в год;  $R^2 = 0,27$ ;  $\alpha = 0,05$ ), а для Верхней Ангары – положительный ( $dQ = 0,9 \text{ м}^3/\text{с}$  в год;  $\alpha = 0,10$ ). Для р. Баргузин также отмечается снижение стока ( $dQ = -0,4 \text{ м}^3/\text{с}$  в год), но статистически недостаточно устойчивое.

Однородность исходных рядов минимального летнего стока основных рек нарушается по одному из принятых критериев, в связи с чем составное распределение для них не рассчитывалось. Вместе с этим, параметры распределения минимального летнего стока для полного периода наблюдений незначительно различаются с соответствующими показателями до 1971 г. Так, для рр. Селенги и Верхней Ангары на 1,0 увеличилось соотношение  $C_s/C_v$ , в то время как  $C_v$  для стока Селенги не изменилось, а для Верхней Ангары возросло вдвое. Однако

наиболее существенный рост соотношения  $C_s/C_v$  отмечается для р. Баргузин - по отношению к данным до 1971 г. оно увеличилось в шесть раз.

Эмпирическое распределение минимальных летних расходов воды этих рек также лучше всего соответствует трехпараметрическому распределению Крицкого-Менкеля, однако для Верхней Ангары отклонение эмпирических точек в области значений обеспеченности 95-99 % от аналитической кривой требует применения усеченного или составного распределения.

Диапазон колебаний стока на рр. Селенга и Верхняя Ангара в сравнении с данными (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976) расширился, но если в первом случае за счет увеличения верхнего предела после потепления, то во втором расширение диапазона произошло в обе стороны.

В соответствии с отмеченными выше долговременными тенденциями, полученные значения  $Q_{p\%}$  минимального стока Верхней Ангары повысились, а двух других основных притоков Байкала получились ниже, чем по данным до 1971 г.

В отношении остальных, более мелких притоков оз. Байкал, также можно говорить о постепенном снижении минимальных летних расходов воды. Различия стока расчетных обеспеченностей, полученных до потепления и по второй половине ряда, для большинства рек составляют 5-20 %, достигая в некоторых случаях 45 %.

На главных притоках оз. Байкал *минимальный зимний сток*, в период потепления повышался. Его рост в целом объясняется меньшим промерзанием зоны активного водообмена подземных вод из-за повышения зимней температуры воздуха и сокращения периода с отрицательными ее значениями (Болгов и др., 2016), а также вследствие деградации многолетней мерзлоты (Джамалов, Потехина, 2010; Синюкович и др., 2013). Скорость повышения зимнего стока наиболее высока для Верхней Ангары ( $dQ = 0,69 \text{ м}^3/\text{с}$  в год), а для Селенги рост стока составляет лишь  $0,32 \text{ м}^3/\text{с}$  в год (против снижения летнего минимума  $4,61 \text{ м}^3/\text{с}$  в год). Для Баргузина зимнее повышение стока еще менее значимое ( $dQ = 0,08 \text{ м}^3/\text{с}$  в год), в связи с чем, статистически значимым является только тренд стока Верхней Ангары ( $R^2 = 0,31$ ;  $\alpha = 0,05$ ).

Межгодовой размах колебаний минимального стока для Верхней Ангары и Селенги расширился, а на р. Баргузин экстремальные расходы воды находятся в первой половине ряда. Вариабельность стока возрастает только для р. Селенги.

Отмеченные различия находят отражение и в качестве исходных данных. Их однородность для периодов до и после потепления подтверждается только для р. Баргузин, а для двух других водотоков ее нарушение отмечается по двум критериям и потребовало пересчета по составному распределению.

В отличие от главных притоков озера, долговременные тенденции зимнего минимального стока остальных байкальских рек отличаются разнонаправленностью. Коэффициенты вариации рассматриваемых рядов также лежат в широких пределах от 0,24 (р. Снежная) до 0,76 (р. Безымянная), а соотношение  $C_s/C_v$  в некоторых случаях принимали отрицательные значения. В результате, сток расчетных обеспеченностей в годы до и после потепления, различается до 30 % как в сторону уменьшения, так и увеличения. Наибольшие различия характерны для небольших, эпизодически промерзающих рек (Рель, Большая Половинная).

