

Научная статья

УДК 556

DOI: 10/24412/2658-4255-2023-1-33-44



EDN: CGLAXD

Для цитирования:

Шпакова Р.Н., Wang P.
Изменение характера
многолетних колебаний стока
рек Южной Якутии и
прилегающих районов
российского Дальнего Востока
в условиях глобального
потепления // Российская
Арктика. 2023. Том 5(1).
С. 33–44
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>

Получена: 17.10.2022
Принята: 15.03.2023
Опубликована: 12.04.2023

For citation:

Shpakova R.N., Wang P.
Change in Perennial Runoff
Fluctuations of the Rivers in
South Yakutia in the Context
of Global Warming // Russian
Arctic, 2023; Vol 5(1):
p.p. 33-44. (In Russ.)
<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>



ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРА МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА РЕК ЮЖНОЙ ЯКУТИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ РАЙОНОВ РОССИЙСКОГО ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Р.Н. Шпакова^{1,*} , Ping Wang (王平) ^{2,**}

¹ Московский государственный институт международных отношений
(университет), Москва, Россия

² Институт географических наук и исследования природных ресурсов, Китайская академия наук, Пекин, Китай

E-mail: *production2003@mail.ru, **wangping@igsnr.ac.cn

Аннотация

В предлагаемой статье приводятся результаты исследования особенностей изменения характера многолетних колебаний водного режима рек в условиях развивающегося глобального потепления. Речные бассейны компактно расположены в пределах одной природно-климатической зоны – региона Южной Якутии и прилегающих районов Иркутской, Амурской областей, Хабаровского и Забайкальского краев Российской Федерации. Бассейны рассмотренных 6 рек, за небольшим исключением, охватывают всю территорию Южной Якутии.

К основным тенденциям в изменениях характера многолетних колебаний стока в современный период (1988-2018 гг.) следует отнести рост водности на большинстве рек на 16-34%, который, тем не менее, не привел к нарушению стационарности рядов годового стока по математическому ожиданию. В большей степени возросла дисперсия годового стока: на 5 реках из 6 ее рост составил от 8 до 254%, в результате чего на трех реках (Чара, Тимптон, Амга) ряды годового стока утратили стационарность по дисперсии.

В целом по региону отмечен рост частоты наступления экстремальных событий – превышения исторического максимального годового стока базового периода или наступления годового стока, меньшего, чем исторический минимальный годовой сток базового периода, причем частота постепенно увеличивается в пределах длительности современного периода. Выявлена географическая закономерность изменения характера многолетних колебаний речного стока: в наибольшей степени эти изменения проявились на реках западной части Южной Якутии (Чара, Олекма), в наименьшей – на реках восточной части (Учур, Мая).

Ключевые слова: глобальное потепление, Южная Якутия, многолетние колебания стока рек, изменчивость стока

CHANGE IN PERENNIAL RUNOFF FLUCTUATIONS OF THE RIVERS IN SOUTH YAKUTIA IN THE CONTEXT OF GLOBAL WARMING

R.N. Shpakova^{1,*} , Ping Wang (王平) ^{2,**}

¹ Moscow State Institute of International Relations (University), Regional Governance and National Policy Department, Moscow, Russia

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

e-mail: *production2003@mail.ru, **wangping@igsnr.ac.cn

Abstract

The proposed article presents the results of a study of the peculiarities of changing the nature of long-term fluctuations in the water regime of rivers in the conditions of developing global warming. River basins are compactly located within one natural and climatic zone - the region of Southern Yakutia and adjacent areas of the Irkutsk, Amur regions, Khabarovsk and Trans-Baikal Territories of the Russian Federation. This approach made it possible to adequately compare the parameters of changes in the nature of long-term fluctuations in the flow of rivers under similar conditions.

The basins of the 6 rivers considered, with a few exceptions, cover the entire territory of South Yakutia.

