

## **ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТООБУСЛОВЛЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИХОДНОЙ ЧАСТИ ВОДНОГО БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩ АНГАРСКОГО КАСКАДА**

А.В. Измайлова, Т.В. Фуксова, К.А. Дубровская,  
Л.М. Романова

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт»,  
Санкт-Петербург*

Под воздействием наблюдающегося в последние десятилетия потепления климата отмечается изменение ледово-термического режима водохранилищ Ангарского каскада и преобразование внутригодового распределения объемов естественных составляющих их водного баланса. Исследование основывается на анализе режимных (годовых и месячных) данных о водных балансах Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ, подготовленных Иркутским управлением Росгидромета и опубликованных в изданиях Государственного водного кадастра. Наряду с составляющими водных балансов рассмотрены изменения характеристик гидрологического режима, напрямую зависящих от климатических факторов: многолетних рядов среднемесячной температуры поверхности воды на постах, расположенных в прибрежной зоне водохранилищ, дат установления ледостава и разрушения ледяного покрова, а также продолжительности периода, свободного ото льда. Анализ изменений составляющих водного баланса и характеристик температурного и ледового режимов водохранилищ выполнен путем сопоставления их средних значений за три примерно одинаковые по продолжительности периода: с 1975 по 1990 г., когда нарушение естественных климатических условий в этом регионе практически не отмечалось; с 1991 по 2005 г., когда были выявлены заметные изменения основных метеорологических характеристик в бассейне озера; и с 2006 по 2020 г. Показано, что на фоне происходящих климатических изменений происходит увеличение доли бокового притока в зимний период ко всем водохранилищам, сокращение периода ледостава и сдвигжка половодья на более ранние сроки. Обнаружена тенденция роста осадков в холодное время года и снижение в теплое.

**Ключевые слова:** *водный баланс, водохранилища, ледово-термический режим, климатические изменения, внутригодовое распределение стока.*

## CHANGES IN THE CLIMATE-DETERMINED COMPONENTS OF THE INCOMING PART OF THE WATER BALANCE OF THE ANGARA CASCADE RESERVOIRS

A.V. Izmailova, T.V. Fuksova, K.A. Dubrovskaya, L.M. Romanova

*State Hydrological Institute, St. Petersburg*

Under the influence of the climate warming observed in recent decades, there is a change in the ice-thermal regime of the reservoirs of the Angara cascade and a transformation of the intra-annual distribution of the volumes of the natural components of their water balance. The study is based on the analysis of the regime (annual and monthly) water balances of the Irkutsk, Bratsk and Ust-Ilimsk reservoirs, prepared by the Irkutsk Department of Roshydromet and published in the publications of the State Water Cadastre. Along with the components of water balances, the changes in the characteristics of the hydrological regime, which are directly dependent on climatic factors, are considered: long-term series of the average monthly water surface temperature at gauges located in the coastal zone of reservoirs, the dates of ice freeze-up and break-up, as well as the ice-free period duration. The analysis of changes in the components of the water balance and the characteristics of the temperature and ice regimes of reservoirs was carried out by comparing their average values for three periods of approximately the same duration: from 1975 to 1990, when there was practically no disturbance of natural climatic conditions in this region; from 1991 to 2005, when noticeable changes in the main meteorological characteristics in the lake basin were revealed; and from 2006 to 2020. It is shown that against the background of ongoing climate changes, there is an increase in the share of lateral inflow to all reservoirs in winter, a reduction in the freeze-up period, and a shift in flood timing to earlier periods. The trend of precipitation increase in the cold season and decrease in the warm season was found.

**Key words:** *water balance, reservoirs, ice-thermal regime, climate change, intra-annual runoff distribution.*

### Введение

Ангарский каскад представляет собой крупнейший в России комплекс, состоящий из четырех водохранилищ с суммарным объемом воды при НПУ 23 901 км<sup>3</sup>. Суммарная площадь зеркала водохранилищ – 41 170 км<sup>2</sup>, в том числе первых трех в каскаде – 38 840 км<sup>2</sup> при объеме воды – 23 843 км<sup>3</sup>. Строительство ГЭС Ангарского каскада последовательно велось с середины XX в. вниз по течению р. Ангары. Возведение плотины Иркутской ГЭС, верхней в каскаде, было начато в 1950 г. и проводилось до 1958 г., сопровождаясь наполнением Иркутского водохранилища, включающего как речную часть на р. Ангаре, так и оз. Байкал. Уровень озера в результате строительства плотины был поднят в среднем

на 80 см, изменилась внутригодовая амплитуда его колебаний относительно средних многолетних значений, наблюдаемых в естественных условиях. Плотина второй в каскаде Братской ГЭС была построена в 1961 г., а заполнение самого крупного по объему воды в России Братского водохранилища продолжалось до 1967 г. Строительство плотины третьей в каскаде Усть-Илимской ГЭС было начато в 1963 г., а закончилось в 1980 г. Усть-Илимское водохранилище заполнялось с 1974 по 1977 г. Нижней ступенью в Ангарском каскаде является Богучанская ГЭС, строительство которой продолжалось с 1974 до 2017 г., наполнение водохранилища было начато в 2012 г., проектная отметка водоема достигнута в июне 2015 г.

Каскад Ангарских ГЭС имеет суммарную действующую мощность 12 014,4 МВт и обеспечивает среднегодовую выработку электроэнергии – 66 млрд кВт·ч, или 6 % от общего потребления в стране. Он снабжает электроэнергией потребителей Сибири, в том числе такие крупные предприятия, как Братский алюминиевый завод, Братский и Усть-Илимский лесопромышленные комплексы, «Саянскхимпласт» и др. Громадная роль, которую Ангарский каскад ГЭС играет в экономике Восточной Сибири, вызывает практический интерес к изменениям, происходящим в водном балансе водохранилищ. Прежде всего это обусловлено тем, что гидроэнергетический потенциал зависит от водности потока, который характеризуется высокой межгодовой изменчивостью, обусловленной климатическими факторами. В экстремально маловодные периоды из-за необходимости поддержания мощности ГЭС на требуемом уровне начинают возникать противоречия между различными участниками водохозяйственного комплекса. В то же время, как показала практика последних десятилетий, на фоне климатических изменений риски водохозяйственных систем, связанные с учащением периодов экстремальной водности, усиливаются.

Накопленные к настоящему времени материалы режимных водных балансов трех водохранилищ Ангарского каскада позволяют провести анализ изменений их естественных составляющих, произошедших за последние десятилетия. Режимные водные балансы Богучанского водохранилища не составляются в силу временной ограниченности его эксплуатации (с 2015 г.).

Цель настоящей работы – выявить характер изменений составляющих приходной части водного баланса водохранилищ Ангарского каскада и проанализировать их обусловленность происходящими в регионе глобальными климатическими изменениями.

### **Материалы и методы оценки**

Проведенное исследование основывается на анализе режимных (годовых и месячных) данных о водных балансах Иркутского, Братского и

Усть-Илимского водохранилищ, подготовленных Иркутским управлением Росгидромета и опубликованных в изданиях Государственного водного кадастра [1–3]. Начало составления водного баланса Иркутского водохранилища приходится на 1956 г., Братского – на 1968 г. и Усть-Илимского – на 1975 г. С 1971 г. месячные водные балансы всех водохранилищ составляются по единообразным методикам, базирующимся на результатах многолетних наблюдений на сети озерных постов, прибрежных метеорологических станций и регулярных гидрометеорологических наблюдений на акватории. Для возможности сопоставления материалов по трем водохранилищам каскада в рамках статьи рассматриваются ряды составляющих приходной части их водного баланса за единый период с 1975 по 2020 г. Основное внимание уделено анализу годовых и месячных рядов суммарного и бокового притока к водохранилищам и осадков на их поверхность, как климатообусловленных составляющих приходной части баланса. Данные по испарению с зеркала водохранилищ, также являющемуся климатообусловленной составляющей водного баланса, не рассматриваются в силу того, что на предварительном этапе проверки информации было обнаружено, что ряды испарения характеризуются нестационарностью и наличием значительных выбросов отдельных значений как на месячном, так и на годовом уровне. В отличие от притока и осадков на водное зеркало, которые рассчитываются по результатам прямых гидрологических и метеорологических измерений, величина испарения рассчитывается по эмпирическим формулам в зависимости от метеорологических факторов и температуры поверхности воды, что обуславливает наличие возможных ошибок расчета в отдельные периоды.

