

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Чернышов Максим Сергеевич

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

1.6.21 – Геоэкология (географические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
Кандидат географических наук, с.н.с.,
Синюкович В.Н.

Иркутск - 2021

Оглавление

Введение	3
1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ БАССЕЙНА ОЗ. БАЙКАЛ	11
1.1. Рельеф и геологическое строение.....	11
1.2. Климатические условия.....	14
1.3. Почвы и растительность.....	17
1.4. Гидрографическая сеть.....	19
2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	24
2.1. Методы оценки колебаний уровня оз. Байкал и изменчивости стока впадающих в него рек.....	24
2.2. Гидрометеорологическая информация.....	38
3. УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ ОЗ. БАЙКАЛ	42
3.1. Общая характеристика колебаний уровня	42
3.2. Формирования колебаний уровня под воздействием природных и антропогенных факторов	47
3.2.1 Природно-климатическая обусловленность	48
3.2.2 Антропогенное перераспределение стока из озера.....	53
3.2.3 Изменения притока речных вод под влиянием хозяйственной деятельности	61
4. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИТОКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД	65
4.1. Средний годовой сток	66
4.2. Максимальные расходы воды весеннего половодья	72
4.3. Максимальный сток дождевых паводков	78
4.4. Минимальные летние расходы воды.....	84
4.5. Минимальный зимний сток.....	89
4.6. Минимальный 30-суточный сток.....	93
4.7. Роль стока отдельных рек в формировании уровня озера.....	96
5. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	102
5.1. Современные проблемы регулирования уровня и использования водных ресурсов Байкала.....	102
5.2. Научно-практическая значимость полученных результатов	109
Заключение	114
Список литературы	116

Введение

Актуальность работы. Уровенный режим водоемов является основным показателем их водного режима (ГОСТ 19179-73; Чеботарев, 1978). Изменения уровня озер определяют и изменения условий функционирования различных звеньев их экосистем. Уровенный режим оз. Байкал до зарегулирования формировался в зависимости от соотношения приходных и расходных статей его водного баланса. В приходной части водного баланса оз. Байкал преобладает (80-88 %) приток речных вод, а в расходной - доминирует сток через р. Ангару (73-86 %). Приток является основной составляющей прихода воды и первичным звеном кругооборота воды в озере. В бытовых условиях в соответствии с изменениями притока формировался 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 (первый пункт по учету стока открыт на р. Баргузин в 1933 г.). 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 зарегулирования в формировании уровня озера, наряду с воднобалансовыми составляющими, сохранившими природно-климатическую обусловленность, участвует уже антропогенно преобразованный сток, который осуществляется через Иркутскую ГЭС. Вместе с повышением, в среднем составляющим около 0,8 м, уровень Байкала теперь изменяется и в зависимости от водохозяйственной обстановки в нижнем бьефе Иркутской ГЭС и нижележащем каскаде Ангарских водохранилищ. В разные периоды высота наблюдаемых зарегулированных уровней над естественными существенно

меняется в зависимости от условий водности, что требует использования более объективного показателя произошедшего повышения уровня.

Основные изменения стока из озера после зарегулирования заключаются в существенном выравнивании его внутригодового хода. При этом меняющийся порядок использования водных ресурсов Байкала, регламентируемый соответствующими правилами использования водных ресурсов (ПИВР) и постановлениями Правительства РФ, сопровождается и перестройкой режима его уровней. В этих условиях связь уровня с поверхностным притоком ухудшилась, но в силу преимущественно сезонного регулирования стока через Иркутский гидроузел приток по-прежнему остается основным фактором формирования уровня озера. Вместе с тем, характер колебаний притока 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 первую очередь, стока рек. С конца XX – начала XXI вв. для рек байкальского бассейна становится заметным усиление пространственной рассогласованности колебаний стока рек, снижение максимальных расходов воды, сдвиг сроков прохождения весеннего половодья, рост зимнего стока и др. Все это вызывает определенную трансформацию межгодовых и сезонных колебаний суммарного притока речных вод в озеро, определяет новые условия формирования его уровня 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 является следствием меняющихся климатических условий, вследствие чего интерпретируется более достоверно.

Исходя из этого, при рассмотрении роли изменчивости речного стока в формировании уровня 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 уровня оз. Байкал после зарегулирования в зависимости от составляющих прихода-расхода воды в озере, 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 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 озера и возможные пути их решения.

Объект исследования. Озеро Байкал и его основные притоки.

Предмет исследований. Формирование уровня озера 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 озера базируются как на фактических сведениях о средних уровнях Байкала, так и реконструированных данных в доинструментальный период (1729-1897 г.) и после зарегулирования озера (1959-2019 гг.). При исследовании трансформации характеристик речного стока в качестве искомых 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, 2005, 2010а; Стандарт ГГИ, 2017 и др.) и других нормативных документов, а также общепринятых методов. Так, для построения трендов временных гидрометеорологических рядов использовался метод наименьших квадратов (Аргучинцева, 2007). Для оценки статистических характеристик стока применялись аналитические функции биномиального и трехпараметрического гамма-распределения. Оценка однородности рядов осуществлялась по критериям Стьюдента, Фишера и

Вилькоксона. Для оценки характера распределений применялся стандартный набор статистических 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.

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

Апробация работы. Результаты исследования, освещаемые в данной работе, 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 Верецагинской 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).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в подготовке и обработке исходных материалов, в анализе и обсуждении полученных результатов, а также в формировании выводов работы. В диссертации используются результаты работ, полученные в соавторстве с В.Н. Синюковичем.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 13 работ, из них 5 статей 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.

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.

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.

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.

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.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Изменчивость притока поверхностных вод в оз. Байкал служит главным природно-климатическим фактором формирования его уровенного 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 уровенного режима озера объективно оцениваются восстановлением условно-естественных уровней по предложенной воднобалансовой схеме.

3. Основные проблемы регулирования уровня 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. Ангары.

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

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность за помощь в проведении исследований, обсуждении и анализе полученных результатов научному руководителю, к.г.н. В.Н. Синюковичу, сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИН СО РАН за помощь и ценные замечания при обсуждении работы.

ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ БАССЕЙНА ОЗ. БАЙКАЛ

Бассейн оз. Байкал представляет собой крупную гидрографическую систему. Озеро находится в центральной части Азии, имеет тектоническое происхождение и известно как самый глубокий пресноводный водоем в мире, глубина которого составляет около 1640 м. Площадь водного зеркала озера составляет 31 500 км², длина береговой линии ~ 2000 км. Общий объем содержащейся в Байкале воды составляет 20 % от всех запасов пресных вод планеты, находящейся в ее озерах и реках (Frits van der Leeden, 1990).

Чаша озера разделена на три котловины - южную, среднюю и северную. Границами раздела служат поднятия дна - Селенгинское поднятие и Академический хребет, которые препятствуют прямому водообмену между котловинами на глубинах более 400 м.

Бассейн Байкала расположен между 46°20'-56°4' с.ш. и 96°50'-114°10' в.д. и занимает территорию площадью 540 000 км² (без водного зеркала озера). В пределах России находится около 48 % всей площади бассейна. По геологическим особенностям бóльшая часть бассейна Байкала может быть отнесена к Байкальской горной стране (Павловский, 1948) и к Байкальской рифтовой зоне (Флоренсов, 1960).

1.1. Рельеф и геологическое строение

Акватория оз. Байкал находится в горном обрамлении, изолирующем его котловину от значительной части бассейна. На общем фоне окружающего рельефа озера выделяются системы хребтов, ориентированные в основном с юго-запада на северо-восток. К наиболее крупным хребтам бассейна можно отнести: Приморский, Байкальский, Верхне-Ангарский, Баргузинский и др. (Рисунок 1.1.1) (Верещагин, 1947; Воскресенский, Посталенко, 1967).

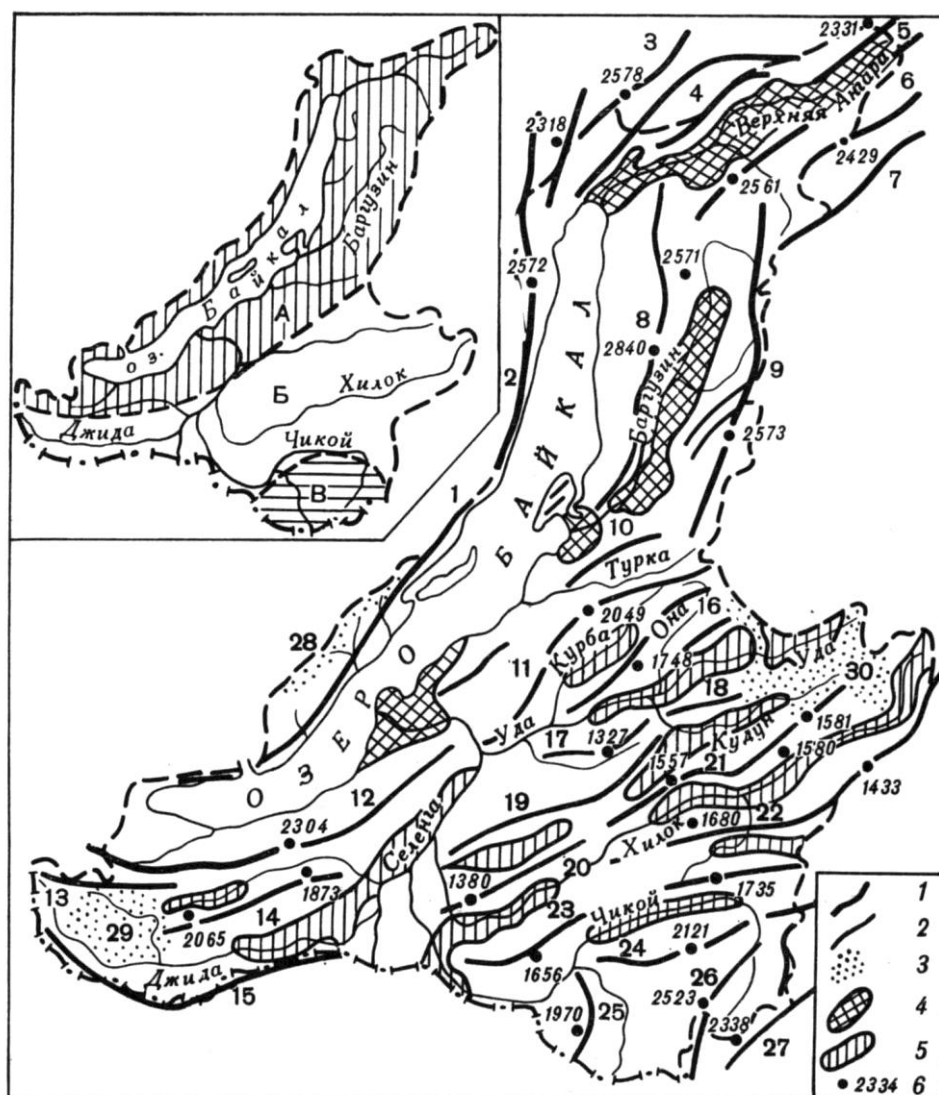


Рисунок 1.1.1 – Орографическая схема бассейна оз. Байкал (по Воскресенскому, Посталенко, 1967)

1 – высокогорные хребты с ледниковым рельефом (высота более 1400 м),
 2 – среднегорные хребты с эрозионным рельефом (высота более 1000 м),
 3 – плоскогорья, 4 – впадины байкальского типа, 5 – впадины забайкальского типа, 6 – отметки высот над уровнем моря.

Хребты: 1 – Приморский, 2 – Байкальский, 3 – Сынныр, 4 – Верхнеангарский, 5 – Делюн-Уранский, 6 – Северо-Муйский, 7 – Южно-Муйский, 8 – Баргузинский, 9 – Икатский, 10 – Голондинский, 11 – Улан-Бургасы, 12 – Хамар-Дабан, 13 – Хангарульский, 14 – Малый Хамар-Дабан, 15 – Джидинский, 16 – Курбинский, 17 – Худунский, 18 – Мухор-Тала, 19 – Цаган-Дабан, 20 – Заганский, 21 – Цаган-Хуртэй, 22 – Яблоновый, 23 – Малханский, 24 – Ацинский, 25 – Мензинский, 26 – Чикоконский, 27 – Хэнтей.

Плоскогорья: 28 – Онотская возвышенность, 29 – Джидинское нагорье, 30 – Витимское плоскогорье.

На врезке: А – Байкальское становое нагорье, Б – Селенгинское среднегорье, В – Хэнтей-Чикойское нагорье.

Большая часть местности преимущественно горная; отметки высот территории изменяются от 456 м (отметка уровня Байкала) до 2 840 м (вершины центральной части Баргузинского хребта). Однако среди горных образований встречаются и относительно равнинные поверхности, которые относятся к долинам больших рек, а также обширным глубоким межгорным впадинам. Эти структуры можно разделить на байкальский (внутригорный) и забайкальский (межгорный) типы (Флоренсов, 1960). Байкальские впадины имеют асимметричный характер склонов, днища заполнены кайнозойскими отложениями мощностью до 2 000 м и более. К таковым относятся Верхне-Ангарская и Баргузинская впадины, а также занятая собственно Байкалом котловина.

Впадины забайкальского типа отличаются меньшими размерами, слабо выраженной асимметрией склонов, и, в основном, представлены широкими межгорными понижениями, развитой эрозионной (овражной) сетью и наличием эоловых форм рельефа в местах распространения супесчаных и песчаных грунтов. Они возникли благодаря молодым глубинным тектоническим нарушениям, наложенным на омоложенные мезозойские депрессии (Экологический атлас бассейна..., 2015; Верещагин, 1949). К основным впадинам забайкальского типа относятся Гусиноозерская, Чикойско-Хилокская и Удинская.

Согласно геоморфологическому районированию (Нагорья Прибайкалья и..., 1974; Национальный атлас МНР, 1990), территория бассейна Байкала подразделяется на Хангайское и Хэнтей-Даурское нагорья, горы Прихубсугулья, Орхон-Селенгинское и его продолжение на севере – Селенгинское (Селенгинская Даурия) среднегорья, горные системы Джидинского горного района, хребтов Хамар-Дабан, Улан-Бургасы, Икатского, Баргузинского, Верхнеангарского, Северо-Муйского, Байкальского, Приморского, а также западное крыло Витимского плоскогорья.

Хангайское нагорье, находящееся в юго-западной части бассейна, является самым высоким, крупнейшие северные отроги Тарбагатай и Тэлин-Цаган

достигают высотных отметок более 2 500 м. На запад и на восток простирается обширное Хэнтейское нагорье с максимальными высотами до 2 400 м и пологим характером рельефа. В центральной части бассейна расположено Орхон-Селенгинское среднегорье. Селенгинское среднегорье выражено цепью вытянутых хребтов с выположенными вершинами, разделенными впадинами, днище которых дренируется основными притоками р. Селенги. Прихубсугулье представлено отсутствием пологих склонов и островершинными хребтами высотой более 2 000 м. Горные системы Джидинского района и Хамар-Дабана направлены с юго-запада на северо-восток, при этом имеет относительно пологие склоны на западе. Для Верхнеангарской котловины характерен небольшой перепад высот на днище, связанный с выходом аллювиальных отложений с водами, р. Верхняя Ангара. Баргузинская котловина представлена заболоченными участками на днище и небольшими возвышенностями песчаных отложений, а с юга ограничена Икатским хребтом с относительно пологим рельефом. Наиболее высокие возвышенности водораздела Икатского хребта находятся южнее, на них отсутствует древесная растительность. Приморский хребет переходит в Байкальский с максимальной высотной отметкой около 2 600 м. На склонах хребта ярко выражены следы ледниковой эрозии.

Рассмотренные формы рельефа и ландшафта оказывают существенное влияние на климат территории, формирование стока и пр.

1.2. Климатические условия

К основным климатообразующим факторам на территории бассейна оз. Байкал относятся: географическое положение бассейна, атмосферные циркуляции, влияние водных масс и рельеф. Именно благодаря этим факторам на Байкале можно наблюдать значительное разнообразие климатов – от сухого степного до альпийского.

Летом наиболее высокая температура воздуха на территории бассейна наблюдается в июле, а в Байкальской котловине только в августе. Максимальные температуры воздуха составляют 35-38 °С и наблюдаются в долинах рек Верхней

Ангары и Баргузина, Селенгинского среднегорья. На побережье озера максимальные отметки температуры не превышают 30-35 °С, что обусловлено влиянием громадного объема воды, создающего мягкий зимой и прохладный летом морской тип климата. Среднемесячная температура летом составляет 15-17 °С на склонах гор, 18-20 °С в котловинах и в долинах, в отдельных районах среднемесячная температура может понижаться до 10-11 °С (о. Большой Ушканий, Давша, Сосновка) (Байкал. Атлас, 1993).

Минимальные температуры воздуха в байкальском регионе наблюдаются в январе. Средняя температура воздуха в этот месяц достигает минус 31 °С и относится к верхней части долины р. Джиды. В северной части бассейна и в Селенгинском среднегорье наблюдается абсолютный минимум температуры, находящийся в пределах минус 50-55 °С, а на побережье Байкала лишь минус 45 °С.

Распределение осадков на исследуемой территории в основном зависит от особенностей рельефа. Распределение горных хребтов по отношению к потокам воздуха, несущим влагу, приводит к тому, что осадки распределяются неравномерно, вследствие чего сумма таковых изменяется в пределах 250-1400 мм в год. Преобладают летние осадки, которые составляют 60-70% годового количества (Экологический атлас бассейна..., 2015). На побережье Байкала и на островах доля осадков теплого сезона составляет 85-90 %, а в южных и юго-восточных районах бассейна и в степных долинах – 90-95 % (Афанасьев, 1976; Структура и ресурсы ..., 1977). Максимальное количество осадков приходится на июль, а минимум можно наблюдать в феврале. Наибольшим количеством осадков отличаются северо-западные и западные наветренные склоны хребтов, здесь в период длительных летних дождей количество осадков может превышать месячную или даже сезонную норму, в отдельные годы достигая 200 и более мм в сутки.

В связи с неоднородностью распределения осадков и температуры, а также метелевых переносов внутри котловин с инверсиями, снежный покров на территории Байкальского бассейна формируется крайне неравномерно.

Высота снежного покрова изменяется в широких пределах – от 10 см в степной долине р. Селенги до 140 см на северо-западном склоне Хамар-Дабана. При этом на вершинах гор снег обычно сдувается, в то время как на подветренных склонах образуются мощные снежные надувы толщиной до 2-3 м.

Находясь в зависимости от высотной поясности, снежный покров раньше всего появляется в горах, а самый ранний его сход можно наблюдать на юге Селенгинской Даурии. В среднем длительность схода снежного покрова достигает двух с половиной месяцев.

В соответствии с суровыми климатическими условиями внутри бассейна озера Байкал широко развиты многолетнемерзлые породы. Большую часть территории занимают сплошной и островной мерзлотные районы (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Геокриология СССР, 1989). Мощность многолетнемерзлых толщ сплошной мерзлоты может достигать 300 м, на водоразделах – 600 м. Островной тип обычно встречается на сырых, заболоченных местах или затененных участках гор выше 1 000 м. Мощность такой мерзлоты достигает 80 м. Среди преобладающих геокриологических процессов можно выделить термокарст, бугры пучения, наледеобразование и др. (Экологический атлас бассейна ..., 2015).

Редкоостровной тип мерзлоты наиболее широко распространен в днище долины р. Селенги. Отсутствие мерзлотных образований характерно только для дельты р. Селенга и территории, близкой к истоку р. Ангара.

Многолетняя мерзлота оказывает благоприятное воздействие на формирование поверхностного стока, она выступает водоупором, оказывая существенное влияние на время добегаания дождевых вод в речные русла на горных территориях. Деградация мерзлоты в условиях потепления является одной из причин роста зимних расходов воды рек за счет сезонно-мерзлотного регулирования стока, в частности, за счет высвобождения воды при вытаивании льда из мерзлых пород и сокращения периода промерзания зоны аэрации, способствующего более интенсивному питанию подземных вод (Георгиевский и др., 2008; Джамалов, Потехина, 2010; Джамалов и др., 2013; Болгов и др., 2016).

1.3. Почвы и растительность

Формирование типов почв на территории бассейна оз. Байкал обусловлено тремя основными факторами: климатом, орографией и геологическими условиями. Вследствие большой протяженности с юга на север исследуемая территория охватывает несколько широтных зон с различными термическими особенностями, что обуславливает большое разнообразие типов почвенно-растительного покрова. Существенна роль мерзлоты, часто встречаемой внутри бассейна, а также антропогенный фактор.

Важнейшим фактором, определяющим распределение почвенного покрова, является рельеф. В связи с высокой расчлененностью рельефа здесь нарушается широтно-зональное распределение элементов климата и растительности и формируется их высотная поясность, вследствие чего и распределение почвенного покрова в бассейне носит азональный характер, и его территория выделяется в качестве самостоятельной почвенной провинции (Ногина, 1964; Белозерцева и др., 2013). Так, горные хребты расположены по территории в мозаичном порядке, их вершины характеризуются отсутствием лесной растительности и наличием горно-тундровых хрящевато-суглинистых почв. Склоны гор и невысокие вершины обычно покрыты лесом с соответствующими ему горно-лесными подзолистыми почвами. Горно-тундровый ландшафт представлен здесь чередованием каменистых почв с участками песчано-глинистых, иногда покрытых слоем мха.

Низкие склоны побережья Байкала от устья р. Баргузин до р. Снежная покрыты дерново-подзолистыми, глинистыми и суглинистыми типами почв, а долина р. Селенги, Верхнее-Ангарская и север Баргузинской котловины имеют супесчаные и песчаные почвы.

Горно-лесные и дерново-подзолистые почвы на рассматриваемой территории распространены незначительно и встречаются только в бассейне р. Джиды. Довольно редко можно встретить серые лесные почвы (склоны бассейнов рек Итанцы, Ильки и по правому берегу Хилка).

В общем, почвы речных долин Прибайкалья и Забайкалья представлены аллювиальными перегнойно-глеевыми, торфянно-глеевыми, темногумусовыми, серогумусовыми, темногумусовыми квазиглеевыми типами (Экологический атлас бассейна ..., 2015).

В нижнем течении рек Хилка, Джиды, Баргузина можно встретить выщелоченные черноземы преимущественно с зернисто-комковатой структурой. В долинах р. Мензы и в районе Кударинской гряды встречаются участки обыкновенного чернозема.

Западный берег Байкала и степи Селенгинской Даурии характеризуются наличием каштановых почв, которые также встречаются от устья р. Бугульдейки до пролива Ольхонские Ворота, по левому берегу Баргузина и в Еравнинской степи.

Солончаковые почвы распространены пятнами в степных массивах (Прасолов, 1927). Данный тип почвы преимущественно характерен для приозерных понижений и припойменных склонов, где наблюдается накопление богатых солями вод долинного стока, или для мест выхода минерализованных грунтовых вод.

Наличие болот в дельте р. Селенги и в долине р. Баргузин обуславливает развитие торфяных типов почв.

Как и в случае с почвами, распределение растительного покрова на территории предопределено сложным строением рельефа. Растительный покров в бассейне представлен богатым видовым составом, основные типы растительности, сообщества которых образуют современный растительный покров бассейна Байкала, составляют гольцовый (высокогорный), таёжный (бореальный) и степной типы. Основную часть байкальского бассейна занимает таёжная растительность, встречающаяся как на равнинах и возвышенностях, так и в горах. В горных районах с понижением высоты гольцовая (альпийская) растительность сменяется таежной. В зонах, где таежная растительность слабо выражена (предгорья Верхне-Ангарской и Баргузинской котловин), ее место

занимают лесо-степные и степные растительные сообщества. На южном склоне Хамар-Дабана прослеживается вся последовательность растительных поясов.

В целом, распространение того или иного пояса приурочено к определенным высотным зонам; альпийский – занимает вершины хребтов выше границы леса и представлен лишайниками, мхами, лугами и небольшими зарослями кедрового стланика (Преображенский, 1959).

Леса таежной зоны широко распространены в северной части бассейна. На западе они охватывают Саяно-Джидинское и Хамар-Дабанское нагорья, на востоке встречаются лишь в верхней части бассейнов рр. Хилка и Чикоя. Представлены следующими видами: лиственница, сосна, кедр, пихта и ель.

Сосновые леса вытесняют лиственничные на Приморском хребте и Онотской возвышенности, оконтуривают Селенгинскую Даурию, центральная часть которой занята лесостепью и степью.

Лесистость территории различается по степени покрытости лесной растительностью отдельных площадей. Так, для высокогорных и котловинных областей характерна низкая степень лесистости (0-20 %), для равнин и частично низкогорий – средняя (20-40 %), для среднегорий – относительно высокая (40-80 %), для среднегорий и высокогорий, где отсутствует вырубка и сельскохозяйственное освоение – высокая (80-100 %).

1.4. Гидрографическая сеть

Обширная гидрографическая сеть бассейна оз. Байкал обусловлена преимущественно горным рельефом и высокой увлажненностью территории. Она включает более 5000 рек, из которых 1053 имеет длину 10 и более км (Гурулев, 2012; Афанасьев, 1976), а остальные водотоки представлены небольшими речками и ручьями.

Густота речной сети имеет строго зональный характер и меняется от 0,1 км/км² на юго-востоке до 0,9 км/км² на прибрежных хребтах и на севере. Средний коэффициент густоты речной сети составляет 0,2–0,3 км/км². В бассейне

насчитывается более 18000 озер общей площадью чуть менее 1300 км². Наиболее крупные из них представлены в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1. – Наиболее крупные озера бассейна оз. Байкал

Название озера	Площадь зеркала, км ²
Гусиное	163
Котокель	68,9
Арахлей	58,2
Арангатуй	54,2
Шакшинское	53,6

Еще девять озер имеют площадь зеркала более 5 км², а оставшуюся часть преимущественно составляют водоемы с площадью водной поверхности менее 1 км².

К основным притокам озера относятся, прежде всего, Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин. Селенга – самый крупный приток озера, поставляющий около половины объема стока речных вод (около 30 км³ за год). Ее длина от истока составляет 1 024 км, а площадь водосбора 447 060 км². В пределах России эти параметры соответственно равны 409 км и 148 060 км².

Верхняя Ангара приносит в Байкал около 8 км³ воды в год, при площади водосбора 21 400 км², а Баргузин около 3,5 км³ при водосборной площади 21 100 км². Помимо Верхней Ангары и Баргузина, северная часть бассейна представлена реками Тья и Турка, а также более мелкими водотоками, дренирующими горные системы Байкальского, Верхне-Ангарского, Северо- и Южно-Муйского, Баргузинского, Икатского, Улан-Бургасы хребтов. Средние уклоны рассматриваемых ранее рек лежат в пределах 3,5–5 ‰, а на их притоках и других малых реках, которые уже имеют горный характер, уклоны увеличиваются до 10–40 ‰. Правобережные притоки р. Селенги собирают свои воды с северных горных областей и имеют величины уклонов аналогичные рекам южной части Прибайкалья, около 1-3‰, что обуславливает их спокойный характер течения, в

то время как реки северо-западного склона Хамар-Дабана типично горные, имеют уклоны 15–35 %.

Модуль годового стока рек в бассейне Байкала изменяется от 0,62 до 27,8 л/с·км² (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. Так, величина нормы годового стока имеет отрицательный тренд с севера на юг, что обусловлено ростом испарения и увеличением количества осадков. Северные реки и горные реки, которые берут своё начало на склонах Хамар-Дабана, характеризуются наибольшей водностью, находящейся в пределе от 12,7 до 27,8 л/с·км². Реки Хэнтэй-Чикойского нагорья отличаются повышенной водностью от 5,63 до 9,70 л/с·км², а реки Селенгинского среднегорья и монгольской части бассейна имеют наименьшую водность. Средняя норма годового стока на остальной территории бассейна составляет от 1 до 3 л/с·км².

Одной из определяющих характеристик условий функционирования водных систем является термический режим её водных объектов. В зимнее время, когда реки покрыты льдом, температура воды близка к 0 °С. Однако в некоторых реках с преобладающим подземным питанием может наблюдаться температура 1,5-2,5 °С. В озерах же значения температуры воды варьируют от 0 °С у поверхности до 4 °С у дна. Прогрев речных вод начинается в первой половине апреля на южных территориях бассейна Байкала, на севере это происходит на месяц позднее.

В июле температура воды в водотоках достигает максимальных значений (до 29 °С). Реки, имеющие горный характер, прогреваются хуже. Во второй декаде августа начинается понижение температуры в реках, и уже в октябре наблюдаются ледовые явления. Для рек с большими скоростями течения характерен осенний ледоход, что приводит к появлению зажоров и заторов, вызывающих подъем уровня воды.

На северо-востоке бассейна ледостав на реках наблюдается уже к концу октября, в остальной части в начале ноября. Горные реки замерзают от истока к

устью, а на многоводных реках появление ледостава может зависеть от направления течения. Стоит отметить, что скорость образования льда на поверхности озер зависит от их размера, т.о. небольшие озера могут покрыться льдом раньше рек. На крупных водоемах ледостав начинается на мелководных участках.

На реках толщина льда может изменяться от 0,5 до 2,5 м, поэтому небольшие водотоки промерзают полностью. Продолжительность ледостава колеблется от 140 до 200 дней.

Весной появление талой воды на поверхности предвещает вскрытие льда. В отличие от малых рек, на которых сход льда происходит в результате образования промоин, на крупных реках формируется весенний ледоход. В зависимости от района он начинается в конце апреля – начале мая и имеет продолжительность от 3 до 14 дней.

Общее представление о расположении рассматриваемых в данной работе водотоков дает Рисунок 1.4.1, где приведена схема расположения мест их впадения, указывающая на более высокую гидрометеорологическую изученность Южного Байкала.

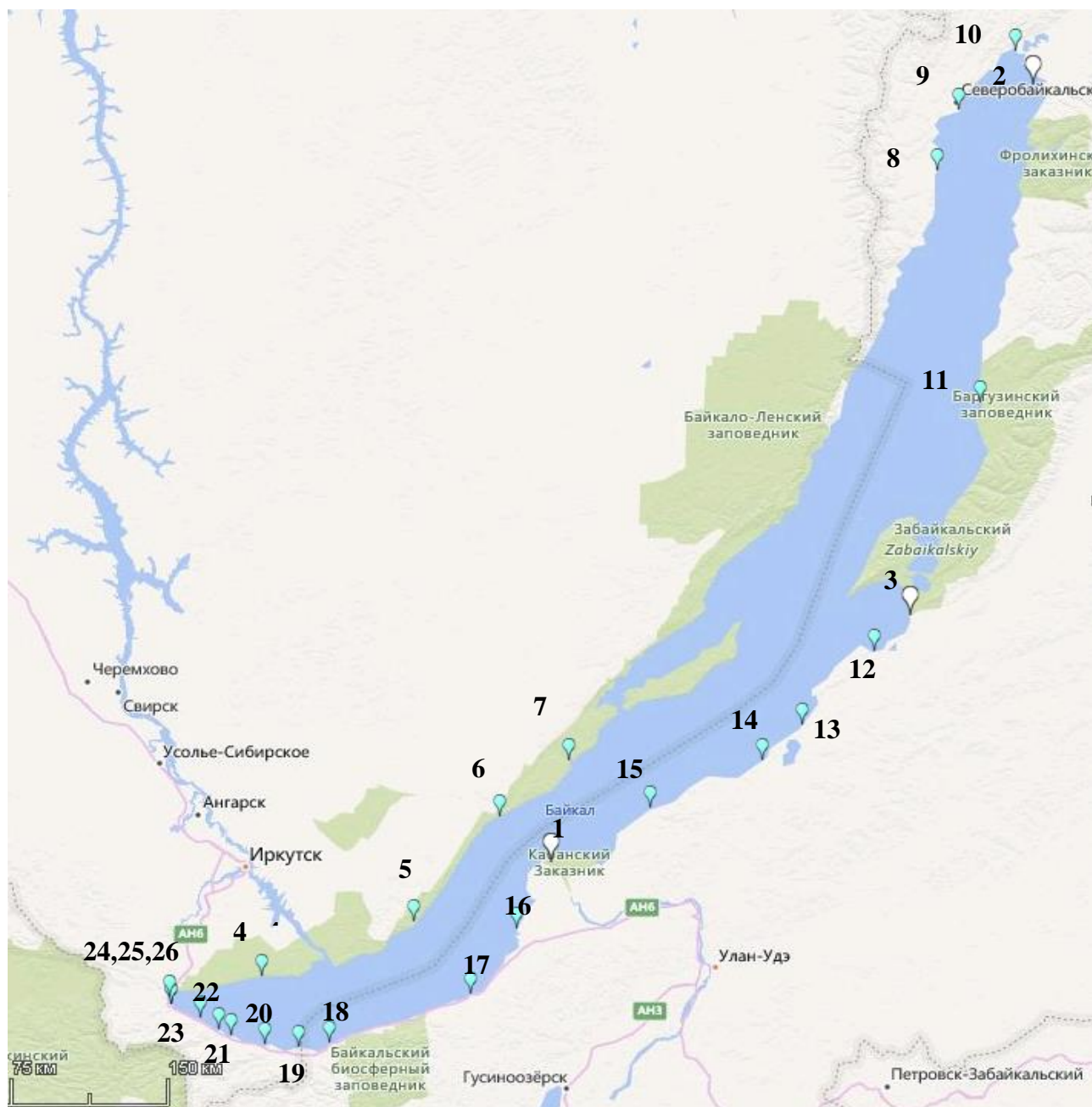


Рисунок 1.4.1 – Схема расположения мест впадения исследуемых рек в оз. Байкал

1 – Селенга, 2 – Верхняя Ангара, 3 – Баргузин, 4 – Большая Половинная, 5 – Голоустная, 6 – Бугульдейка, 7 – Анга, 8 – Рель, 9 – Тья, 10 – Холодная, 11 – Давша, 12 – Максимиха, 13 – Турка, 14 – Кика, 15 – Большая Сухая, 16 – Большая речка, 17 – Мысовка, 18 – Выдринная, 19 – Снежная, 20 – Хара-Мурин, 21 – Харлахта, 22 – Утулик, 23 – Безымянная, 24 – Слюдянка, 25 – Похабиха, 26 – Култучная.