Для сравнения в работе выполнены расчеты параметров многолетней изменчивости *минимального 30-дневного стока*, которые хорошо согласуются с соответствующими показателями минимального срочного и для летнего, и для зимнего периодов. Отношение средних значений минимальных расходов воды по рядам 30-дневных ( $Q_{30\text{-дн}}$ ) и срочных ( $Q_{\text{сроч}}$ ) значений в случае с минимальным летним стоком в среднем составляют 1,29 и изменяется в пределах от 1,05 до 1,49. При этом наиболее высокие значения данного показателя характерны для рек, стекающих с Хамар-Дабанского склона (Снежная, Хара-Мурин, Утулик, Выдринная, Харлахта), за исключением двух водотоков с нарушенными гидрогеологическими условиями (Слюдянка, Похабиха).

Соотношение  $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$  для расчетной обеспеченности минимального летнего стока 80 % в среднем не изменяется (составляет 1,29), однако для следующих, более высоких обеспеченностей (95 и 97 %) возрастает до 1,33 и 1,36 соответственно. Максимальные же их значения достигают 1,85 (Харлахта) и 1,92 (Утулик). Такое смещение соотношения в сторону увеличения с ростом обеспеченности связано, очевидно, с разной асимметричностью сопоставляемых характеристик, которая для 30-дневных расходов воды более высока и  $C_s$  в основном превышает  $C_v$  в 3-4 раза, тогда как для срочных  $C_s = 2-3C_v$ .

Для минимального зимнего стока разброс соотношений средних значений  $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$  существенно ниже – от 1,03 до 1,26, при их средней величине 1,11. С увеличением обеспеченности до 80 % и выше относительные расхождения сопоставляемых показателей также несколько возрастают из-за различий в асимметрии их распределений. В данном случае величина  $C_s$  для 30-дневного стока преимущественно составляет  $3C_v$ , а для срочного  $2C_v$ . Как и для летнего стока, наибольшие значения  $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$  расчетных обеспеченностей характерны рекам, стекающим с Хамар-Дабанского склона, где они достигают значений 1,8-2,0 (Выдринная).

Сток расчетных обеспеченностей в годы до и после потепления для периода зимней межени вырос или остался на том же уровне, особенно хорошо такой рост проявился на главных притоках озера, где разница их значений достигала 20 %, что объясняется увеличением доли подземного питания вследствие более интенсивного таяния мерзлоты рассматриваемой области. Для летне-осеннего периода преобладающей является обратная ситуация – существенное падение стока (также достигающее 20 %) на главных притоках озера и незначительные разнонаправленные изменения на остальных исследуемых реках, что в свою очередь можно объяснить уменьшением доли дождевого питания, которое является основным в это время.

Наряду с трансформацией рассмотренных характеристик стока, для исследуемых рек характерны изменения и других показателей их водного режима, среди которых наиболее важным представляется сдвиг сроков прохождения половодья, вызывающий смещение сроков начала весенне-летнего наполнения озера и интенсивности повышения его уровня. Для главных притоков Байкала - Селенги и Верхней Ангары видно, что происходящие изменения параметров стока талых вод отличаются общей тенденцией сдвига окончания половодья на более ранние сроки и уменьшением его продолжительности, при сохранении времени прохождения максимального расхода. До 1971 г. половодье на Селенге в среднем заканчивалось 26 июня, а в последующий период – 16 июня. При неизменных сроках его начала продолжительность половодья сократилась с 86 до 76 дней.

На Верхней Ангаре средние сроки окончания половодья в годы потепления переместились с 6 августа на 20 июля, при этом начинаться оно стало на 5 дней позже, в результате чего продолжительность половодья уменьшилась на 22 дня.

На р. Баргузин, наоборот, с 1971 г. половодье начинается в среднем на два дня позже, а его пик теперь наблюдается позже на 14 дней.

В результате отмеченных изменений сроков прохождения половодья и объемов поступления талых поверхностных вод в озеро начинается раньше, определяя и более раннее начало весеннего роста его уровня.