Наряду с режимными данными водных балансов для анализа изменений, произошедших с составляющими приходной части водного баланса Ангарских водохранилищ, рассмотрены изменения характеристик гидрологического режима, напрямую зависящих от климатических факторов: многолетних рядов среднемесячной температуры поверхности воды на постах, расположенных в прибрежной зоне водохранилищ, дат установления ледостава и разрушения ледяного покрова, а также продолжительности периода, свободного ото льда. Оценены тренды изменений указанных характеристик.

Анализ изменений составляющих водного баланса и характеристик температурного и ледового режимов водохранилищ выполнен путем сопоставления их средних значений за три примерно одинаковые по продолжительности периода: с 1975 по 1990 г., когда нарушение естественных климатических условий в этом регионе практически не отмечалось; с 1991 по 2005 г., когда большинством авторов [4, 5] отмечались заметные изменения основных метеорологических характеристик в бассейне озера; и с 2006 по 2020 г., когда наблюдалось последнее экстремальное маловодье,

Таблица 1

Сведения о гидрологической изученности водохранилищ (по данным на 2020 г.)

Водохранилище	Характеристика водосбора	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Количество пунктов наблюдений на замыкающих створах притоков	Гидрометрическая изученность бассейнов, %	Количество ОГП на водохранилище	Количество осадкомерных пунктов на побережье
Иркутское, в том числе Байкал	Водосбор р. Ангары до Иркутской ГЭС, включая оз. Байкал	541 770 (540 000)	28 (26)	93,1	26 (в т. ч. 20 на Байкале)	20
Братское	Частный водосбор от Иркутской ГЭС до Братской ГЭС	157 530	13	63,1	10	7
Усть-Илимское	Частный водосбор от Братской ГЭС до Усть-Илимской ГЭС	47 080	3	15	8	8

вызавшее значительные водохозяйственные проблемы в Ангарском бассейне. В каждом из выделенных периодов присутствуют как годы с низкой, так и годы с высокой водностью, что позволяет проводить их сопоставление между собой.

Расчет месячных значений составляющих водного баланса выполнен в Иркутском УГМС по материалам гидрометеорологических наблюдений на водохранилищах (табл. 1). На озерных гидрометеорологических постах (ОГП) проводятся наблюдения за уровнем, температурой поверхности воды, ледовыми явлениями. На речных гидрологических постах (ГП) ведутся наблюдения за уровнем и расходами воды.

Суммарный поверхностный приток к створу Иркутского гидроузла рассчитывается с водосборной площади 541 770 км<sup>2</sup> (включая речную часть Иркутского водохранилища). Поверхностный приток по рекам с изученной части водосбора озера рассчитывается суммированием расходов воды, измеренных в замыкающих гидрометрических створах 28 притоков. До 1973 г. поверхностный приток с неосвоенной гидрометрическими измерениями площади, включая боковой приток в речную часть Иркутского водохранилища, вычислялся с по-

мощью установленных локальных зависимостей стока от средней высоты речных бассейнов по методике Афанасьева [6]. С 1973 г. поверхностный приток с неосвоенной гидрометрическими измерениями площади рассчитывается по средневзвешенным модулям стока рек-аналогов.

Следует отметить, что в разные периоды изменялось количество рек, по данным гидрометрического учета стока которых оценивался измеренный приток в озеро, – от 20 рек до начала 1970-х гг. до 29 рек в 1996 г.

Объем атмосферных осадков на акваторию Байкала определяется по ежемесячным картам изогий, построенным по наблюдениям на береговых и островных осадкомерных пунктах, расположенных на метеостанциях и гидрологических постах, с учетом площади озера 31,5 тыс. км<sup>2</sup>. В разные периоды количество пунктов изменялось: от 29 пунктов с 1960 г. до середины 1970-х гг. до 24–22 в 1980–1990-е гг. В настоящее время карты изогий составляются по данным наблюдений в 20 осадкомерных пунктах. Объем осадков на речную часть Иркутского водохранилища рассчитывается по данным метеостанции Патроны с учетом площади зеркала, соответствующей среднемесячному значению уровня воды.

Основной приток по р. Ангаре в Братское водохранилище принимается по данным ведомственного учета стока через Иркутский гидроузел, в Усть-Илимское – по данным учета стока через Братский гидроузел.

Боковой приток в Братское водохранилище определяется с площади водосбора 163 000 км<sup>2</sup>, включая площадь зеркала водоема, изменяющуюся в зависимости от среднемесячных значений уровня воды, в Усть-Илимское – с площади водосбора 49 000 км<sup>2</sup>, включая изменяющуюся площадь зеркала водоема. Измеренный боковой приток в эти водохранилища учитывается гидрометрическими измерениями на замыкающих гидростворах 13 рек для Братского водохранилища и 3 рек для Усть-Илимского. Боковой приток с неосвоенной измерениями площади водосбора рассчитывается по модулям стока рек-аналогов.

Объем осадков на зеркало Братского водохранилища определяется по данным наблюдений на 7, на зеркало Усть-Илимского – на 8 осадкомерных пунктах, расположенных по периферии водоема, с учетом площади зеркала, соответствующей среднемесячному значению уровня воды.

### Результаты исследования

*Характер климатических изменений в бассейне р. Ангары.* К основным метеорологическим факторам, характеризующим наблюдаемые с начала 1960-х гг. климатические изменения, относят, как правило, температуру и влажность воздуха, осадки, скорость ветра. Общее потепление оказывает влияние на изменения ряда климатических характеристик посредством различных прямых и обратных связей в климатической си-

стеме [7]. В частности, это касается характеристик гидрологического цикла, таких как средние сезонные осадки и показатели экстремальности режима осадков; облачность; характеристики сезонного снежного покрова; речной сток; замерзание и вскрытие водных объектов. Рост содержания водяного пара в атмосфере при повышении температуры потенциально способствует росту осадков, в особенности экстремальных осадков. В среднем по территории России увеличение количества осадков диагностируется на интервале 1976–2020 гг.

Согласно оценкам, выполненным специалистами Климатического центра Росгидромета [7–9], на территории Сибирского федерального округа наблюдается заметное повышение температуры воздуха. В частности, в период с 1960 по 2020 г. средняя годовая температура воздуха в Иркутске возросла примерно на 2,5 °С. Рост температуры отмечался как в теплый, так и в холодный периоды года. Осадки увеличились в основном в холодный период. Однако из-за их малого количества в зимний сезон это существенно не отразилось на изменении годовых сумм.

Темп роста среднегодовой глобальной приповерхностной температуры (суша и море) составляет за период 1976–2020 гг. 0,179 °С за десятилетие, а температуры над сушей – более чем в полтора раза выше – 0,295 °С за десятилетие [7]. Территория России теплеет почти вдвое быстрее: 0,51 °С за десятилетие. Некоторое похолодание наблюдалось между 2005 и 2015 гг. в осенние сезоны. Весной и особенно летом потепление происходит практически монотонно. Наиболее быстрое потепление наблюдается на азиатской территории РФ: 0,71 °С за десятилетие. Потепление наблюдается во все сезоны, однако на сезонные тренды накладываются значительные междесятилетние колебания, особенно выраженные зимой.

Согласно данным [4], на фоне глобальных процессов, сопровождающихся значительным повышением температуры в Арктике, в последние десятилетия происходит изменение климата в бассейне р. Ангары. В работах [10, 11] отмечается повышение летних показателей давления и понижение зимних, сопровождаемые существенным снижением частоты проявлений экстремально низких температур зимой и повышением вероятности проявления экстремально высоких температур летом. Наряду с положительными аномалиями летних температур, способствующими учащению периодов низкой водности оз. Байкал, в работе [12] отмечается ослабление Юго-Восточного муссона, с чем авторы указанной работы связывают последний маловодный период на р. Селенге.

Как правило, маловодные периоды на оз. Байкал совпадают с маловодными периодами во всем Ангарском каскаде. При этом, как показывает анализ синоптических данных бассейна Иркутского водохранилища, на большей его части (кроме южных районов бассейна р. Селенги) среднегодовые показатели температуры воздуха в последнее 25-летие увеличи-



лись на 1–2 °С по отношению к предыдущему периоду [4]. По данным [13], основное повышение температуры воздуха в бассейне Иркутского водохранилища отмечается в феврале, апреле и ноябре. Наряду с этим на всей территории бассейна происходит снижение годовых сумм осадков. В среднем по водосбору оз. Байкал оно составляет 8,7 мм за десятилетие, а в пределах бассейна р. Селенги – 10,6 мм [13]. Наиболее заметные изменения, выражающиеся в снижении среднемноголетних сумм осадков за месяц на 8,2, 12,0 и 6,8 мм, отмечены в июле, августе и сентябре соответственно.