Глава 2. Используемые методы исследования и исходные данные

2.1. Методы оценки колебаний уровня оз. Байкал и изменчивости стока впадающих в него рек

При изучении уровня режима Байкала нами, как и предшествующими исследователями разных лет (Шостакович, 1926; Лопатин, 1924; Афанасьев, 1960, 1976; Федоров, 1981; Бычков, Никитин, 2015, Синюкович, 2016, Гармаев и др., 2017) оценивались как колебания осредненных за различные интервалы уровней (суточных, месячных, сезонных, годовых, многолетних), так и их наивысшие и наименьшие значения в отдельные периоды. Наличие четкого сезонного хода позволяет анализировать темпы ежегодного наполнения и сброски уровня, продолжительность подъемов и спадов и др. Сравнение указанных параметров в годы естественного режима и после зарегулирования дает возможность выявить произошедшие нарушения отмеченных ранее закономерностей формирования уровня озера и оценить их последствия для экологии озера и населения прилегающих территорий. При этом сопоставляемые характеристики должны не только осредняться за разные (однородные) периоды, но и давать возможность получения количественных оценок искусственных нарушений уровня, происходящих в результате хозяйственной деятельности человека, на конкретных отрезках времени.

Исходя из общих представлений о формировании уровня любого водоема в зависимости от соотношения приходно-расходных статей его водного баланса и учитывая опыт реконструкции естественных уровней Байкала (Синюкович, 1993, 2005; Савельев, 2000), нам представляется возможным использовать для определения такого показателя воднобалансовую схему реконструкции. Полученная с ее помощью разница между наблюдаемыми значениями уровня после зарегулирования и его рассчитанными условными отметками, в предположении на отсутствие подпирающего воздействия плотины Иркутской

ГЭС, является объективным показателем искусственного повышения уровня озера.

В сравнении с исходной схемой реконструкции естественно-условных среднемесячных уровней озера (Синюкович, 2005) расчетное выражение дополнено нами соответствующим значением невязки баланса, которая в основном положительна и в отдельные месяцы достигает $2,59 \text{ км}^3$, или 8 см уровня. Ее учет позволяет уменьшить погрешность расчетов, связанную с дисбалансом прихода-расхода воды в озере, который при постоянной невязке одного знака способствует накоплению ошибки. Тогда, изменение уровня (ΔH) за некоторый расчетный интервал находится через соответствующие значения воднобалансовых составляющих, выраженных высотой слоя:

$$\Delta H = X + Y - Y_A - E - S, \quad (2.1.1)$$

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

Основными составляющими водного баланса Байкала являются приток и сток, на долю которых приходится до 90 % объема, участвующего в кругообороте воды в озере, поэтому от погрешности их определения будет зависеть и погрешность расчетов по уравнению (2.1.1). Такие составляющие как подземный приток и конденсация на практике обычно не учитываются из-за небольших абсолютных значений и низкой точности расчетов (Афанасьев, 1976; Янтер, 1990; Синюкович, 2005).

Сложность использования данной схемы для восстановления естественных уровней Байкала после зарегулирования состоит только в нахождении неизвестного стока из озера (Y_A), который мог бы быть в современный период при естественном (более низком) уровне. Для этого используется связь стока с уровнем озера $Y_A = f(H)$ в бытовых условиях, отражающая степень отмеченной выше инерционности (зарегулированности) стока. Определение стока из озера по данной зависимости обеспечивает частичную компенсацию возможных ошибок и препятствует их накоплению (Синюкович и др., 2015). Действительно, если на

некотором этапе расчетов уровень озера из-за погрешности определения слагаемых выражения (2.1.1) оказался завышенным (заниженным), то на следующем шаге окажется завышенным (заниженным) и значение Y_A , которое входит в это выражении с противоположным знаком и обеспечивает снижение имеющейся погрешности.

Устойчивость русла в истоке р. Ангары, прорезающего коренные породы, определяет и стабильность указанной связи, позволяя использовать ее в течение длительного времени. В работе (Синюкович, 2005) для построения искомой зависимости использована связь и расходов р. Ангары в истоке, и уровней озера у ст. Байкал КБЖД за 1956-1958 гг., аппроксимированная полиномом второй степени, тогда как в некоторых подобных исследованиях (Sutcliff, Parks, 1995; Фролов, Выручалкина, 2017; 2020) они принимаются линейными. С учетом того, что для Байкала известны и другие альтернативные зависимости $Y_A = f(H)$, представляется важным знать, какая из них более достоверная. В работе проведена верификация расчетов уровня с использованием следующих вариантов кривых:

- 1) построенной нами по сведениям о расходах воды р. Ангары в истоке и уровнях оз. Байкал за 1950-1957 гг.;
- 2) из проекта Иркутской ГЭС (Иркутская гидростанция на ..., 1951);
- 3) из проекта ПИВР (Правила использования водных..., 2013).

По известным значениям элементов водного баланса и рассчитанной по искомому кривым величине Y_A были выполнены помесечные расчеты уровней, которые сопоставлялись с фактически наблюдаемыми. При этом использовались воднобалансовые составляющие Байкала и его уровни по данным (Афанасьев, 1960) и ФГБУ «Иркутское УГМС» Росгидромета.

Результаты верификации за 1950-1957 гг. для всех вариантов расчетов получились достаточно схожими. Восстановленные уровни хорошо согласуются с наблюдаемыми - средняя квадратическая ошибка расчетов с использованием разных кривых составила от 2,2 до 2,6 см. Это подтверждает достоверность рассмотренных зависимостей $Y_A = f(H)$ и приемлемость их практического

использования, но для дальнейших расчетов нами принята первая из них, как имеющая наименьшую погрешность расчетов (2,2 см). Средняя квадратическая ошибка расчетов с использованием данной кривой без учета невязки для периода верификации (1951-1958 гг.) была несколько выше (2,7 см) и подтверждает целесообразность выполненной корректировки.

Объединение рассчитанных условно-естественных уровней с наблюдаемыми до 1958 г. дает возможность в два раза увеличить продолжительность однородных данных по уровенному режиму озера и повысить достоверность его расчетных показателей.

В некоторых исследованиях уровенного режима оз. Байкал используются схожие расчетные схемы. В частности, в динамико-стохастической модели среднегодовых уровней озера (Фролов, 1985; Фролов, Выручалкина, 2017, 2020), где сток также рассчитывается по связи с уровнем, а остальные элементы водного баланса - по авторегрессионной модели первого порядка. Правомерность такого подхода определяется высокой инерционностью колебаний уровня и наличием тесной связи годовых уровней озера с притоком двух лет – текущего и предшествующего (Синюкович, 1993). В то же время, связь $Y_A = f(H)$ в годы после зарегулирования должна учитывать высоту уровня в Иркутском водохранилище, что снижает прогностическую ценность моделирования.

Многолетняя изменчивость различных показателей речного стока с первой половины прошлого столетия исследуется отечественными гидрологами с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. Правомерность их применения вытекает из многофакторной сущности гидрологических процессов. В России (СССР) особенно интенсивно началось применение этих методов после Великой Отечественной войны и было связано с началом послевоенной индустриализации страны. В этот период появилась потребность в сведениях о режиме стока, в том числе и при отсутствии данных наблюдений.

Основными исследователями, внесшими вклад в применение математической статистики в гидрологических и водохозяйственных расчетах,

были Д.И. Кочерин, Д.Л. Соколовский, А.Н. Великанов, С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, Г.Н. Бровкович, А.В. Рождественский, Н.А. Картвелишвили, Г.Г.Сванидзе, А.М. Резниковский и др.

В 1972 г. опыт применения статистических методов в исследовании стока позволил сформировать первый нормативный документ «Указания по определению расчетных гидрологических характеристик». В дальнейшем расчетные рекомендации 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). В регионе оз. Байкал, где рост температуры воздуха в ходе потепления был вдвое выше, чем в среднем на Земле, и за последние 30 лет XX в. составил $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Шимараев и др., 2002; Шимараев, Старыгина, 2010), трансформация гидрологических показателей должна проявляться особенно заметно. Отмечаемые в последнее время изменения в характере колебаний водности байкальских рек (Шимараев и др., 2002; Синюкович и др., 2013; Гармаев и др., 2000; Гармаев, Христофоров, 2010) достаточно индивидуальны, очевидно, в силу природных условий их бассейнов, также претерпевающих со временем разной степени преобразования.

Справедливость гипотезы стационарности стока для большинства рек территории бывшего СССР, подтвержденная (Пространственно-временные колебания..., 1988) в конце XX в., для последующего периода подвергается сомнению. Для годового стока крупных рек бассейна Северного Ледовитого океана, куда входит и водосборная территория оз. Байкал, трансформация колебаний, например, характеризуется, с одной стороны, сохранением

статистической однородности многолетних данных, с другой - явно выраженной квазипериодичностью (Симонов, Христофоров, 2005).

Кроме того, несмотря на преобладание сценариев продолжения потепления, будущие изменения стока байкальских рек остаются достаточно неопределенными. Следует отметить, что первые климатические сценарии происходящего потепления (Израэль, Груза, 2001; Climate Change, 2001 и др.) предполагали также и рост увлажненности в регионе Сибири с ростом температуры воздуха. В действительности же на территории Байкальского региона начальный период потепления (1976-1981 гг.) отмечен почти повсеместным аномальным снижением речного стока. С середины 1990-х гг. суммарный сток рек в бассейне озера вновь стал пониженным и остается низким до сих пор. Такой сценарий согласуется с модельными оценками (Мохов, Хон, 2002) о возможном уменьшении стока отдельных сибирских рек в первой половине XXI в. Другие разработки (Arnell, 1999; Arnell et al., 2011) указывают на возможность незначительного роста стока к середине XXI в. в Центральной Азии и более заметное (25-50 мм) на юге Прибайкалья, но к концу века наиболее вероятными признаются сценарии снижения водности рек Байкальского региона.

С учетом перечисленных обстоятельств в настоящей работе все представленные расчеты в основном проводились в соответствии с последним нормативным документом – СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик» и дополняющих его рекомендаций (Пособие по определению..., 1984; Методические рекомендации по..., 2005, 2010а; Стандарт ГГИ, 2017 и др.). Расчетные характеристики стока и уровня определялись по данным гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности путем применения аналитических функций распределения вероятностей – так называемых кривых обеспеченностей.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения вероятностей превышения было принято трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля, а также распределение вероятностей Пирсона III типа. Первое из них является более универсальным, так как применимо при любом

соотношении C_s/C_v , тогда как распределение Пирсона используется для рядов с $C_s/C_v \geq 2$. Для оценок коэффициентов вариации и асимметрии исходных рядов использовались оценки средних, дисперсий и третьих центральных несмешанных моментов, полученных методом моментов и приближенного наибольшего правдоподобия.

Однородность выборочных оценок средних значений (Q_1, Q_2) или дисперсий (σ^2_1, σ^2_2) оценивалась по критериям Стьюдента (t) и Фишера (F), соответственно, 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 отдельно для n_1 и n_2 с построением общей (составной) кривой.

Правомерность отнесения начала потепления к 1971 г., очевидно, несколько условна и отличается от наиболее распространенного использования в качестве соответствующего рубежа 1976 г. (Логинов, 2008; Второй оценочный доклад..., 2014). Отчасти это связано со значительной продолжительностью «переходного» периода, но по фактическим данным о температуре воздуха по станциям с длительными наблюдениями в бассейне видно, что смена многолетней тенденции термического режима в основном приходится на 1970 г. и связана с холодным 1969 г. (Рисунок 2.1.1). Такая же дата начала потепления в регионе приводится и в работе (Гармаев и др., 2017).

При значительных отклонениях аналитических кривых распределения от эмпирических точек (для максимального и минимального стока) рассчитывалось усеченное распределение. Для оценки внутрирядной независимости данных рассчитывался коэффициент корреляции стока в смежные годы $r(1)$.

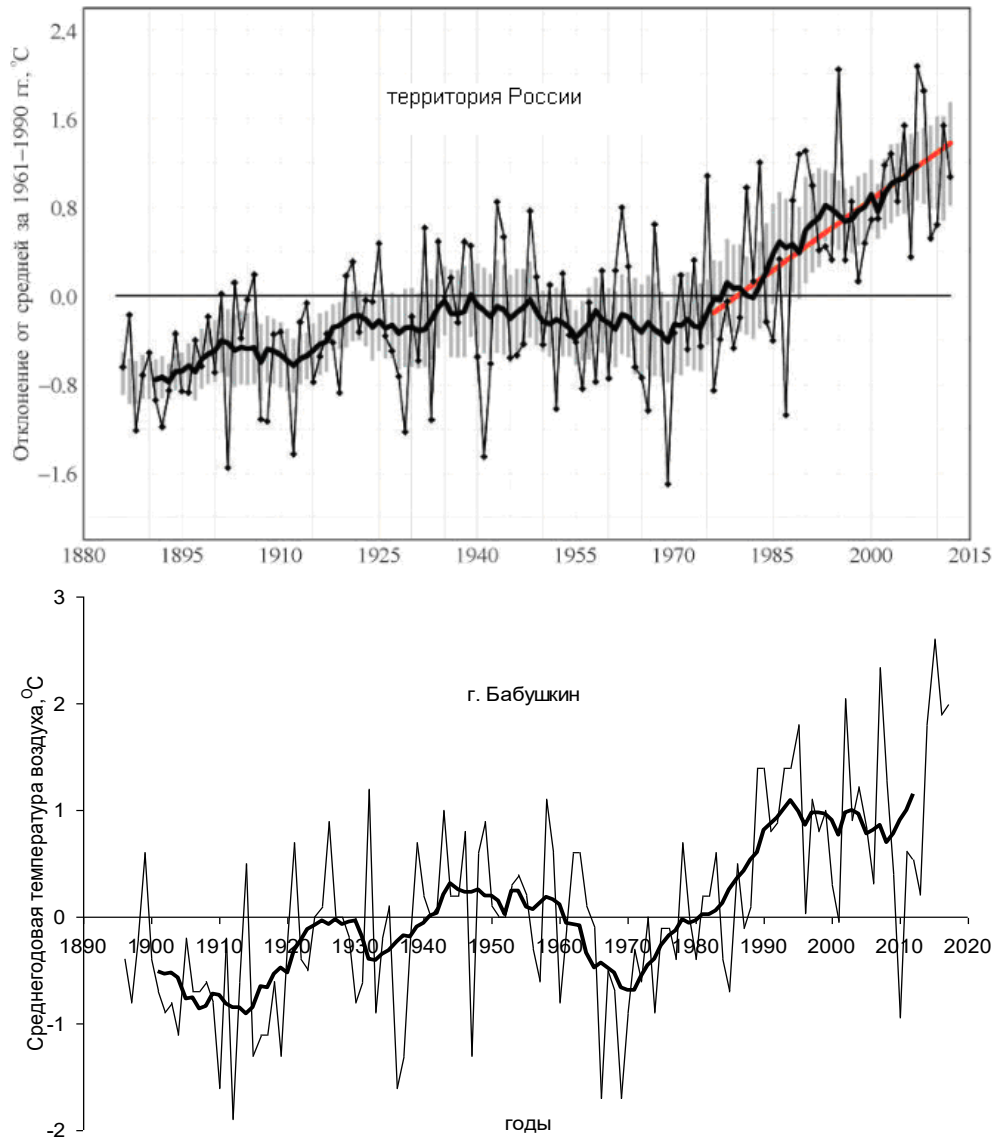


Рисунок 2.1.1 – Аномалии температуры воздуха на территории России (Второй оценочный доклад..., 2014) и динамика среднегодовых температур в г. Бабушкин. Жирная кривая показывает сглаженный ход температуры (11-летние скользящие средние). Вертикальными отрезками показан 95%-й доверительный интервал для 11-летних средних (без учета ошибок пространственного осреднения и нарушений однородности). Красная линия – линейный тренд.

При оценке достоверности 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 %. Как и в случае с парными коэффициентами корреляции (r) с этой целью определялась t -статистика по формуле:

$$t_{набл} = (r\sqrt{n-2})/(\sqrt{1-r^2}), \quad (2.1.2)$$

которая затем сравнивалась с табличным критическим значением ($t_{\text{крит}}$) для заданного уровня значимости и длины ряда (n).

В отдельных случаях для этого использовался квадрат полученного коэффициента корреляции (R^2), называемый в статистике коэффициентом достоверности аппроксимации, или коэффициентом детерминации, а также критерий Спирмена, вычисляемый по:

$$R = 1 - \frac{6 \sum d^2}{(n(n^2 - 1))} , \quad (2.1.3)$$

где n – количество ранжируемых признаков; d – разность между рангами для каждого признака.

Коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s для трехпараметрического гамма-распределения определялись методом приближенного наибольшего правдоподобия в зависимости от статистик λ_2 и λ_3 , которые вычислялись по формулам (2.1.4) и (2.1.5.)

$$\lambda_2 = \left(\sum_{i=1}^n \lg k_i \right) / (n - 1) \quad (2.1.4)$$

$$\lambda_3 = \left(\sum_{i=1}^n k_i \lg k_i \right) / (n - 1) , \quad (2.1.5)$$

где n – общее число членов ряда; а k_i - модульный коэффициент рассматриваемой гидрологической характеристики, определяемый по формуле:

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} , \quad (2.1.6)$$

где Q_i - годовые значения расходов воды, а \bar{Q} - среднее арифметическое значение расходов воды, определяемое в зависимости от числа лет гидрометрических наблюдений по формуле:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^n Q_i / n . \quad (2.1.7)$$

Для распределения Пирсона III типа распределения C_v и C_s рассчитывались с помощью программного обеспечения (ПО) STOCKSTAT, которое используется для расчета статистических гидрологических характеристик. Для оценки обеспеченности гидрологической величины ПО использует метод моментов, при котором коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s определяются следующим образом:

$$C_v = (a_1 + a_2/n) + (a_3 + a_4/n)\tilde{C}_v + (a_5 + a_6/n)\tilde{C}_v^2 \quad (2.1.8)$$

$$C_s = (b_1 + b_2/n) + (b_3 + b_4/n)\tilde{C}_s + (b_5 + b_6/n)\tilde{C}_s^2, \quad (2.1.9)$$

где $a_1, \dots, a_6; b_1, \dots, b_6$ – коэффициенты, определяемые для распределения Пирсона III типа и для распределения Крицкого-Менкеля при помощи статистических таблиц.

\tilde{C}_v и \tilde{C}_s – смещенные оценки коэффициентов вариации и асимметрии, определяемые по формулам:

$$\tilde{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (2.1.10)$$

$$\tilde{C}_s = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3 \right]}{\left[\tilde{C}_v^3 (n - 1)(n - 2) \right]}. \quad (2.1.11)$$

Также стоит отметить, что при значениях $C_v < 0,6$ и $C_s < 1,0$ коэффициенты вариации и асимметрии допускается определять по формулам (2.1.8) и (2.1.9) без введения поправок.

Для построения кривых обеспеченностей использовались табличные значения ординат соответствующих распределений, которые были получены методом статистических испытаний. Ординаты кривых для отсутствующих в таблицах промежуточных значений обеспеченности определялись интерполяционным способом.

Эмпирические кривые распределения ежегодных вероятностей превышения строились при помощи программного обеспечения Originlab.Origin.Pro.v7.5.

Эмпирическая вероятность превышения $P_{m\%}$ гидрологических характеристик определялась по формуле:

$$P_{m\%} = \frac{m}{n+1} 100, \quad (2.1.12)$$

где m – порядковый номер гидрологической характеристики в ранжированном в убывающем порядке ряде.

Применение кривых распределения для описания статистических совокупностей, условно говоря, является возможным лишь в тех случаях, когда эти совокупности представлены однородными и независимыми элементами. Гидрологические ряды являются некоторыми случайными выборками из генеральных совокупностей, поэтому судить о принадлежности их к какой-либо конкретной генеральной совокупности не представляется возможным. В связи с этим выяснение однородности рядов является важнейшим элементом оценки статистических обобщений. Проверка рядов на однородность по принятому критерию Стьюдента осуществляется путем сравнения расчетного значения (2.1.13) с критическим значением статистики, и, при условии, что расчетное значение меньше критического, ряд признается однородным.

$$t = \frac{Y_{cp1} - Y_{cp2}}{\sqrt{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1n_2(n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (2.1.13)$$

где $Y_{cp1}; Y_{cp2}; \sigma_1^2; \sigma_2^2$ - средние значения и дисперсии двух последовательных выборок; n_1, n_2 – объемы выборок.

Критерий однородности гидрологических характеристик по однородности их дисперсий (критерий Фишера) для двух последовательных частей ряда рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}, \quad (2.1.14)$$

где σ_x и σ_y - средние квадратические отклонения, полученные по рядам, в отношении которых предполагается, что они подчинены нормальному закону распределения.

Однако именно это предположение сужает возможность рассматриваемого критерия, но при небольшой асимметричности рядов критерий Фишера обычно используют.

Оценка однородности гидрологических данных по максимальным или минимальным значениям анализируемых рядов, как отмечено выше, использовалась в тех случаях, когда наибольшее или наименьшее значение характеристик существенно отклоняется от эмпирического поля точек и от кривых распределения. В соответствии с (Методические рекомендации по..., 2010) статистика критерия Смирнова-Граббса для максимального члена ранжированного ряда (Y_n) рассчитывается по формуле:

$$G_n = \frac{(Y_n - \bar{Y})}{\bar{\sigma}}, \quad (2.1.15)$$

а для минимального (Y_1):

$$G_n = \frac{(\bar{Y} - Y_1)}{\bar{\sigma}}, \quad (2.1.16)$$

где \bar{Y} , $\bar{\sigma}$ - среднее значение и среднеквадратическое отклонение исследуемого ряда.

Следует отметить, что вследствие многофакторности большинства параметров гидрологического режима часто бывает невозможно отделить причины, нарушающие однородность рядов. Так, предполагается, что в последнее время гидрологические характеристики претерпевают некоторые изменения, связанные с нестабильностью климата.

В этих условиях современные нормативные и методологические документы рекомендуют использовать метод построения аналитических кривых при помощи усеченного распределения, суть которого заключается в разделении

ранжированного (от большего к меньшему) ряда на две однородные совокупности по медианному принципу. После чего рассматривают только верхнюю часть ряда - для максимального стока, и нижнюю часть – для минимального стока.

Основное расчетное выражение среднего x_0 по методу приближенно наибольшего правдоподобия имеет вид:

$$x_0 = \overline{\chi_{n/2}} \varphi(C_v), \quad (2.1.17)$$

где $\overline{\chi_{n/2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} x_i}{n/2}$ - среднеарифметическое значение верхней половины ранжированного в убывающем порядке ряда; а функция $\varphi(C_v)$, описывается выражением, которое приведено ниже:

$$\varphi(C_v) = \left[1 + \frac{2}{\gamma} \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) P \left(\frac{x_{me}}{x_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2.1.18)$$

где $\gamma = \frac{1}{C_v^2}$.

Однако на практике значение функции обычно берется из уже разработанной статистической таблицы.

Оценку максимального правдоподобия коэффициента изменчивости C_v определяют с помощью статистики $\lambda_{2_{n/2}}$, используя табулированные зависимости, где $\lambda_{2_{n/2}}$ - статистика, вычисляемая по верхней половине ранжированного ряда, расположенного в убывающем порядке, по формуле:

$$\lambda_{2_{n/2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n/2} \lg \frac{x_i}{x_{n/2}}}{n/2}. \quad (2.1.19)$$

В общем случае порядок расчетов при использовании усеченного гамма-распределения, сводится к следующему:

- исходный ряд располагается по убыванию;
- рассчитывается среднее арифметическое значение верхней половины ранжированного ряда;

- по формуле (2.1.19) вычисляют статистику $\lambda_{2_{n/2}}$;
- по полученному значению $\lambda_{2_{n/2}}$ в соответствии с табулированной зависимостью находят значение коэффициента C_v ;
- по выражению (2.1.17) находят оценку x_0 ;
- отношение C_s/C_v определяют тем же способом, что и для полного ряда.

Однако на примере главных притоков Байкала (Синюкович, Чернышов, 2017) можно видеть, что усеченное распределение для рек исследуемой территории оправдано в сравнительно редких случаях и характеризуется незначительными различиями параметров распределения, полученных для полных рядов, в особенности для тех случаев, когда нарушения однородности фиксируются по одному из критериев.

При оценке обусловленности колебаний уровня оз. Байкал от различных показателей стока впадающих рек и других факторов помимо парных коэффициентов корреляции использовалась множественная линейная регрессия. Для расчета коэффициента множественной корреляции (r_{mn}) составляется матрица парных r , по которой рассчитываются полный определитель (D) и определитель (D_{11}) подматрицы, содержащей те же элементы за исключением элементов первой строки и первого столбца:

$$r_{mn} = \sqrt{1 - D/D_{11}} . \quad (2.1.20)$$

Для уменьшения ошибки полученное значение рекомендуется корректировать (Бабкин, 1970) по выражению:

$$R_{mn} = \sqrt{(1 - r_{mn}^2)(m-1)/(n-mn)} , \quad (2.1.21)$$

где m - число переменных.

Расчет коэффициентов множественной регрессии (b) и свободного члена уравнения (c) осуществляется также по соответствующим определителям,

средним значениям и стандартным отклонениям сопоставляемых признаков. В случае с $m = 3$, например, коэффициенты регрессии вычисляются следующим образом:

$$b1 = (\sigma_1/\sigma_2)(D_{12}/D_{11}) \quad (2.1.22)$$

и

$$b2 = (\sigma_1/\sigma_3)(D_{13}/D_{11}) . \quad (2.1.23)$$

Расчеты по приведенным выше формулам и методам выполнялись с использованием стандартного программного обеспечения (StockStat, Originlab.Origin.Pro.v.8.0 и др.). Рассчитанные характеристики стока сопоставлялись с соответствующими данными (Афанасьев, 1976; Ресурсы поверхностных вод..., 1973), полученными по материалам наблюдений до 1971 г. и, таким образом, отражающими состояние рассматриваемых характеристик стока до начала потепления. Для сравнения использовались основные параметры распределения: среднее значение стока за расчетный период, коэффициент вариации (C_v), соотношение между коэффициентом асимметрии (C_s) и вариации, а также расчетные значения характеристик с определенной ежегодной вероятностью превышения ($P\%$).

2.2. Гидрометеорологическая информация

В настоящей работе для исследования уровня режима оз. Байкал использовались результаты регулярных гидрометрических наблюдений на постах Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет, ранее Гидрометслужба СССР). Первые инструментальные наблюдения за уровнем воды на озере были начаты польскими исследователями с организации водомерного поста на южном Байкале (с. Култук) в 1868 г. (Дыбовский, Годлевский, 1897), однако полученные данные до начала XX в. остаются недостаточно достоверными из-за перерывов в наблюдениях и выполнения измерений в разных пунктах. Достаточно надежными признаны уровни по ст. Байкал КБЖД (порт Байкал) с 1898 г. В настоящее время

наблюдения за уровнем режимом озера осуществляются Росгидрометом на семнадцати постах, где измерения производятся преимущественно два раза в сутки. Для определения среднего уровня водоема используются наблюдения восьми наиболее репрезентативных постов.

При изучении уровня режима оз. Байкал определенные разночтения возникают уже при выборе высотной привязки измеренных значений. На сегодняшний день на Байкале используются три системы высот: Тихоокеанская (ТО), Балтийская (БС) и неперевыравненная система Балтийского моря (БМ). В настоящей работе принята Тихоокеанская система высот, как наиболее распространенная при решении вопросов регулирования уровня и использования водных ресурсов озера.

Нами рассматриваются только те колебания уровня водоема, которые связаны с изменением его объема. Для Байкала отметки его водного зеркала, в силу огромной площади (31 500 км²), изменяются достаточно плавно, без резких колебаний (эта инерционность уровня определяет и инерцию стока вытекающей из озера р. Ангары). Не учитываются более высокочастотные вариации уровня, происходящие без изменения объема воды в водоеме и представляющие собой разнонаправленные искажения его водного зеркала, т. е. когда в одной части озера уровень воды повышается, то в другой он снижается. К ним относятся сгонно-нагонные денивеляции и сейши, обусловленные ветровым воздействием и перепадами атмосферного давления и проявляющиеся в виде стоячих свободных волн.

Помимо наблюденных данных по уровню в работе использованы воднобалансовые составляющие Байкала по данным А.Н. Афанасьева (1960, 1976) и ФГБУ «Иркутское УГМС» Росгидромета.

В качестве характеристик речного стока используются многолетние данные по среднему, максимальному и минимальному стоку притоков оз. Байкал в замыкающих створах. Помимо главных притоков озера (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин), которые обеспечивают 2/3 общего притока воды в озеро с территории, составляющей около 90 % всей его водосборной площади, к исследованию

привлечены характеристики стока еще 23 рек, освещенных гидрометрическими наблюдениями (таблица 2.2.1). Наиболее продолжительный ряд (Баргузин – с. Баргузин) имеет 85 лет наблюдений, самый короткий (Култучная – р.п. Култук) – 31 год, что обеспечивает требуемую точность расчетов и получение достоверных результатов.

Таблица 2.2.1 – Сведения об используемых пунктах наблюдений по стоку рек

№	Река - Пункт	Период наблюдений, годы	Площадь бассейна**, км ²
1*	Селенга – рзд. Мостовой	1934-2017	440 000
2	Верх. Ангара – с. Верх. Заимка	1936-2017	20 600
3	Баргузин – с. Баргузин	1933-2017	19 800
4	Голоустная – с. Большое Голоустное	1943-2017	2260
5	Бугульдейка – д. Большая Бугульдейка	1952-2017	1700
6	Анга – с. Еланцы	1960-2017	272
7	Рель – с. Байкальское	1957-2017	567
8	Тыя – гп. Тыя	1949-2017	2380
9	Холодная – пос. Холодный	1955-2017	1050
10	Давша – пос. Давша	1952-2017	93,7
11	Максимиха – с. Максимиха	1955-2017	440
12	Турка – с. Соболиха	1938-2017	5050
13	Кика – с. Хаим	1959-2004	1740
14	Большая Сухая – с. Сухая	1953-2017	379
15	Большая Речка – ст. Посольская	1936-2017	565
16	Мысовка – г. Бабушкин	1928-2017	151
17	Выдринная – 245 км Вост. Сиб. ж.д.	1979-2017	259
18	Снежная – ст. Выдрино	1936-2017	3000
19	Хара-Мурин – пос. Мурино	1940-2017	1130
20	Харлахта – г. Байкальск	1975-2017	14,8
21	Утулик – пос. Утулик	1941-2017	959
22	Безымянная – пос. Мангутай	1959-2017	204
23	Слюдянка – г. Слюдянка	1959-2017	56,3
24	Похабиха – г. Слюдянка	1951-2017	62,9
25	Култучная – р.п. Култук	1987-2017	175
26	Большая Половинная - 110 км Вост. Сиб. ж.д.	1942-2017	356

*Нумерация соответствует порядковым номерам на рисунке 1.4.1.