The main trends in changes in the nature of long-term fluctuations in runoff in the modern period (1988-2018) include an increase in water content on most rivers by 16-34%, which, nevertheless, did not lead to a violation of the stationarity of the annual runoff series according to mathematical expectation. The dispersion of annual runoff increased to a greater extent: on 5 rivers out of 6, its growth ranged from 8 to 254%, as a result of which on three rivers (Chara, Timpton, Amga), the annual runoff series lost their stationarity in dispersion.

In general, the region has seen an increase in the frequency of occurrence of extreme events – exceeding the historical maximum annual runoff of the base period or the occurrence of an annual runoff less than the historical minimum annual runoff of the base period, and the frequency is gradually increasing within the duration of the modern period.

The geographical pattern of changes in the nature of long-term fluctuations in river flow was revealed: to the greatest extent these changes were manifested on the rivers of the western part of Southern Yakutia (Chara, Olekma), to the least - on the rivers of the eastern part (Uchur, Maya).

Keywords: global warming, water runoff, SouthYakutia, perennial runoff, runoff variability

Введение

Продолжающееся глобальное потепление имеет прямым следствием дестабилизацию гидрометеорологических процессов, в частности, режима стока рек, что, в свою очередь, может проявляться в формировании опасных гидрологических явлений. Особая опасность в данном случае состоит в том, что такие явления могут оказаться нетипичными, беспрецедентными для многих водных объектов. Подобные события необходимо предвидеть хотя бы на вероятностном уровне, чтобы предотвратить или смягчить причиняемый ими ущерб.

Происходящие климатические изменения уже привели к существенным изменениям водного режима в ряде крупных регионов [4; 11]. При этом ряд исследований свидетельствует о том, что процессы глобального потепления продолжатся в ближайшей обозримой перспективе [13; 16]. Предполагается, что Россия (особенно арктические и субарктические регионы) окажется в зоне наиболее интенсивного потепления [8].

С учетом указанных перспектив нетрудно предположить и продолжение (а, вероятно, и усиление) реакции рек на климатические изменения. Общим правилом в этом отношении является увеличение стока воды в тех случаях, когда повышенное испарение не превышает увеличения количества осадков [8].

Такого рода предполагаемое развитие гидрометеорологических процессов ставит вопрос об оценке возможного влияния развивающегося глобального потепления на речной сток. Моделирование таких процессов осуществляется, как правило, для отдельных речных бассейнов или речных систем [17; 21].

Относительно территориальных особенностей предполагаемых изменений годового стока рек, преобладающим мнением является то, что наибольшее увеличение годового стока рек будет иметь место в северном полушарии и, в частности, в зоне Сибири (с более чем 8% в начале до 17% в конце XXI века) [8]. Увеличение стока предполагается и для рек на территории Якутии, прежде всего, для реки Лены [3; 15].

Как правило, модельные расчеты строятся для крупных и крупнейших рек и речных систем, в связи с чем, оценки изменения стока в таких случаях являются крайне обобщенными. Вопросы о поведении в условиях климатических изменений различ-

ных участков крупных речных систем, а также средних по величине, изолированных речных бассейнов, остаются открытыми. И, если представление о предполагаемых основных тенденциях годового стока такого рода объектов можно получить, адаптировав к ним результаты модельных расчетов для рек, к бассейнам которых они относятся, то формы возможных нарушений характера многолетних колебаний стока предсказать пока невозможно. Между тем, потепление длится уже более 30 лет, и реакция речного стока на это явление, если таковая имеется, уже должна была проявиться.

Представляется, что, обобщив данные о фактических изменениях характера многолетних колебаний стока в период развивающихся климатических изменений, можно получить представление и о возможных изменениях в будущем.

Именно оценка фактических изменений характера многолетних колебаний стока в условиях глобального потепления явилась предметом настоящего исследования. В качестве объекта принят ряд рек, бассейны которых расположены в Южной Якутии и прилегающих к ней районах Дальнего Востока южнее 60°с.ш. Это исследование является своего рода продолжением исследований, проведенных для рек, расположенных в приполярной зоне Якутии [20] и в Центральной Якутии [18]. Под изменениями характера многолетних колебаний стока здесь понимается: а) нарушение стационарности временного ряда, б) увеличение частоты возникновения (по сравнению с предыдущим периодом) экстремальных событий (годового стока, превышающего исторический максимум, или меньшего, чем исторический минимум).