Глобальное изменение климата, выражающееся в пределах Ангарского бассейна в повышении давления и температуры воздуха в летний период и понижении давления и снижении частоты проявлений экстремально низких температур зимой, существенно повлияло на пространственно-временные гидрометеорологические характеристики и привело к внутригодовому перераспределению естественных составляющих водного баланса Ангарских водохранилищ.

**Многолетние изменения ледово-термического режима Ангарских водохранилищ.** Соответственно климатическим изменениям в бассейне Ангары происходят изменения в ледово-термическом режиме рассматриваемых водохранилищ.

Анализ данных наблюдений за ледовыми явлениями на водохранилищах Ангарского каскада свидетельствует о заметном смещении дат окончания ледостава и очищения ото льда на более ранние сроки и, как следствие, об увеличении на 10–15 дней периода, свободного ото льда. Практически на всех гидрологических постах, расположенных по периметру водохранилищ, даты окончания ледостава и очищения ото льда в третьем рассматриваемом периоде наступают на 7–12 дней раньше, чем в первом. Даты начала ледостава на большинстве постов, расположенных на Братском, Усть-Илимском и на речной части Иркутского водохранилища, значимых изменений не претерпели (рис. 1). Сдвигка на более поздние сроки начала ледостава отмечена лишь на ряде постов, расположенных на оз. Байкал (рис. 2). Причем в районах, где ледостав наступал раньше (в конце декабря–начале января), сдвигка наиболее выражена и достигает недели, тогда как в районах, в которых ледостав наступает позже (в конце первой декады января), сдвигка практически не заметна.

Изменения сроков ледовых явлений связаны с наблюдающимися в регионе изменениями климата, проявляющимися в повышении весенних температур. На оз. Байкал изменения ледового режима выражены наиболее ярко. С ростом весенних температур воздуха происходит повышение среднемесячной температуры воды Ангарских водохранилищ (рис. 3). Анализ многолетних данных свидетельствует о ее увеличении между первым и третьим периодами в апреле месяце на 0,1–0,4 °С (наибольший рост



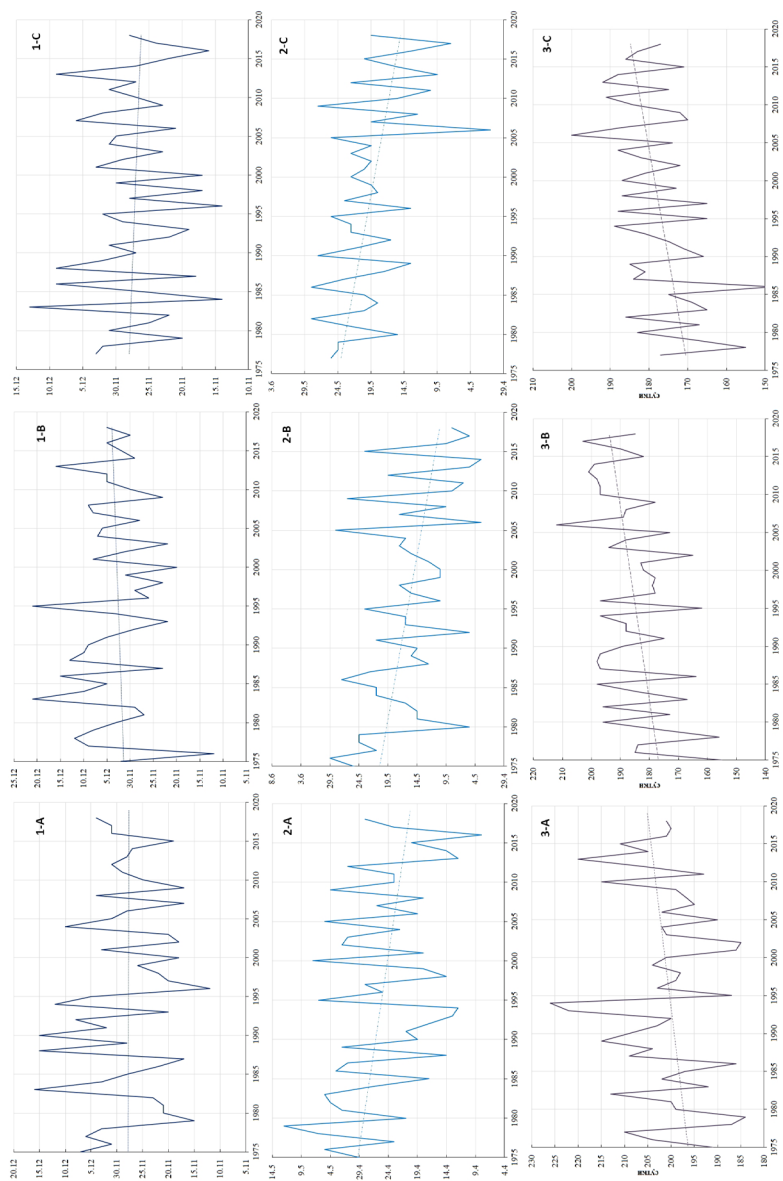


Рис. 1. Многолетние изменения дат начала ледостава (1), очищения ото льда (2) и продолжительность свободного ото льда периода (3) на водохранилищах Ангарского каскада по данным постов, расположенных на ГЭС:

А – Иркутская ГЭС; В – Братская ГЭС; С – Усть-Илимская ГЭС.

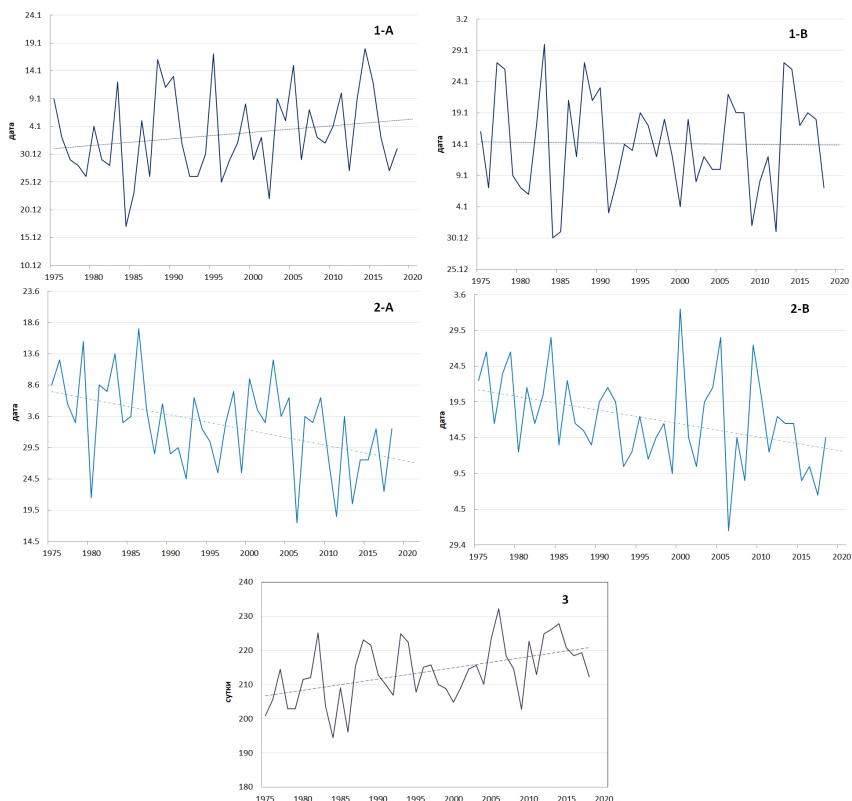


Рис. 2. Многолетние изменения дат начала ледостава (1) и очищения ото льда (2) на оз. Байкал по данным постов Томпа (А) и Танхой (В), продолжительность свободного ото льда периода средняя по всем постам на оз. Байкал (3)

наблюдается на постах на Иркутском водохранилище), а в мае – на 0,7–1,5 °С (наибольший рост на постах на Братском и Усть-Илимском водохранилищах). Несмотря на то, что наиболее заметное повышение температуры воздуха в Ангарском бассейне отмечается в апреле [13], в силу того, что на большей части водохранилищ продолжает стоять лед, увеличение средней температуры воды ярче выражено в мае.