**В замыкающих створах

Для анализа использованы материалы Росгидромета по среднегодовому стоку и максимальным расходам воды весеннего половодья и дождевых паводков, а также минимального зимнего и летнего стока за периоды (N) от начала наблюдений до 2017 г. Как уже было отмечено выше, сток байкальских рек не

зарегулирован водохранилищами и в незначительных масштабах используется в народном хозяйстве, а основные изменения условий его формирования связаны с преобразованием подстилающей поверхности. В связи с этим, отмечаемые изменения характеристик стока в основном носят климатообусловленный характер.

Для некоторых из приведенных в таблице 2.2.1 водотоков вопросы расчетов характеристик стока рассмотрены в ряде других работ (Гармаев, Христофоров, 2010; Фролова и др., 2017 и др.), однако используемые в них подходы несколько отличны от применяемых в диссертации. Так, в большинстве работ рассматриваемые ряды максимального стока составлены по наибольшим годовым расходам воды, тогда как нами они дифференцированы по генетическим признакам, т.е. разделены на сформированные тальми (половодье) или дождевыми (паводки) водами. В исследовании (Гармаев, Христофоров, 2010), например, расчетные значения стока получены по методике, использующей ряды наблюдений до 1987 г. и уже недостаточно полно отражают современные колебания водности рек. В работе (Фролова и др., 2017) анализируемые данные наблюдений продлены в основном до 2013 г., но касаются только рек бассейна Селенги.

Вместе с данными по уровенному режиму оз. Байкал и водности его притоков в работе использованы также сведения о температуре воздуха и атмосферных осадках по отдельным станциям Росгидрмета и из архива глобальной базы реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center for Atmospheric Research).

Глава 3. Уровенный режим оз. Байкал

3.1. Общая характеристика колебаний уровня

Многолетний ход уровня Байкала (Рисунок 3.1.1) в первую очередь указывает на наличие двух периодов, связанных со строительством Иркутской ГЭС и фактическим превращением оз. Байкал в водохранилище сезонного и частично многолетнего регулирования. В связи с этим, в истории озера выделяются периоды естественного и зарегулированного водного режима, требующие отдельного рассмотрения. Кроме того, между ними может быть выделен переходный период, в течение которого происходило заполнение полезного объема озера. 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.



Рисунок 3.1.1 — Среднегодовые уровни оз. Байкал за период инструментальных наблюдений

В период естественного режима наивысший уровень озера достигал отметки 456,95 м (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 Б. Дыбовского и В. Годлевского 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. Подпор от плотины ГЭС достиг озера осенью 1958 г. (Синюкович, 2005; Синюкович, Чернышов, 2018), а период нормальной эксплуатации Иркутского водохранилища отсчитывается с 1962 г. (Иркутское водохранилище, 1980), хотя уже с 1960 г. озеро наполнялось до отметок, близких к проектным. Уровень мертвого объема (УМО) озера, при котором обеспечивается нормальная работа гидроузла, составляет 455,54 м. Таким образом, по проекту ГЭС допустимый диапазон колебаний уровня составляет 1,96 м.

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.

Расширение амплитуды колебаний зарегулированных уровней до 2000 г. в основном было связано с неоправданно частыми форсировками вопреки действующим ПИВР, предусматривающим превышение НПУ только в годы с обеспеченностью притока менее 10 %.

На практике, за первые 35 лет регулирования форсировки уровня отмечались 17 раз, а за период 1983–1994 гг. они имели место в 10 годах. Для энергетиков переполнение озера позволяло минимизировать возможность холостых сбросов через Иркутскую ГЭС, хотя и способствовало снижению суммарной выработки ангарских ГЭС из-за прохождения «байкальской» воды через Братскую ГЭС при более низком напоре.

После создания Межведомственной оперативной группы по регулированию режимов работы Ангарских водохранилищ (1995 г.) и выхода в 2001 г. постановления Правительства РФ, сузившего допустимый диапазон регулирования до одного метра (456-457 м) форсировки уровня Байкала не

допускались. Их исключению благоприятствовала и невысокая приточность воды в озеро, установившаяся с 1996 г.

Наряду с превышениями НПУ, в маловодные периоды (например, в 1976–1981 гг.) имела место и, наоборот, сработка уровня озера ниже УМО (Рисунок 3.1.1) с рекордным снижением в апреле 1982 г. до 455,27 м.

Таким образом, по размаху колебаний уровенный режим Байкала в 1960–2000 гг. (до выхода постановления) находился существенно ближе к бытовым условиям, чем в последующие два десятилетия. При более строгом соблюдении ПИВР, сдерживаемых существовавшим в конце XX в. приоритетом гидроэнергетики перед другими водопользователями при использовании водных ресурсов озера, это соответствие, очевидно, было бы еще больше.

Что касается выхода уровня Байкала за отметку ниже 456 м, с которой нередко связываются экологические угрозы озеру, то до 2001 г. такие сработки наблюдались практически каждый второй год, без упоминаний о каких-либо катастрофических событиях для байкальской экосистемы (Синюкович, 2016; Болгов и др., 2017), т.е. с гидрологических позиций подобные ситуации были вполне штатными.

В целом, исходя из статистических параметров многолетних изменений уровня можно видеть, что в естественных условиях (1898-1958 гг.) его среднее значение составляет 455,61 м при среднеквадратическом отклонении (σ) 0,17 м. За все годы зарегулированного режима (1962-2020 гг.) выше оказался не только уровень, но и его вариабельность - соответствующие показатели составили 456,40 и 0,24 м. Величина среднего подъема уровня после зарегулирования (0,79 м) при этом получилась несколько меньше, чем приводилось ранее другими исследователями (Афанасьев, 1976; Гидроэнергетика и состояние..., 1999; Савельев, 2000) и объясняется низкими уровнями озера в 2014-2017 гг., а также отсутствием форсировок в XXI веке (до 2020 г.). Более высокая изменчивость уровня в период зарегулированного режима, наоборот, в значительной степени обусловлена расширением диапазона его колебаний: более высокие значения

обусловлены форсировками, а пониженные - сработкой ниже УМО в маловодные годы.

И, напротив, в годы отсутствия форсировок (2001-2019 гг.) и сужения допустимого диапазона колебаний уровня постановлением № 234, средний уровень озера практически не изменился (456,39 м), тогда как его вариабельность с 0,24 м снизилась до 0,15 м.

Внутри года изменения уровня носят выраженный сезонный характер, закономерно меняющийся в зависимости от соотношения между приходом и расходом воды. Поскольку определяющим элементом прихода является приток речных вод, то и ход уровня в первом приближении соответствует ходу приточности в озеро (с запаздыванием в один-три месяца) и в соответствии с его внутригодовым ходом с конца апреля-начала мая обычно повышается и достигает максимума в среднем в сентябре. После этого он постепенно понижается вплоть до весны следующего года. Несмотря на определенные искажения, эта закономерность сохраняется и после зарегулирования, т.е. внутри года зарегулированные уровни как бы повторяют естественные, но на более высоких отметках.

В естественных условиях колебания уровня внутри отдельных лет изменялись от 0,48 (1903 г.) до 1,67 м (1932 г.) при среднем значении 0,83 м. В период 1960-2000 гг. диапазон их изменений существенно не отличался (0,56-1,81 м), тогда как в последующие годы он редко достигал 0,9 м, снижаясь внутри отдельных лет до 0,44 м.

Средняя интенсивность подъема уровня в годы естественного режима составляла 5,5 мм/сут, а спада – 3,9 мм/сут (Афанасьев, 1976). В отдельные годы скорость подъема достигала 16 мм/сут, а спада – 6,1 мм/сут.

За годы зарегулированного режима значения интенсивности подъема и спада уровня незначительно возросли и составляют соответственно 5,9 и 4,2 мм/сут с максимумами в 1973 г. (11,2 и 8 мм/сут). Наиболее интенсивный спад уровня в среднем приходится на декабрь (6,1 мм/сут), а подъем – на июль (8,7

мм/сут). Однако максимальный месячный прирост уровня наблюдался в августе 1973 г. и составлял 17,7 мм/сут.

В результате, внутригодовые изменения естественных и зарегулированных уровней достаточно синхронны (Рисунок 3.1.2), с наибольшими различиями в зимние месяцы.

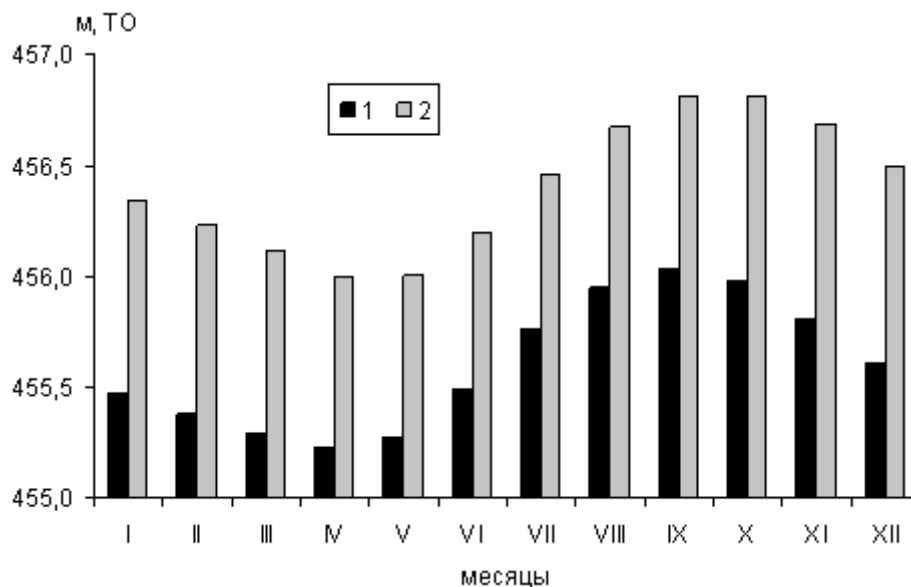


Рисунок 3.1.2 – Осредненные внутригодовые колебания уровня оз. Байкал в период 1898-1958 гг. (1) и 1962-2020 гг. (2)

В 2014-2015 гг. из-за низкой водности в бассейне Байкал был недозаполнен на 0,43 и 0,70 м до НПУ, что стало причиной последующей сезонной сработки озера до отметок ниже допустимых по постановлению № 234 пределов (456 м).

В зарегулированных условиях некоторые изменения внутригодовых показателей уровня режима были связаны с назначением новых предельных значений уровней. За 1960–2000 гг. в результате отступления от ПИВР размах внутригодовых изменений уровня в среднем увеличился до 1,00 м (Филатов и др., 2016) с разбросом в отдельные годы от 0,56 до 1,81 м. В последующий период (2001–2020 гг.), после выхода постановления № 234, средний диапазон внутригодовых колебаний уровня составил всего 0,77 м при максимальном значении 0,95 м и минимальном 0,36 м.

С форсировками также было связано смещение сроков максимального наполнения озера в сторону запаздывания. Одновременно это способствовало

соответствующему сдвигу и в отношении дат весенних минимальных уровней вследствие более высоких накопленных объемов воды и более позднего начала их сработки. В естественных условиях максимум летне-осеннего наполнения Байкала приходился на середину сентября, а весенней сработки – на середину апреля. В годы с форсировками уровня сдвиг сроков этих явлений в сторону запаздывания достигал одного месяца (Афанасьев, 1976; Гидроэнергетика и состояние..., 1999), однако в среднем за 1960–2020 гг. их изменения оказались не столь велики и для наивысших уровней составляют около 10 дней, а для наинизших 2–3 дня. При этом в годы естественного режима максимальное наполнение озера приходилось на период с 14 августа до 9 октября, а после зарегулирования – с 21 августа до 29 октября. Сроки же максимальной сработки озера изменились более значительно: от интервала 17 марта – 9 мая в естественных условиях до 12 апреля – 22 мая в условиях подпора. В то же время указанные различия могут быть вызваны не только искусственными факторами, но и изменениями климата.

В целом, внутригодовые изменения уровня в годы естественного режима и после зарегулирования происходят достаточно синхронно (Рисунок 3.1.2), с наибольшими различиями в зимние месяцы.

3.2. Формирования колебаний уровня под воздействием природных и антропогенных факторов

Преобладание приходных или расходных статей баланса водоемов вызывает увеличение или уменьшение их объемов, сопровождаясь повышением или снижением уровня. В соответствии с выделением в истории оз. Байкал периодов с естественным и зарегулированным водным режимом исследование формирования уровней озера для них должно проводиться отдельно. До зарегулирования в формировании уровня озера принимали участие в основном природно-климатические факторы. После строительства Иркутской ГЭС уровень Байкала испытывает влияние хозяйственной деятельности, связанной с перераспределением стока из озера.

3.2.1. Природно-климатическая обусловленность

Наряду с колебаниями, вызванными изменениями прихода и расхода воды, уровни морей и озер испытывают вариации, происходящие без изменения их объемов. Они отличаются разнонаправленными искажениями водного зеркала, т.е. когда в одной части водоема уровень воды повышается, то в другой он будет пониженным. На Байкале к таким колебаниям, в первую очередь, относятся сгонно-нагонные денивеляции и сейши. Первые обусловлены ветровым воздействием, достигают 17-20 см и имеют продолжительность до 72-84 часов (Помыткин, 1960, Афанасьев, 1976). Сейши, с периодами от 60 до 278 минут, вызваны в основном перепадами атмосферного давления и представляют собой стоячие свободные волны в замкнутом или полужамкнутом водоеме.

На свайных и речных водомерных постах Росгидромета можно регистрировать колебания уровня с периодом от нескольких суток, и такие короткопериодные колебания могут быть выявлены только путем проведения специальных исследований. С 2006 г. на Байкале начинают внедряться автоматизированные системы непрерывной регистрации уровня ЛИН СО РАН, основанные на измерении гидростатического давления. С их помощью более полно была проанализирована и уточнена высокочастотная часть спектра колебаний уровня озера (Смирнов и др., 2014), а также выявлены реакции уровня на действие приливных сил и на сильные удаленные землетрясения. Амплитуды приливных лунно-солнечных колебаний уровня по данным (Тимофеев и др., 2010) достигают 20,9 мм. Продолжительность короткопериодных возмущений уровня в результате землетрясений характеризуется периодами от 1 до 2 минут и амплитудой до 15 см (Гранин и др., 2014).

Несмотря на то, что перечисленные короткопериодные колебания обусловлены природно-климатическими факторами, они не вызывают изменений объема воды в озере. Их проявление носит нерегулярный и локальный характер, ограничено по времени, поэтому в большинстве случаев данные вариации расцениваются как искажения уровня (денивеляции) и являются предметом

отдельного рассмотрения. Для исключения их влияния на общую картину изменения уровня Байкала данные наблюдений на постах приводятся к среднему уровню водоема в соответствии с размерами тяготеющих к ним площадей.

Уровень водоемов, как уже отмечалось, изменяется в соответствии с приходно-расходными статьями их водных балансов. Для Байкала основными приходными элементами баланса являются приток поверхностных вод (Y) и атмосферные осадки (X) на поверхность озера, а расходными – сток через р. Ангару (Y_A) и испарение (Z). Их формирование определяется физико-географическими и климатическими условиями территории, т.е. региональными природно-климатическими факторами.

Прямая связь между среднегодовыми уровнями озера и суммарным притоком рек до зарегулирования (1901-1958 гг.) по коэффициенту корреляции (r) составляет 0,86.

Принимая во внимание, что связь уровня остается достаточно высокой и с притоком в предшествующие годы (Синюкович и др., 2014), нами исследована зависимость многолетних колебаний уровня от притока двух лет – текущего (Y_i) и предшествующего (Y_{i-1}), с оценкой среднеквадратической ошибки (s) соответствующих уравнений регрессии (таблица 3.2.1) в абсолютных значениях и в долях σ . Одновременно оценивалась связь уровня с другими элементами водного баланса.

Таблица 3.2.1. – Зависимость среднегодовых уровней от элементов водного баланса

Расчетный период	Предиктор	Коэффициент корреляции	Ошибка регрессии	
			s , см	s/σ
1901-1958 гг.	Y_i	0,86	8,4	0,52
1901-1958 гг.	Y_i, Y_{i-1}	0,97	3,6	0,23
1901-1958 гг.	X_i	0,51	12,5	0,78
1901-1958 гг.	Z_i	0,22	15,9	0,98
1901-1958 гг.	Y'_i	0,84	8,8	0,54
1901-1958 гг.	Y_{Ai}	0,98	3,2	0,20
1901-1958 гг.	Y_i, Y_{Ai}	0,98	3,0	0,19
1962-2017 гг.	Y_i	0,55	20,3	0,84
1962-2017 гг.	Y_i, Y_{i-1}	0,69	17,6	0,72

Полученные результаты указывают на то, что для естественных условий зависимость межгодовых колебаний уровня оз. Байкал от объема поверхностного притока может быть использована для практических расчетов, так как ошибка расчетов значительно ниже нормативного предела $0,674\sigma$ и в варианте с притоком двух лет снижается до $0,23\sigma$. Доминирующая роль поверхностного притока в формировании уровня озера подтверждается и более низкими коэффициентами корреляции с другими составляющими его водного баланса – осадками и испарением. При этом точность регрессионного уравнения с учетом всех трех рассматриваемых элементов водного баланса даже несколько снижается в сравнении с регрессией по притоку двух лет и не увеличивается по отношению к регрессии по значениям притока текущих лет. Также видно, что близкий результат может быть получен и при замене этих трех элементов водного баланса одним, а именно, полезным притоком (Y'). В связи с этим, для упрощения подобных расчетов роль осадков и испарения в формировании межгодовых колебаний уровней может быть учтена не напрямую, а опосредованно через полезный приток.

Связь стока из оз. Байкал через исток Ангары с уровнем озера значительно теснее и приближается к функциональной ($r = 0,98$). И несмотря на то, что сток в данной ситуации является следствием, а не предиктором, данная зависимость оказывается полезной при описании колебаний уровня. При учете для этих целей стока и притока (в том числе полезного) относительная ошибка регрессии уровня снижается до $0,19\sigma$, или 3 см в абсолютных значениях (таблица 3.2.1).

Связь среднегодовых уровней Байкала с суммарным притоком рек после зарегулирования по коэффициенту корреляции снизилась до $0,55$ (таблица 3.2.1), но остается наиболее тесной по сравнению с другими элементами водного баланса.

Внутригодовые флуктуации уровня также тесно связаны с колебаниями притока поверхностных вод (Рисунок 3.2.1). При этом видно, что ход уровня

отстает от колебаний притока на 2-3 месяца. Действительно, их взаимокорреляционная функция на этом сдвиге достигает максимума 0,74-0,75, тогда как без сдвига величина r между ними составляет только 0,23.

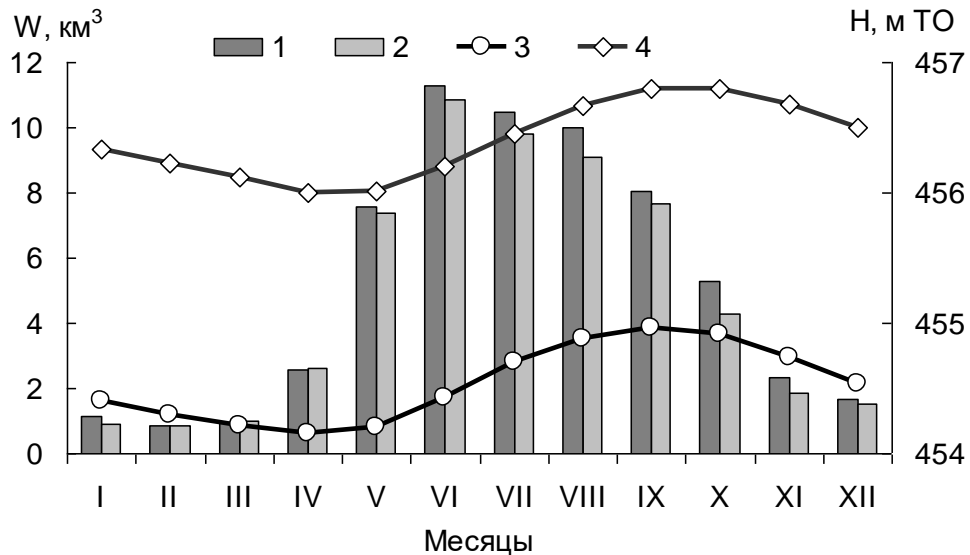


Рисунок 3.2.1 – Осредненные внутригодовой ход притока и уровня до и после зарегулирования. Приток: 1 - до зарегулирования; 2 – после зарегулирования; уровень: 3 - до зарегулирования, 4 – после зарегулирования.

Связь уровня в разрезе месячных значений с осадками и испарением со сдвигом до пяти месяцев значительно слабее и по коэффициентам корреляции находятся в пределах 0,1-0,2, однако в периоды максимальных значений этих элементов их влияние на уровень может существенно возрасти. Так, в начале зимней межени, когда приток интенсивно снижается, значительно повышается роль испарения с водной поверхности Байкала, которое становится главной статьей водного баланса озера (без учета стока). В результате роста температурного контраста на границе «вода-воздух» и активизации ветровой деятельности испарение в октябре-декабре увеличивается до 3-4 км³/мес. (Рисунок 3.2.2), или на порядок и более в сравнении с летним периодом, а полезный приток при этом зачастую принимает отрицательные значения. В ноябре-декабре испарение в два раза может превышать общий речной приток и, таким образом, становится главным фактором сработки уровня, обеспечивающим его снижение до 10-15 см в месяц.

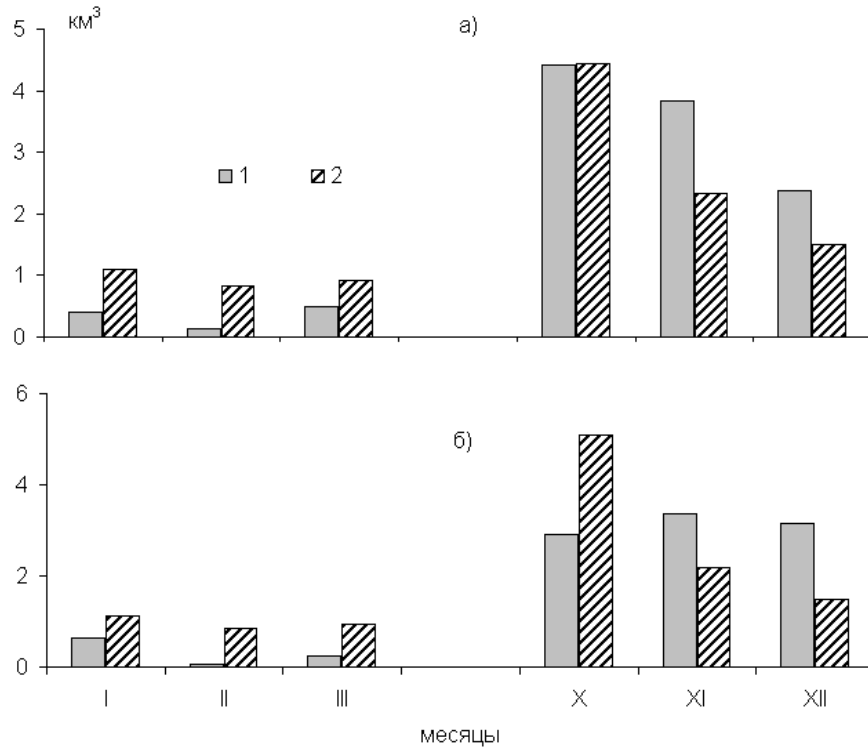


Рисунок 3.2.2 – Испарение с поверхности озера (1) и речной приток (2) в холодный период года. а – 2016 г., б – осредненные данные за 1971-2017 гг.

Вместе с воднобалансовыми составляющими для внутригодовых колебаний уровня Байкала большое значение имеют морфометрические особенности озера, которые с этих позиций также выступают в качестве естественных обуславливающих факторов. К ним относятся ограниченная пропускная способность истока Ангары и большие размеры (31500 км²) водной поверхности Байкала, определяющие известную инерционность (зарегулированность) уровня и стока из водоема. Можно видеть, что при разнице прихода и расхода воды в озере в 500-700 м³/с изменение уровня водоема на 1 см произойдет только через 6 дней. При меньших различиях скорость подъема/спада уровня становится еще ниже.

В целом, регулирующая способность оз. Байкал может быть оценена по коэффициенту естественной зарегулированности притока и стока, рассчитываемому по отношению площади годового гидрографа, лежащего ниже среднего значения, к его общей площади. Для притока в период естественного режима (1901-1958 гг.) искомый коэффициент получился равным 0,64, а для стока

из озера – 0,89. Следовательно, за счет сглаживающего влияния озера коэффициент зарегулированности стока Ангары увеличивается на 0,25, или 39 %.

После строительства Иркутской ГЭС коэффициент зарегулированности притока в 1962-1995 гг. не изменился (Верболов и др., 1992; Выручалкина, 2004), однако для маловодных 1996-2017 гг. его среднее значение увеличивалось до 0,66, а для 2015-2017 гг. – до 0,70. При этом зарегулированность стока через Иркутскую ГЭС в среднем возросла до 0,97, а в маловодье 2015-2017 гг. достигала 0,99.

Вследствие собственной регулирующей способности оз. Байкал стабилизация уровня после подъемов (спадов) теоретически могла бы продолжаться до двух лет (Синюкович, 1984), если бы не высокая внутригодовая неравномерность прихода воды в озеро. Изменение уровня прекращается с установлением равновесия между приходом и расходом воды, и при дальнейшем росте или снижении поступления воды растет и падает уровень. В любом случае (и после зарегулирования) собственная регулирующая способность оз. Байкал остается значимым фактором формирования его уровенного режима, сглаживающим влияние на уровень мелкомасштабных колебаний приходно-расходных составляющих водного баланса озера.

3.2.2. Антропогенное перераспределение стока из озера

После строительства Иркутской ГЭС и выклинивания подпора на оз. Байкал межгодовые и сезонные колебания его уровня определяются уже не только природно-климатическими условиями формирования элементов водного баланса водоема, но и режимом стока через гидроузел. Изменения стока зарегулированных рек в целом характеризуются выравниванием внутригодовых и межгодовых колебаний водности. Сток р. Ангары после зарегулирования также претерпел существенные внутригодовые изменения (Рисунок 3.2.3). Если в годы естественного режима максимальный сток из озера приходился на август-октябрь, то теперь он сместился на ноябрь-декабрь.

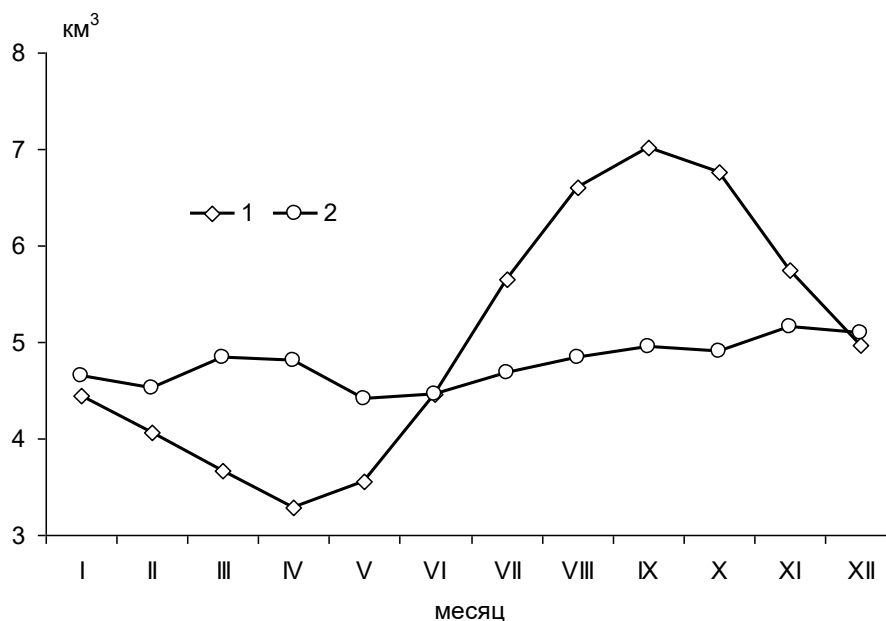


Рисунок 3.2.3 – Внутригодовые изменения стока из озера в годы естественного водного режима (1) и после зарегулирования (2)

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. Это наглядно проявляется в изменении порядка регулирования использования водных ресурсов Байкала с начала текущего столетия.

Как уже отмечалось, постановлением Правительства РФ № 234 от 2001 г. допустимая амплитуда колебаний уровня была уменьшена с 1,96 до 1 м и в условиях средней и незначительно пониженной водности соблюдалась до 2015 г., однако затем, в связи с аномальным снижением притока, уровень Байкала опускался ниже установленного постановлением минимального значения 456 м. По этой причине в 2015 г. Правительством было принято новое постановление, а в последующий период еще три – в 2016, 2017 и 2021 гг. В них предельные значения уровня озера были уже значительно расширены, но, распространяясь на конкретные, ограниченные периоды времени, они обуславливали и непостоянство

подходов к режиму регулирования уровня Байкала и стока через Иркутскую ГЭС, в том числе и, казалось бы, не всегда адекватные. Так, несмотря на временное существенное снижение нижнего предельного уровня до 455,54 м Федеральное Агентство водных ресурсов РФ (ФАВР), тем не менее, воздерживается от сработки Байкала до этих отметок, практикуя с конца 2014 г. постоянные попуски через Иркутский гидроузел в размере 1250-1300 м³/с (минимально допустимый расход), что было бы совершенно исключено в естественных условиях. На этом фоне изменился и характер формирования уровня озера под воздействием притока (Рисунок 3.2.4), приобретая черты, присущие непроточным (бессточным) водоемам.

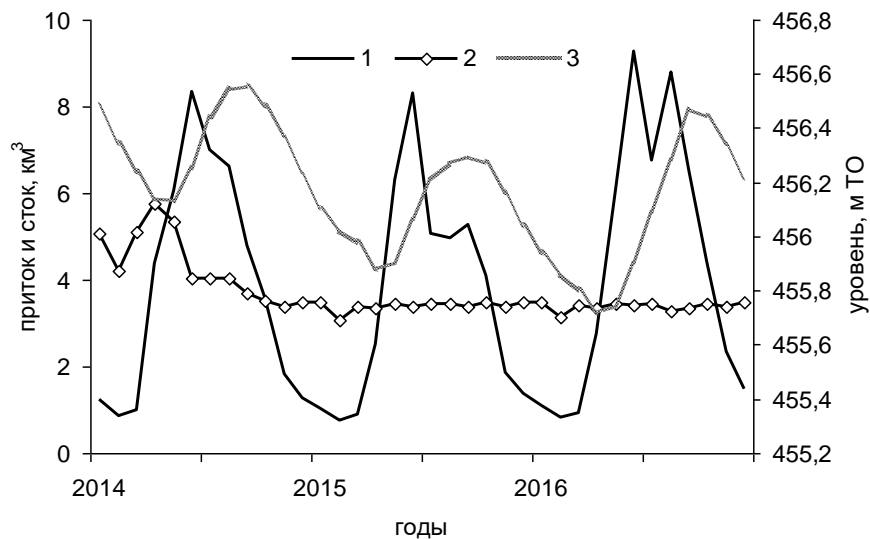


Рисунок 3.2.4 – Параметры водного режима оз. Байкал в маловодный период 2014-2017 гг. 1 – приток; 2 – сток; 3 – уровень

Таким образом, становится видно, что 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 обратимся к результатам расчетов естественно-условных уровней по изложенной в главе 2 воднобалансовой схеме.

Рассчитанные условно-естественные уровни Байкала за годы после зарегулирования (Рисунок 3.2.5) характеризуют наиболее вероятную картину уровня озера, которая могла бы наблюдаться в отсутствие подпора от

плотины Иркутской ГЭС. При этом видно, что гидрографы зарегулированных и восстановленных уровней заметно сближаются в маловодные периоды и, наоборот, расходятся в многоводные и в годы форсировок.