Оценки современных изменений стока воды, обусловленных климатическими изменениями, для рек бассейна Нижней Лены и Вилюя, лежащих вблизи исследуемого района, представлены Д.В. Магрицким [7]. К выводу о том, что климатически обусловленные изменения стока рек особенно интенсивно проявляются в бассейне Северного Ледовитого океана, в частности – в бассейне реки Лены, пришли А.Г. Георгиади и Е.А. Кашутина [2]. В указанных работах дается наиболее общая оценка ожидаемых изменений водности рек, но не дается ответа на вопрос, какого характера будут проявления этих изменений по частоте, продолжительности, амплитуде отклонения от нормы и т. д. Только в исследовании Е. Гусева и др. [12] сделана попытка определить для р. Лены (в числе еще ряда крупнейших рек мира) вероятности наступления в перспективе лет с экстремально высоким и экстремально низким годовым стоком.

В работе Shpakova et al. [19] установлена общая тенденция к увеличению среднегодового стока для рек Якутии за последние 50 лет, правда, без выделения отдельной оценки реакции стока в период активного потепления. В упомянутых выше работах [18; 20] были проведены исследования изменений характера многолетних колебаний стока рек приполярной зоны Якутии и Центральной Якутии (соседствующей с рассматриваемым в данной работе регионом), согласно которым реакция стока рек носит различный характер: появление в отдельных случаях экстремально высокого годового стока на фоне обычного режима многолетних колебаний; возникновение длительных (свыше 5 лет) периодов повышенной (выше обычных максимумов годового стока) водности. Начало периода искажений характера многолетних колебаний стока в указанных регионах – конец 90-х годов XX века.

Проблеме определения начала существенных изменений климата в бассейне р. Лены (а, следовательно, и на территории Якутии) также уделялось достаточное внимание. В статье Джамалов и др., 2012 год [5] в качестве срока, разграничивающего период похолодания и последующего потепления, принят 1970 год, хотя даже на приведенных в этой статье графиках изменения температур видно, что ни о каком выраженном потеплении климата до конца 80-х годов не может быть и речи. Скорее всего, авторам пришлось сдвинуть расчетную дату на несколько лет назад для выравнивания продолжительности рядов среднегодовой температуры воздуха до и после потепления. Используя метод разностных интегральных кривых, А. Г. Георгиади и Е. А. Кашутина пришли к выводу, что переломным является 1980 год [1]. В данном случае авторами за начало потепления принято начало относительно стабильного в климатическом отношении периода 1980-1987 годов, в течение которого среднегодовые температуры менялись незначительно вплоть до начала в 1988 году интенсивного потепления. Такой подход, разумеется, имеет свою логику.

Применительно к теме исследования определенным интерес представляет работа Tananaev, Makarieva & Lebedeva [22], в которой, в ходе оценки многолетних изменений водности рек бассейна р. Лены, определены случаи статистически значимых разрывов однородности рядов среднегодового стока. К сожалению, формат подачи выводов в указанной работе таков, что не позволяет установить, на каких конкретно реках и когда именно происходили существенные изменения в однородности, а это было бы крайне интересно в плане сравнения с результатами, полученными в настоящей работе.

Материалы и методы

Использованы многолетние данные о среднегодовом стоке воды для 6 гидрологических постов российской государственной системы наблюдений за режимом рек, расположенных в пределах выделенного региона (рис. 1).