Наблюдающееся в Ангарском бассейне повышение летних показателей давления, сопровождаемое ростом температуры воздуха, приводит к повышению среднеемесячных значений температуры воды водохранилищ каскада во все месяцы летнего периода. Анализ многолетних рядов среднеемесячной температуры воды свидетельствует о ее заметном росте в летние месяцы на 1–3 °С (рис. 4). На оз. Байкал и на речной части Иркутского

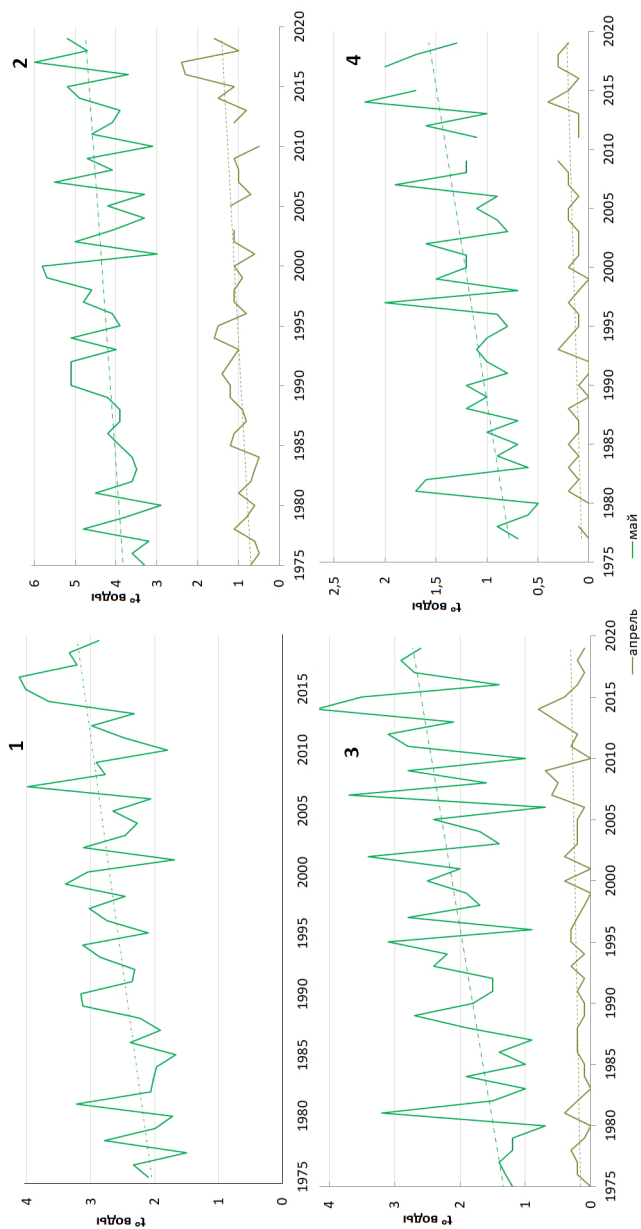


Рис. 3. Многолетние изменения среднемесячной температуры воды в апреле и мае месяцах на оз. Байкал (среднее по озеру) (1) и на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

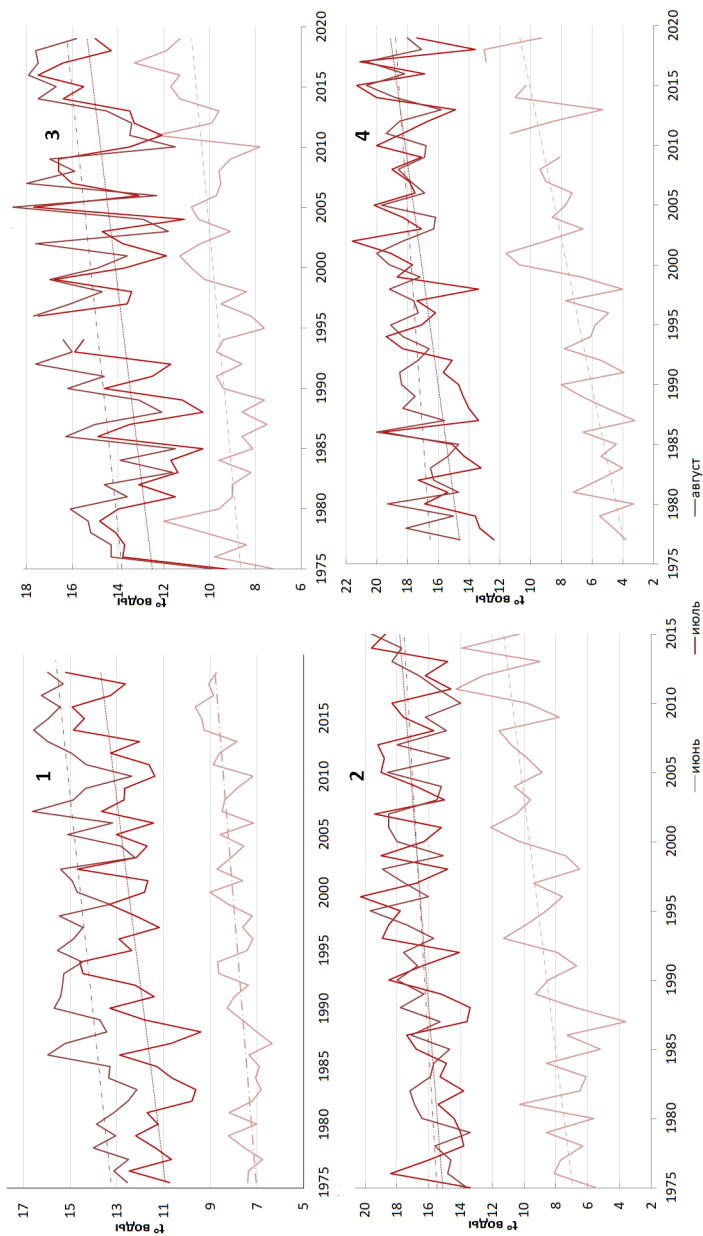


Рис. 4. Многолетние изменения среднемесячной температуры воды в летние месяцы на оз. Байкал (1), на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

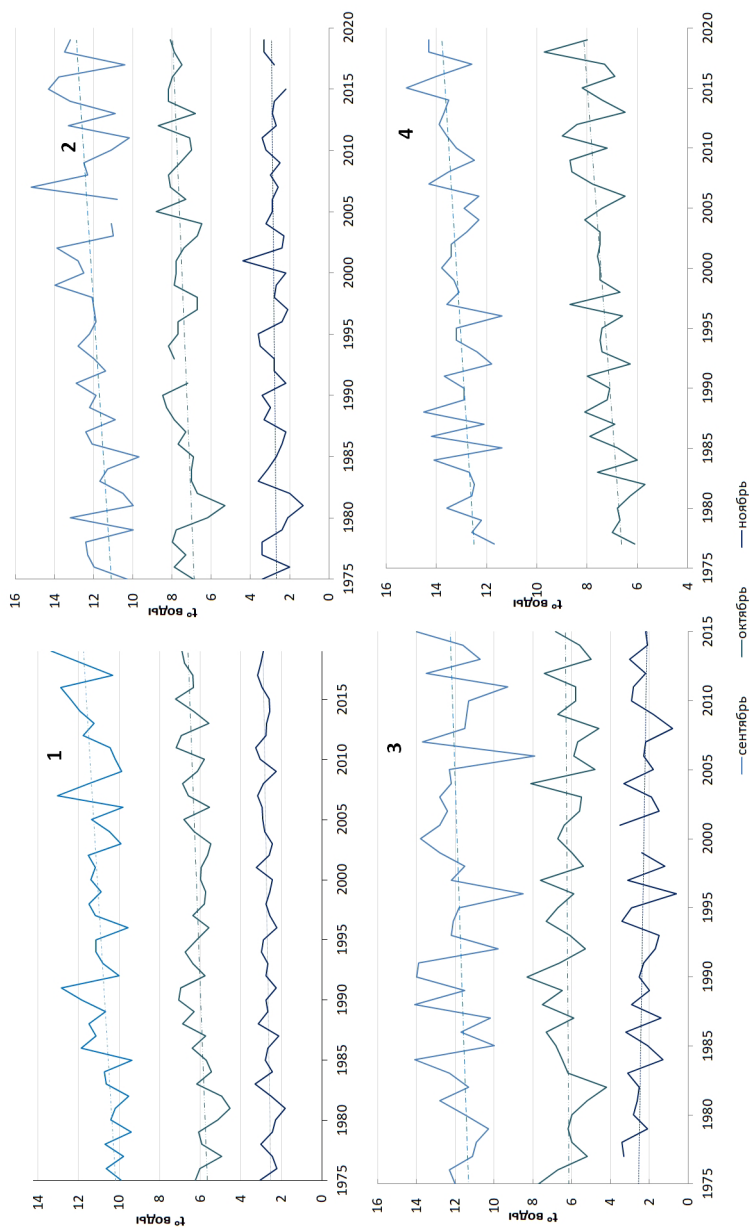


Рис. 5. Многолетние изменения среднемесячных значений температуры воды в осенние месяцы на оз. Байкал (1), на постах у ГЭС Иркутского (2), Братского (3) и Усть-Илимского (4) водохранилищ