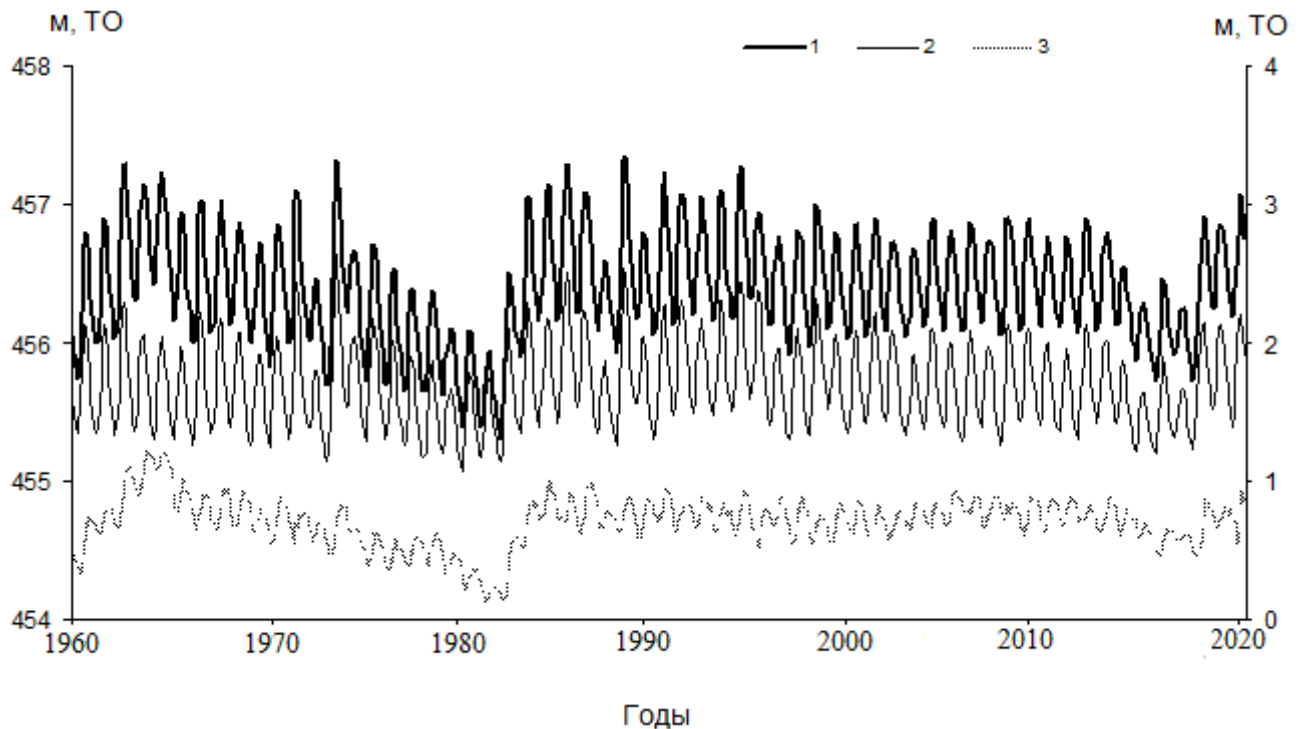


Рисунок 3.2.5 – Наблюденные (1), условно-естественные (2) среднемесячные уровни и разница между ними (3)

По результатам расчетов высота антропогенного повышения уровня оз. Байкал от подпирающего воздействия Иркутского водохранилища за 1962-2019 гг. изменялась от 0,13 до 1,22 м и в среднем составила 0,71 м. Кроме этого, внутри отдельных лет становится видна приуроченность наибольшей разницы уровней в зимние месяцы (Рисунок 3.2.6). 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.

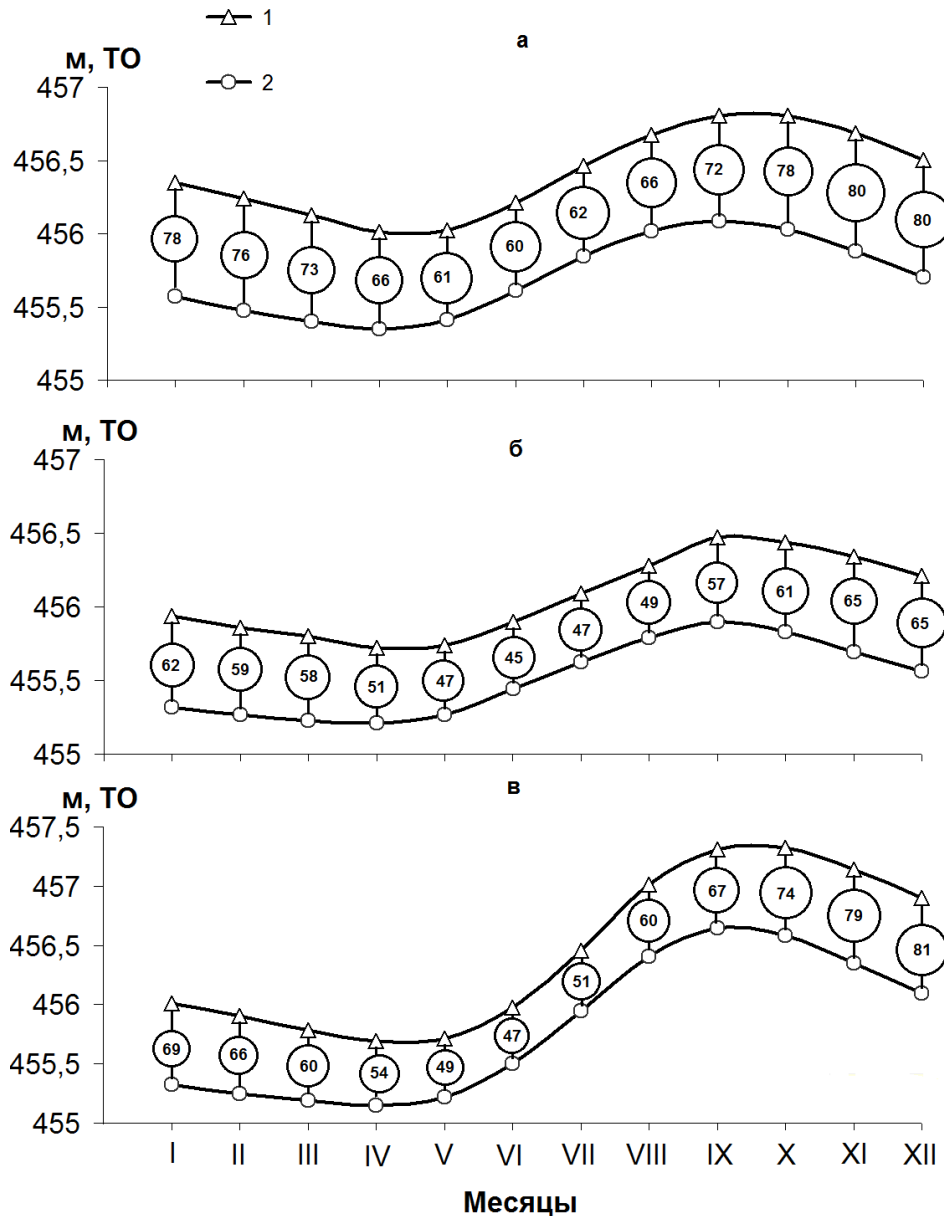


Рисунок 3.2.6 – 3 зарегулированные и условно-естественные уровни. а – среднее за 1962-2019 гг.; б – маловодный 2017 г.; в – многоводный 1973 г.; цифры в кружках – разница уровней в см.

С начала XXI в. превышение фактических уровней над приведенными оставалось достаточно стабильным и до 2014 г. в среднем составляло 77 см, изменяясь внутри отдельных лет от 56 до 93 см (таблица 3.2.2, Рисунок 3.2.1). В дальнейшем, после выхода наблюдаемых уровней на отметки ниже 456 м, оно стало уменьшаться и в 2017 г. в среднем составляло уже только 56 см. Это говорит о том, что в естественных условиях снижение уровня было бы меньше, чем в реальности, а, следовательно, меньшим бы был и сток из озера. Кроме того, в целом для зарегулированных уровней характерна более высокая амплитуда

колебаний, чем для реконструированных, что также отражает общие принципы регулирования стока – более интенсивное аккумулярование воды осенью и более глубокую сработку весной.

Таблица 3.2.2 – Показатели уровня режима по наблюдаемым и реконструированным (в скобках) среднемесячным значениям в XXI веке

Год	Средний уровень, м ТО	Высота подъема, м	Высота спада, * м	Превышение наблюдаемых уровней над приведенными, м	
				Среднее значение	Предел изменений
2001	456,50 (455,79)	0,86 (0,80)	0,83 (0,79)	0,71	0,57-0,82
2002	456,42 (455,74)	0,64 (0,66)	0,68 (0,76)	0,68	0,56-0,80
2003	456,33 (455,58)	0,65 (0,57)	0,58 (0,53)	0,75	0,64-0,84
2004	456,51 (455,74)	0,78 (0,73)	0,80 (0,71)	0,77	0,67-0,85
2005	456,48 (455,69)	0,72 (0,61)	0,72 (0,72)	0,79	0,68-0,93
2006	456,50 (455,67)	0,78 (0,81)	0,72 (0,69)	0,83	0,74-0,91
2007	456,47 (455,67)	0,59 (0,57)	0,68 (0,7)	0,80	0,67-0,89
2008	456,48 (455,67)	0,84 (0,86)	0,81 (0,70)	0,81	0,69-0,88
2009	456,50 (455,75)	0,80 (0,67)	0,78 (0,70)	0,75	0,60-0,87
2010	456,47 (455,70)	0,65 (0,60)	0,65 (0,63)	0,77	0,64-0,87
2011	456,44 (455,65)	0,65 (0,59)	0,69 (0,65)	0,79	0,68-0,89
2012	456,47 (455,69)	0,82 (0,81)	0,81 (0,70)	0,78	0,71-0,86
2013	456,45 (455,72)	0,72 (0,60)	0,67 (0,60)	0,73	0,63-0,88
2014	456,35 (455,61)	0,42 (0,45)	0,67 (0,64)	0,74	0,61-0,88
2015	456,10 (455,44)	0,41 (0,41)	0,57 (0,43)	0,66	0,60-0,74
2016	456,07 (455,51)	0,75 (0,69)	0,56 (0,56)	0,56	0,45-0,65
2017	456,10 (455,50)	0,35(0,35)	0,53 (0,43)	0,60	0,57-0,64
2018	456,28 (455,68)	1,19 (0,91)	0,57 (0,63)	0,60	0,46-0,86
2019	456,57 (455,81)	0,61 (0,62)	0,67 (0,71)	0,75	0,66-0,82
Среднее	456,39 (455,66)	0,70 (0,65)	0,68 (0,65)	0,73	0,45-0,93

* спад продолжается с осени расчетного года до весны следующего.

Последние обстоятельства объясняют претензии некоторых специалистов и заинтересованных водопользователей к неоправданно высоким, по их мнению, попускам воды через Иркутскую ГЭС весной 2014 г., которые, очевидно, не лишены оснований. Однако они могут быть справедливыми только в отношении расходов воды в мае (среднее значение 1990 м³/с), отчасти оправданных недостаточной предполоводной сработкой полезной емкости (годовой минимум уровня составлял 456,12 м). Сравнение динамики наблюдаемых и реконструированных уровней показывает, что в естественных условиях падение уровня к концу 2014 г. было бы всего на 3-5 см меньше, чем имело место в

действительности). Это согласуется с выводами (Бычков, Никитин, 2015), что при экономичном режиме пропуска воды через гидроузел (при надежном заблаговременном прогнозе снижения притока) к маю 2015 г. падение уровня могло быть меньше произошедшего на 6 см.

Следует отметить, что при регулировании стока из озера должны быть учтены требования различных водопользователей не только в верхнем бьефе Иркутской ГЭС (Иркутское водохранилище и оз. Байкал), но и в нижнем (р. Ангара ниже плотины). Последние в основном касаются предельных значений стока через Иркутскую ГЭС, которые по проекту составляют 1050 и 6000 м³/с. Если в действующих ПИВР верхний предел стока не изменился, то нижний теперь увеличен до 1300 м³/с (во время ледостава до 1250 м³/с), что продиктовано требованиями безопасной работы водозаборов, обеспечивающих водо- и теплоснабжение расположенных ниже по течению городов (Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово). Изменение требований эксплуатации водозаборов связано с просадкой уровня р. Ангары вследствие дноуглубительных работ и выемки песчано-гравийной смеси. В навигационный период (май-октябрь) минимальный расход воды р. Ангары должен быть не ниже 1500 м³/с, хотя по факту этот предел уже составляет 1600-1700 м³/с (Правила использования водных..., 2013).

В настоящее время существенно изменилась и ситуация с максимальным расходом воды р. Ангары ниже Иркутской ГЭС. Главным образом это связано с застройкой пойменной части реки, где затопление и подтопление уже начинаются при расходах воды 2800-3000 м³/с (Бычков, Никитин, 2015). При этом угроза и 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 м³/с). Ограничение повышенных сбросов через Иркутскую ГЭС также связано и с необходимостью поддержания минимально допустимого напора (25 м по проекту), падающего по мере подъема уровня в нижнем бьефе при росте расходов воды.

В верхнем бьефе Иркутской ГЭС требования водопользователей в основном касаются предельных уровней Иркутского водохранилища и оз. Байкал. Одновременно с этим, в разного рода дискуссиях по уровенному режиму Байкала приводятся и экологические требования к регулированию стока через Иркутский гидроузел, 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, обеспечивающего следующие условия:

- амплитуда внутригодовых изменений уровня озера в условиях средней водности не должна превышать 85 см;
- при приточности в озеро редких повторяемостей (0,01; 0,1 и 1% обеспеченности) максимально допустимый уровень озера должен быть не выше $457,20 \pm 0,04$ м ТО. Превышение НПУ допустимо только при согласовании с заинтересованными государственными органами управления, министерствами и ведомствами;
- в годы с приточностью выше 10 % обеспеченности уровень озера не должен превышать НПУ 457,00 м ТО;
- минимальный уровень озера не должен опускаться ниже 456,00 м ТО, что может соответствовать высокой (80, 95 %) обеспеченности приточности;
- при регулировании уровня озера необходимо придерживаться естественной динамики сезонных изменений уровня, характерных для естественного режима: весенний минимум озера должен приходиться на вторую половину апреля, и его продолжительность не должна превышать 10-15 дней;
- в мае-июне повышение уровня должно составлять не менее 15-45 см;
- осенний максимум уровня не должен выходить за пределы третьей декады сентября, и его продолжительность не должна превышать 5-7 дней;
- с сентября снижение уровня должно составлять не менее 10 см в месяц.

Таким образом, перечисленные водохозяйственные и экологические ограничения и требования к режиму стока через Иркутскую ГЭС также

выступают антропогенными факторами формирования уровенного режима оз. Байкал.

3.2.3. Изменения притока речных вод под влиянием хозяйственной деятельности

Результатом антропогенных воздействий на водность рек является, прежде всего, внутригодовое перераспределение их стока и формирование тенденции его постепенного снижения (Крестовский, 1986; Шикломанов, 1989; Водогрецкий, 1990). В бассейне оз. Байкал, где нет водохранилищ, основные нарушения стока отдельных рек могут быть связаны с хозяйственным водопотреблением.

Одна из первых оценок хозяйственного воздействия на изменения притока воды в оз. Байкал выполнена А.Н. Афанасьевым (1977). Произошедшие после этого изменения в политической и социально-экономической сферах России существенно изменили и уровень хозяйственного использования ее водных ресурсов (Антропогенные воздействия на..., 2004; Водные ресурсы России..., 2008). В бассейне Байкала масштабы водопотребления с 1990-х гг. к началу XXI века сократились приблизительно вдвое (Гармаев, Христофоров, 2010) и с тех пор остаются достаточно стабильными. На российской части территории бассейна забор воды на хозяйственные нужды из поверхностных источников в начале XXI века составлял 503,1 млн. м³, при безвозвратных потерях 123,4 млн. м³ (Гармаев, Христофоров, 2010). Близкие оценки приводятся и Федеральным агентством водных ресурсов (ФАВР) на 2016 г. – 488 и 95 млн. м³ соответственно. С учетом объемов потребления воды на территории Монголии, не превышающих в этот период 120-130 млн. м³ (Монгол улсын статистикийн ..., 2003), нетрудно посчитать, что ежегодное снижение стока рек в байкальском бассейне за счет использования воды на хозяйственные нужды не выходит за пределы 200 млн. м³, или 0,2 км³. Данная величина составляет менее 0,5 % от суммарного притока поверхностных вод в озеро и не может оказывать существенного влияния на его уровенный режим.

Вместе с тем, учет использования воды по отдельным районам, или водохозяйственным участкам, недостаточно надежен и оценки снижения стока отдельных рек в разных источниках могут не совпадать, а развитие экономики и социальной сферы в регионе предполагает и рост хозяйственного использования поверхностных вод. На водосборной территории оз. Байкал основное потребление воды 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. м³/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. м³/год и 0,10 %. При этом водопотребление иногда не только не вызывает снижения речного стока, но даже наоборот – способствует его повышению. Для р. Тьи, например, где основной забор воды направлен на водоснабжение г. Северобайкальска и осуществляется за счет подземных вод изолированных горизонтов, дополнительное увеличение ресурсов поверхностных вод составляет 2,16 млн. м³/год (Схема комплексного использования..., 2014).

Потери стока р. Селенги за счет хозяйственного использования воды в 1980-е гг. достигали 1,3 км³/год (Родионов, Нямжав, 1986). Очевидно, эту величину следует расценивать как максимально возможную, так как основное снижение стока связывалось с орошаемым земледелием, масштабы которого к настоящему времени значительно снизились. 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). Сокращение потребления воды произошло во всех отраслях экономики, за исключением жилищно-коммунального сектора. По сведениям ФАВР в 2016 г. общее

водопотребление в бассейне составило $0,554 \text{ км}^3$ при объеме безвозвратных потерь $0,075 \text{ км}^3$.

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 $0,36 \text{ км}^3/\text{год}$, при общем объеме водозабора от $0,48$ до $0,91 \text{ км}^3/\text{год}$ (Гармаев и др., 2019). В этом случае безвозвратные потери воды Селенги увеличиваются до $0,2 \text{ км}^3/\text{год}$ и вместе с потерями на российской части территории обуславливают общее снижение притока поверхностных вод в оз. Байкал около $0,3 \text{ км}^3/\text{год}$ 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. Создание наиболее крупных водохранилищ предполагается на р. Селенге (ГЭС Шурэн с объемом $3,8 \text{ км}^3$) и ее притоке Эгийн-Гол (ГЭС Эгийн-Гол с объемом $5,5 \text{ км}^3$). Используя сведения о возможных изменениях стока реки ниже каждого из водохранилищ (Гречушникова, Эдельштейн, 2016; Бычков и др., 2017) нами оценены изменения стока в нижнем течении р. Селенги (рзд. Мостовой).

Таблица 3.2.3. – Внутригодовые изменения стока р. Селенги под воздействием водохранилищ

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Шурэнская ГЭС												
$\text{м}^3/\text{с}$	318	87,0	75,1	0	-324	-303	-165	-252	-84,4	0	26,9	274
%	261	97	77	0	-23	-22	-12	-13	-5	0	8	145
ГЭС Эгийн-Гол												
$\text{м}^3/\text{с}$	124	122	117	0	-42,2	-82,6	-234	-136	-50,6	-31,4	90,7	71,8
%	102	136	120	0	-3	-6	-17	-7	-3	-3	27	38

Полученные данные (таблица 3.2.3) указывают на то, что в условиях водности 50 %-ной обеспеченности наиболее существенные изменения стока р. Селенги приходится на 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 составляет около 2 км^3 , что эквивалентно изменению уровня Байкала на 6-7 см. В варианте с одновременным воздействием двух водохранилищ эти изменения могут быть вдвое больше.

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.

Глава 4. Изменчивость характеристик притока поверхностных вод

Многолетние изменения притока речных вод в оз. Байкал являются интегральным показателем стока всех впадающих в него рек. В связи с этим, вместе с исследованием структуры межгодовой и сезонной изменчивости притока воды в озеро как элемента водного баланса, нами рассмотрены особенности колебаний стока байкальских рек с определением значений расчетной обеспеченности каждой из его характеристик. Основное внимание при этом уделено наиболее крупным водотокам (Селенга, Верхняя Ангара, Баргузин), обеспечивающим 2/3 общего притока воды в озеро с территории, составляющей около 80 % всей его водосборной площади, а также имеющим и наиболее продолжительные ряды наблюдений. При этом результаты расчета стока заданной обеспеченности по главным притокам (Синюкович, Чернышов, 2014; Синюкович, Чернышов, 2017) учитывались и при рассмотрении других рек. В частности, составное распределение применялось в случае неоднородности данных, выявленной одновременно для средних значений и дисперсий (критерии Фишера и Стьюдента), однако для среднего и максимального стока при подтверждении гипотезы неоднородности только по одному из параметров привлекался еще один критерий (Вилькоксона или Смирнова-Граббса) и в зависимости от полученного результата принималось решение о целесообразности применения к исходным реализациям составного распределения.

Для аппроксимации эмпирических распределений характеристик стока использовались преимущественно аналитические функции трехпараметрического гамма-распределения, однако в тех случаях, когда это было невозможным из-за превышения предельных для данного распределения соотношений $C_s > 6C_v$, или невозможности снятия с номограмм параметров вариации и асимметрии для полученных значений λ_2 и λ_3 , то расчеты выполнялись с использованием распределения Пирсона III типа.

Составное распределение и сопоставление рассчитанных показателей за разные периоды относительно начала потепления (1971 г.) не рассматривалось для отдельных рек с коротким периодом наблюдений в первой части ряда ($n_1 \leq 10$).

4.1. Средний годовой сток

Многолетние изменения годового стока рек, впадающих в оз. Байкал, несмотря на разные размеры и различные природные условия их водосборных территорий, имеют достаточно схожие особенности вследствие действия крупномасштабных атмосферных процессов, определяющих общие закономерности переноса атмосферной влаги в регионе и формирование речного стока (Афанасьев, 1967; Воскресенский, Бочков, 1972; Дзердзеевский, 1975; Природа многолетних колебаний..., 1976; Структура и ресурсы..., 1977; Добровольский, 2011). Известная согласованность колебаний годового стока рек СССР отмечалась (по ПКФ) на расстоянии до 2500 км (Воскресенский, 1962; Калинин, 1968; Смирнов, 1975; Пространственно-временные колебания..., 1988; Лобанов, 1995).

В связи с этим, сначала обратимся к динамике суммарного притока поверхностных вод в озеро за 1901-2017 гг. (Рисунок 4.1.1), где помимо долговременного положительного тренда заметны периоды (циклы), продолжительность которых, по данным разных исследователей (Дружинин и др., 1966; Афанасьев, 1967, 1976; Кузин, 1970; Шимараев и др., 2002), составляет 20-35 лет. В целом за рассматриваемый период приток возрастал со скоростью (dQ) около $0,6 \text{ км}^3$ за 10 лет. В годы с начала потепления и до 1996 г. он также был повышенным, за исключением маловодного периода 1976-1981 гг. Однако затем приточность изменялась от незначительно пониженной, или близкой к средним значениям, до аномально низкой в 2014-2017 гг. Несмотря на эти различия, исходные данные по притоку до и после 1971 г. по критерию Фишера и Стьюдента остаются однородными. Следует отметить, что для полезного притока в Байкал это требование не выполняется (Болгов и др., 2018).

Анализ динамики годового стока трех главных притоков указывает на наличие разнонаправленных долговременных тенденций. Для р. Селенги они хоть в основном и согласуются с изменениями суммарного притока, но отличаются снижением водности. Для Верхней Ангары преобладающим был рост стока, тогда как Баргузин отличала относительная стабильность водности (см. Рисунок 4.1.1). Нарушение согласованности колебаний водности Селенги и Верхней Ангары заметно стала проявляться с начала потепления (Синюкович и др., 2013; Чернышов, Синюкович, 2015).

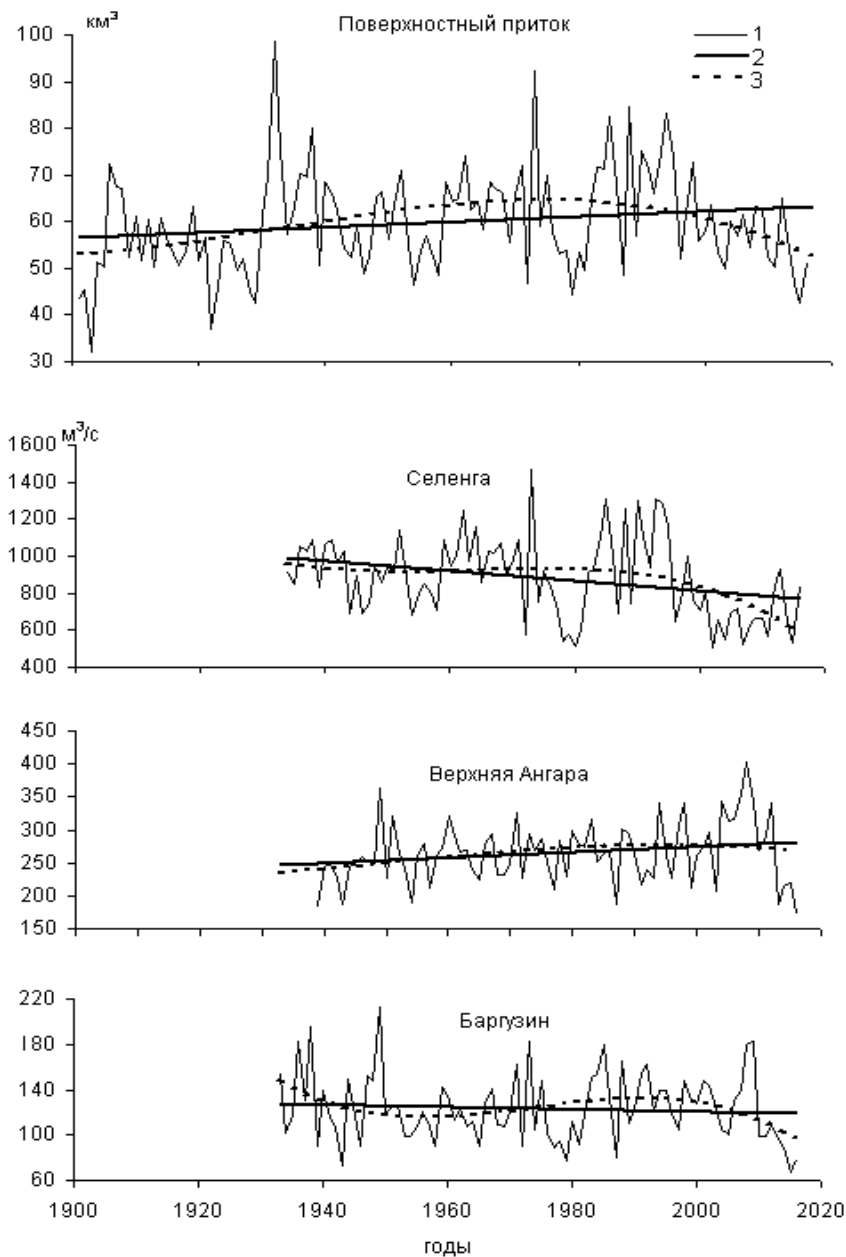


Рисунок 4.1.1 – Динамика многолетних колебаний притока и стока главных рек: 1 – текущие значения, 2 – линейный тренд, 3 – полиномиальный тренд

В среднем скорость ежегодного снижения стока р. Селенги составила 2,8 м³/с в год, однако после 1996 г. она стала вдвое больше, что наглядно отражает характер нелинейного тренда. Темпы роста стока Верхней Ангары были значительно ниже (0,6 м³/с за год), что лишь частично компенсировало дефицит водности р. Селенги и предопределяло пониженный или близкий к среднему общий приток в оз. Байкал. Однако в 2013-2016 гг. водность Верхней Ангары и Баргузина (с 2011 г.) также существенно снизилась, а в 2015-2016 гг. сток всех трех водотоков оказался минимальным за весь период наблюдений. Все это стало причиной крайне низкого притока в оз. Байкал, вызвавшего падение его уровня ниже установленного минимального значения.

Подобное маловодье в бассейне оз. Байкал имело место в 1976-1981 гг. и также в основном было вызвано аномально низкой водностью р. Селенги (Синюкович и др., 2013).

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. Лучше всего эмпирическим точкам соответствуют аналитические кривые трехпараметрического гамма-распределения (Рисунок 4.1.2). 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 (Q_1) составлял 939 м³/с, а за период с 1971 г. он (Q_2) снизился до 831 м³/с (11 %). Тем не менее, по критерию Стьюдента указанные Q_1 и Q_2 могут считаться однородными.

Изменчивость во второй части ряда, наоборот, существенно увеличилась ($\sigma_1=140$ м³/с, $\sigma_2=263$ м³/с). Соотношение соответствующих дисперсий ($F=3,53$) по критерию Фишера не подтверждает их однородность, вследствие чего данный ряд также не может рассматриваться как единая совокупность.

Расчетные значения стока Селенги обеспеченностью 5, 25 и 50 %, полученные по n_2 , с учетом указанной выше неоднородности данных, дают существенно меньшие значения, чем в годы до потепления, или за весь период наблюдений. Тем не менее, результаты расчетов по общей (составной)

аналитической кривой распределения, построенной на основе двух отдельных, практически совпадают с данными, полученными по полному ряду (разница 10-20 м³/с), в связи с чем, последние приняты нами в качестве расчетных значений стока и приведены в сводной таблице.

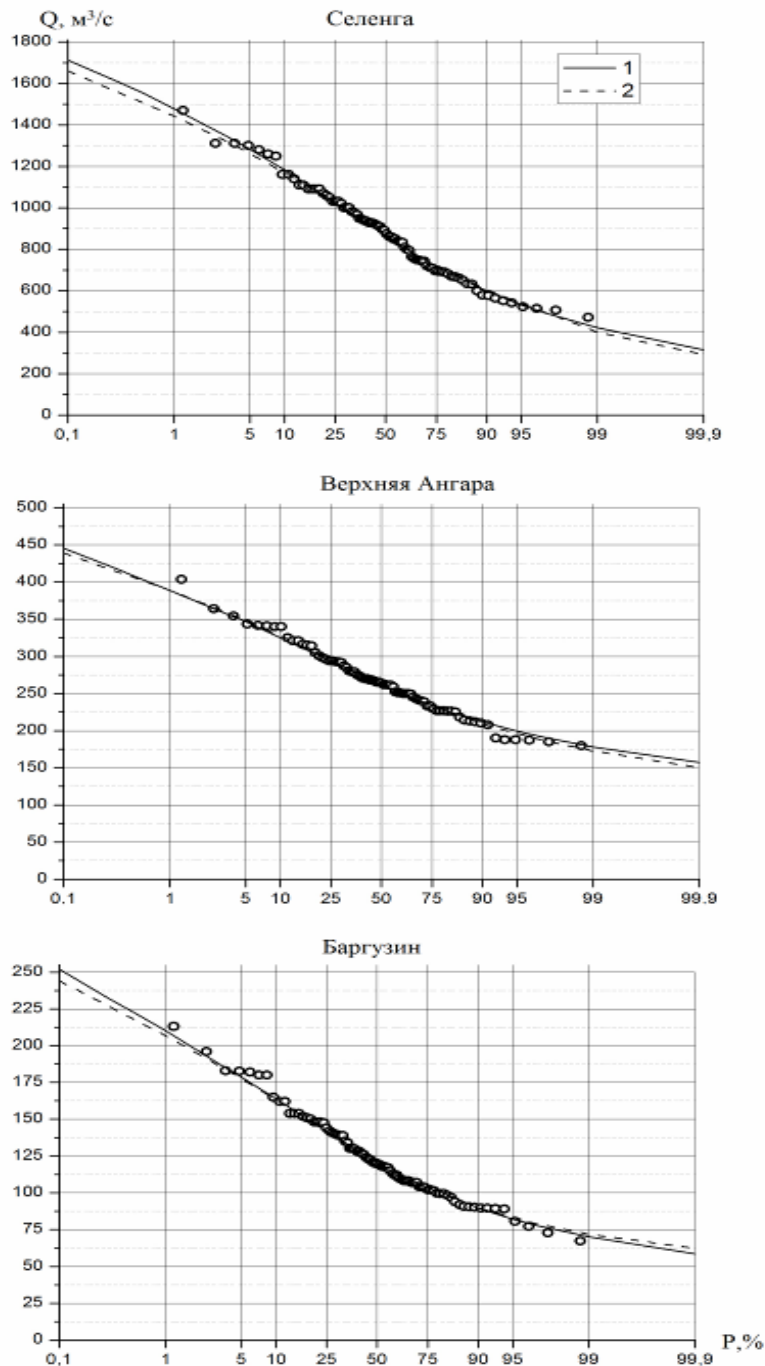


Рисунок 4.1.2 – Кривые обеспеченности годового стока. Аналитические функции распределения: 1 – Крицкого-Менкеля, 2 – Пирсона III типа

Средние значения и дисперсии стока Верхней Ангары и Баргузина в годы до и после потепления отличались менее существенно – соответствующие

статистики Стьюдента и Фишера не превышали критических значений. 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 10-15 м³/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 м³/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 динамике годового стока притоков северной котловины озера (Рель, Тья и Холодная), с преобладанием снегового питания, отмечаются в основном слабые отрицательные и статистически незначимые тренды, за исключением Холодной с $dQ = 0,11$ м³/с в год и $\alpha = 5$ %.