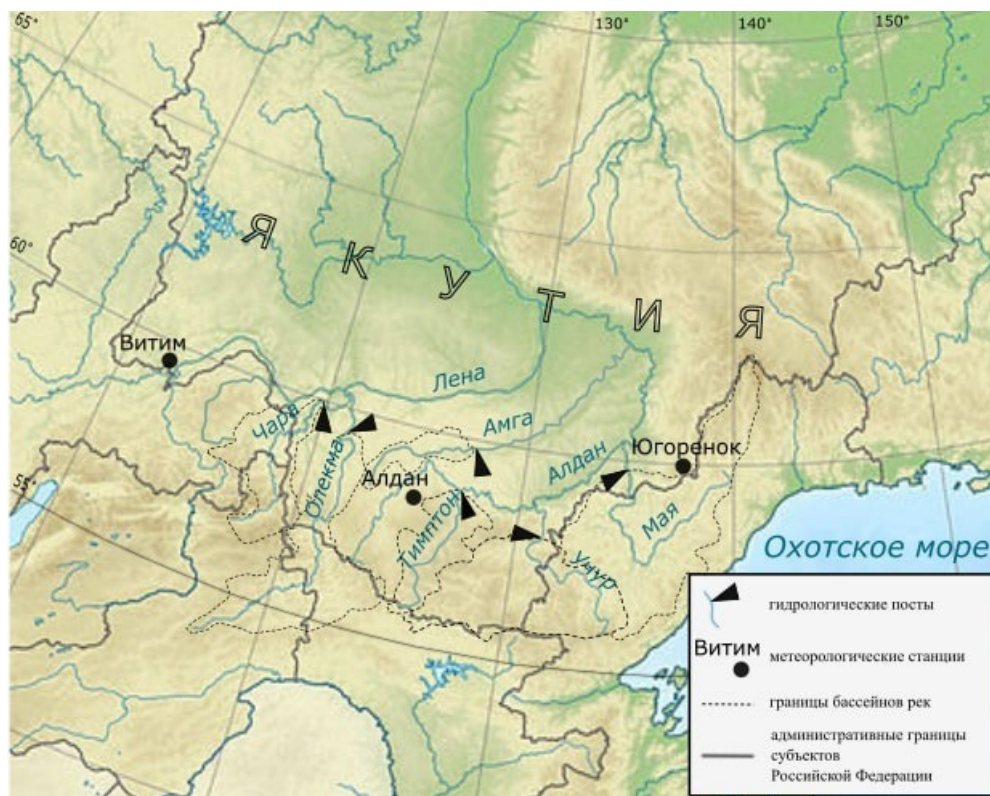


Рисунок 1. Карта-схема размещения рек, пунктов наблюдения за стоком воды и метеорологических станций в регионе Южной Якутии

Данные о среднегодовом стоке предоставлены Якутским управлением по гидрометеорологии и контролю природной среды. Реки – объекты исследования выбирались в соответствии с заданными в данном исследовании критериями: а) бассейн должен быть целиком расположен в выделенной широтной зоне 55-60°с.ш.; б) период наблюдений должен составлять не менее 60 лет; в) река не должна быть малым водотоком; г) река не может быть очень крупной – площадь водосбора не должна превышать 200 000 тыс. км². Указанным критериям не вполне соответствует только р.Олекма, исток которой находится несколько за пределами выделенного географического района.

Выбранные объекты исследования характеризуются водосборами различной величины (таблица 1), относящимся к категориям больших и средних рек. Период наблюдений на постах составляет от 66 до 85 лет и заканчивается 2018 годом.

Таблица 1

Сведения о гидрологических постах

Гидрологические посты (река, пункт)	Площадь водосбора (км ²)	Период наблюдения за стоком, гг
Олекма, Куду-Кель	115 000	1939 - 2018
Чара, Токко	62 500	1934 - 2018
Тимптон, Усть-Тимптон	43 700	1953 - 2018
Учур, Чюльбю	108 000	1953 - 2018
Мая, Чабда	165 000	1935 - 2018
Амга, Буяга	23 900	1937 - 2018

Для сравнимости результатов все ряды приведены к единому размеру расчетного периода 1953-2018 гг.

Сведения о годовом стоке представлены в модульных коэффициентах – нормированном по отношению к среднему многолетнему значению виде.

Несмотря на достаточно малое количество пунктов наблюдений за речным стоком, их размещение позволяет охватить всю территорию Южной Якутии по широте.