водохранилища рост средней июньской температуры воды между первым и третьим периодами составил около  $1,5^{\circ}\text{C}$ , а июльской и августовской – около  $2^{\circ}\text{C}$ . На Братском и Усть-Илимском водохранилищах на всех постах прослеживается выраженный рост средней июньской температуры воды (на Братском водохранилище на  $4^{\circ}\text{C}$ , а на Усть-Илимском – на  $5^{\circ}\text{C}$ ), а также существенный рост средней температуры июля месяца (на 2 и  $2,5^{\circ}\text{C}$  соответственно), тогда как рост температуры в августе (около  $1^{\circ}\text{C}$ ) выражен не столь сильно.

Анализ многолетних рядов среднемесячной температуры воды Ангарских водохранилищ в осенний период свидетельствует о ее незначительных изменениях (рис. 5), более выраженных лишь в сентябре (увеличение средних температур в последнем периоде на  $1^{\circ}\text{C}$  на Иркутском водохранилище, на  $0,5^{\circ}\text{C}$  – на Братском и Усть-Илимском).

**Климатические изменения притока к водохранилищам и осадков на их поверхность.** Период с 1975 по 2020 г. характеризовался последовательной сменой маловодных и многоводных фаз. На рис. 6 представлены многолетние изменения суммарного притока к водохранилищам Ангарского каскада и разностные интегральные кривые. На начало рассматриваемого периода приходится экстремальное маловодье, продолжавшееся до весны 1982 г., когда уровень Байкала опустился до отметки 455,27 м ТО, т. е. ниже проектного уровня мертвого объема (455,54 м ТО), а уровень Братского водохранилища приблизился к уровню мертвого объема (392 м ТО). С мая 1982 г. уровень воды в верховье р. Ангары начал резко расти. Как видно из характера интегральных кривых (см. рис. 6), период с 1983 по 1995 г. можно охарактеризовать как многоводный, когда приток воды в водохранилища практически ежегодно был выше нормы, рассчитанной для периода совместного функционирования трех Ангарских ГЭС.

Максимальный годовой приток в Иркутское водохранилище наблюдался в 1988 г. и составлял 85 000 млн  $\text{м}^3$ , в Братское – в 1985 г. (114 000 млн  $\text{м}^3$ ), в Усть-Илимское – в 1995 г. (125 000 млн  $\text{м}^3$ ). С 1996 года приток воды в водохранилища сократился и вплоть до 2013 г. колебался около нормы в пределах 10 % от среднемноголетних значений, лишь в отдельные годы опускался ниже. В 2014 г. летний приток в водохранилища оказался существенно ниже нормы, и период с 2014 по 2017 г. считается экстремально маловодным, настолько, что с октября 2014 г. для предотвращения снижения уровня оз. Байкал ниже законодательно допустимого уровня расходы через Иркутскую ГЭС были сокращены до предельно допустимых минимальных значений – 1300  $\text{м}^3/\text{с}$ . За рассматриваемый 46-летний период функционирования трех Ангарских ГЭС минимальные значения годового притока в Иркутское водохранилище приходятся на 2015 г. (42 610 млн  $\text{м}^3$ ), а в Братское – на 2017 г. (63 380 млн  $\text{м}^3$ ). Минимальный приток в Усть-Илимское водохранилище в период последнего

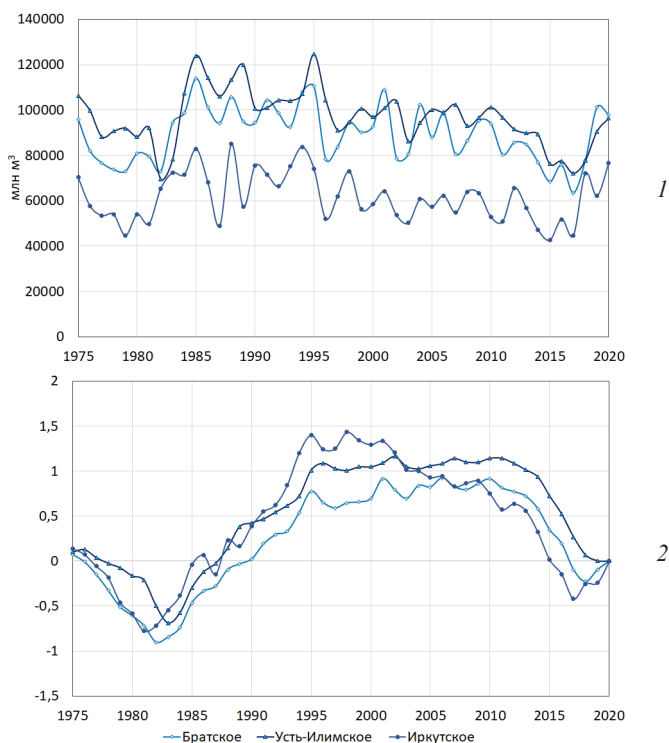


Рис. 6. Многолетние изменения суммарного притока к водохранилищам Ангарского каскада (1) и разностные интегральные кривые (2)

маловодья в 2017 г. составил 72 158 млн  $\text{м}^3$ , его более низкие значения отмечались лишь в 1982 г. (69 550 млн  $\text{м}^3$ ). С мая 2018 г. уровень воды в верховье р. Ангары начал быстро расти, так что период с 2018 г. можно охарактеризовать как период повышенной водности.

В связи с тем, что приток воды по р. Ангаре обеспечивает 63 % суммарного притока в Братское водохранилище и 93 % в Усть-Илимское, периоды водности для всего каскада в целом совпадают с соответствующими периодами на оз. Байкал. Различия наблюдаются лишь в короткие периоды и чаще всего объясняются асинхронностью бокового притока к разным водохранилищам. Коэффициент корреляции рядов суммарного годового притока в Иркутское и Братское водохранилища составляет 0,74, а в Братское и Усть-Илимское – 0,72. В то же время коэффициент корреляции рядов годового бокового притока в Братское и Усть-Илимское низкий – 0,32.

Сопоставление осредненных значений суммарного притока в Ангарские водохранилища за три рассматриваемых периода (табл. 2) показыва-



Таблица 2

**Средние значения годового притока к Ангарским водохранилищам, млн м<sup>3</sup> (числитель) и коэффициент вариации (знаменатель) за отдельные периоды совместного функционирования Ангарских ГЭС**

Период	Иркутское	Братское	Усть-Илимское
Общий приток			
1975–2020	<u>61 645</u> 17,7	<u>89 162</u> 13,7	<u>96 856</u> 12,8
1975–1990	<u>63 137</u> 19,6	<u>89 481</u> 14,2	<u>99 411</u> 15,1
1991–2005	<u>63 882</u> 15,4	<u>94 120</u> 11,8	<u>100 959</u> 8,6
2006–2020	<u>57 818</u> 17,0	<u>84 443</u> 13,4	<u>89 994</u> 10,8
Макс.	84 954 (1988)	114 000 (1985)	124 570 (1995)
Мин.	42 608 (2015)	63 380 (2017)	69 550 (1982)
Боковой приток			
1975–2020		<u>33 493</u> 17,1	<u>6914</u> 22,9
1975–1990		<u>33 159</u> 14,3	<u>7678</u> 21,4
1991–2005		<u>33 943</u> 18,9	<u>6628</u> 16,7
2006–2020		<u>33 399</u> 18,8	<u>6384</u> 26,5
Макс.		46 450 (2001)	11 260 (1983)
Мин.		22 370 (2017)	3988 (2017)

ет, что его наименьшие значения приходятся на последний пятнадцатилетний период, включающий экстремальное маловодье 2014–2017 гг. Среднее за последний период значение суммарного притока в Иркутское и Братское водохранилища составило 94 % нормы, в Усть-Илимское – 93 %. Обращает на себя внимание, что осредненное за последний период значение бокового притока в Братское водохранилище было близко к норме, а в Усть-Илимское составило 92 % нормы (Иркутское водохранилище, включающее акваторию оз. Байкал, – верхнее в каскаде, поэтому к нему рассматривается только общий приток). Наибольшие значения суммарного притока наблюдались в среднем периоде 1991–2005 гг., характеризовавшемся отсутствием выраженного маловодья. На этот период приходятся и наиболее

высокие значения бокового притока в Братское водохранилище. Боковой приток в Усть-Илимское водохранилище постепенно сокращался на протяжении всего времени его существования, его осредненное за последний период значение в 1,2 раза ниже, чем за первый. За период 1975–2020 гг. выявлен значимый нисходящий тренд как бокового, так и суммарного притока к Усть-Илимскому водохранилищу.