Снижение стока, связанное, главным образом, с маловодьем последних лет, характерно и для соседней Давши (Баргузинский гидрологический район) с примерно равным участием стока дождевых и талых вод ($dQ = -0,02$ м³/с в год).

Параметры распределения стока перечисленных рек характеризуются значениями C_v в диапазоне 0,20-0,27 и отношением C_s/C_v от 1,5 до 2,5. Максимальные и минимальные значения их стока, несмотря на принадлежность к одному району, приходится на разные годы.

Притоки центральной котловины озера представлены Нижнеселенгинским (Турка, Кика, Большая Сухая), Баргузинским (Максимиха) и Хамар-Дабанским (Анга) районами с примерно равным участием дождевых и талых вод. Для динамики стока Анги и Кики также характерны незначительные отрицательные тренды (соответственно 0,02 и 0,05 м³/с в год), а для Турки, наоборот, отмечается слабый рост водности (0,12 м³/с в год). Долговременные тенденции среднего стока Максимихи и Большой Сухой статистически незначимы.

Параметры распределения годового стока этой группы рек характеризуются диапазонами C_v 0,18-0,41 и C_s/C_v от 1,0 до 3,1. Согласованное наступление экстремально многоводных лет характерно для Турки, Максимихи и Кики и приходится на 1988 г. Все остальные экстремумы наблюдались в разные годы.

Реки, впадающие в южную котловину Байкала, относятся в основном к Хамар-Дабанскому району (за исключением Большой Речки и Мысовки) и характеризуются преобладанием дождевого стока. Для большинства из них можно отметить многолетние достоверные тенденции снижения стока: от 0,01 (Большая Половинная) до 0,11 м³/с в год (Снежная). Положительной тенденцией стока отличается только Утулик (0,02 м³/с в год), а для Голоустной, Бугульдейки, Мысовки, Слюдянки, Похабихи и Харлахты значимые тренды отсутствуют.

Параметры распределения годового стока для рек южной котловины озера представлены наиболее широкими диапазонами C_v (0,16-0,42) и соотношения C_s/C_v (0,5-5,0). Максимальные значения стока большинства рек приходятся на многоводный 1973 г., а минимальные в основном наблюдались в последние несколько лет.

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 было рассчитано составное распределение, которое по трем из них не было принято вследствие недостаточной длительности n_1 , или же незначительных различий с результатами расчетов по полному ряду. Составное распределение для определения стока

расчетной обеспеченности использовано только для Слюдянки, с наибольшими различиями Q_1 и Q_2 (таблица 4.1.1).

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 (см. таблицу 4.1.1).

4.2. Максимальные расходы воды весеннего половодья

Анализ многолетних колебаний максимальных расходов воды главных притоков Байкала в период половодья указывает на достаточно схожий характер их динамики с годовым стоком (Рисунок 4.2.1).

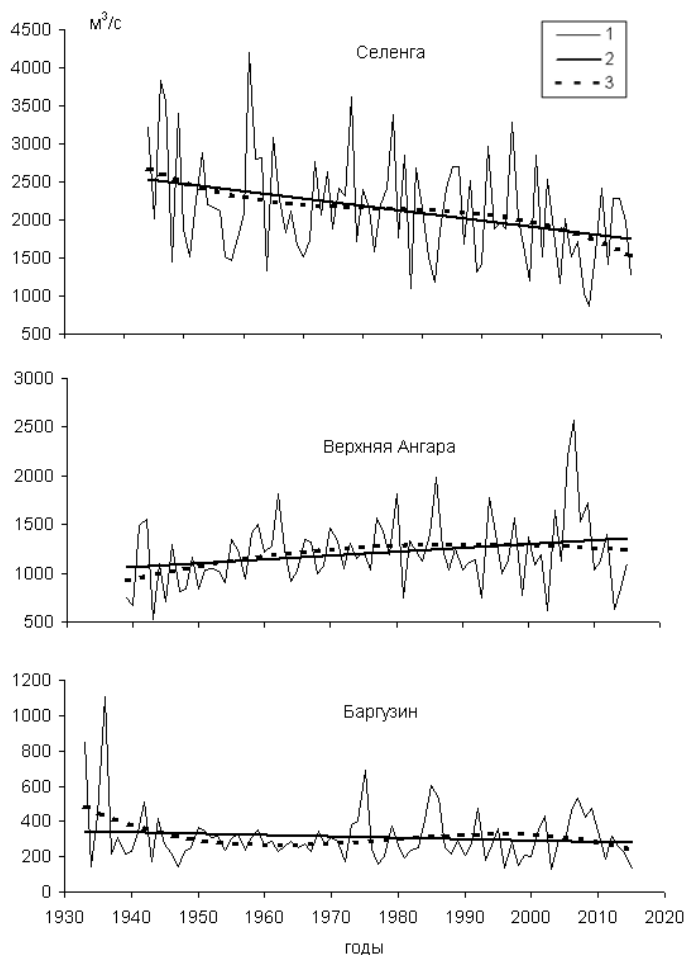


Рисунок 4.2.1 – Динамика многолетних колебаний максимальных расходов воды весеннего половодья: 1 – текущие значения, 2 – линейный тренд, 3 – полиномиальный тренд

Таблица 4.1.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики среднегодового стока

Река	Q_0 , м ³ /с	Q_2/Q_1	Диапазон колебаний	C_v	C_s/C_v	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			$r(1)$
						5 %	25 %	50 %	
Все реки (приток)	1900	1,04	1020-3130 (1020-3130)	0,18	3,0	2510	2110	1870	0,34
Селенга	880	0,89	471-1470 (681-1250)	0,26 (0,20)	1,5 (5,0)	1280 (1290)	1030 (1040)	864 (907)	0,35
Верхняя Ангара	267	1,08	172-404 (185-364)	0,17 (0,24)	3,0 (2,0)	347 (332)	295 (282)	263 (254)	0,17
Баргузин	124	1,00	67,2-216 (72,9-213)	0,24 (0,26)	3,0 (3,0)	179 (185)	142 (144)	121 (121)	0,11
Голоустная	9,12	1,03	3,18-19,2 (5,35-19,2)	0,36 (0,55)	2,4 (2,0)	20,5(21,1)	11,0 (13,5)	8,65 (9,35)	0,10
Бугульдейка	5,14	0,75	2,35-10,1 (2,35-7,12)	0,36 (0,41)	2,2 (2,0)	8,54 (8,84)	6,22 (6,21)	4,92 (4,75)	0,57
Анга	2,47	1,27	1,02-4,38 (2,34-4,38)	0,36 (0,37)	2,0 (2,0)	4,09 (5,54)	2,98 (4,03)	2,36 (3,17)	0,29
Рель	13,1	1,01	6,61-19,6	0,21	1,5	14,9	12,4	10,8	-0,19
Тыя	39,1	1,03	19,6-60,4	0,22	2,5	54,3	44,3	38,3	0,07
Холодная	20,0	1,17	12,5-29,4	0,20	1,0	26,8	22,6	19,8	-0,04
Давша	0,91	-	0,54-1,42	0,25	2,5	1,32	1,05	0,89	0,65
Турка	50,2	0,92	21,2-107 (24,7-80)	0,33 (0,30)	3,0 (2,0)	80,8 (70,5)	59,3 (54,1)	47,7 (44,4)	0,48
Большая Речка	12,1	1,04	7,16-20,4 (7,94-20,4)	0,23 (0,25)	3,0 (2,0)	17,2 (18,0)	13,8 (14,4)	11,8 (12,2)	-0,01
Мысовка	2,91	1,02	1,61-4,44 (1,91-4,20)	0,21 (0,20)	3,0 (2,0)	4,01 (3,98)	3,27 (3,33)	2,85 (2,92)	0,13
Выдринная	11,3	-	8,2-15,2	0,16	3,0	14,5	12,4	11,2	0,30
Снежная	47,1	1,04	29-73,1 (30,9-69,5)	0,20 (0,22)	3,0 (2,0)	64,1 (67,2)	52,8 (55,2)	46,2 (47,5)	-0,02
Хара-Мурин	23,8	1,05	15,4-37,8 (15,4-34,3)	0,21 (0,22)	3,0 (2,0)	32,8 (32,9)	26,8 (26,9)	23,3 (23,3)	-0,04
Харлахта	0,43	-	0,27-0,77	0,24	5,0	0,61	0,48	0,41	0,36
Утулик	16,8	0,98	6,20-26,6 (11,1-23,2)	0,24 (0,21)	0,5 (2,0)	23,5 (23,2)	19,4 (19,1)	16,7 (16,7)	0,16
Безымянная	5,55	1,02	3,13-8,37	0,24	2,0	7,91	6,38	5,43	0,24
Слюдянка**	0,82	0,75	0,34-1,37	0,32	2,0	1,3	0,98	0,79	0,20
Похабиха	1,46	0,98	0,79-2,47 (0,97-2,20)	0,22 (0,28)	3,0 (2,0)	2,04 (2,14)	1,65 (1,68)	1,42 (1,39)	0,35
Бол. Половинная	2,49	1,09	1,13-6,05 (1,39-5,23)	0,42 (0,45)	5,0 (2,0)	4,41 (4,81)	2,93 (3,28)	2,27 (2,44)	0,08
Максимиха	1,64	1,02	0,80-2,88 (1,07-2,47)	0,30 (0,30)	2,5 (3,0)	2,54 (2,57)	1,94 (1,93)	1,58 (1,57)	0,37
Кика	24,7	1,08	16,9-34,1 (19,6-28,8)	0,18 (0,26)	1,0 (2,0)	32,2 (40,0)	27,6 (31,8)	24,5 (26,8)	-0,00
Большая Сухая	3,84	0,97	2,01-5,76 (2,01-5,22)	0,41 (0,26)	3,1 (2,0)	5,53 (4,98)	4,45 (3,95)	3,78 (3,34)	-0,24
Култучная	1,11	-	0,62-1,73	0,29	2,0	1,70	1,31	1,08	0,49

* в скобках соответствующие значения по (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976)

** сток расчетной обеспеченности принят по составному распределению

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 значение стока по полному ряду для Баргузина также оказалось ниже, чем в (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976), а для Верхней Ангары, наоборот, выше. Разница средних значений и дисперсий до и после потепления для Верхней Ангары достаточно велика, но их однородность не нарушается, как и для Баргузина, где различия в рядах наблюдений до и после 1970 г. менее значительны, хотя коэффициент вариации C_v для полного ряда за счет второй его части существенно уменьшился. Асимметрия же стока Баргузина и Верхней Ангары за все годы наблюдений стала выше, чем до 1971 г., а Селенги, наоборот, снизилась.

Более высокая асимметричность колебаний расходов воды Верхней Ангары и Баргузина обуславливает заметный уход аналитических кривых распределения вниз от наибольших наблюдаемых значений (Рисунок 4.2.2), при том, что для Баргузина, например, соотношение C_s/C_v для изображенных кривых 1, 2 – предельное (6,0) и уже не может быть увеличено в связи с отсутствием соответствующих таблиц с ординатами кривых распределения.

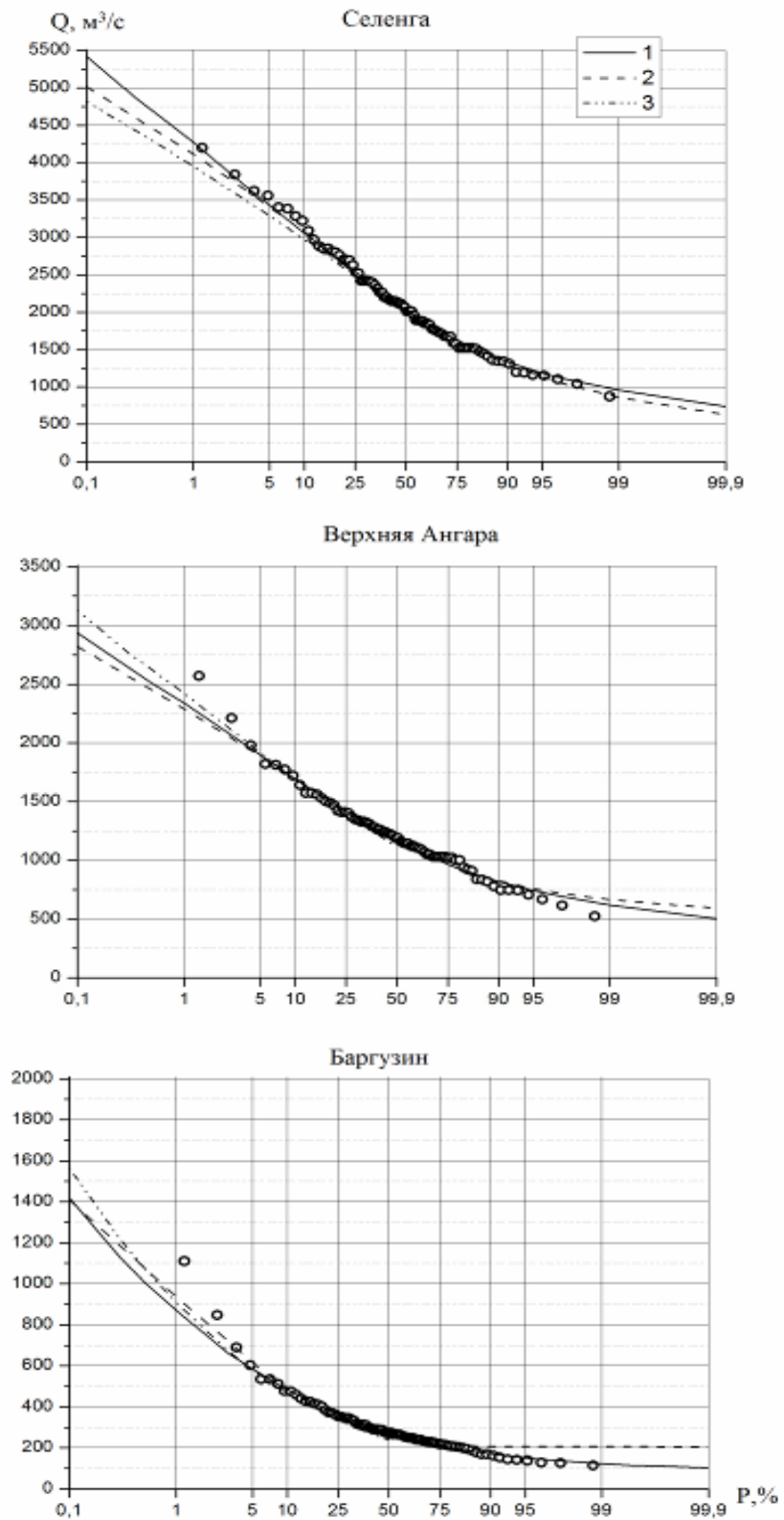


Рисунок 4.2.2 – Кривые обеспеченности максимальных расходов воды весеннего половодья. Аналитические функции распределения: 1 – Крицкого–Менкеля, 2 – Пирсона III типа, 3 – усеченного распределения Крицкого–Менкеля

Как и для годового стока, 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.

Для Селенги рассчитано составное распределение, которое для обеспеченностей <50 % фактически совпадает с распределением по полному ряду (для Q_1 % разница составила 30, для Q_5 % – 0, для Q_{25} % – 10 м³/с), поэтому корректировка расчетных значений стока с использованием составной кривой для данного водотока в работе не выполнялась.

В соответствии с отмеченными нюансами гамма-распределения (для Верхней Ангары и Баргузина – усеченного) и многолетними тенденциями изменились и расчетные значения стока (таблица 4.2.1).

Для Селенги и Баргузина снижение расходов воды обеспеченностью 1 %, рассчитанных за весь период наблюдений, составляет ~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, как следует из полученных данных, в период потепления было характерно снижение максимальных расходов талых вод, за исключением двух рек - Бугульдейки и Давши. 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. Так, для р. Бол. Половинная расход 1%-ной обеспеченности с учетом данных после 1970 г. уменьшился в 1,8 раза, а 5 %-ной – в 2,0 раза. Анализ исходных данных указывает на наибольший сток половодья здесь в середине XX в., который достигал 77-102 м³/с, тогда как после 1953 г. его значения уже ни разу не превышали 30 м³/с. Средняя скорость снижения стока талых вод р. Бол. Половинная за счет этого составляет около 0,4 м³/с в год (достоверность тренда соответствует 5 %-ному уровню значимости).

Таблица 4.2.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики максимальных расходов воды весеннего половодья, м³/с

Река	Q_0	Q_2/Q_1	Диапазон колебаний	C_v	C_s/C_v	Расход воды обеспеченностью			$r(1)$
						1 %	5 %	25 %	
Селенга	2130	0,83	874-4200 (1340-4200)	0,33 (0,38)	2,5 (4,0)	4180 (5350)	3420 (4120)	2540 (2780)	0,04
Верх. Ангара	1220	1,14	524-2570 (524-1820)	0,30 (0,30)	3,5 (1,3)	2420 (1980)	1910 (1690)	1390 (1130)	0,14
Баргузин	317	0,95	129-1110 (142-1110)	0,50 (0,59)	6,0 (3,5)	909 (1100)	579 (753)	336 (409)	0,07
Голоустная	64,8	0,71	10,6-206 (31,2-206)	0,80 (0,95)	3,0 (2,9)	256 (438)	163 (326)	82,9 (195)	0,18
Бугульдейка	31,4	1,10	5,60-121 (5,60-111)	0,84 (1,05)	3,5 (2,3)	131 (130 _A)	80,2 (84,0 _A)	39,5 (43,0 _A)	0,16
Анга	23,3	0,64	3,61-57,5 (12,9-57,5)	0,57 (0,50)	1,7 (1,8)	61,8 (73,9)	48,1 (57,5)	31,0 (38,3)	0,03
Рель	115	0,86	46,5-321 (46,5-321)	0,44 (0,66)	4,0 (1,7)	285 (535)	209 (396)	137 (238)	0,25
Тыя	448	0,96	133-820 (200-638)	0,37 (0,53)	1,0 (1,9)	873 (1130)	738 (860)	557 (554)	0,24
Холодная	247	0,81	99,7-456 (217-456)	0,32 (0,46)	1,0 (2,0)	448 (537)	385 (422)	300 (285)	0,23
Давша	3,01	1,16	0,98-5,67 (0,98-4,93)	0,40 (0,42)	1,4 (1,9)	6,25 (6,45)	5,15 (5,15)	3,75 (3,60)	0,24
Турка	181	0,99	67,5-315 (75,4-315)	0,35 (0,31)	1,4 (1,3)	350 (344)	293 (293)	220 (227)	0,01
Большая Речка	72,2	0,97	23,5-147 (23,5-147)	0,39 (0,42)	2,0 (2,6)	153 (172)	124 (135)	88,4 (92,0)	-0,13
Мысовка	12,0	0,79	3,22-122 (47,7)	0,51 (0,64)	5,0 (2,8)	29,2 (45,4)	21,2 (31,9)	14,1 (17,1)	0,17
Выдринная	69,6	-	32,9-185	0,44	4,5	176	127	82,7	-0,15
Снежная	249	0,76	72,5-777 (125-777)	0,51 (0,53)	5 (3,4)	705 (855)	478 (615)	299 (365)	0,17
Хара-Мурин	131	0,71	37,2-289 (74,0-286)	0,45 (0,48)	3 (2,5)	323 (415)	243 (320)	161 (204)	0,10
Харлахта	0,97	-	0,34-2,27	0,48	2,4	2,43	1,85	1,21	0,24
Утулик	82,2	0,88	11-276 (45,5-225)	0,61 (0,83)	3,3 (3,5)	261 (488)	177 (296)	102 (130)	-0,10
Безымянная	13,5	0,70	3,73-43,3 (9,26-43,3)	0,5 (0,32)	3,6 (3,1)	36,6 (29,1)	26,2 (23,7)	16,5 (17,4)	0,18
Слюдянка	1,91	-	0,28-11,0	0,89	2,3	8,40	5,04	2,40	-0,08
Похабиха	2,03	0,65	0,87-8,3 (1,25-5,17)	0,58 (0,72)	8,4 (3,3)	7,34 (9,95)	4,15 (6,5)	1,93 (3,22)	0,15
Бол. Половинная	13,1	0,37	2,27-102 (4,00-102)	1,40 (1,41)	3,9 (2,1)	93,3 _п (171 _a)	48,5 _п (98,5 _a)	13,5 _п (25,2 _a)	0,14
Максимиха	10,4	0,86	2,05-22,6 (4,1-20,8)	0,49 (0,63)	1,6 (2,7)	24,8 (38,2)	19,7 (27,2)	13,4 (15,5)	0,01
Кика	86,7	0,84	20,7-168 (77,3-168)	0,36	1,6	171 (210)	143 (170)	106	-0,04
Большая Сухая	16,5	0,77	4,79-42,8 (12,6-42,8)	0,41 (0,26)	3,1 (2,7)	38,0 (31,0)	29,3 (26,3)	20,1 (20,6)	-0,03
Култучная	2,75	-	1,24-9,56	0,71	6,0	10,1	6,10	3,31	-0,17

Столь резкие различия стока могут быть следствием изменившихся условий его формирования, а также свидетельствовать о погрешности измерений расходов воды в сложный сезон снеготаяния. 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. Эта же степень внутрирядной связи отличает и некоторые северные притоки Байкала (Холодная, Рель, Тья) с преобладанием снегового питания. Отрицательные значения $r(1)$ отмечаются значительно реже, чем положительные, и меньше последних по абсолютным значениям.

Некоторые другие различия колебаний максимальных расходов снеговых вод менее крупных притоков Байкала до и после потепления могут быть недостаточно достоверными из-за коротких частей n_1 рядов наблюдений, однако для большинства из них, также, как и для годового стока, характерны отрицательные статистически значимые тренды. Противоположные долговременные тенденции присущи водотокам, в основном впадающим в Северный Байкал.

4.3. Максимальный сток дождевых паводков

В межгодовой динамике наибольших расходов воды летних дождевых паводков для трех главных притоков оз. Байкал преобладают 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 (Рисунок 4.3.1).

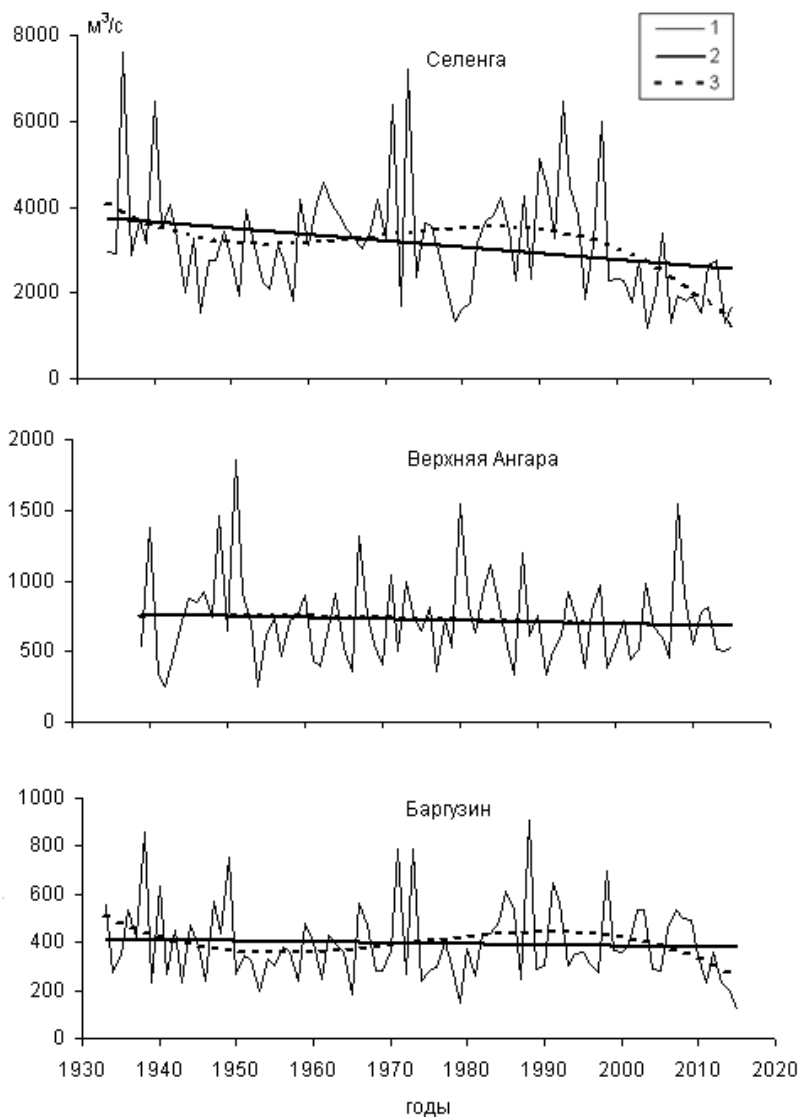


Рисунок 4.3.1 – Динамика многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков наиболее крупных рек. 1 – текущие значения, 2 – линейный тренд, 3 – полиномиальный тренд

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 σ_1 , σ_2 в рассматриваемых выборках статистики Стьюдента и Фишера не превышают критических значений, поэтому используемые ряды наблюдений могут рассматриваться как статистически однородные. 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 ($C_s = 3-4C_v$). Как и в случае со среднегодовым стоком и стоком весеннего половодья, для всех рек наилучшим соответствием аналитических кривых эмпирическим точкам отличается трехпараметрическое гамма-распределение (Рисунок 4.3.2).

Полученные значения $Q_{P\%}$ (таблица 4.3.1) 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 Селенги следует отметить, что указанные выше расхождения в действительности должны быть значительно ниже, поскольку являются следствием использования в (Ресурсы поверхностных вод..., 1973) завышенного наибольшего паводочного расхода воды, составляющего $8900 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда как в исходных данных в этом же источнике и в других изданиях Гидрометслужбы СССР по многолетним данным приведена величина $7620 \text{ м}^3/\text{с}$.

В отношении других рассматриваемых притоков озера можно сделать выводы (в соответствии с таблицей 4.3.1), что в период потепления максимальные расходы дождевых паводков, как и в случае с максимальными расходами талых вод, характеризуются общим снижением стока. Исключение составляют лишь два водотока (Бугульдейка и Анга), вследствие чего значения максимального дождевого стока большинства рек для всех расчетных обеспеченностей уменьшились преимущественно на 5-20 %, но на отдельных реках эта разница оказалась более значительной. Данная тенденция указывает на произошедшие изменения условий формирования паводков в байкальском бассейне в период

потепления, что согласуется с результатами исследований по изменениям особенностей циркуляции атмосферы в регионе, в том числе проявляющаяся в снижении интенсивности процессов зонального переноса воздушных масс (Шимараев, Старыгина, 2010; Бережных и др., 2012), преобладании меридионального северного переноса (Кононова, 2015), атмосферного

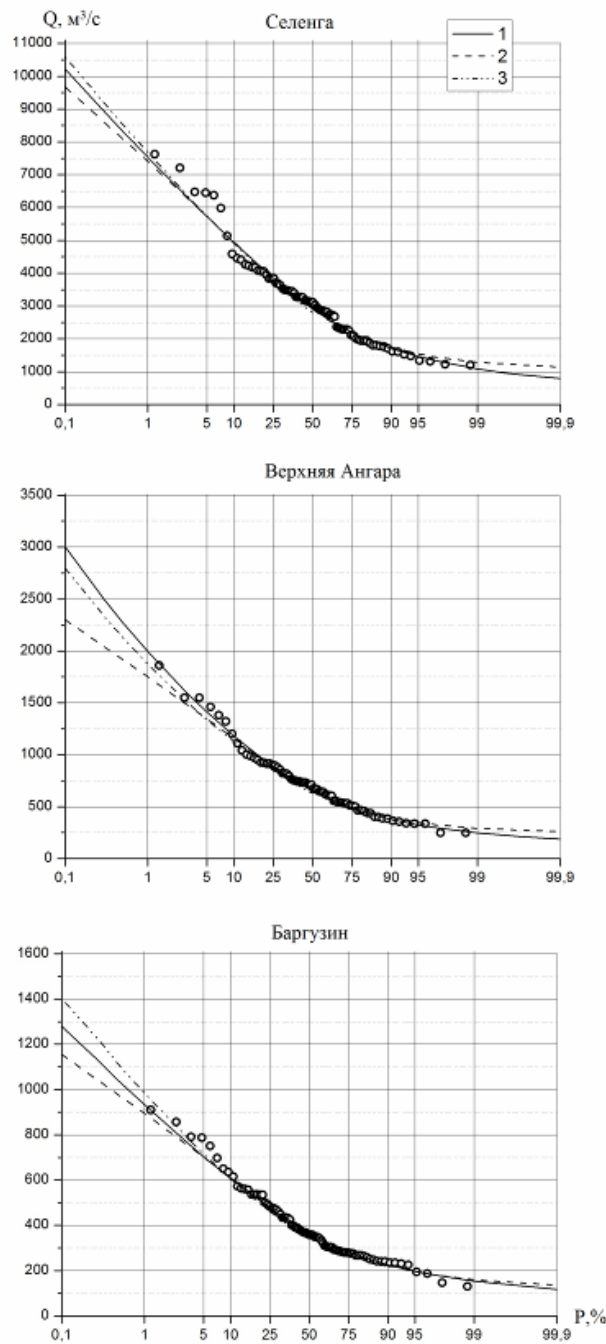


Рисунок 4.3.2 – Кривые обеспеченности максимальных расходов воды дождевых паводков. Аналитические функции распределения: 1 – Крицкого–Менкеля, 2 – Пирсона III типа, 3 – усеченного распределения Крицкого–Менкеля

блокирования над Сибирью с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком (Antokhina et al., 2017), увеличением испаряемости (Фролова и др., 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) м³/с. Показатели распределения 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).

Как и в случаях с колебаниями среднего и половодного стока, рассмотренных выше, корреляция стока в смежные годы для исследуемых рядов паводочного стока не имеет явно выраженной связи с крупностью рек, однако отрицательные значения $r(1)$ отмечаются значительно чаще, чем положительные. Так из 26 исследуемых рек только 4 характеризуются положительным значением $r(1)$, а по абсолютной величине отрицательные $r(1)$ значительно превосходят положительные значения: –0,33 (Голоустная) против 0,13 (Давша).

Проверка исходных рядов на однородность по критериям Стьюдента и Фишера не выявила ее нарушения по обоим параметрам одновременно, но по одному из них достоверность данных не подтверждалась по 13 рекам, причем это касалось в основном дисперсий и только в одном случае – среднего значения. С привлечением дополнительного критерия (Вилькоксона) и учетом рядов с недостаточной продолжительностью наблюдений до 1971 г. (n_1) корректировка рассчитанных $Q_{P\%}$ с использованием составного распределения оказалась целесообразной и была выполнена для двух рек – Бол. Половинной и Кики.

В соответствии с отмеченными тенденциями уменьшения паводочных расходов воды для абсолютно всех исследуемых рядов характерно проявление отрицательных трендов, однако невысокие значения коэффициента достоверности (детерминации) их аппроксимации (R^2), не превышающие 0,04 (за исключением р. Кика), свидетельствуют о низкой статистической значимости этих долговременных тенденций.