Отмеченный рост притока воды в озеро в холодное время года также направлен на повышение уровня. Рост зимних расходов воды основных притоков Байкала проявляется по-разному. Для Селенги с начала 1970-х гг. зимние расходы воды в среднем увеличились на  $15 \text{ м}^3/\text{с}$  (10 %), при этом самыми высокими они были в 1994 г., однако с 1996 г. сток реки стал заметно ниже в связи со снижением влагонасыщения деятельного слоя и запасов подземных вод из-за общего уменьшения увлажнения в селенгинском бассейне.

Среднемеженный зимний сток Верхней Ангары за период потепления также увеличился – приблизительно на  $8,5 \text{ м}^3/\text{с}$  (11 %), но еще более заметным (20 %) было увеличение зимнего стока Баргузина, которое продолжалось до 2013 г.



Повышение зимнего притока приходится на время сезонной сработки призмы регулирования Байкала и, таким образом, является сдерживающим фактором снижения уровня озера.

**В пятой главе** обсуждаются основные проблемы регулирования уровня и возможности практического использования полученных в работе результатов.

Основные проблемы регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал обострились с начала XXI в. после принятия Правительством РФ ограничения диапазона допустимых колебаний уровня озера с проектных 1,96 до 1 м. Столь радикальное сужение диапазона регулирования серьезно осложнило проблему «удержания» уровня в установленных границах в случае наступления аномально многоводных, или маловодных лет. Ситуация усугубляется несоответствием действующих ПИВР как новым предельным значениям уровней, так и новым требованиям к разработке Правил. В сложившейся ситуации порядок регулирования оказался не способен адекватно отреагировать на произошедшее снижение приточности в озеро в 2015-2017 гг., в результате чего уровень Байкала ежегодно на 10-29 см выходил за нижнюю допустимую отметку 456 м (Рисунок 5).

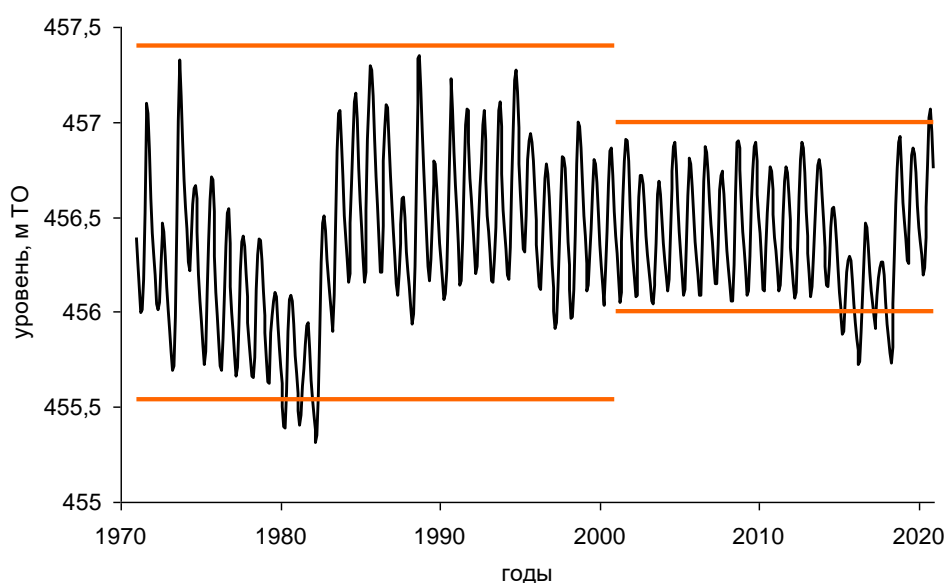


Рисунок 5. – Среднемесячные уровни озера в период 1971-2020 гг.

Красными линиями ограничен диапазон предельных колебаний уровня в соответствии с ПИВР-1988 (левая часть графика) и Постановления № 234 (правая часть).