Реки, принятые к исследованию, имеют естественный режим. Какие-либо гидротехнические объекты, оказывающие влияние на речной сток, на этих реках отсутствуют. Также следует отметить, что рассматриваемый регион отличается крайне низкой плотностью населения и отсутствием крупных промышленных предприятий и иных факторов антропогенного воздействия, что позволяет оценивать условия формирования стока рек на данной территории как фоновые.

Для изучения климатических факторов выбрано 3 метеорологических станции, для каждой из которых рассмотрены многолетние ряды температуры воздуха. Метеостанции, по которым определялась многолетняя динамика среднегодовых температур, выбирались так, чтобы они располагались примерно на одной широте и распределялись равномерно по всей территории региона (см. рис. 1). Сведения о географических характеристиках метеостанций приведены в таблице 2.

Для целей определения изменения статистических характеристик временного ряда в условиях радикальной смены климатических условий необходимо установить момент начала этой смены. Это позволит разделить временные ряды на периоды «до» и «после» указанного момента. В работе [20] такой момент был определен для полярной зоны Якутии как 1988 год. Затем данная оценка подтвердилась и для региона Центральной Якутии, непосредственно соседствующего с исследуемым в настоящей работе регионом [18].

Н. М. Юмина и М. А. Терешина, применив в своем исследовании метод разностных интегральных кривых, пришли к выводу, что годом начала климатически-обусловленных изменений водного режима для водных рек бассейна реки Вилюя является 1987 год [11]. При этом следует отметить, что бассейн реки Вилюя также соседствует с регионом Южной Якутии.

Кроме того, в исследовании Min Xu et al. [14] установлена примерная дата начала существенного изменения климата в бассейне реки Оби – 1990 год. Хотя данный регион отделен от Южной Якутии огромной территорией водной системы реки Енисея, но, тем не менее, близость дат начала проявления глобального потепления в Якутии и Западной Сибири очевидна.

Не противоречат изложенным выше обстоятельствам и результаты наблюдений на метеостанциях, расположенных непосредственно в исследуемом регионе, в частности, на метеостанции Югоренок (рис. 2). Переход к растущей тенденции от стационарного состояния, начиная с 1988 года (обозначен на рис. 2 вертикальной линией), выражен достаточно явно.

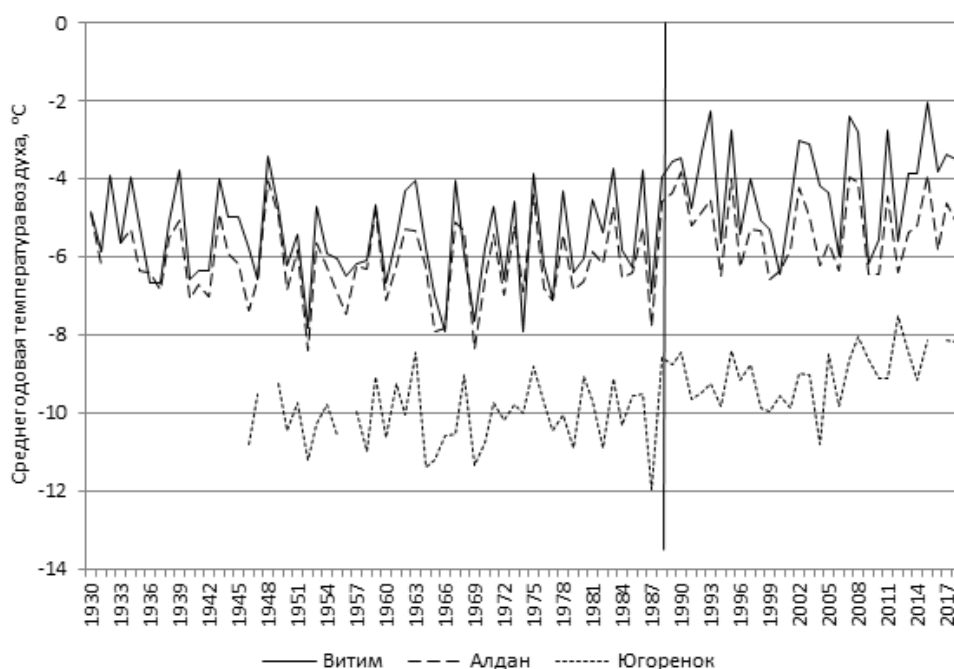


Рисунок 2. Изменение среднегодовой температуры воздуха по метеостанциям Витим, Алдан, Югоренок за период с начала наблюдений до 2018 года