Таблица 4.3.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики максимальных расходов воды дождевых паводков

Река	$Q_0, \text{м}^3/\text{с}$	Q_2/Q_1	Диапазон колебаний	C_v	C_s/C_v	Расход воды обеспеченностью, $\text{м}^3/\text{с}$			$r(1)$
						1 %	5 %	25 %	
Селенга**	3170	1,12	681-7620 (681-8900 ^н)	0,43 (0,42)	3,0 (4,3)	7540 (8870)	5730 (6510)	3860 (4180)	0,11
Верхняя Ангара	731	1,04	185-1860 (185-1860)	0,46 (0,56)	4,0 (2,7)	1990 (2190)	1410 (1600)	703 (725)	-0,05
Баргузин	397	1,01	72,9-909 (72,9-856)	0,41 (0,42)	3,5 (2,6)	3860 (4180)	884 (967)	477 (495)	-0,13
Голоустная	98,0	1,08	11,5-310 (22,7-308)	0,87 (0,98)	2,0 (2,2)	394(478)	266 (310)	135 (70,6)	-0,33
Бугульдейка	34,1	0,77	4,99-251 (4,99-56,8)	1,5 (0,94)	3,5 (2,3)	243 (120)	121 (78,0)	40,3 (35,7)	0,02
Анга	28,6	0,86	1,51-163 (4,07-64,2)	1,1	3,0	153 (152)	87,3	36,6	-0,02
Рель	87,0	1,09	15,4-331 (35,7-204)	0,65 (0,63)	3,4 (2,5)	358 (319)	238 (230)	133 (131)	-0,08
Тыя	198	1,03	40,0-520 (40,0-514)	0,64 (0,74)	3,2 (2,4)	642 (816)	440 (561)	251 (298)	-0,05
Холодная	131	1,01	39,0-378 (58,1-231)	0,65 (0,85)	3,5 (3,1)	439 (686)	291 (432)	163 (193)	0,04
Давша	2,29	1,65	0,93-6,33 (1,03-3,03)	0,36	5,0	5,09 (5,68 _A)	3,82 (4,70 _A)	2,66	0,13
Турка	164	1,05	28,6-908 (57,0-457)	0,79 (0,80)	6,0 (2,6)	656 (780)	385 (520)	199 (261)	0,08
Большая Речка	89,3	1,13	17,0-444 (17-775 ^н)	0,76 (0,95)	4,0 (2,6)	344 (561)	214 (351)	111 (152)	-0,13
Мысовка	13,3	1,05	4,26-38,3 (4,26-38,30)	0,54 (0,63)	3,5 (3,0)	38,2 (47,9)	26,8 (33,3)	16,3 (18,5)	-0,03
Выдринная	163	-	31,4-634	0,86	4,0	700	416	202	-0,16
Снежная	536	1,08	6,16-1910 (6,16-1900)	0,58 (0,50)	1 (2,6)	1358 (1680)	1105 (1250)	739 (802)	-0,18
Хара-Мурин	375	1,03	62,0-1670 (95,8-1460)	0,75 (0,69)	3,5 (2,5)	1418 (1420)	901 (991)	471 (549)	-0,23
Харлахта	2,89	-	0,90-9,87	0,66	3,5	9,80	6,47	3,60	-0,07
Утулик	301	1,01	42,8-1320 (61,2-1300)	0,72 (0,76)	2,9 (2,5)	1082 (1250)	716 (850)	386 (441)	-0,15
Безымянная	51,1	-	7,56-367	1,15	6,0	172	109	56,3	-0,26
Слюдянка	13,9	1,69	0,94-145 (2,44 -103)	1,96	3,9	127	54,9	14,6	-0,12
Похабиha	5,75	1,30	1,61-38,6 (1,61-38,6)	1,24 (1,62)	4,4 (2,8)	34,0 (82,0)	17,6 (40,0)	6,93 (9,2)	-0,03
Бол. Половинная**	23,1	1,43	3,35-348 (5,98-347)	2,26 (1,38)	4,4 (2,4)	209 (310)	89,0 (170)	24,2 (44,5)	0,04
Максимиха	5,65	0,77	1,0-30,8 (1,38-12,2)	1,01 (0,85)	4,4 (2,5)	27,9 (22,6)	15,6 (14,9)	6,95 (7,2)	0,02
Кика**	77,9	0,83	23,0-190 (29,9-121)	0,50	2,5	202 (157)	152	98,2	0,01
Большая Сухая	15,1	1,06	3,29-43,2 (4,50-37,3)	0,53 (-)	3,0 (-)	42,7 (-)	30,6 (-)	18,9 (-)	0,14
Култучная	10,5	-	2,09-29,9	0,64	2,0	31,9	23,3	13,8	0,12

* в скобках соответствующие значения по (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976)

** сток расчетной обеспеченности принят по составному распределению

н – неподтвержденные данные

4.4. Минимальные летние расходы воды

Минимальный сток рек в период открытого русла, за который принято считать время от даты окончания половодья до даты появления устойчивых ледовых образований осенью, является важным показателем состояния речных систем во время летне-осенней межени. В период ее прохождения наблюдается обсыхание и зарастание участков русла, сокращение размеров и усыхание пойменных озер и стариц, угнетение околоводной растительности и др. Масштабы происходящих при этом негативных событий зависят как от масштабов (крупности) самих рек, так и степени аномальности их стока. В практике гидрологических расчетов аномальность условий водности оценивается именно расходами воды редкой повторяемости, принимаемыми по среднему стоку наиболее маловодного 30-дневного периода, или по наименьшим срочным значениям меженного стока. С учетом результатов, полученных с использованием 30-дневных минимальных расходов воды главных притоков Байкала (Чернышов, Синюкович, 2017), и опыта некоторых обобщающих работ (Владимиров, 1976; Болгов и др., 2014) в настоящем разделе предпочтение было отдано срочным расходам воды.

Анализируя динамику минимальных срочных расходов за период открытого русла трех главных рек, можно отметить проявление долговременных тенденций, присущих среднегодовому стоку (Рисунок 4.4.1). 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.

Достоверность 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. (таблица 4.4.1). 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.

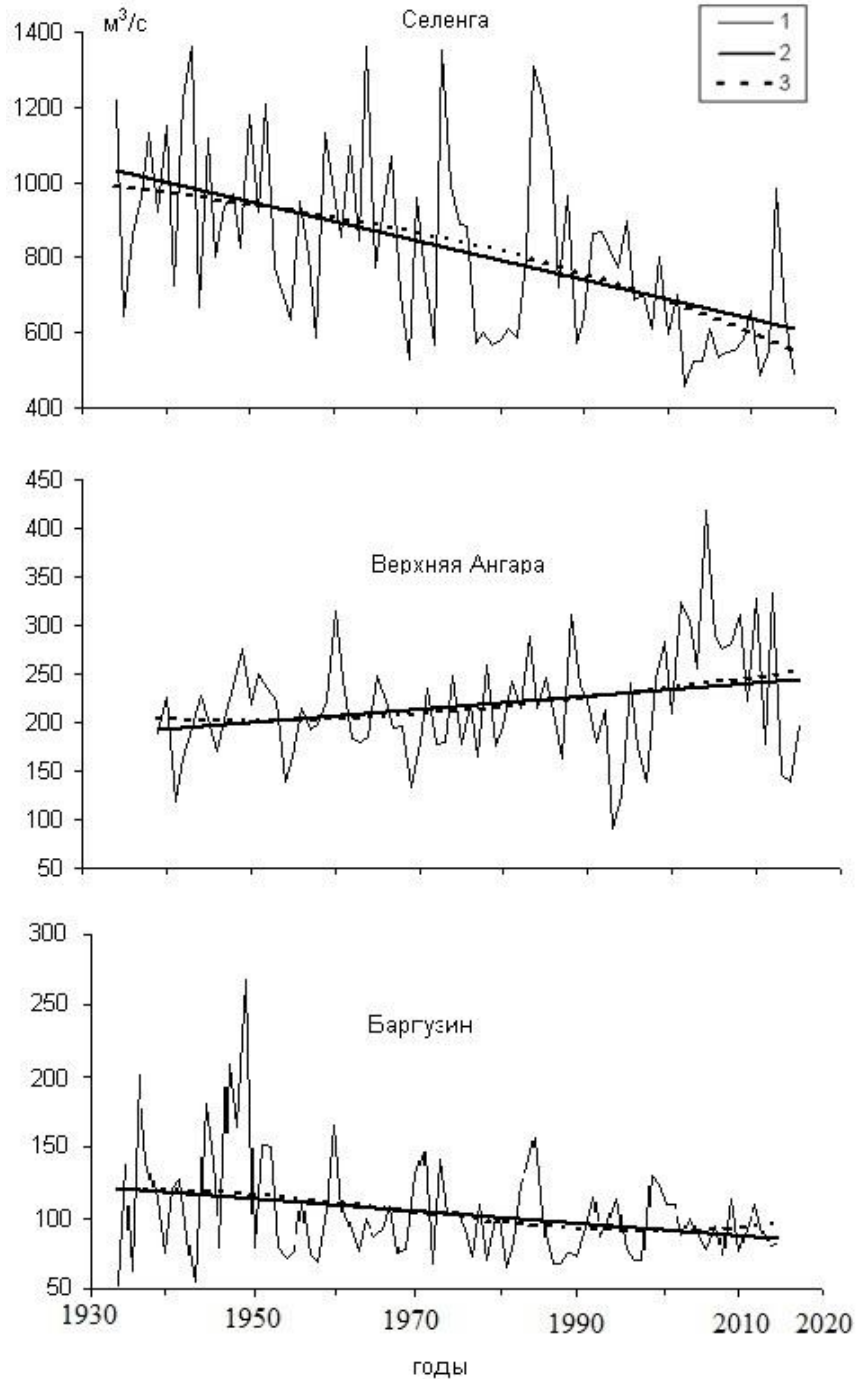


Рисунок 4.4.1 – Динамика многолетних колебаний минимального летнего стока главных притоков. 1 – текущие значения, 2 – линейный тренд, 3 – полиномиальный тренд

Таблица 4.4.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики минимального летнего стока

Река	Q_0 , м ³ /с	Q_2/Q_1	Диапазон колебаний	C_v	C_s/C_v	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			$r(1)$
						80 %	95 %	97 %	
Селенга	820	1,14	459-1360 (530-1360)	0,29 (0,31)	2,0 (1,0)	618 (664)	474 (543)	436 (510)	0,32
Верхняя Ангара	219	0,94	91,0-419 (118-315)	0,26 (0,13)	2,0 (1,0)	170 (120)	136 (97,9)	127 (91,9)	0,25
Баргузин	104	1,08	52,5-268 (52,5-268)	0,36 (0,26)	6,0 (1,0)	75,2 (60,2)	61,2 (49,6)	57,8 (46,7)	0,13
Голоустная	5,50	0,86	1,22-10,1(1,22-10,1)	0,38 (0,59)	0,70	3,66 (2,28)	2,31 (1,21)	1,97 (0,96)	0,11
Бугульдейка	4,02	0,90	0,93-8,44 (1,90-8,44)	0,37 (0,41)	1,3	2,72 (2,28)	1,75 (1,56)	1,50 (1,36)	0,29
Анга**	1,56	1,29	0,55-3,99 (1,00-3,99)	0,42 (0,80)	3,9	1,05	0,78	0,72	0,30
Рель	6,16	0,95	1,53-22,7(3,08-9,20)	0,60	5,3	3,51	2,46	2,22	0,08
Тья	24,4	-	15,0-43,1	0,25	4,5	19,1	16,3	15,6	-0,02
Холодная	9,78	1,17	4,20-21,7(4,25-19,10)	0,36 (0,22)	3,9	6,91	5,31	4,92	-0,06
Давша	0,97	0,86	0,41-1,6 (0,41-1,27)	0,29	0,7	0,72 (0,72)	0,52 (0,52)	0,47 (0,47)	0,32
Турка	43,2	0,95	20,2-83,0 (20,2-82,1)	0,34 (0,25)	2,4 (1,0)	30,7 (27,4)	23,0 (20,6)	21,1 (18,7)	0,43
Большая Речка	8,23	1,04	4,30-15,5 (5,04-15,5)	0,24 (0,22)	3,1 (0,0)	6,56 (4,09)	5,43 (2,67)	5,14 (2,30)	0,07
Мысовка	2,56	0,97	1,21-4,38 (1,34-3,80)	0,25 (0,22)	2,1 (0,0)	2,02 (1,45)	1,64 (1,08)	1,54 (0,98)	0,28
Выдринная	5,75	-	2,83-11,5	0,33	4,4	4,21	3,35	3,15	0,02
Снежная	29,2	0,93	14,8-53,1 (14,8-46,8)	0,31 (0,21)	2,8 (1,0)	21,9 (12,9)	17,5 (6,42)	16,4 (4,50)	0,23
Хара-Мурин	15,1	1,11	8,20-31,8 (9,00-23,5)	0,30 (0,46)	2,2 (1,0)	11,2 (5,78)	8,26 (3,66)	7,5 (3,14)	0,15
Харлахта	0,25	-	0,07-0,70	0,45	4,9	0,16	0,11	0,10	-0,01
Утулик	11,2	1,03	1,29-24,5 (5,75-16,8)	0,40 (0,39)	1,7 (1,0)	6,99 (2,60)	4,30 (1,47)	3,67 (1,21)	0,38
Безымянная	3,96	1,13	2,04-6,70 (2,50-5,98)	0,29 (0,11)	2,6	3,48	2,72	2,52	0,40
Слюдянка**	0,33	0,49	0,06-0,74 (0,06-0,22)	0,50	1,1	0,22	0,12	0,10	0,80
Похабиха	1,06	1,13	0,51-2,57 (0,76-2,57)	0,39 (0,16)	5,2	0,74	0,60	0,56	0,50
Бол. Половинная	1,89	0,88	0,70-4,72 (0,70-2,91)	0,42	3,1	1,22 (1,02)	0,87 (0,69)	0,79 (0,61)	0,12
Максимиha	1,14	0,84	0,42-2,61 (0,48-1,36)	0,41 (0,54)	3,6	0,69 (0,51)	0,51 (0,39)	0,46 (0,29)	0,54
Кика	20,0	0,79	7,76-33,6 (13,9-33,6)	0,27 (0,24)	1,0	15,4	11,6	10,6	0,08
Большая Сухая	3,05	0,95	1,28-5,09 (1,28-4,94)	0,32 (0,28)	1,6	2,22	1,69	1,56	0,31
Кулгучная	0,77	-	0,30-1,80	0,39	3,5	0,52	0,39	0,35	0,48

* в скобках соответствующие значения по (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976);

** сток расчетной обеспеченности принят по составному распределению.

Эмпирическое распределение минимальных летних расходов воды этих рек (Рисунок 4.4.2), как и в случае с рассмотренными выше характеристиками стока, лучше всего соответствует трехпараметрическому распределению Крицкого-Менкеля, однако для Верхней Ангары отклонение эмпирических точек в области значений обеспеченности 95-99 % от аналитической кривой становится заметным и 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 %.

Еще одним показателем снижения стока после 1970 г. является расширение диапазонов его колебаний за счет нижнего предела.

Диапазон показателей изменчивости стока рассматриваемых рек отвечает значениям по C_v от 0,24 (Большая Речка) до 0,60 (Рель). В соответствии с вышеуказанным изменение стока по территории в период открытого русла отличается большим разнообразием, что, в первую очередь, связано с неравномерным распределением осадков и запасов подземных вод в бассейне озера.

Корреляция стока в смежные годы для рассматриваемых рядов в основном положительная, и лишь для трех рек (Тыя, Холодная, Харлахта) величина $r(1)$

была отрицательной, но невысокой (до $-0,06$). Положительные же значения $r(1)$ находятся в пределах от $0,02$ (Выдринная) до $0,40$ (Безымянная).

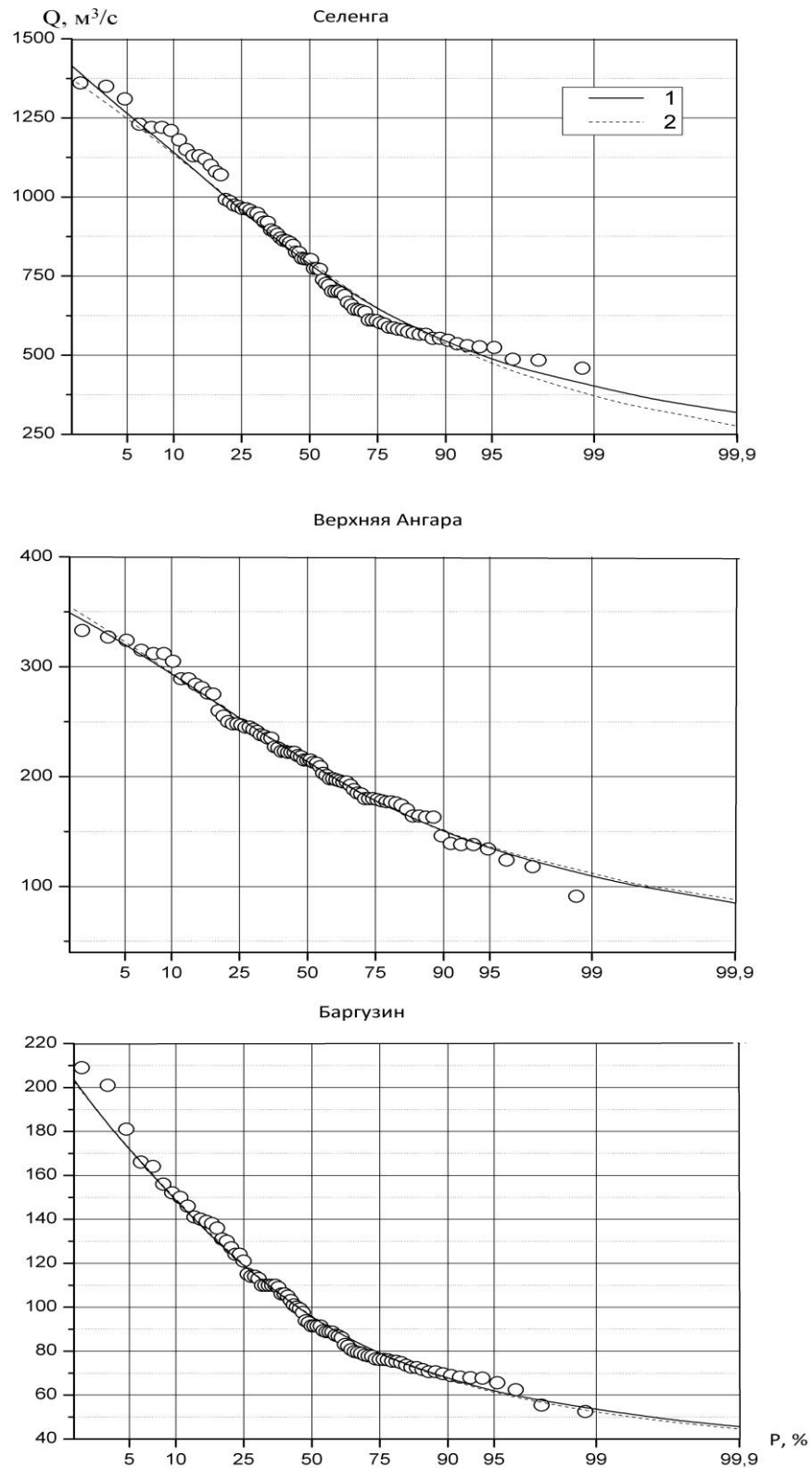


Рисунок 4.4.2 – Кривые обеспеченности минимальных летних расходов воды основных рек. Аналитические функции распределения: 1 – Крицкого–Менкеля, 2 – Пирсона III типа

В многолетнем плане половине водотоков присущи отрицательные тренды с коэффициентом достоверности аппроксимации от 0,0001 (Бугульдейка) до 0,23 (Хара-Мурин) и скорости снижения стока от 0,0007 м³/с в год (Слюдянка) до 0,1 м³/с в год (Хара-Мурин). Для рядов с положительным трендом скорость повышения минимального летнего стока составляет от 0,003 м³/с в год (Мысовка) до 0,1 м³/с в год (Тыя).

Достоверность рассматриваемых рядов относительно 1971 г. по двум применяемым критериям не подтверждается только для двух рек (Анга, Слюдянка), для которых расчетные расходы воды были скорректированы с использованием составного распределения.

4.5. Минимальный зимний сток

Сток рек, впадающих в оз. Байкал, внутри отдельных лет достигает наименьших значений во время зимней межени, которая продолжается от даты появления на реках устойчивых ледовых образований осенью до даты начала половодья. Для главных притоков оз. Байкал минимальный зимний сток, в отличие от минимальной водности теплого времени года и среднегодовых расходов воды, 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). Однако скорость повышения зимнего стока не столь существенна, как его рост или снижение в летнее время. Наиболее высока она для Верхней Ангары ($dQ = 0,69$ м³/с в год), а для Селенги рост стока составляет лишь 0,32 м³/с в год (против снижения летнего минимума 4,61 м³/с в год). Для Баргузина зимнее повышение стока еще менее значимое ($dQ = 0,08$ м³/с в год), в связи с чем, статистически значимым является только тренд стока Верхней Ангары ($R^2 = 0,31$; $\alpha = 0,05$).

Несмотря на общую тенденцию снижения минимального стока зимней межени, межгодовой размах их колебаний для Верхней Ангары и Селенги расширился (Рисунок 4.5.1), а на р. Баргузин минимальное и максимальное значения находятся в первой половине ряда.

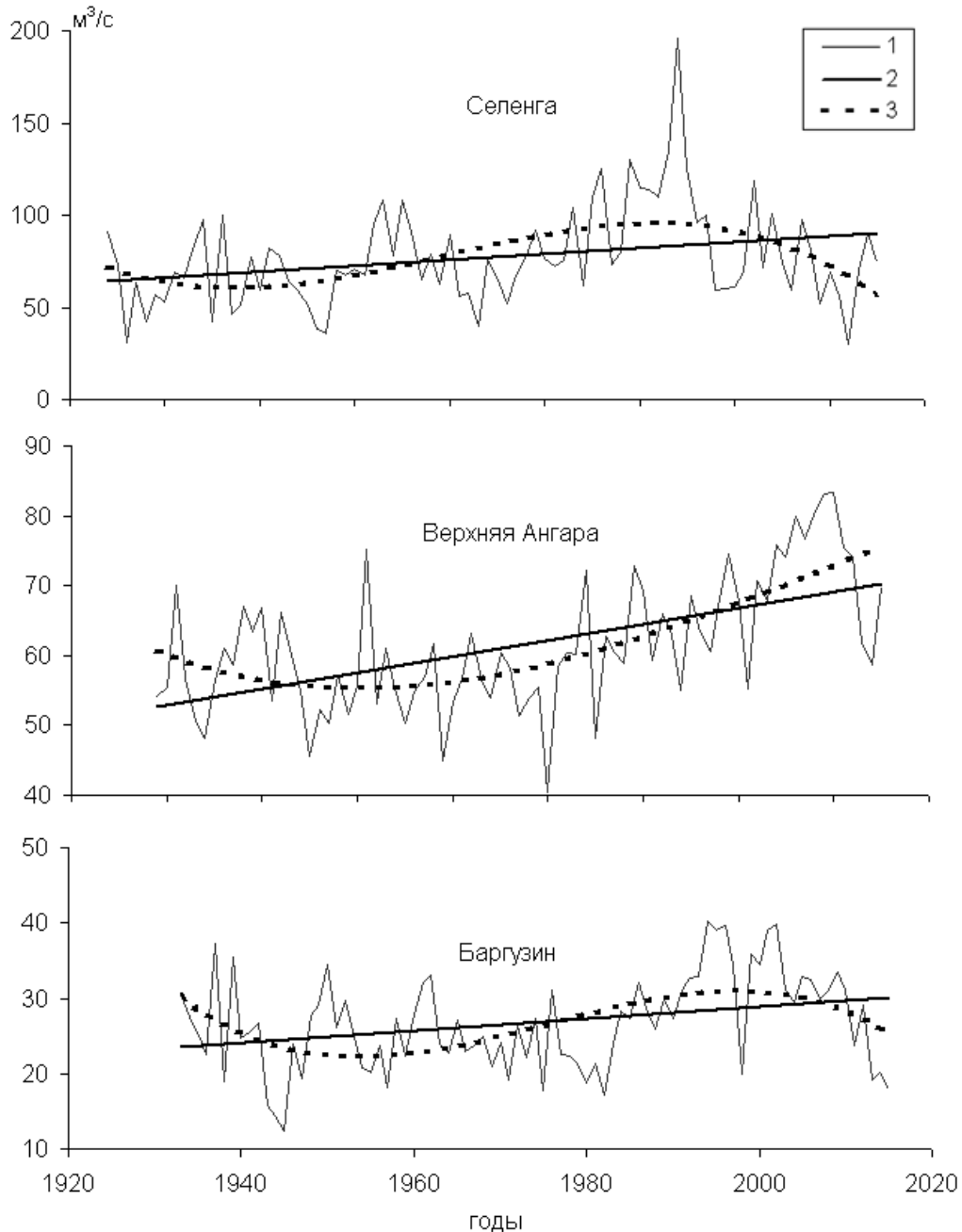


Рисунок 4.5.1 – Динамика многолетних колебаний минимального зимнего стока главных рек. 1 – текущие значения, 2 – линейный тренд, 3 – полиномиальный тренд

Вариабельность стока возрастает только для р. Селенги, а на двух других водотоках по отношению к данным до 1971 г. она, наоборот, стала ниже.

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

Корреляция стока в смежные годы для этих трех рек характеризуется только положительными значениями – от 0,13 до 0,54.

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 соотношения C_s/C_v в некоторых случаях принимали отрицательные значения (таблица 4.5.1).

Однородность анализируемых рядов не подтвердилась для трех рек (Турка, Большая Речка, Мысовка), в соответствии с чем приведенные в таблице 4.5.1 значения минимальных $Q_{P\%}$ скорректированы для них по результатам составного распределения.

Сток расчетных обеспеченностей в годы до и после потепления, из-за его разнонаправленных изменений, различался до 30 % как в сторону уменьшения, так и увеличения. Наибольшие различия характерны для небольших, эпизодически промерзающих рек (Рель, Бол. Половинная) вследствие наличия в соответствующих рядах наблюдений нулевых значений.

Столь разная реакция колебаний стока на сравнительно схожие изменения внешних условий (температуры воздуха, прежде всего), снижающая достоверность его оценок, отчасти объясняется полным промерзанием небольших рек и ручьев, питающих основной водоток.

Как и в случае с главными притоками озера, корреляция зимних минимальных расходов воды в смежные годы для остальных рассматриваемых рядов описывается только положительными значениями: $r(1)$ лежит в пределах от 0,02 (р. Голоустная) до 0,87 (р. Турка).

Таблица 4.5.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики минимального зимнего стока

Река	Q_0 , м ³ /с	Q_1/Q_2	Диапазон колебаний	C_v	C_s/C_v	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			$r(1)$
						80 %	95 %	97 %	
Селенга**	77,3	0,95	29,9-196 (30,6-108)	0,29 (0,31)	2,0 (1,0)	55,9 (50,0)	44,2 (34,6)	41,2 (30,5)	0,32
Верх. Ангара**	61,4	0,93	40,5-83,4 (44,9-75,3)	0,16 (0,12)	3,0 (1,0)	53,3 (51,6)	47,2 (46,4)	45,5 (44,6)	0,54
Баргузин	26,8	0,93	12,4-40,3 (12,4-37,2)	0,36 (0,26)	6,0 (1,0)	21,3 (20,6)	16,8 (13,9)	15,6 (11,7)	0,13
Голоустная	0,45	0,86	0,03-1,32 (0,09-1,30)	0,81	2,0	0,15 (0,07 ^п)	0,05 (0 ^п)	0,04 (0 ^п)	0,02
Бугульдейка	1,46	0,87	0,45-2,66(0,62-2,35)	0,37 (0,41)	1,5	0,99	0,67	0,59	0,26
Рель	0,87	0,13	0,02-2,50 (0,02-0,18)	0,88	1,5	0,21 (0,04 ^п)	0,04 (0 ^п)	0,02 (0 ^п)	0,77
Тыя	3,91	-	1,41-7,92	0,34	3,5	2,82	2,19	2,04	0,59
Холодная	1,43	0,74	0,71-2,80 (0,74-1,51)	0,32 (0,22)	3,0	1,05	0,81	0,76	0,42
Давша	0,16	1,05	0,03-0,28 (0,07-0,28)	0,36 (0,48)	0,0	0,11	0,07	0,05	0,04
Турка**	19,27	0,63	7,38-54,0 (7,42-18,5)	0,74 (0,25)	6,0 (1,0)	11,0 (9,63)	7,48 (7,44)	6,72 (6,83)	0,87
Большая Речка**	2,29	1,08	0,63-3,67(1,40-3,48)	0,30 (0,22)	-0,5 (0,0)	1,66 (2,08)	1,11 (1,62)	0,98 (1,45)	0,37
Мысовка**	0,88	1,21	0,16-1,5 (0,49-1,5)	0,39 (0,22)	-1,0(0,0)	0,51 (0,85)	0,23 (0,66)	0,18 (0,61)	0,62
Выдринная	0,81	-	0,07-1,54	0,43	0,5	0,50	0,26	0,21	0,84
Снежная	3,21	0,97	1,39-4,85 (2,00-4,85)	0,24 (0,21)	-0,5 (1,0)	2,56 (2,53)	1,90 (2,06)	1,72 (1,94)	0,13
Хара-Мурин	2,61	0,76	0,48-4,8 (0,48-3,55)	0,38(0,46)	0,5 (1,0)	1,73 (1,15)	1,03 (0,59)	0,85 (0,44)	0,56
Харлахта	0,08	-	0,04-0,17	0,31	4,0	0,06	0,05	0,05	0,03
Утулик	1,40	0,97	0,26-4,23 (0,48-2,95)	0,40 (0,39)	1,7 (1,0)	0,87 (0,90)	0,60 (0,55)	0,53 (0,46)	0,24
Безымянная	1,47	0,86	0,96-2,42 (0,96-1,98)	0,76 (0,13)	2,5	1,14	0,92	0,86	0,48
Похабиха	0,59	0,91	0,34-1,14 (0,35-0,73)	0,28 (0,16)	3,5	0,46	0,37	0,35	0,43
Бол. Половинная	0,26	0,97	0,01-0,89 (0,02-0,85)	0,87	2,0	0,08 (0,04 ^п)	0,02 (0 ^п)	0,02 (0 ^п)	0,16
Максимиха	0,27	1,50	0,07-0,88 (0,17-0,88)	0,59 (0,54)	3,5	0,15 (0,51)	0,10 (0,39)	0,08 (0,29)	0,53
Кика	6,62	1,2	0,17-11,3 (5,93-11,2)	0,40 (0,16)	-1,0	4,09	1,82	1,35	0,85
Большая Сухая	1,00	1,09	0,26-1,68 (0,56-1,68)	0,25 (0,28)	1,0	0,79	0,61	0,56	0,40
Култучная	0,25	-	0,06-0,46	0,50	1,5	0,14	0,08	0,06	0,28

*в скобках соответствующие значения по (Ресурсы поверхностных вод..., 1973; Афанасьев, 1976)

** сток расчетной обеспеченности принят по составному распределению

п - характерные минимальные зимние расходы для эпизодически промерзающих рек.

4.6. Минимальный 30-суточный сток

Как уже было отмечено выше, в гидрологической практике для оценки минимального стока, помимо наименьших среднесуточных и срочных расходов воды применяется еще и наименьший за 30 суток. Последний представляет собой средний расход за 30 дней внутри летне-осенней или зимней межени (рассматривается отдельно) с наиболее низким стоком. Введение в практику гидрологических и водохозяйственных расчетов минимального 30-дневного расхода вместо минимального среднемесячного вызвано необходимостью исключить влияние календарных месяцев, завышавших оценки низкого стока в условиях прерывистой межени.

Расчеты параметров многолетней изменчивости минимального 30-дневного стока (таблицы 4.6.1-4.6.2) показывают, что они хорошо согласуются с соответствующими показателями минимального срочного стока и для летнего, и для зимнего периодов. Практический интерес представляет вопрос возможности пересчета тех или иных параметров 30-дневного стока к соответствующим показателям срочных минимумов и наоборот. Такие примеры в практике гидрологических расчетов единичны (Ресурсы поверхностных вод..., 1973), хотя и очень важны при проектировании. В связи с этим, нами выполнено сопоставление минимальных расходов воды расчетных обеспеченностей по рядам 30-дневных ($Q_{30\text{-дн}}$) и срочных ($Q_{\text{сроч}}$) значений. Первое представление о соотношении между ними дает сопоставление их средних величин. В случае с минимальным летним стоком отношение для всех водотоков в среднем составляет 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 1,33-1,36

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 $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$ 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 соотношение C_s для 30-дневного стока преимущественно составляет $3C_v$, а для срочного – $2C_v$. Как и для летнего стока, наибольшие значения $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$ характерны рекам, стекающим с Хамар-Дабанского склона, где они достигают значений 1,8-2,0 (Выдринная).