Происходящие понижения уровня вполне ожидаемы, так как нижний предельный уровень 456 м предусматривается для средних по условиям водности лет, но в случае их наступления после маловодья — это будет далеко не всегда выполнимо. Это связано с тем, что после сработки уровня ниже нормативной отметки в последующий год потребуется дополнительный объем притока на заполнение свободной емкости до возвращения на искомый горизонт. Остальной объем поступивших в озеро вод должен обеспечить сток через Иркутскую ГЭС зимой в размере не менее 1250-1300 м<sup>3</sup>/с. В зависимости от снижения уровня в предшествующий год при соблюдении гарантированных навигационных попусков в нижнем бьефе Иркутской ГЭС общий годовой приход воды в озеро должен составлять порядка 50-60 км<sup>3</sup>, что в период 2001-2017 гг. отмечалось лишь в половине случаев.

В периоды низкой приточности проблемы регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал значительно обостряются и требуют поиска вызывающих их причин. С привлечением данных из базы реанализа видно, что в период потепления (1971-2017 гг.) в сравнении с предыдущими 1948-1970 гг. произошло снижение выпадения атмосферных осадков на всей водосборной территории оз. Байкал. Максимальным оно было в южных районах бассейна р Селенги и достигало 17 мм. Такое снижение осадков не дает исчерпывающего объяснения низкого стока р. Селенги в этот период и, очевидно, связано еще с ростом

испарения в ее бассейне. Имеющиеся сведения об изменении испаряемости в бассейне Селенги (Фролова и др., 2017) указывают на рост этого показателя в период 1976-2014 гг. на 27 мм, с наиболее значимым увеличением для монгольской части бассейна.

Возможно, смена тенденции увлажнения произошла в 2018 г., после которого приток оставался повышенным в течение четырех лет и сразу же позволил вывести уровень Байкала на нормативные отметки. Однако, в 2020-2021 гг. уровень вышел уже за верхнее предельное значение на 12 и 23 см, соответственно. Следовательно, проблема «удержания» уровня Байкала в диапазоне его предельных значений в многоводные годы столь же актуальна, как и в маловодные.

Еще одна сложность регулирования стока из оз. Байкал состоит в ограничениях расходов воды в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, рассмотренных в третьей главе. В действующих ПИВР минимальный расход р. Ангары должен быть не менее 1250-1300 м<sup>3</sup>/с по условиям бесперебойной работы водозаборов, а в навигационный период – не менее 1500 м<sup>3</sup>/с. Практика регулирования стока в маловодные годы показала невозможность поддержания судоходных попусков, в то время как для обеспечения минимальных расходов потребовалась сработка уровня Байкала ниже отметки 456 м.

Столь же проблематично и повышение расхода воды через Иркутскую ГЭС до предусмотренных ПИВР 6000 м<sup>3</sup>/с в связи с угрозой затопления застроенной пойменной части р. Ангары. В свою очередь, более низкий сток в многоводный период сопровождается опасностью затопления хозяйственных объектов на побережья Байкала в зоне переменного подпора, в особенности во время форсировок, предельная высота которых во временных постановлениях Правительства РФ увеличена до 457,85 м).

Таким образом, практикуемые с 2001 г. ограничения уровня оз. Байкал, вместе с достаточно противоречивыми экологическими требованиями к уровневому режиму озера, не позволяют принимать адекватных мер при наступлении экстремально маловодных и многоводных периодов. Следствием перечисленных обстоятельств в маловодье 2014-2017 гг. стало не только падение уровня озера ниже установленного предельного значения, но и снижение выработки электроэнергии на каскаде Ангарских ГЭС, ухудшение условий судоходства на р. Ангаре ниже г. Иркутска, рост напряженности водообеспечения населения и промышленности в нижнем бьефе Иркутского гидроузла и др. В 2020-2021 гг., наоборот, уровень Байкала выходил за верхнюю предельную отметку, сток через Иркутскую ГЭС осуществлялся с холостыми сбросами и достигал 3600 м<sup>3</sup>/с, сопровождаясь затоплением и подтоплением хозяйственных объектов в пойме р. Ангары.