Сопоставление коэффициентов вариации годовых значений общего притока в водохранилища за рассмотренные периоды свидетельствует, что его наибольшие значения были в первом периоде, наименьшие – во втором. Коэффициент вариации годовых значений бокового притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам в последние десятилетия повысился.

Анализ многолетних изменений приходных составляющих водного баланса Ангарских водохранилищ не показал значимых трендов годового притока к Иркутскому и Братскому водохранилищам и выявил нисходящий тренд годового притока к Усть-Илимскому водохранилищу. Более существенные изменения коснулись внутригодового распределения притока к указанным водохранилищам.

На рис. 7 представлены изменения среднемесячных значений суммарного и бокового притока к Ангарским водохранилищам за рассматриваемый период.

Как видно из рис. 7, происходит приращение доли бокового притока в холодный период года к Ангарским водохранилищам относительно годового объема. Доля притока за ноябрь–март к Иркутскому водохранилищу (рис. 8) выросла на 1,9 % (в 1975–1990 гг. она в среднем составляла 9,7 %, в 1991–2005 и 2006–2020 гг. – около 11,6 %). Тенденция увеличения зимнего притока четко проявляется и при рассмотрении рядов притока за весь период функционирования Иркутской ГЭС, т. е. с 1956 г. по настоящее время [5]. При рассмотрении рядов месячного притока к Иркутскому водохранилищу выявлены значимые восходящие тренды рядов притока с ноября по март.

Доля бокового притока в холодную часть года к Братскому водохранилищу с 1975 г. выросла на 1,7 %, к Усть-Илимскому – на 1,9 %. Ее основное повышение произошло между первым и вторым рассматриваемыми периодами. При этом приращение доли суммарного притока в холодную часть года к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам не наблюдается, что связано с характером регулирования стока на ГЭС в холодное время года, а именно снижением зимних попусков на Иркутском и Братском ГУ в последние десятилетия (рис. 9). Как уже указывалось выше, приток по Ангаре составляет основной объем притока к обоим водохранилищам. За счет его регулирования на гидроузлах отмеченная для бокового притока тенденция роста в холодную часть года при рассмотрении суммарного притока незаметна (см. рис. 7). Напротив, наблюдается его

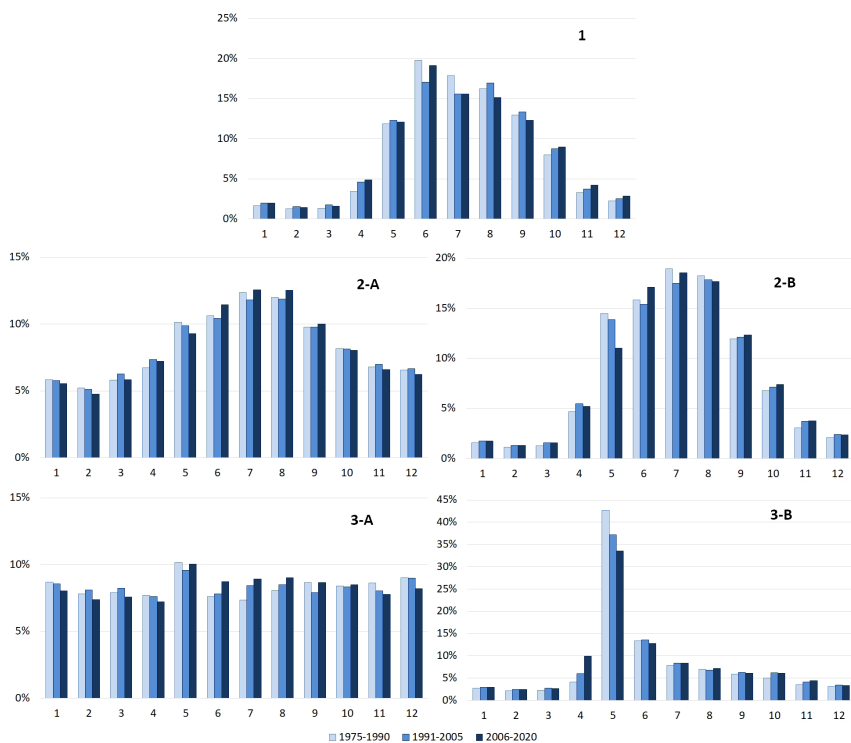


Рис. 7. Внутригодовое распределение притока к Ангарским водохранилищам в % от годового:

1 – Иркутское; 2 – Братское; 3 – Усть-Илимское; А – суммарный приток; В – боковой приток

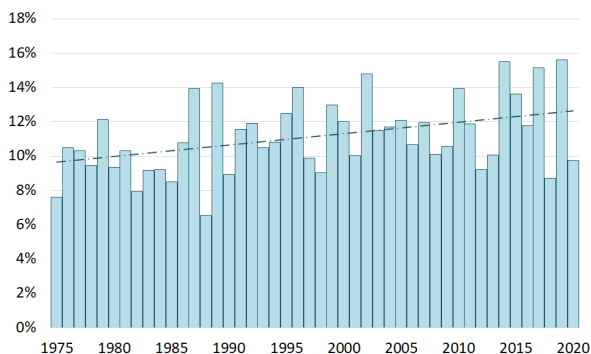


Рис. 8. Доля зимнего притока к Иркутскому водохранилищу в процентах от годового

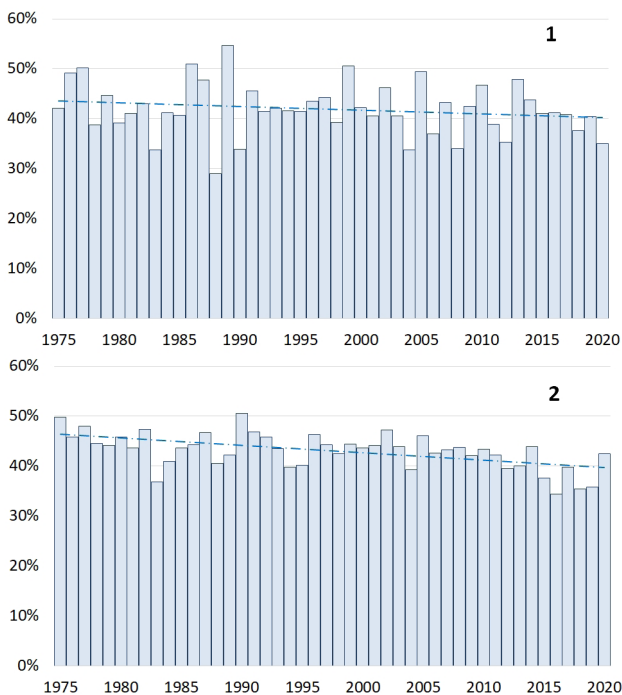


Рис. 9. Доля стока через ГУ Иркутского (1) и Братского (2) водохранилищ за ноябрь–март месяцы в процентах от годового

снижение, так как сокращение зимних попусков превосходит наметившуюся тенденцию повышения зимнего стока в естественных условиях.

На фоне повышения среднемесячных температур воздуха и воды в рассматриваемом бассейне для всех Ангарских водохранилищ за период 1975–2020 гг. фиксируется тенденция сдвижки половодья на более ранние сроки. Доля притока в апреле к Иркутскому водохранилищу в третьем периоде увеличилась на 1,4 %, бокового и основного притока к Братскому – на 0,5 %, к Усть-Илимскому – на 5,8 % (рис. 10). При этом к Усть-Илимскому водохранилищу существенно снизился приток в мае месяце (около 9 %).