Таблица 4.6.1 – Параметры распределения и расчетные характеристики летнего минимального 30-дневного стока

Река	Q_0 , м ³ /с	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			Соотношение $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$			
		80 %	95 %	97 %	Q_0	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$	$Q_{97\%}$
Селенга	1030	740	558	513	1,26	1,197	1,177	1,177
Верхняя Ангара	277	183	141	130	1,26	1,076	1,037	1,024
Баргузин	137	92,9	73,2	67,7	1,32	1,235	1,196	1,171
Голоустная	6,73	4,36	2,94	2,57	1,22	1,190	1,273	1,305
Бугульдейка	4,67	3,13	2,23	2,01	1,16	1,153	1,278	1,340
Анга	2,04	1,35	0,98	0,89	1,31	1,320	1,287	1,271
Рель	8,52	5,52	4,09	3,75	1,38	1,573	1,661	1,689
Тыя	31,2	24,4	22,0	20,1	1,28	1,280	1,347	1,288
Холодная	14,5	10,2	7,34	6,59	1,48	1,477	1,383	1,339
Давша	1,11	0,85	0,66	0,60	1,14	1,179	1,271	1,277
Турка	49,3	34,1	25,5	23,4	1,14	1,109	1,110	1,109
Большая Речка	10,4	7,93	6,35	5,95	1,26	1,209	1,169	1,158
Мысовка	2,89	2,23	1,80	1,69	1,13	1,104	1,098	1,097
Выдринная	8,41	6,84	5,75	5,47	1,46	1,626	1,715	1,737
Снежная	41,3	31,6	25,3	23,7	1,41	1,443	1,446	1,445
Хаара-Мурын	22,0	16,3	12,7	11,8	1,46	1,455	1,538	1,573
Харлахта	0,37	0,25	0,22	0,2	1,49	1,590	1,845	1,818
Утулик	15,9	11,2	7,9	7,06	1,42	1,604	1,837	1,924
Безымянная	5,12	4,04	3,31	3,13	1,29	1,161	1,217	1,242
Похабиха	1,23	0,87	0,7	0,65	1,16	1,169	1,176	1,161
Бол. Половинная	2,38	1,69	1,32	1,23	1,26	1,385	1,519	1,557

Продолжение таблицы

Река	Q_0 , м ³ /с	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			Соотношение $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$			
		80 %	95 %	97 %	Q_0	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$	$Q_{97\%}$
Максимиха	1,27	0,824	0,571	0,511	1,22	1,200	1,128	1,260
Кика	23,6	18,1	13,6	12,4	1,18	1,174	1,172	1,283
Большая Сухая	3,67	2,67	1,99	1,81	1,20	1,201	1,176	1,274
Кулгучная	0,93	0,650	0,500	0,470	1,21	1,255	1,294	1,408
Среднее					1,29	1,29	1,33	1,36

Корреляция стока в смежные годы для обоих рассматриваемых периодов характеризуется положительными значениями, более высокими для зимнего стока, лежащими в диапазоне от 0,48 до 0,55 и более низкими для летне-осеннего: от 0,05 до 0,32.

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 в значениях достигала 20 %, что объясняется увеличением доли подземного питания вследствие более интенсивного таяния мерзлоты рассматриваемой области. Что касается летне-осеннего периода, то здесь можно наблюдать обратную ситуацию – существенное падение стока (также достигающего 20 %) на главных притоках озера и незначительные разнонаправленные изменения на остальных исследуемых реках, что в свою очередь можно объяснить уменьшением доли дождевого питания.

Абсолютно для всех рассматриваемых рек корреляция расходов воды в смежные годы описывается только положительными значениями: $r(1)$ лежит в пределах от 0,01 (Голоустная) до 0,88 (Турка). Однородность анализируемых рядов не подтвердилась только для двух рек (Баргузин, Турка), в соответствии с чем приведенные в таблице 4.6.2 значения минимальных $Q_{P\%}$ потребовали дополнительной корректировки при помощи составного распределения.

Таблица 4.6.2 – Параметры распределения и расчетные характеристики зимнего минимального 30-дневного стока

Река	Q_0 , м ³ /с	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			Соотношение $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$			
		80 %	95 %	97 %	Q_0	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$	$Q_{97\%}$
Селенга	83,2	59,6	45,5	42,08	1,08	1,066	1,029	1,021
Верхняя Ангара	63,5	55,9	50,1	48,6	1,03	1,049	1,061	1,068

Продолжение таблицы

Река	Q_0 , м ³ /с	Расход воды обеспеченностью, м ³ /с			Соотношение $Q_{30\text{дн}}/Q_{\text{сроч}}$			
		80 %	95 %	97 %	Q_0	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$	$Q_{97\%}$
Баргузин	27,7	22,5	18,07	16,9	1,03	1,056	1,076	1,083
Голоустная	0,5	0,2	0,0813	0,0618	1,11	1,299	1,573	1,652
Бугульдейка	1,61	1,102	0,78	0,693	1,10	1,113	1,164	1,175
Анга	1,03	0,235	0,0347	0,0172	1,18	1,135	1,110	1,090
Рель	4,34	3,108	2,38	2,2	1,11	1,102	1,087	1,078
Тыя	1,61	1,23	0,988	0,926	1,13	1,171	1,220	1,218
Холодная	0,18	0,127	0,0747	0,06204	1,13	1,155	1,067	1,241
Давша	19,8	10,2	7,039	6,25	1,03	1,039	1,043	1,047
Турка	2,49	1,89	1,33	1,18	1,09	1,139	1,198	1,204
Большая Речка	0,98	0,673	0,386	0,317	1,11	1,217	1,508	1,617
Мысовка	0,96	0,681	0,469	0,414	1,19	1,362	1,804	1,971
Выдринная	3,48	2,77	2,10	1,91	1,08	1,082	1,105	1,110
Снежная	2,86	2,0069	1,302	1,12	1,10	1,160	1,270	1,318
Хаара-Мурин	0,09	0,0736	0,06301	0,0605	1,13	1,227	1,260	1,210
Харлахта	1,56	1,0302	0,745	0,676	1,11	1,184	1,242	1,275
Утулик	1,57	1,25	1,038	0,981	1,07	1,096	1,128	1,141
Безымянная	0,35	0,2073	0,135	0,119	1,05	1,078	1,181	1,240
Похабиха	0,64	0,497	0,4049	0,381	1,08	1,080	1,094	1,089
Бол. Половинная	0,3	0,089	0,0277	0,0174	1,15	1,145	1,151	1,152
Максимиха	0,3	0,175	0,116	0,1023	1,11	1,167	1,160	1,450
Кика	8,34	6,85	5,45	5,0501	1,26	1,098	1,152	1,265
Большая Сухая	1,08	0,8305	0,582	0,514	1,08	1,058	1,050	1,038
Култучная	0,255	0,153	0,0953	0,0814	1,02	1,093	1,254	1,550
Среднее					1,10	1,135	1,199	1,252

4.7. Роль стока отдельных рек в формировании уровня озера

Участие водотоков, впадающих в оз. Байкал, в формировании его уровня зависит от вклада каждой из рек в общий объем притока поверхностных вод. Рассмотренные выше особенности многолетней динамики характеристик среднего, максимального и минимального стока отдельных рек определяют особенности формирования многолетних и внутригодовых колебаний приточности, а через них – скорость повышения и снижения уровня озера, время наступления его наивысших и наименьших значений.

Так как влияние рек на уровень озера опосредовано через суммарный речной приток, то значимо проследить его можно только для крупных водотоков. Вместе с тем, изменения водности небольших рек могут отражать общий характер увлажнения крупных территорий и происходят

синхронно. Сопоставление колебаний суммарного поверхностного притока в озеро со стоком отдельных рек (Рисунок 4.1.1, таблица 4.7.1) указывает на разную степень согласованности их динамики, однако в целом она остается достаточно синхронной – все коэффициенты корреляции с притоком положительны. При том, как и ожидалось, наиболее тесная связь присуща стоку наиболее крупной реки – Селенги. Заметно хуже с притоком согласованы колебания стока рек, впадающих в Северный Байкал (Верхняя Ангара, Холодная, Рель, Тья) и южную оконечность озера (Слюдянка, Похабиха, Култучная, Бол. Половинная). По этому признаку рассматриваемые водотоки условно могут быть подразделены на две группы, колебания водности которых больше соответствует колебаниям стока двух главных рек – Селенги и Верхней Ангары. Соответствующие значения парных коэффициентов корреляции (таблица 4.7.1) однако в основном получились положительными, но уступающими показателям связи стока рек с суммарным притоком. Такие водотоки как Рель, Тья, Бол. Половинная имеют, очевидно, своеобразные условия формирования стока и отличаются практически полным отсутствием согласованности водности с другими реками. Их изолированность не противоречит схеме районирования территории по синхронности колебаний стока других исследователей и, в частности, подтверждается данными (Болгов, Коробкина, 2011; Абасов и др., 2017), относящих водотоки с колебаниями водности, синхронными стоку Селенги, к одному району.

Отсутствие связи колебаний стока Селенги и Верхней Ангары объясняется переменой ее знака в разные периоды. До начала потепления связь была слабо положительной ($r = 0,26$), но после 1971 г. она стала слабо отрицательной, в особенности до 2010 г. ($r = -0,15$). При этом менее согласованными стали изменения стока Верхней Ангары и Баргузина: до 1971 г. связь между ними по коэффициенту корреляции составляла 0,68, а в период с начала 1970-х гг. снизилась до 0,44.

Таблица 4.7.1. – Показатели связи стока рассматриваемых рек с общим притоком и водностью главных рек

№№ п/п	Река	Средний сток		Коэффициент корреляции		
		км ³ /год	Доля в общем притоке, %	с притоком	со стоком Селенги	со стоком В. Ангары
1	Селенга	27,7	46,3	0,86	1,00	0,00
2	Верх. Ангара	8,41	14,1	0,40	0,00	1,00
3	Баргузин	3,91	6,5	0,69	0,42	0,54
4	Турка	1,58	2,64	0,63	0,39	0,32
5	Снежная	1,48	2,48	0,72	0,65	0,17
6	Тыя	1,23	2,06	0,06	-0,22	0,47
7	Кика	0,78	1,30	0,65	0,56	0,22
8	Хара-Мурин	0,75	1,25	0,61	0,53	0,20
9	Холодная	0,63	1,05	0,18	0,03	0,26
10	Утулик	0,53	0,88	0,47	0,35	0,16
11	Рель	0,41	0,69	0,14	-0,04	0,12
12	Большая Речка	0,38	0,64	0,68	0,53	0,25
13	Выдринная	0,36	0,60	0,72	0,67	0,11
14	Голоустная	0,29	0,48	0,60	0,45	0,28
15	Безымянная	0,17	0,29	0,56	0,44	0,24
16	Бугульдейка	0,16	0,27	0,54	0,37	0,17
17	Большая Сухая	0,12	0,20	0,68	0,46	0,38
18	Мысовка	0,09	0,15	0,50	0,39	0,24
19	Анга	0,08	0,13	0,62	0,51	0,35
20	Бол. Половинная	0,08	0,13	0,02	0,11	-0,17
21	Похабиха	0,05	0,08	0,57	0,48	0,26
22	Максимиha	0,05	0,09	0,61	0,62	0,06
23	Култучная	0,03	0,06	0,21	-0,01	0,49
24	Давша	0,03	0,05	0,37	0,04	0,63
25	Слюдянка	0,03	0,04	0,34	0,22	0,23
26	Харлахта	0,01	0,02	0,48	0,35	0,37

Помимо средних показателей водности на колебания уровня оз. Байкал могут оказывать влияние и экстремальные характеристики стока рек через изменения сроков прохождения половодья и паводков, время прохождения максимального стока, объемов стока за половодье и паводки и др. Если

характеристики паводочного стока заведомо считаются крайне неустойчивыми, то для стока весеннего половодья характерна определенная стабильность и ее нарушение сопровождается сдвигом сроков начала весенне-летнего наполнения озера и интенсивности повышения его уровня. Рассмотрим происходящие изменения параметров стока талых вод на примере главных притоков Байкала (Рисунок 4.7.1).

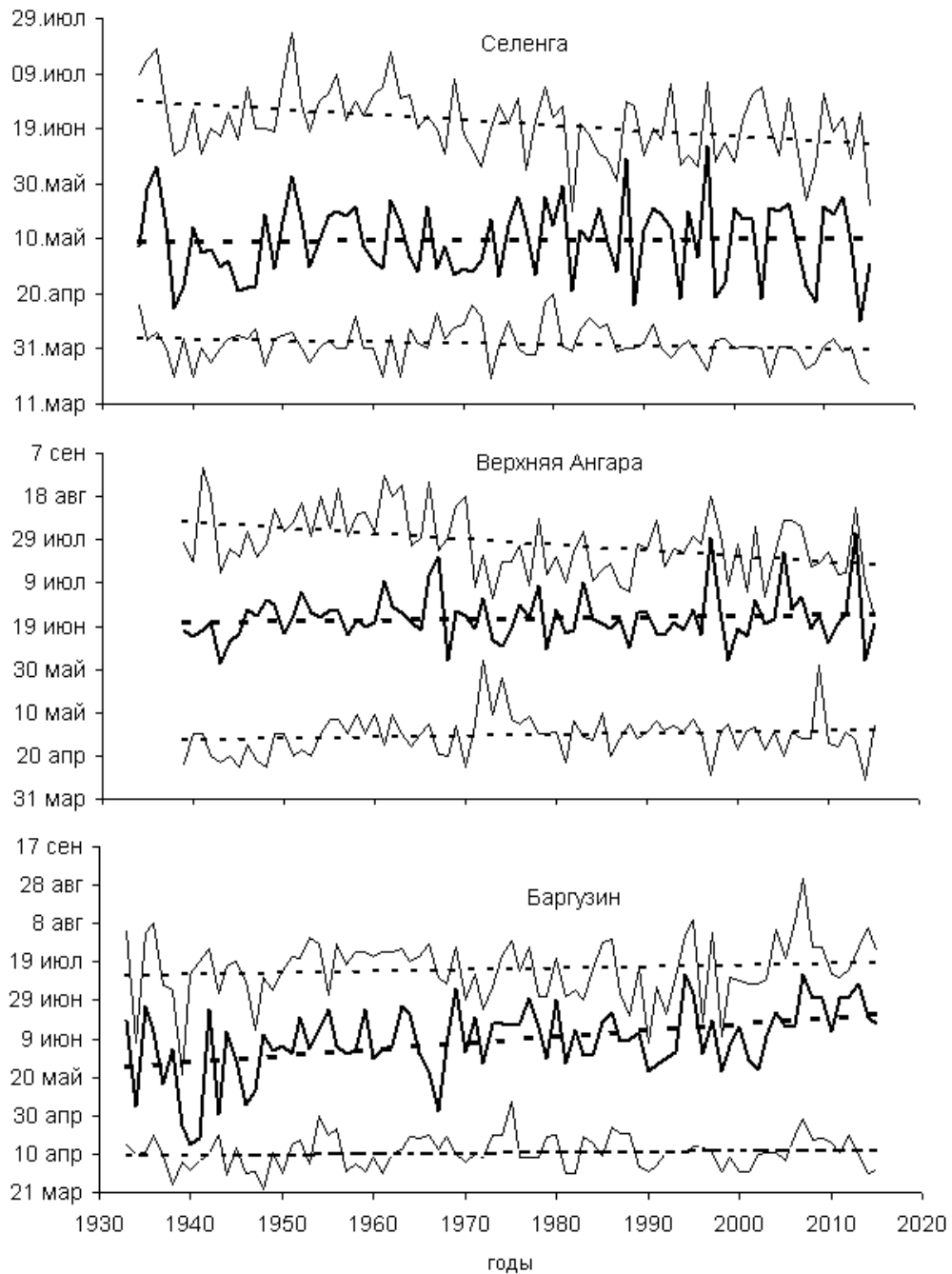


Рисунок 4.7.1 – Даты начала (верхние линии) и окончания, (нижние линии) половодья, сроки прохождения максимального стока талых вод рек Селенга, В.Ангара, Баргузин (центральные линии). Пунктирные прямые – линейные тренды

Для Селенги и Верхней Ангары в первую очередь заметна общая тенденция сдвига сроков окончания половодья на более ранние даты и уменьшение его продолжительности, при сохранении сроков прохождения максимального расхода. До 1971 г. половодье на Селенге в среднем заканчивалось 26 июня, а в последующий период – 16 июня. При неизменных датах 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 его объемов изменяется и характер поступления поверхностных вод в озеро. Используя декадные данные по полезному притоку из (Правила использования водных..., 2013) можно видеть, что до начала потепления приток в теплый период года имел двухвершинный максимум во второй декаде июня и июля (Рисунок 4.7.2).

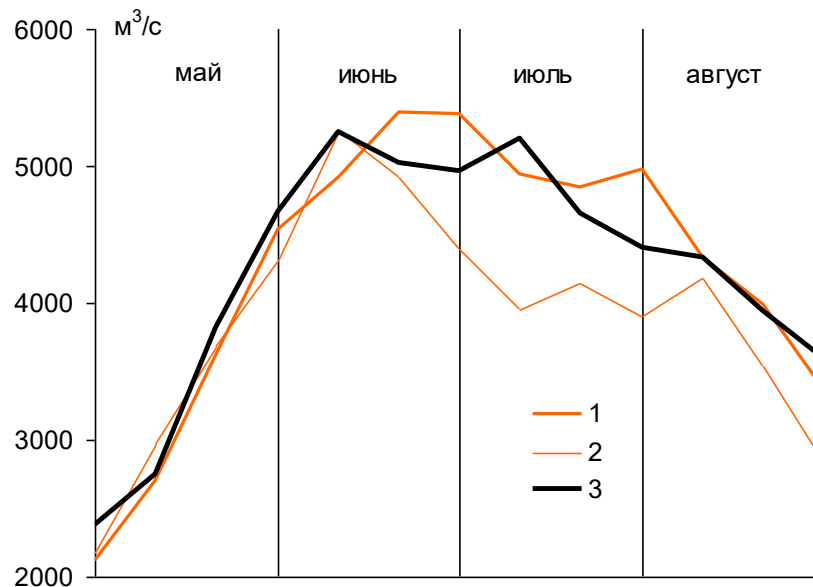


Рисунок 4.7.2 – Декадные значения полезного притока теплого времени года в разные периоды: 1 – 1971-1995 гг.; 2 – 1996-2016 гг.; 3 – 1971-1990 гг.

В 1971-1995 гг. произошло сближение пиков к середине интервала (конец июня – начало июля), а в период общего снижения приточности (с 1996 г.) второй пик уже не формировался и, следовательно, условия для наполнения озера с середины июня до середины августа стали менее благоприятными, чем в предшествующие годы.

Изменения внутригодового распределения рек также находят отражение в характере межгодовых и сезонных колебаний уровня. В первую очередь, это рост притока воды в озеро в холодное время года, что наглядно проявляется в повышении минимального зимнего стока байкальских рек, отмеченного выше. 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. после выдающегося паводка 1993 г. Однако с 1996 г. зимний сток стал заметно ниже в связи со снижением влагонасыщения деятельного слоя и запасов подземных вод из-за общего уменьшения увлажнения в селенгинском бассейне и водности теплого времени года.

Среднемеженный зимний сток Верхней Ангары за период потепления также увеличился – приблизительно на $8,5 \text{ м}^3/\text{с}$ (11 %), но в отличие от р. Селенги особенно высокие его значения имели место в 2005-2012 гг.

Еще более заметным (20 %) при потеплении до 2012 г. было увеличение зимнего стока Баргузина, однако с 2013 г. зимние расходы воды здесь снизились от 50-60 до $30\text{-}35 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. практически вдвое.

Последние обстоятельства, а именно, существенное снижение зимнего меженного стока рассматриваемых рек с 2013-2014 гг. подтверждает вторичную роль в его формировании смягчения климатических условий. Определяющим же фактором здесь является водность рек в предшествующий теплый период года, когда происходит восполнение запасов подземных вод.

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

Глава 5. Основные проблемы регулирования уровня и использование полученных результатов

5.1. Современные проблемы регулирования уровня и использования водных ресурсов Байкала

Проблемы регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал обострились с начала XXI в. после принятия Правительством РФ новых ограничений допустимого диапазона колебаний уровней озера (постановление № 234). Выход постановления был связан с принятием закона «Об охране озера Байкал» (1999 г.), но его содержание во многом стало следствием обсуждения неоднократных и недостаточно обоснованных превышений (форсировок) нормального подпорного уровня озера, составляющего 457 м. С выходом постановления форсированные уровни озера уже не предполагались, но столь радикальное сужение диапазона регулирования до настоящего времени служит предметом дискуссий по проблеме «удержания» уровня в установленных границах в случае наступления аномально многоводных, или маловодных лет. Данная проблема усугубляется несоответствием действующих ПИВР как новым предельным значениям уровней, так и новым требованиям к разработке Правил. Несмотря на предпринимаемые усилия по совершенствованию ПИВР, эта работа еще не завершена, а существующий порядок регулирования оказался не способен адекватно отреагировать на произошедшее в 2014-2017 гг. снижение приточности в озеро, в результате чего уровень Байкала в 2015-2017 гг. ежегодно на 10-29 см выходил за нижнюю допустимую отметку 456 м (Рисунок 5.1.1).

В этих условиях Правительством РФ принимались краткосрочные постановления по использованию водных ресурсов Байкала и в последних из них (№ 1667 от 27 декабря 2017 г. «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2018-2020 годах» и № 654 от 27 апреля 2021 г. «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2021 году») установленный нижний предельный уровень составляет уже 455,54 м, т.е. соответствует отметке, существовавшей до 2001 г.

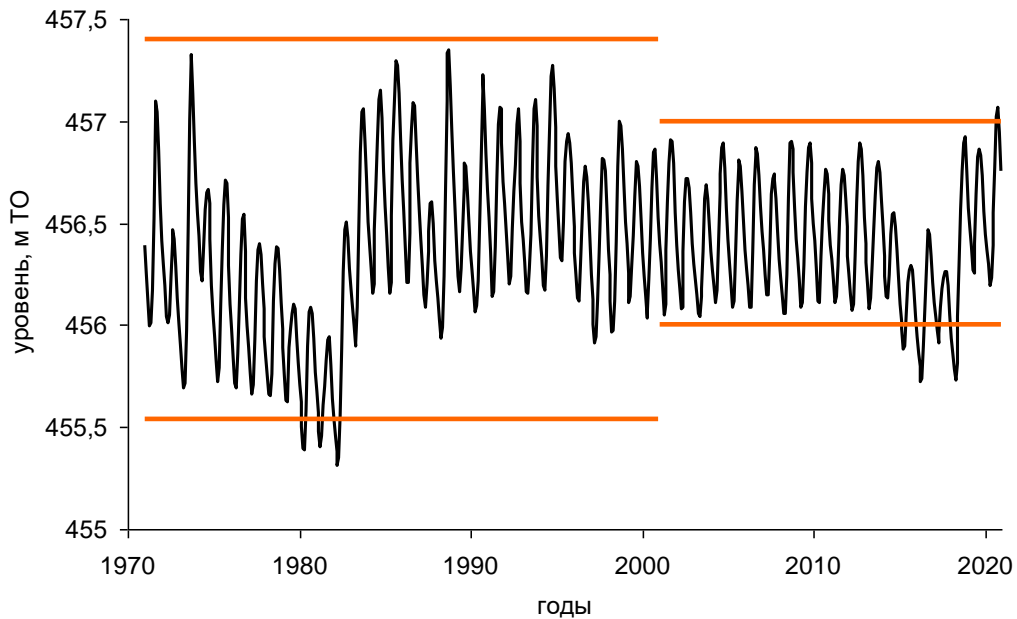


Рисунок 5.1.1 – Среднемесячные уровни озера в период 1971-2020 гг. Красными линиями ограничен диапазон предельных колебаний уровня в соответствии с ПИВР-1988 (левая часть графика) и Постановления № 234 (правая часть)

Нижний предельный уровень Байкала 456 м во временных постановлениях предусматривается для средних по условиям водности лет, что не всегда выполнимо. Так, если в маловодный год уровень будет сработан ниже нормативной отметки, например, на 30 см, то только на заполнение сработанной емкости до возвращения на искомый горизонт потребуется порядка 10 км^3 воды. Остальной объем поступивших в озеро вод должен обеспечить сток через Иркутскую ГЭС в размере не менее $1250\text{-}1300 \text{ м}^3/\text{с}$ (экономичный режим), или еще около 40 км^3 , т.е. общий годовой приход воды (с учетом испарения с поверхности озера и осадков) должен быть не ниже 50 км^3 . Если же после маловодья уровень будет находиться на самой нижней предельной отметке ($455,54 \text{ м}$), то и полезный приток должен будет быть не менее $54,5 \text{ км}^3$. А при соблюдении гарантированных навигационных попусков в нижнем бьефе Иркутской ГЭС – не ниже 60 км^3 , при его среднем значении в 2001-2020 гг. около 51 км^3 .

При таком низком полезном притоке восстановление сработки уровня озера может быть обеспечено только через один-два года и более в зависимости от

увлажненности этих лет. Особенности же увлажнения в регионе с конца XX в. как раз и отличались (до 2018 г.) отсутствием лет повышенной водности, усугубляя проблемы регулирования стока из озера. В соответствии с внутривековой цикличностью в 20-28 лет (Афанасьев, 1976; Никитин и др., 2016), начавшийся в 1980 г. цикл приточности в озеро должен был завершиться в 2007–2008 гг., однако низкая водность последующих лет указывала на его продолжение, что больше согласуется с климатическими ритмами в 30-60 лет (Jaagus, 2017). Надежных прогнозов притока пока нет.

Возможно, смена тенденции 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. При этом верхний предел уровня, предусмотренный постановлением на отметке 457,85 м, допускается только в условиях повышенной водности. Такая отметка, с одной стороны, противоречит существующим ПИВР, с другой – правомерность принятия ее применения никак не регламентирована на законодательном уровне вследствие отсутствия количественных критериев низкой и высокой водности. Таким образом, проблема «удержания» уровня Байкала в диапазоне его предельных значений в многоводные годы столь же актуальна, как и в маловодные.

Наличие ограничений по расходам и уровням воды в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, а также достаточно противоречивые экологические требования к уровенному режиму оз. Байкал, перечисленные в главе 3, указывают на проблематичность соблюдения установленных предельных уровней озера и необходимость более тщательного их обоснования с учетом особенностей поступления воды в оз. Байкал. Вместе с доработкой ПИВР это позволит минимизировать наступление неблагоприятных для экосистемы Байкала экстремальных уровней в будущем.

К положительным моментам порядка регулирования уровенного режима озера после принятия «Закона о Байкале» и, в особенности, в маловодные 2014-

2015 и 2017 гг., может быть отнесена определенная смена приоритетов при использовании водных ресурсов Байкала, когда интересы гидроэнергетики оказались уже не на первом месте. Правда, практикуемый режим экономии вод в этот период был продиктован, в первую очередь, необходимостью исполнения постановлений Правительства РФ в части уменьшения сработки уровня Байкала и быстрее его возвращения на отметки выше 456 м (в 2015 г. восстановление уровня до этого горизонта было достигнуто 5 июня, а в 2016 г., из-за более глубокой сработки, значительно позже – 29 июня). При таком подходе страдают и принципы комплексности использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и оз. Байкал, в частности, остаются неучтенными интересы водного транспорта в нижнем бьефе Иркутской ГЭС.

Еще одна сложность регулирования стока из оз. Байкал состоит в фигурирующем во всех нормативных документах максимальном попуске воды через Иркутскую ГЭС $6000 \text{ м}^3/\text{с}$, хотя за всю историю ее существования максимальный расход воды через Иркутский гидроузел составлял $4180 \text{ м}^3/\text{с}$. Справедливости ради следует отметить, что увеличение попусков через ГЭС до $6000 \text{ м}^3/\text{с}$, предназначенное для достижения максимальной скорости снижения уровня Байкала, на самом деле оказывается малоэффективным из-за ограниченной пропускной способности истока р. Ангары. В действительности при таких сбросах и уровне Байкала на отметке НПУ (457 м) фактический сток из озера не превысит $4420 \text{ м}^3/\text{с}$ (Абасов и др., 2017).

Как уже отмечалось, затопление и подтопление пойменной части р. Ангары ниже ГЭС происходит уже при расходах воды больше $2800 \text{ м}^3/\text{с}$ (Савельев, 2000; Абасов и др., 2017; Никитин и др., 2019). Площадь затопления в нижнем бьефе при расходах $3000 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет 2728 га, а при максимальных попусках $6000 \text{ м}^3/\text{с}$ она увеличивается до 12620 га (Абасов и др., 2015; Никитин и др., 2019). В то же время, сдерживание стока через Иркутский гидроузел в аномально многоводные годы повышает риск выхода уровня Байкала за верхнюю отметку 457 м. Наглядным примером в этом плане служит 1973 г., в котором аномально

высокий приток в озеро ($92,2 \text{ км}^3$) способствовал подъему уровня на 1,8 м (Синюкович, 2016).

В маловодные годы, учитывая расширение застройки побережья Байкала в зоне переменного подпора, угроза затопления возведенных здесь объектах возникает теперь при менее высоких подъемах воды, чем это было ранее. При форсировках уровня озера в многоводные годы и приближению его к верхней предельной отметке 457,85 м создается угроза затопления новых территорий, находящихся за пределами зоны переменного подпора.

С учетом сказанного и результатов других исследований (Бычков, Никитин, 2015; Абасов и др., 2017; Фролов, Выручалкина, 2020) можно полагать, что практикуемые с 2001 г. ограничения уровня режима оз. Байкал не позволяют принимать адекватных мер при наступлении экстремально маловодных и многоводных периодов. Вероятность повторения маловодья в бассейне Байкала по некоторым сценариям (Arnell, 1999; Arnell, van Vuuren, Isaac, 2011) достаточно высока, в особенности во второй половине XXI в., в то время как ожидаемое повышение увлажнения региона по более ранним прогнозам (Climate Change..., 2001) не подтверждается.

Следует также отметить, что связь изменений притока поверхностных вод в оз. Байкал и водности основных байкальских рек с количеством выпадающих осадков в регионе в условиях потепления нарушается. С привлечением данных реанализа видно, что в период потепления (1971-2017 гг.) в сравнении с предыдущими 1948-1970 гг. (Рисунок 5.1.2) снижение выпадения атмосферных осадков характерно для всей байкальской водосборной территории, но крайне незначительное. Даже в бассейне Селенги, где снижение стока было особенно заметным, уменьшение годовых сумм осадков за 1971-2017 гг. в среднем составило 5-6 мм, за исключением южной части бассейна, где оно достигало 10-14 мм. При этом данные натурных наблюдений по отдельным станциям российской части бассейна Байкала (Синюкович, Чернышов, 2019), свидетельствуют о разнонаправленных тенденциях осадков и даже их росте. Увеличение выпадения осадков характерно и для монгольской части бассейна

Селенги, где положительный тренд по данным (Dorjsuren et al., 2018) отмечается для всех пяти рассматриваемых метеостанций.

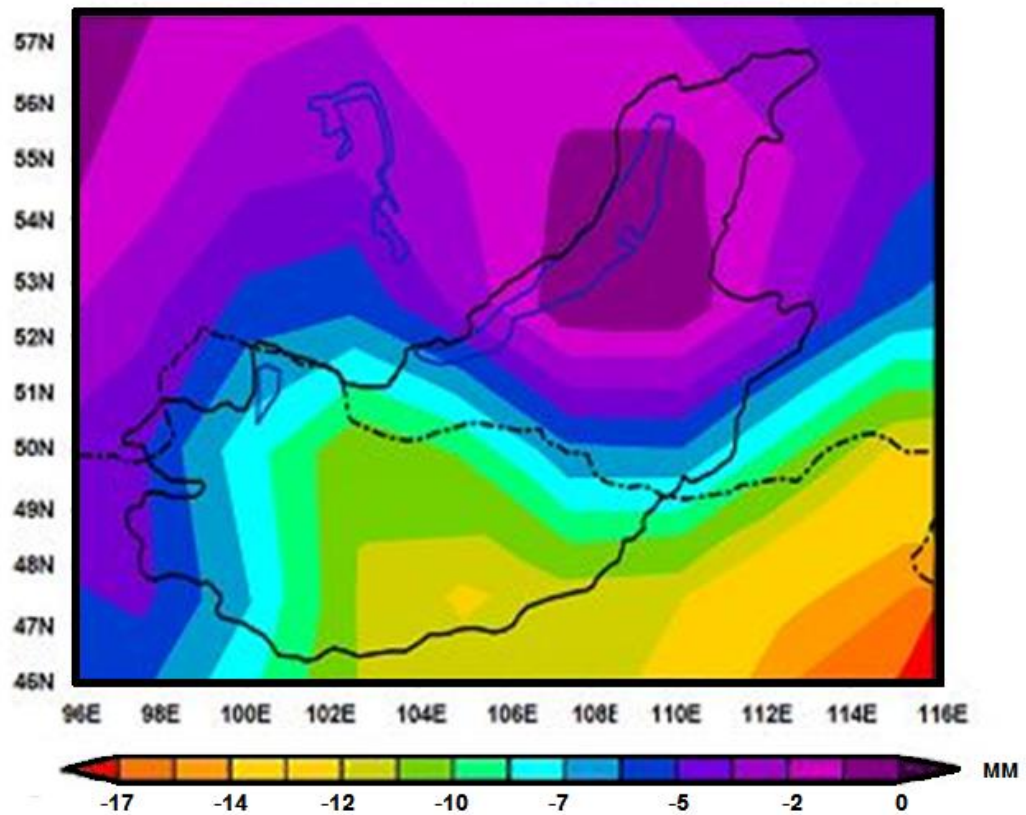


Рисунок 5.1.2 – Разница годовых сумм атмосферных осадков на водосборный бассейн Байкала между периодами 1971-2017 и 1948-1970 гг.