Перечисленные обстоятельства однозначно указывают на необходимость совершенствования порядка регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал. На первом этапе необходимо увеличить диапазон допустимых колебаний уровня озера до 2 м, с возможностью его расширения в аномально маловодные, или многоводные годы. Одновременно с этим требуется разработка новых ПИВР, учитывающих требования всех водопользователей и состояние экосистемы озера, предусматривающих конкретные действия при разных соотношениях притока и уровня, а также перечень мероприятий выхода из нештатных ситуаций.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезными в решении некоторых проблем регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал. В частности, основой для определения критериев высокой и низкой приточности в озеро послужат квантили полученных в диссертации значений годового притока, дополненные расчетами для наиболее многоводных месяцев (июнь-сентябрь) и наиболее многоводного III квартала, которые разделены на градации водности (таблица 1) в соответствии с классификацией для годового стока рек СССР (Кочукова, 1955).

Таблица 1 – Градации водности притока поверхностных вод в оз. Байкал, км<sup>3</sup>

Водность периода	Год	III квартал	июнь	июль	август	сентябрь
Исключительно многоводный	> 90,3	> 51,1	> 18,1	> 18,8	> 19,8	> 15,2
Очень многоводный	79,8- 90,3	42,1-51,1	15,9-18,1	15,9-18,8	15,8-19,8	12,4-15,2
Многоводный	66,6-79,8	32,5-42,1	13,0-15,9	12,3-15,9	11,6-15,8	9,34-12,4
Средний	54,8-66,6	24,8-32,5	10,2-13,0	8,97-12,3	8,46-11,6	6,85-9,34
Маловодный	41,7-54,8	17,6-24,8	6,85-10,2	5,44-8,97	5,65-8,46	4,39-6,85
Очень маловодный	38,4-41,7	16,0-17,6	5,99-6,85	4,60-5,44	5,05-5,65	3,88-4,39
Исключительно маловодный	< 38,4	< 16,0	< 5,99	< 4,60	< 5,05	< 3,88

Среди характеристик речного стока наиболее важными для практики представляются показатели максимальной водности рек редкой повторяемости, с которыми связаны наводнения (40 % стихийных бедствий). Приведенные в главе 4 значения максимальных расходов воды талых и дождевых вод для 26 рек служат количественными показателями высоты наводнений и вероятности их формирования на каждом из водотоков. Несмотря на то, что масштабы наводнений оцениваются по высоте уровня, расходы воды служат более универсальной характеристикой этих явлений, так как являются исходной для формирования уровня величины, не зависящей от морфометрии русла.

Важное практическое значение имеют также результаты расчетов минимального стока рек 80 и 95 %-ной обеспеченности, которые уже служат показателями экологического, санитарного или базисного стока, а также позволяют произвести переход (перерасчет) от параметров минимального суточного стока к 30-дневному и наоборот.

Для уровня оз. Байкал наибольший научный и практический интерес представляет воссоздание картины естественных колебаний уровня после зарегулирования и за счет увеличения объема данных повысить достоверность определения отдельных параметров изменчивости уровня. С использованием этих данных и реконструированных по связи с солнечной активностью уровней Байкала за 1729-1897 гг. (Афанасьев, 1967) нами проанализирован ряд среднегодовых уровней оз. Байкал за 1729-2019 гг., отражающий формирование уровня озера в течение длительного исторического периода, с разными климатическими условиями и степенью антропогенного влияния.

Из анализа составленной, таким образом, 291-летней динамики многолетних естественных уровней Байкала (Рисунок 6) можно проследить проявление долговременных тенденций разной длительности, в том числе, как вековых, так и внутривековых циклов. Начало первого (условно) векового цикла приходится на 1700-1710 гг. (Афанасьев, 1976), а его окончание - на 1814 г. Своего максимального значения уровень в данном цикле достигал в 1751 г., а минимального - в 1814 г., который оказался самым экстремальным за весь почти 300-летний период.

Второй вековой цикл продолжался до 1903 г., а его максимум в 1869 г. является абсолютным, что подтверждено нивелировкой засечки наивысшего уровня данного года, нанесенной Б. Дыбовским и В. Годлевским на мысе Шаманский и летописными сведениями. Третий цикл оказался более продолжительным и, возможно, продолжается в настоящее время. Внутри него, имея натурные наблюдения за уровнем и притоком, можно достаточно уверенно выделить три внутривековых цикла и менее выраженный четвертый, начавшийся в 1981 г.