Чаще всего годы высокой водности на Ангаре определяются повышенным половодьем и высоким паводковым стоком в летние и осенние месяцы. Коэффициенты корреляции между значениями месячного и годового притока возрастают к лету и постепенно снижаются с начала осени (табл. 3). Годовой приток в Иркутское водохранилище прежде всего определяется притоком за июль–октябрь. Суммарный годовой приток в Братское и Усть-Илимское водохранилища связан с режимом попусков на

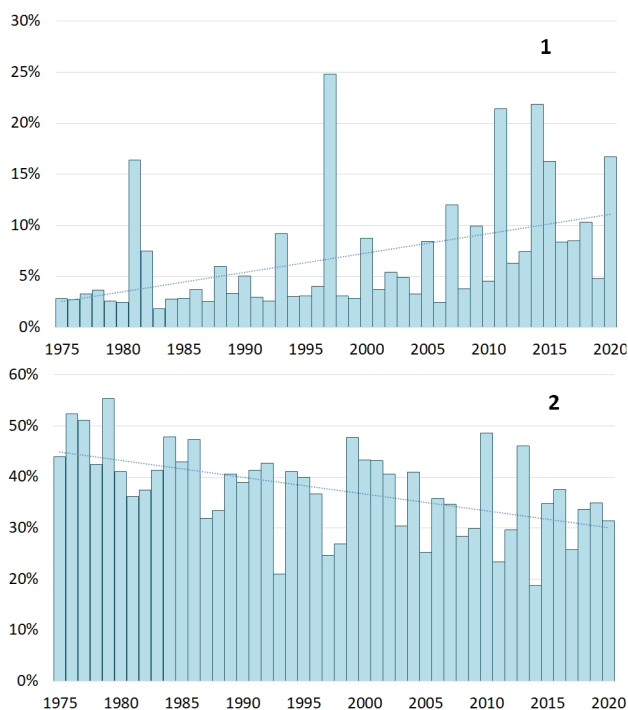


Рис. 10. Доля бокового притока к Усть-Илимскому водохранилищу за апрель (1) и май (2) месяцы в процентах от годового

Иркутском и Братском гидроузлах. При этом боковой приток в Братское водохранилище (37 % суммарного притока) определяется притоком во вторую часть года, а в Усть-Илимское (лишь 7 % суммарного притока) – притоком за май и июнь месяцы.

За весь рассматриваемый период четко прослеживается тенденция снижения притока в Иркутское водохранилище в летние месяцы (рис. 11). Доля суммарного притока в водохранилище за июнь–август снизилась на

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции между месячными и годовым значениями бокового притока к Ангарским водохранилищам**

Водохранилище	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Иркутское	0,25	0,31	0,27	0,18	0,24	0,51	0,77	0,80	0,81	0,80	0,66	0,65
Братское	0,15	0,19	0,06	0,16	0,59	0,66	0,72	0,60	0,59	0,65	0,67	0,66
Усть-Илимское	0,47	0,49	0,29	0,02	0,83	0,76	0,62	0,55	0,61	0,57	0,60	0,69

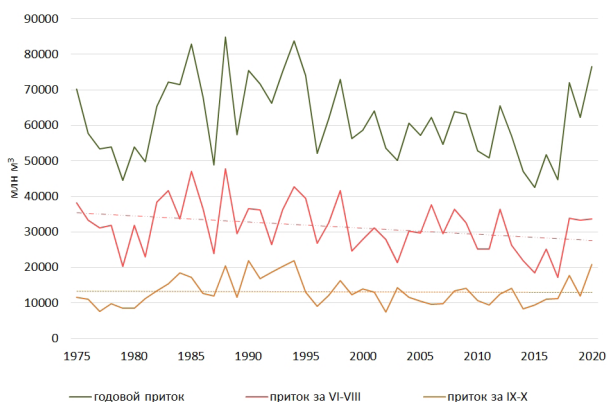


Рис. 11. Многолетняя динамика притока к Иркутскому водохранилищу в летние и осенние месяцы в сравнении с годовым притоком (в млн м³)

4 % (с 54 % в первую часть периода до 50 % в третью). При этом изменений доли летнего притока в Братское и Усть-Илимское водохранилища не произошло. Доля суммарного притока в летние месяцы в Усть-Илимское водохранилище даже немного выросла (с 23 до 26 %) за счет увеличения летних пусковок через Братскую ГЭС. Тенденция снижения доли летнего притока в Иркутское водохранилище определяется происходящими в Ангарском бассейне изменениями климата, динамикой повышения летних показателей давления (антициклональная циркуляция), сопровождаемых ростом температур.

В последнем рассматриваемом периоде, когда внутригодовое перераспределение притока в водохранилища Ангары стало наиболее выражено, годы повышенной водности совпадали с повышенными значениями как летнего, так и осеннего стока. На примере Иркутского водохранилища (см. рис. 11) можно заметить, что если в первом периоде характер колебаний годового притока повторял характер колебаний летнего притока, то в последнем периоде усилилась его зависимость от притока за сентябрь и октябрь месяцы. При этом коэффициент корреляции между суммарным летним и годовым притоком в водохранилище последовательно снижался с 0,93 в первом периоде до 0,87 в третьем.

Анализ изменений внутригодового распределения осадков (рис. 12), выпадающих на зеркало водохранилищ Ангарского каскада, также свидетельствует о тенденции их роста в холодное время года (доля осадков, выпадающих с ноября по март, выросла на 2–4 %) и снижения в середине лета. В то же время при рассмотрении осадков за каждый отдельный месяц значимый восходящий тренд выявлен лишь для осадков за март, выпадающих на зеркало Братского водохранилища. Как показано на рис. 13,

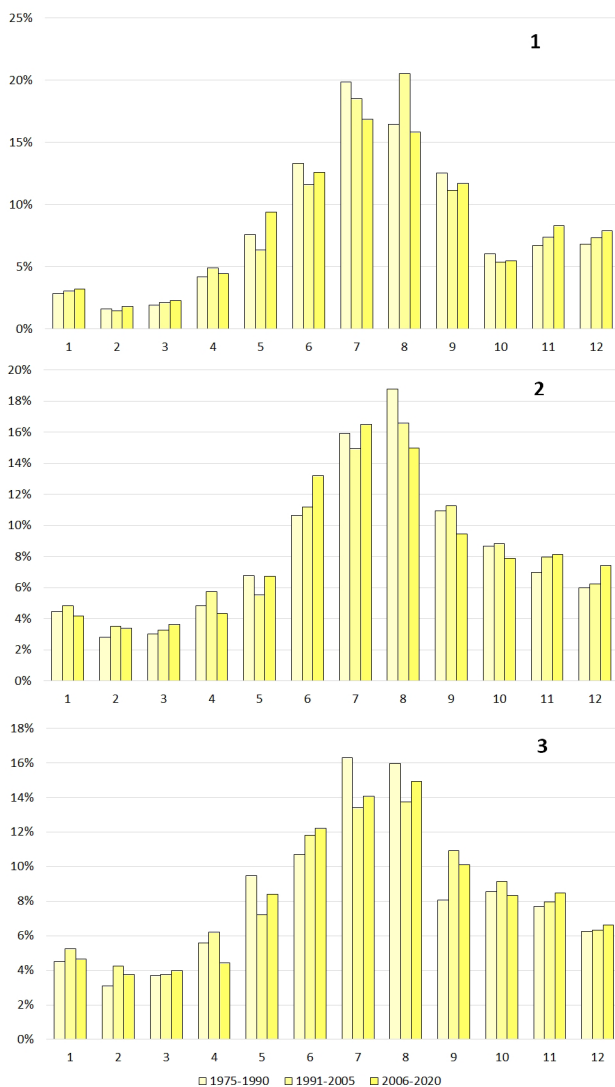


Рис. 12. Внутригодовое распределение осадков, выпадающих на поверхность Ангарских водохранилищ в % от годового:

1 – Иркутское; 2 – Братское; 3 – Усть-Илимское



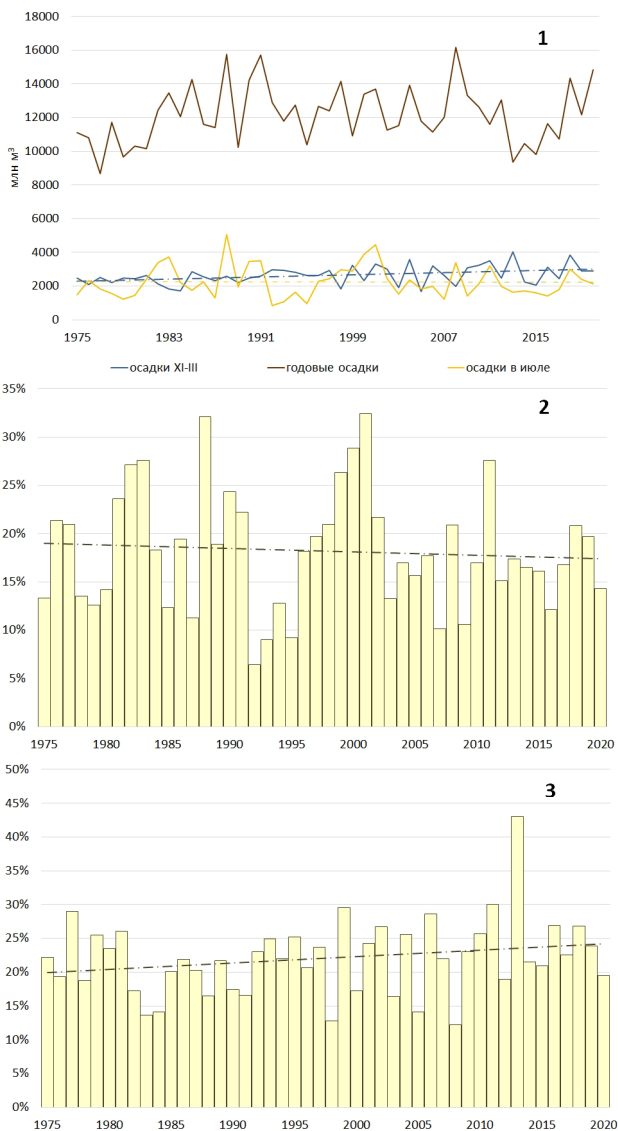


Рис. 13. Многолетняя динамика выпадения осадков на зеркало Иркутского водохранилища в млн м<sup>3</sup> (1) и доля осадков за июль (2) и суммарных осадков за ноябрь–март (3) месяцы в процентах от годового

наблюдается тенденция снижения осадков в середине лета на зеркало Иркутского водохранилища, где в июле месяце их доля сократилась на 2 %, тогда как доля осадков за холодное время года выросла на 4 %.

Тренды годовых сумм осадков на зеркало Братского и Усть-Илимского водохранилищ не выявлены, изменения коснулись лишь перераспределения осадков внутри года.

Характер распределения осадков внутри года для всех Ангарских водохранилищ схожий и характеризуется их максимумом в течение лета и небольшими значениями в холодный период. Происходящие изменения приводят к большей выравненности выпадения осадков в течение года. Коэффициент вариации осредненных месячных значений осадков на зеркало Иркутского водохранилища за три периода снизился с 0,71 до 0,61, Братского – с 0,60 до 0,54, Усть-Илимского – с 0,52 до 0,47. В то же время корреляция между годовыми значениями осадков, выпадающих на зеркало трех водохранилищ, отсутствует (коэффициенты составляют 0,12–0,34). Она существенно ниже, чем корреляция между годовыми значениями бокового притока к каждому водохранилищу и осадками на его поверхность (0,26–0,48).

### Заключение

Проведенный анализ режимных водных балансов Иркутского, Братского и Усть-Илимского водохранилищ за период их совместного функционирования показал, что изменения естественных составляющих водного баланса водохранилищ согласуются с характером изменений климата, наблюдающихся в Ангарском бассейне. Годовые величины притока к большинству водохранилищ не претерпели сильных изменений, отмечен лишь значимый нисходящий тренд суммарного годового притока к Усть-Илимскому водохранилищу. В то же время выявлено внутригодовое перераспределение естественных составляющих приходной части водного баланса.

На фоне понижения зимних показателей давления, приводящих к смягчению зим, в холодный период года наблюдается увеличение доли бокового притока ко всем водохранилищам. Доля притока за ноябрь–март к Иркутскому водохранилищу выросла на 1,9 %, доля бокового притока к Братскому водохранилищу – на 1,7 %, к Усть-Илимскому – на 1,9 %. На фоне снижения зимних попусков через Иркутский гидроузел с октября по январь и через Братский гидроузел с октября по апрель повышение суммарного притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам не выявлено.

На фоне роста температуры воздуха, наиболее выраженного в апреле месяце, для всех Ангарских водохранилищ отмечается сокращение периода ледостава и тенденция сдвиги половодья на более ранние сроки.

Доля притока в апреле к Иркутскому водохранилищу увеличилась на 1,4 %, бокового и основного притока к Братскому – на 0,5 %, к Усть-Илимскому – на 5,8 %. При этом к Усть-Илимскому водохранилищу существенно снизился суммарный приток в мае месяце (около 9 %).

На фоне повышения летних показателей давления, сопровождаемых ростом температуры воздуха и воды, четко прослеживается тенденция снижения притока в Иркутское водохранилище в летние месяцы. Доля суммарного притока в водохранилище за июнь–август в годовом его объеме снизилась на 4 %. При этом изменений доли летнего притока в Братское и Усть-Илимское водохранилища не выявлено. Доля притока в сентябре–октябре месяцах во все водохранилища каскада значимых изменений не претерпела.

Отмечено, что если в первом периоде совместной работы Ангарских ГЭС, 1975–1991 гг., характер колебаний годового притока в Иркутское водохранилище повторял характер колебаний летнего притока, то в последнем периоде, 2006–2021 гг., усилилась его зависимость от притока за сентябрь и октябрь месяцы. Коэффициент корреляции между суммарным летним и годовым притоком в водохранилище последовательно снижался с 0,93 в первом периоде до 0,87 в третьем.

Анализ изменений внутригодового распределения осадков, выпадающих на зеркало водохранилищ Ангарского каскада, свидетельствует о тенденции их роста в холодное время года (доля осадков, выпадающих с ноября по март, выросла на 2–4 %) и снижения в теплое время года, что согласуется с наблюдающимся в Ангарском бассейне изменением циркуляции атмосферных в разные сезоны года.

### Литература

1. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах (Дополнения к гидрологическим ежегодникам, Т. 7, вып. 2–4), 1956–1959 гг.
2. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 7. Бассейн Карского моря (восточная часть), вып. 2–4. Бассейн Ангары). М.: Гидрометеоиздат, 1960–1980 гг.
3. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1, вып. 13–15. Бассейн р. Ангары, оз. Байкал и р. Лены (верхнее течение). Ч. 2. Озера и водохранилища. Иркутск: Иркутское УГМС, 1981–2020 гг.
4. Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н. Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата // Энергетика и климат. 2017. Вып. 62 (4). С. 62–70.
5. Никитин В.М., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н., Бережных Т.В., Георгиевский В.Ю., Измайлова А.В., Молчанова Т.Г., Фуксова Т.В. Уровненный режим озера Байкал // География и природ. ресурсы. 2022. № 5. С. 36–44.

6. *Афанасьев А.Н.* Водный баланс озера Байкал // Тр. Байкальской Лимнологической станции. 1960. Т. 18. С. 155–241.
7. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: «Научные технологии», 2022. 124 с.
8. *Школьник И.М., Аментьева Е.М., Ключева М.В., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Фасолько Д.В., Разова Е.Н., Рудакова Ю.Л., Павлова В.Н.* Федеральные округа России: изменения климата и экономика // Тр. ГГО. 2022. Вып. 604. С. 55–201.
9. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 30 с.
10. *Абасов Н.В., Бережных Т.В., Ветрова В.В.* Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС // Тр. Британско-российской конференции «Гидрологические последствия изменения климата». Барнаул: Пять плюс, 2009. С. 42–49.
11. *Shkorba S., Ponomarev P., Dmitrieva E.* Linkages of climatic anomalies in Arctic, Asian Pacific and Indo-Pacific regions // Proceedings of Joint Science and Education Conference: Arctic Dialogue in the Global World. Ulan-Ude: Buryat State University Publishing Department, 2015. P. 122–125.
12. *Бережных Т.В., Марченко О.Ю., Абасов Н.В., Мордвинов В.И.* Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природ. ресурсы. 2012. № 3. С. 61–68.
13. *Сутырина Е.Н.* Современные тенденции изменения климатических условий в пределах водосбора оз. Байкал // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2019. Т. 25, № 5. С. 49–55.