Это не согласуется с уменьшением с 1996 г. стока Селенги на 23 % и помимо осадков предполагает участие других факторов. Очевидно, главным из них должно быть испарение, так как более 80 % территории селенгинского бассейна относятся к очень сухим, сухим и умеренно влажным территориям. Тогда, очевидно, наблюдающийся низкий сток р. Селенги обусловлен не столько снижением количества выпадающих осадков, сколько 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.

Опыт решения схожих проблем регулирования уровня на оз. Онтарио, учитывающий разные условия водности и интересы водопользователей (Lake

Ontario and..., 2006; Klein, 2013) показывает реалистичность их разрешения и для оз. Байкал. Если же этого не будет сделано, то при повторении подобных ситуаций в будущем проблемы регулирования уровня озера будут решаться в режиме ручного управления. При выработке более рационального регламента регулирования уровня озера следует исходить из того, что его параметры должны быть ориентированы не на средние условия водности, а учитывать и экстремальные периоды, содержать разработанный порядок действий в конкретных ситуациях, предусматривающий наиболее оптимальные варианты выхода из них.

Таким образом, основные сложности регулирования уровня и использования водных ресурсов оз. Байкал в XXI в. связаны, в первую очередь, с продолжительным маловодным периодом, продолжающимся с 1996 г. и особенно низкой водностью 2014-2015 и 2017 гг., а в 2020-2021 гг. – с повышенным притоком в озеро. Другими, немаловажными факторами, являются несоответствие ПИВР принятому в 2001 г. постановлению Правительства РФ о предельных уровнях озера, а также новые ограничения (по факту) попусков через Иркутскую ГЭС, как по условиям незатопления хозяйственных объектов в нижнем бьефе, так и необходимости обеспечения бесперебойного водо- и теплоснабжения расположенных здесь городов.

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, выход уровня Байкала за верхнюю предельную отметку сопровождался обострением экологических проблем на мелководье и на побережье озера. Сток через Иркутскую ГЭС при этом осуществлялся с холостыми сбросами и достигал 3600 м³/с, с затоплением и подтоплением хозяйственных объектов в пойме р. Ангары. Все это указывает на

необходимость совершенствования порядка регулирования использования водных ресурсов озера, в особенности в маловодные и многоводные периоды.

5.2. Научно-практическая значимость полученных результатов

Рассмотренные в настоящей работе особенности многолетних и сезонных изменений уровня оз. Байкал и водности его притоков могут быть использованы при назначении режима пусков через Иркутскую ГЭС, определении различных показателей состояния водных объектов и околводных систем, необходимых для планирования хозяйственных и природоохранных мероприятий. Отдельные положения работы служат дополнением сложившихся представлений о причинности колебаний и взаимосвязи элементов водного режима оз. Байкал и его водосборной территории. Полученные параметры распределения различных характеристик стока рассмотренных в работе водотоков могут служить аналогами при решении подобных вопросов для неизученных рек со схожими природными условиями в их бассейнах.

Среди характеристик стока наиболее важными в практическом отношении являются показатели максимальной водности рек редкой повторяемости, с которыми связаны наводнения (40 % стихийных бедствий). Наводнения сопровождаются затоплением и подтоплением прибрежных территорий, разрушением хозяйственных объектов, ухудшением экологической ситуации, изменениями качественного состава вод, увеличением размывающей способности потока и повышением мутности воды. Для байкальских рек при этом возможно образование селей. 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 универсальным показателем этих явлений, так как являются исходной для формирования уровня величиной, не зависящей от морфометрии русла.

Важное практическое значение имеют также результаты расчетов минимального стока рек. В периоды значительного снижения водности обостряются проблемы водоснабжения и судоходства, происходит обсыхание и зарастание участков русла, сокращение размеров и усыхание пойменных озер и стариц, угнетение околоводной растительности, снижение самоочищающей способности рек и др. Полученные в работе минимальные расходы воды 80 и 95 %-ной обеспеченности служат основой определения экологического, санитарного или базисного стока. Использование нами разных по качеству исходных данных позволяет произвести переход (перерасчет) от параметров минимального суточного стока к 30-дневному и наоборот.

Значения рассмотренных в работе характеристик стока различных обеспеченностей служат основой определения категорий высокой и низкой водности рек, которые до настоящего времени отсутствуют в нормативно-правовой базе по регулированию отношений в водном хозяйстве. С позиций формирования уровня режима Байкала наиболее важным представляется определение таких показателей для притока поверхностных вод. С использованием соответствующей классификации для годового стока рек СССР (Кочукова, 1955) нами рассчитаны значения притока различной обеспеченности для наиболее многоводных месяцев (июнь-сентябрь), наиболее многоводного III квартала и годовой приточности (таблица 5.2.1).

Таблица 5.2.1 – Градации водности притока поверхностных вод в оз. Байкал, км³

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

В данной классификации за границы обеспеченности различных градаций водности приняты 1, 5, 25, 65, 97 и 99 %. Схожий подход использован в работе (Абасов и др., 2017) для полезного притока в Байкал с некоторыми различиями в значениях граничных обеспеченностей и терминологии (нормальная водность, экстремально высокая и т. д.).

Для уровня режима оз. Байкал наибольший научный и практический интерес представляет воссоздание картины естественных колебаний уровня после зарегулирования. Полученная в главе 3 разница наблюдаемых и восстановленных по воднобалансовой схеме реконструкции служит показателем реального повышения уровня озера и степени нарушений его внутригодового хода. Кроме того, восстановление естественного хода уровня после зарегулирования позволяет получить однородный ряд данных по уровню за 1898-2019 гг. и повысить достоверность определения отдельных параметров его изменчивости, в особенности вариаций большой продолжительности. 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. Реконструкции уровня А.Н. Афанасьева неоднократно использовались в исследованиях многолетней изменчивости уровня оз. Байкал и других природных явлений (Янтер, 1990; Леви и др., 2013), однако существенно различались в разных источниках, вызывая справедливые сомнения в их реальности. Нами, искомые уровни получены из архивных материалов А.Н. Афанасьева и представляются наиболее достоверными.

Из анализа составленной, таким образом, 291-летней динамики многолетних естественных уровней Байкала (Рисунок 5.2.1) 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 максимума данный цикл достигал в 1751 г., а минимум 1814 г. оказывается самым экстремальным за весь 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, окончился в 2018 г. Внутри него, имея натурные наблюдения за уровнем и притоком, можно достаточно уверенно выделить три внутривековых цикла и менее выраженный четвертый, начавшийся в 1981 г. и отличающийся продолжительным растянутым спадом, что не позволяет на сегодняшний день уверенно говорить о его завершении и начале следующей волны.

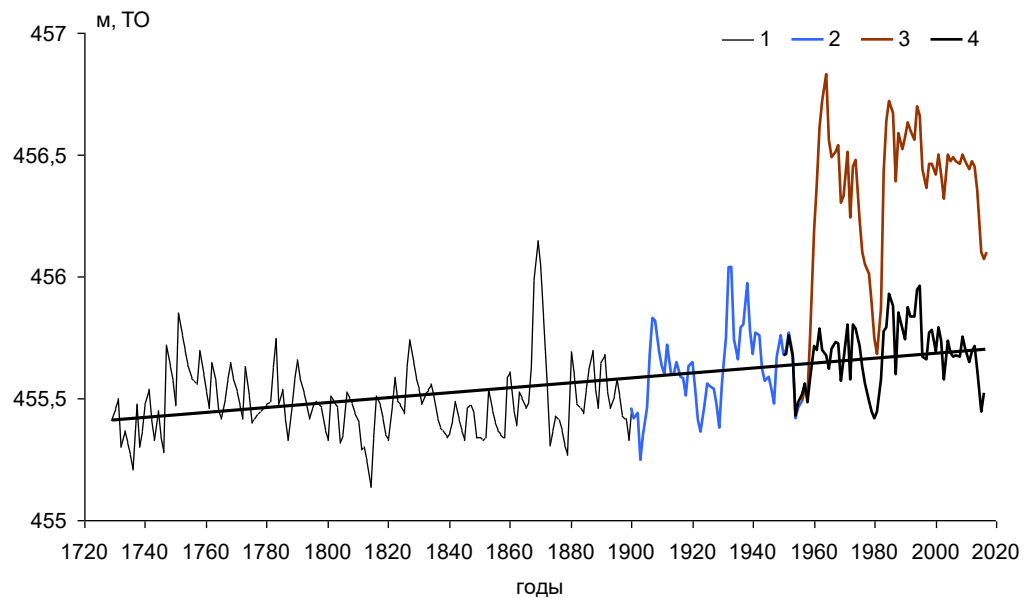


Рисунок 5.2.1 – Динамика среднегодовых уровней оз. Байкал по доинструментальным данным (1), наблюдениям в естественных (2) и зарегулированных (3) условиях, условно-естественным значениям. Прямая линия – тренд

В течение всего рассмотренного периода более высокие уровни приходятся на третий вековой цикл. Для временных отрезков с разным характером исходных данных основные параметры уровня режима получились близкими (таблица 5.2.2) и свидетельствуют о незначительном постепенном росте уровня.

Таблица 5.2.2 – Среднегодовые уровни оз. Байкал и их вариабельность в исторически разные периоды

Период (годы)	Средний уровень, м ТО	Стандартное отклонение, м
Доинструментальный естественный (1729-1897 гг.)	455,49	0,14
Инструментальный естественный (1898-1958 гг.)	455,61	0,17
Инструментальный условно-естественный (1959-2017 гг.)	455,69	0,13
Весь ряд (1729-2019 гг.)	455,55	0,17

Тенденции роста уровня в течение трех последних столетий, полученная по параметрам тренда (Рисунок 5.2.1) сравнительно невелика и составляет около 1 мм в год, но статистически достоверна ($R^2 = 0,23$; $\alpha = 0,05$).

Полученные результаты позволяют сформулировать основные рекомендации к порядку регулирования использования водных ресурсов оз. Байкал. Некоторые из них далеко не новы, но поскольку не реализованы, то остаются актуальными до настоящего времени. Главная задача при этом состоит в разработке новых ПИВР, учитывающих требования всех водопользователей и состояние экосистемы озера. Разработанный режим регулирования стока через Иркутскую ГЭС должен быть выполнен не только в условиях средней водности, но и при наступлении аномальных гидрологических событий. Внутригодовые изменения уровня озера должны быть максимально приближены к естественным условиям, а форсировки назначаться в строгом соответствии с фиксированными значениями повышенной водности, критерии которой закреплены на законодательном уровне.

Заключение

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 уровенного режима 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 обеспечивая снижение уровня до 10-15 см в месяц. 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 подпирającego воздействия Иркутского водохранилища, который за 1962-2019 гг составил 0,71 м. За счет восстановленных данных вдвое увеличена продолжительность однородного ряда по уровню озера с 61 года до 118 лет, 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. Для среднего и максимального стока в период потепления характерно снижение (около 10%), а для минимального, наоборот, увеличение (около 18%). 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.

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 сокращение

сроков прохождения половодья на главных притоках озера до 10-20 дней, 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 режима озера и изменчивости характеристик стока впадающих в него рек.

Список литературы

1. Абасов, Н.В. Формирование и визуализация зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС / Н.В. Абасов [и др.] // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — Вып. 1. — С. 6–12.
2. Абасов, Н.В. О регулировании уровня режима озера Байкал / Н.В. Абасов [и др.] // Водные ресурсы. - 2017. - Т. 44, № 3. - С. 407-416.
3. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия./Отв. Ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. – М.: Наука, 2003. – 367 с.
4. Аргучинцева, А.В. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений: Учеб. пособие / А.В. Аргучинцева. - Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2007. - 105 с.
5. Афанасьев, А.Н. Водный баланс оз. Байкал / А.Н. Афанасьев // Исследования гидрологического режима Байкала. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1960. - С. 155–241.
6. Афанасьев, А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР / А.Н. Афанасьев. - М: Наука, 1967. - 231 с.
7. Афанасьев, А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал / А.Н. Афанасьев. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. – 238 с.
8. Афанасьев А.Н. Вопросы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна оз. Байкал/ А.Н. Афанасьев //Тр. IV лимнологического совещания. Гидрология и климат.- Лиственничное на Байкале, 1977. - С. 264-268.
9. Байкал. Атлас. – М., 1993. – 159 с.
10. Белозерцева, И.А. Почвы бассейна озера Байкал и их картографирование на территории России и Монголии / И.А. Белозерцева [и др.]//Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. - № 5 (ч. 2). – С. 114-120.

11. Бережных, Т.В. Изменение циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги / Т.В. Бережных [и др.] // География и природные ресурсы, 2012. – № 3. – С. 61-68.
12. Болгов, М.В. Современные изменения минимального стока на реках бассейна р. Волга / М.В. Болгов [и др.] // Метеорология и гидрология, 2014. – № 3. – С. 72-81.
13. Болгов, М.В. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата / М.В. Болгов, Е.А. Коробкина, И.А. Филиппова. // Метеорология и гидрология, 2016. – № 7. – С.75-84.2016
14. Болгов, М.В. Озеро Байкал: экстремальные уровни как редкое гидрологическое событие / М. В. Болгов [и др.] // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 3. – С . 392-406.
15. Болгов, М.В. Особенности временной изменчивости притока к озеру Байкал и водохранилищам ангарского каскада ГЭС. / М. В. Болгов, Е.А. Коробкина, И.А. Филиппова // Водное хозяйство России, 2018. – № 4. – С. 6-19.2018
16. Бычков, И.В. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенга / И.В. Бычков [и др.] // География и природные ресурсы. – 2017. – № 3. – С. 75-86.
17. Бычков, И.В. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения / И.В. Бычков, В.М. Никитин // География и природные ресурсы. 2015. № 3. – С. 5–16.
18. Бычков, И.В. Предложения по совершенствованию действующих методических и практических подходов в сфере водных отношений / И.В. Бычков, И.И. Орлова, В.М. Никитин // Водное хозяйство России, 2018. – № 5. – С. 50-64.2018
19. Верещагин, Г.Ю. Байкал. Научно-популярный очерк / Г.Ю. Верещагин. - Иркутск: ОГИЗ, 1947. - 170 с.

20. Верещагин, Г.Ю. Байкал. Научно-популярный очерк / Г.Ю. Верещагин. - М: Географгиз, 1949. – 228 с.
21. Верболов, В.И. Изменение водного режима оз.Байкал после строительства Иркутской ГЭС / В.И. Верболов, В.Н. Синюкович, Н.Л. Карпышева // География и природные ресурсы. – 1992, №1. – С. 50-56.
22. Воскресенский, К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. / К.П. Воскресенский. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. 545 с.
23. Владимиров, А.М. Сток рек в маловодный период года. / А.М. Владимиров. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 295 с.
24. Водогрецкий, В.Е. Антропогенные изменения стока малых рек. / В.Е. Водогрецкий. – Л.: Гидрометеиздат. – 1990, – 176 с.
25. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. Проф. И. А. Шикломанова. – СПб.: Государственный Гидрологический институт. - 600
26. Воскресенский, К.П. Водные ресурсы и баланс вод Сибири / К. П. Воскресенский, А. П. Бочков //Труды ГГИ, 1972. - Вып. 200. - С. 103- 114.
27. Воскресенский, С.С. Орографическая схема бассейна оз. Байкал / С.С. Воскресенский, Г.А. Посталенко // Атлас Забайкалья. – Москва – Иркутск: Изд-во ГУГК, 1967. – С.12.
28. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. - Режим доступа: [http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/10.02.2014].
29. Выручалкина, Т.Ю. Байкал и Ангара до и после создания водохранилищ/ Т.Ю. Выручалкина // Водные ресурсы. – 2004. – Т. 31, № 5. – С. 526-532.
30. Ганджумян, Р.А. Математическая статистика в разведочном бурении / Р.А Ганджумян. – М.: Недра, 1990. – 220 с.
31. Гармаев, Е.Ж. Сток рек Бурятии / Е.Ж Гармаев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2000. — 189 с.

32. Гармаев, Е.Ж. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны / Е.Ж. Гармаев, А.В. Христофоров. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2010. – 231 с.
33. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР. – М.: Недра, 1989. – С. 139-143.
34. Георгиевский, В.Ю. Внутригодовое распределение речного стока / В.Ю. Георгиевский, А.Л. Шалыгин, Т.Г. Молчанова // В кн. Водные ресурсы России и их использование /Ред. Шикломанов И.А. – СПб.: Изд-во ГГИ, 2008. – С.137-165.
35. Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал / под ред. А.К. Тулохонова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 279 с.
36. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения / – М.,1988. – 36 с.
37. Гранин, Н.Г. Генерация колебаний уровня озера Байкал удаленными сильными землетрясениями / Н.Г. Гранин [и др.] // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 455, № 2. – С. 224–228.
38. Гречушникова, М.Г. Экспресс оценка последствий гидротехнического строительства в бассейне реки Селенги / М.Г. Гречушникова, К.К. Эдельштейн // Водное хозяйство России, 2016. – № 1. – С. 66-82.2016
39. Гурулёв, С.А. Реки бассейна Байкал: историко-топонимический анализ / С.А. Гурулёв. – Иркутск: Изд-во Института географии им В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. – 379 с.
40. Джамалов, Р.Г. Современные изменения водного режима в бассейне Дона / Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева // Водные ресурсы, 40 (6). – 2013. – С. 544-556.
41. Джамалов, Р.Г. Природноклиматические и антропогенные причины изменения подземного стока бассейна Лены / Р.Г. Джамалов, Е.В. Потехина // Георазрез. – 2010. – № 1. – С. 1–25. <http://georazrez.uni-dubna.ru>.
42. Дзердзеевский, Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат / Б.Л. Дзердзеевский. - М.: Наука, 1975. – 285 с.

43. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. – 660 с.
44. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – Режим доступа: [<http://www.meteorf.ru> 15.10.2011].
45. Дружинин, И.П. Речной сток и геофизические процессы / И.П. Дружинин. – М.: Наука, 1966. – 295 с.
46. Дыбовский, Б. Физико-географические исследования на Байкале в 1869-1876 гг. [по измерению глубины оз. Байкал] / Б. Дыбовский, В. Годлевский // Тр. ВСОРГО. – 1897. – № 1. - Байкальский сборник, вып.1. – С.1– 61.
47. Израэль, Ю.А. Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий / Ю. А. Израэль, Г. В. Груза // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 5. – С. 5–21.
48. Иркутская гидроэлектростанция на р. Ангаре. Технический проект. Т. 1. Природные условия. Ч. 2: Гидрологический очерк. Московское отделение Института Гидроэнергопроект. 1951. – 220 с.
49. Иркутское водохранилище. Л: Гидрометеиздат, 1980. – 140 с.
50. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии / Г.П. Калинин. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 378 с.
51. Кононова, Н.К. Изменения циркуляции атмосферы северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата / Н.К. Кононова // Фундамент. и приклад. климатология. 2015. Т. 1, № 1. – С. 133–162.
52. Кочукова, Т.Н. Колебания годового стока рек СССР/ Т.Н. Кочукова // Труды ГГИ. – 1955. – Вып. 50 (104). – С. 56-116.
53. Клибашев, К.П. Гидрологические расчеты / К.П. Клибашев, И.Ф. Горошков. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 460 с.
54. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановление лесов на водность рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 460 с.

55. Кузин, П.С. Циклические колебания стока рек северного полушария / П.С. Кузин. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 178 с.
56. Леви, К.Г. Проблемы наведенной сейсмичности и инженерно-геологической защиты водохранилищ Байкало-ангарского каскада / К.Г. Леви [и др.] // Геодинамика и технофизика. – 2013. – Т. 4. – С. 13-36.
57. Логинов, В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В.Ф. Логинов. – Минск: ТетраСистем, 2008. – 496 с.
58. Лобанов, С.А. Анизотропность полей годового стока рек в отношении их пространственной корреляции / С.А. Лобанов // Тезисы докладов междунационального симпозиума «Расчеты речного стока». – СПб., 1995. – С. 73.
59. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии гидрометрических наблюдений. СПб.: Изд-во ГГИ, 2005. – 124 с.
60. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб.: Изд-во Нестор-История, 2010. – 162 с.
61. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В.В. Коваленко. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2010. – 51 с.
62. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – Т. 1, вып. 14. – 363 с.
63. Монгол улсын статистикийн эмхтгэл 2002// Монгол улсын ундэсний статистикийн газар. – Улаанбаатар, 2003. – 246 х.
64. Мохов, И.И. Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные сценарии изменений в XXI веке / И.И. Мохов, В.Ч. Хон // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. – С. 77-93.
65. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / Логачев Н.А [и др.]. – М: Наука, 1974. – 360 с.
66. Национальный атлас МНР / ред. Воробьев В.В., Цегмид Ш. – Улан-Батор – Москва. 1990.

67. Ногина, Н.А. Почвы Забайкалья / Н.А. Ногина. – М.: Наука, 1964. – 314 с.
68. Обоснование экстремальных уровней воды в озере Байкал – М.: Ассоциация «Гидропроект», 2000. – 62 с.
69. Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н. Озеро Байкал: риски маловодных и многоводных периодов // География и природ. ресурсы. – 2016. – № 5. – С. 29–38.
70. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). М.: Изд-во Министерства мелиорации и водного хозяйства РСФСР. 1988. - 65 с.
71. Павловский, Е.В. Геологическая история и геологическая структура Байкальской горной области / Е.В. Павловский. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – 174 с.
72. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
73. Постановление Правительства Российской Федерации от 26 марта 2001 года № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности». // Сборник законодательства РФ, 2001. - № 14. – 1366 с.
74. Постановление Правительства РФ от 27.12.2017 № 1667 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2018 - 2020 годах» // Номер опубликования: 0001201712280076.
75. Правила использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал. Проект. М.: Изд-во Моск. ун-та природообустройства. 2013. – 168 с.
76. Прасолов, Л.И. Южное Забайкалье. Почвенно-географический очерк / Л.И. Прасолов. – Л., 1927. – 422 с.
77. Преображенский, В.С. Типы местности и природное районирование Бурятской АССР / В.С. Преображенский [и др.]. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – 218 с.

78. Природа многолетних колебаний речного стока (под ред. И. П. Дружинина). – Новосибирск: Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1976. – 335 с.
79. Пространственно-временные колебания стока рек СССР (под ред. А. В. Рождественского). - Л.: Гидрометеоздат, 1988 – 376 с.
80. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – Т. 16, вып. 3. – 400 с.
81. Родионов В.З., Нямжав Н. Влияние хозяйственной деятельности на гидрологический режим реки Селенги / В.З. Родионов, Н. Нямжав // Тр. / ГГИ. – Л. 1986. – Т. Вып.315:.. – С. 82–83
82. Рождественский, А.В. Статистические методы в гидрологии / А. В. Рождественский, А. И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. - 424 с.
83. Румшицкий, Л.З. Смирнов С.Н. Методы обработки результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий, С.Н. Смирнов. – М.: Наука, 1973. – 162 с.
84. Савельев, В.А. Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири / В.А. Савельев. – Новосибирск: Наука. 2000. – 200 с.
85. Семенов, В.А. Региональные особенности климатических изменений стока рек СССР / В.А. Семенов, А. К. Алексеева //Метеорология и гидрология. - 1989. - № 9. – С. 91–97.
86. Сикан, А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / Сикан А.В. – СПб: Изд-во РГГМУ, 2007. – 279 с.
87. Симонов, Ю.А. Анализ многолетних колебаний стока рек бассейна Северного Ледовитого океана / Ю.А. Симонов, А.В. Христофоров // Водные ресурсы. - 2005. – Т. 32. – № 6. – С. 645–652.
88. Синюкович, В.Н. Современные проблемы регулирования уровня озера Байкал / В.Н. Синюкович, М.С. Чернышов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. – 2018. – Т. 24. – С. 99–110. DOI: 10.26516/2073-3402.2018.24.99.

89. Синюкович, В.Н. О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал / В.Н. Синюкович, М.С. Чернышов // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 3. – С. 256-263. DOI: 10.1134/S0097807817030174.
90. Синюкович, В.Н., Сизова Л. Н., Шимараев М. Н., Курбатова Н.Н. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал // География и природные ресурсы. – 2013. – № 4. – С. 57–63.
91. Синюкович, В.Н. Оценка регулирующей способности оз. Байкал / В.Н. Синюкович // Гидрология Байкала и других водоемов. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 105-110.
92. Синюкович, В.Н. Реконструкция естественных уровней оз. Байкал в период зарегулированного режима / В.Н. Синюкович // География и природные ресурсы. - 1993. - № 4. – С. 57–61.
93. Синюкович, В.Н. Проблемы регулирования уровня озера Байкал в условиях аномальной водности / В.Н. Синюкович // Водное хозяйство России. 2016. № 1. – С. 42–51.
94. Синюкович, В.Н. Реконструкция уровня оз. Байкал после зарегулирования и оптимальный режим использования его водных ресурсов / В.Н. Синюкович, Н.Н. Курбатова, М.С. Чернышов // 4-й Байкальский Микробиологический симпозиум с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах». 7-12 Сентября, 2015г. г. Иркутск, Лимнологический институт СО РАН – 2015. – С. 35.
95. Синюкович, В.Н. О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал / В.Н. Синюкович, М.С. Чернышов // Водные ресурсы, 2017. – т. 44. – № 3. – С. 256-263.
96. Смирнов, Н.П. Пространственно-временные закономерности многолетних колебаний стока рек СССР / Н.П. Смирнов // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. – Т. 3. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
97. Смирнов, С.В. Сейшевые колебания Байкала / С.В. Смирнов [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 49, № 5. - С. 1-12.

98. Сороковикова, Л.М. Состояние водной экосистемы дельты реки Селенги в условиях длительного маловодья / Л.М. Сороковикова [и др.] // География и природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 81-89. DOI: 10.1134/S1875372817010085.
99. СП-33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России. – 2004. – 73 с.
100. СТО ГГИ 52.08.41-2017. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. – Санкт-Петербург.: ФГБУ «ГГИ». –2017. – 42 с.
101. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск: Наука, 1977. – 272 с.
102. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Селенга. Утверждена приказом Енисейского БВУ от 24 июня 2014 г. № 100 [Электронный ресурс]. — <http://skiovo.enbv.ru> (дата обращения 14.02.2017).
103. Сутырина, Е. Н. Изменчивость климатических факторов формирования стока рек водосборного бассейна оз. Байкал / Е. Н. Сутырина // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы Всерос. Научно-практ. конф. – Иркутск, 2018. – С. 329-334.
104. Тимофеев В.Ю. Деформация ледового покрова, приливные и собственные колебания уровня озера Байкал / Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Гранин Н.Г. и др. // Физ. мезомеханика. 2010. № 13. – С. 58-71.
105. Федоров, В.Н. Изменчивость уровня озера Байкал / В.Н. Федоров. – Новосибирск: Наука. 1981. – 94 с.
106. Филатов, Н.Н. Внутривековая изменчивость уровня крупнейших озер России / Н.Н. Филатов [и др.] // Докл. АН. – 2016. - Т. 467, № 5. – С. 589-593.
107. Флоренсов, Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья / Н.А. Флоренсов. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – 258 с.
108. Фролов, А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озер / А.В. Фролов. – М.: Наука, 1985. -103 с.

109. Фролов, А.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары / А.В. Фролов, Т.Ю. Выручалкина // Водные ресурсы, 2017. – т. 44. – № 3. – С. 264-274.

110. Фролов, А.В. Оценка влияния стохастической структуры притока в Байкал на многолетний уровенный режим озера / А.В. Фролов, Т.Ю. Выручалкина // Водные ресурсы, 2020. – т. 47. – № 1. – С. 26-32.

111. Фролова, Н.Л. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги / Фролова Н.Л. // Водные ресурсы, 2017. – т. 44. - № 3. – С. 243-255.

112. Чеботарев, А.И. Гидрологический словарь. Издание второе переработанное и дополненное / А.И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 308 с.

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

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

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

116. Шикломанов, И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И.А. Шикломанов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 334 с.
117. Шимараев, М.Н. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии / М.Н. Шимараев [и др.] // Докл. РАН. – 2002. – Т. 383, № 3. – С. 397-400.
118. Шимараев, М.Н. Климат и гидрологические процессы в бассейне оз. Байкал в XX столетии / М.Н. Шимараев [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 3. – С. 71-78.
119. Шимараев, М.Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968-2007 гг.) / М.Н. Шимараев, Л.Н. Старыгина // География и природные ресурсы. – 2010. – № 3. – С. 62-68.
120. Экологический Атлас бассейна озера Байкал. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. – 145 с.
121. Экологические требования к режиму работы Иркутской ГЭС. — Иркутск: Изд-во Ин-та экологической токсикологии, 1996. — 110 с.
122. Янтер Н.Н. Водный баланс оз. Байкал в период зарегулированного режима // Труды V всесоюз. гидрол. съезда. Т.8. Л.: Гидрометеиздат, 1990. - С. 161-169.
123. Antokhina, O.Yu. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime / O. Yu. Antokhina [end etc.] // Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE. 2017. Vol. 10466. P. 104665V
124. Arnell, N.W. Climate change and global water resources / N. W. Arnell // Global Environ. Change. 1999. № 9. - P. 31–49.
125. Arnell, N.W. The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources / N. W. Arnell, D. P. van Vuuren, M. Isaac // Global Environ. Change. 2011. Vol. 21, № 2. - P. 592–603. doi.org/0.1016/j.gloenvcha.2011.01.015.
126. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Summary for Policymakers and

Technical Summary, WMO/UNEP, 2001.
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WG1> (дата обращения 10.04.2018).

127. Dorjsuren B., Observed trends of climate and river discharge in Mongolia's Selenga sub-basin of the Lake Baikal basin / B Dorjsuren [end etc.]. — Water, 2018, vol. 10; doi: 10.3390/w10101436. Frits, van der Leeden. The Water Encyclopedia, Second Edition. Front Cover . CRC Press, Jan 31, 1990 - Technology & Engineering - 824 pages.

128. Goldman, C.R. (ed.) Climatic Change and Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies / C.R. Goldman, M. Kumagai, R. D. Robats // A John Wiley&Sons. Ltd. Publication. 2013. - 472 p.

129. Jaagus, J. Trends and regime shifts in climatic conditions and river runoff / J. Jaagus // Earth Syst. Dynam. 2017. Vol. 8. P. 963–976.

130. Lake Ontario–St. Lawrence River Study Board. Options for Managing Lake Ontario and St. Lawrence River Water Levels and Flows: Final Report to the International Joint Commission. 2006.
<http://www.ijc.org/loslr/en/library/LOSLR%20Study%20Reports/report-main-e-6KB.pdf> (дата обращения 09.04.2018).

131. Klein, D. F. Regulation of levels and flows of Lake Ontario and St. Lawrence river / D. F Klein // Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Реки Сибири и Дальнего Востока». — Иркутск: Изд-во ИРОО «Байкальская экологическая волна», 2013. - С. 23–24.

132. Level regime regulation in Lake Baikal / N. V. Abasov [et al.] // Water Res. Vol. 44, Is. 3. 2017. P. 537-546. DOI: 10.1134/S0097807817030022.

133. Sutcliff, J.V. The hydrology of Nile / J. V. Sutcliff, Y. P. Parks // IASH Special, Publ. 1995. № 5. - 179 p

134. Verbolov, V.I. Water and mass exchange in the Lake Baikal and storage reservoirs of the Angara cascade / V.I. Verbolov, V.N. Sinyukovich N.L. Karpicheva // Archiv Hydrobiol. Beih. 33. - Stuttgart, 1989. - P. 35-40.

135. Zoljoodi, M. Water-Level Fluctuations of Urmia Lake: Relationship with the Long-Term Changes of Meteorological Variables (Solutions for Water-Crisis

Management in Urmia Lake Basin) / M. Zoljoodi, A. Did evarasl // Atmospheric and Climate Sciences. 2014. № 4. - P. 358-368.

136. Changnon, S.A. Temporal behavior of levels of the Great Lakes and climate variability / S.A. Changnon // Great Lakes Res. 2004. Vol. 30. № 1. - P. 184–200.