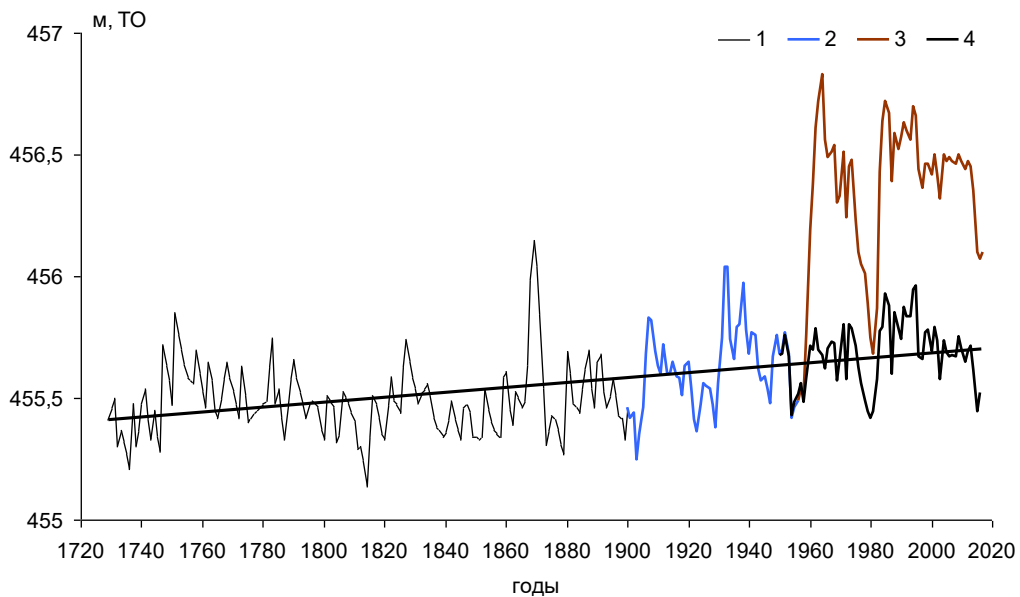


Рисунок. 6 – Динамика среднегодовых уровней оз. Байкал по доинструментальным данным (1), наблюдениям в естественных (2), зарегулированных (3) условиях и условно-естественным значениям. Прямая линия – тренд (данные 1,2,4)

### ВЫВОДЫ:

Вместе с основными положениями, составляющими предмет защиты и новизну работы, сформулированными во введении, наиболее важные результаты выполненного исследования сводятся к следующему:

1. Представлена современная характеристика уровня оз. Байкал и основных факторов его формирования. Среди природно-климатических факторов определяющее влияние на уровень Байкала оказывает поверхностный приток, но в ноябре-декабре на первое место выходит испарение с поверхности озера. Основным антропогенным фактором формирования уровня является искусственное перераспределение стока из озера на Иркутской ГЭС.

2. Усовершенствована воднобалансовая схема реконструкции условно-естественных уровней оз. Байкал после зарегулирования, с помощью которой получен количественный показатель искусственного повышения уровня от подпирания воздействием Иркутского водохранилища. За счет восстановленных данных вдвое увеличена продолжительность однородного ряда по уровню озера, что повышает достоверность оценок его внутригодовой и многолетней изменчивости.

3. Получены количественные оценки среднего, максимального и минимального стока рек, впадающих в оз. Байкал, выявлена степень произошедшей трансформации каждой из характеристик в результате изменений климата. Подтверждена климатообусловленная природа колебаний стока, выявлено повышение зимних минимальных расходов воды байкальских рек, обеспечивающее рост среднемеженного зимнего притока поверхностных вод в озеро и поддержание его уровня в холодное время года.

4. Показано, что роль стока отдельных рек в колебаниях уровня определяется их вкладом в общий речной приток и согласованностью колебаний с изменениями водности основных впадающих в Байкал рек. Выявлено смещение сроков прохождения половодья на главных притоках озера, способствующее более раннему началу весенне-летнего наполнения водоема.

5. Охарактеризованы основные проблемы регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал и предложены некоторые рекомендации по их разрешению.

Отдельные результаты работы носят качественный характер и их развитие составляет предмет дальнейших исследований формирования уровня озера и изменчивости

характеристик стока впадающих в него рек в зависимости от изменений природных и антропогенных факторов.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ, из них 5 статьи из списка изданий, рекомендованных ВАК:

1. Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Томберг И.В., Поповская Г.И., **Чернышов М.С.**, Иванов В.Г., Ходжер Т.В. Состояние водной экосистемы дельты реки Селенги в условиях длительного маловодья // География и природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 81-89. DOI: 10.1134/S1875372817010085.

2. Синюкович В.Н., **Чернышов М.С.** О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 3. – С. 256-263. DOI: 10.1134/S0097807817030174.

3. Синюкович В. Н., **Чернышов М. С.** Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. - 2018. - Т. 24. - С. 99–110. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.24.99.

4. Sinyukovich V.N., **Chernyshov M.S.** Water regime of lake Baikal under conditions of climate change and anthropogenic influence // Quaternary International. – 2019. – V. 524. – P. 93-101. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.05.023

5. Синюкович В. Н., **Чернышов М. С.** Особенности многолетней изменчивости притока поверхностных вод в озеро Байкал // Метеорология и гидрология. – 2019. – Т. 44. – № 10. – С. 652-658. DOI: 10.3103/S1068373919100029

### *Публикации в других изданиях:*

1. **Чернышов М.С.**, Синюкович В.Н. К проблеме определения расчетных гидрологических характеристик основных притоков оз. Байкал в условиях нестабильности климата // Материалы III Международной научно-практической конференции с элементами школы семинара для студентов, аспирантов и молодых ученых. 11-12 ноября 2014 г. Томск, ФАОУ ВО «Национальный исследовательский томский государственный университет» – 2015. – С. 598 - 601.

2. **Чернышов М.С.**, Синюкович В.Н. Расчетные гидрологические характеристики основных притоков оз. Байкал в современных условиях // Шестая Международная Верещагинская Байкальская конференция. 4-й Байкальский Микробиологический симпозиум с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах». 7-12 сентября 2015 г. Иркутск, Лимнологический институт СО РАН – 2015. – С. 72-73.

3. Синюкович В.Н., **Чернышов М.С.**, Курбатова Н.Н. Реконструкция уровня оз. Байкал после зарегулирования и оптимальный режим использования его водных ресурсов // 4-й Байкальский Микробиологический симпозиум с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах». 7-12 сентября 2015 г. Иркутск, Лимнологический институт СО РАН – 2015. – С. 35.

4. **Чернышов М.С.**, Синюкович В.Н. Расходы воды редкой повторяемости как показатель экологических рисков для речных систем (на примере основных притоков оз. Байкал) // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Экологический риск». 18-21 апреля 2017 г. Иркутск, Институт географии СО РАН – 2017. – С. 302-305.

5. Синюкович В.Н., **Чернышов М.С.** Гидрометеорологический мониторинг и достоверность расчетов элементов водного баланса оз. Байкал // Материалы всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 21-23 марта 2018 г. ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет" – 2018. – С. 126-133.

6. Синюкович В.Н., **Чернышов М.С.** Параметры уровня режима оз. Байкал с учетом данных доинструментального периода // Сборник Международной конференции

«Пресноводные экосистемы – современные вызовы». 10-14 сентября 2018 г. Иркутск, Лимнологический институт СО РАН. – 2018. – С.329 – 334

7. **Чернышов М.С.**, Синюкович В.Н. Особенности уровня режима оз. Байкал в XXI веке // Материалы междунар. научно-практ. конф. «Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития». Иркутск, 26-28 сентября 2017 г. ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет" – 2017. – С. 59-62.

8. **Чернышов М.С.**, Синюкович В.Н. Некоторые аспекты расчетов минимального зимнего стока притоков озера Байкал. // Международная научно-практическая конференция, посвящённая памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова. 23-27 сентября 2019 г. Иркутск, Институт географии СО РАН – 2019. – С. 283-285.