Таким образом, дата начала глобального потепления в Якутии, в том числе и Южной, – 1988 год, полученная различными независимыми методами, может быть оценена как достаточно корректная.

Для удобства анализа и изложения результатов единый для всех пунктов ряд наблюдений за период 1953-2018 гг. именуется расчетным, ряд наблюдений до даты начала потепления (1953-1987 гг.) – *базовым*, период после начала потепления (1988-2018 гг.) – *современным*.

Проверка наличия или отсутствия существенного изменения режима рек состояла, в частности, в определении стационарности временных рядов годового стока рек за базовый и расчетный периоды. Соответственно, предполагалось, что изменение оценки стационарности, если таковое будет иметь место, должно быть связано с изменениями характера многолетних колебаний в период после даты начала потепления (современный).

Каждый ряд годового стока проверялся на соответствие нормальному распределению с помощью критерия Шапиро-Уилка, вполне приемлемого для временных рядов, имеющих более 20 членов [6, с. 26-29]. В качестве нулевой гипотезы выдвигалась гипотеза о соответствии эмпирического распределения нормальному типу, альтернативная гипотеза – о несоответствии. Нулевая гипотеза принималась при превышении рассчитанного (эмпирического) значения критерия W над критическим $W_{кр}$.

Оценка стационарности временных рядов сводилась к проверке статистических гипотез о постоянстве математического ожидания и постоянстве дисперсии. Оценка стационарности математического ожидания проводилась по параметрическому критерию – t -критерию Стьюдента, а оценка стационарности дисперсий – по параметрическому F -критерию Фишера [10]. Нулевая гипотеза – постоянство математического ожидания или дисперсии, альтернативная – непостоянство. В обоих случаях меньшее, по отношению к критическому, значение критерия являлось основанием принятия нулевой гипотезы.

Существовала проблема неприменимости критериев Фишера и Стьюдента к оценке стационарности временных рядов гидрологических характеристик. Дело в том, что указанные критерии были разработаны для нормальных функций распределения вероятностей и независимых во времени случайных последовательностей, а ряды гидрологических характеристик, как правило, асимметричны и коррелированы во времени. Однако, к настоящему времени классические критерии Фишера и Стьюдента уточнены для случаев асимметричных и коррелированных последовательностей и рекомендованы для применения при оценке однородности гидрологических рядов [9]. Этот вариант критериев и использован в настоящей работе.

Уровень значимости α во всех случаях принимался равным 0,05.

Стационарным признавался ряд данных, для которого подтверждались обе нулевые гипотезы (о стационарности математического ожидания и дисперсии), нестационарным – для которого обе нулевые гипотезы отвергались. Среди полученных результатов имеются также случаи нестационарности по одному из параметров – дисперсии.

Кроме оценки стационарности временных рядов проверялось изменение частоты появления в современном периоде экстремальных по отношению к базовому периоду событий – наступления годового стока, превысившего исторический максимальный годовой сток базового периода, или наступления годового стока, меньшего, чем исторический минимальный сток базового периода. Анализировалось число таких случаев, их распределение в пределах современного периода и в пределах рассматриваемой территории.

Результаты и их обсуждение

Очевидно, что в условиях глобального характера климатических процессов изменение параметров многолетних колебаний стока может не вполне соответствовать характеру изменений климатических условий на региональном уровне, но, тем не менее, полагаем необходимым кратко описать динамику среднегодовой температуры воздуха в Южной Якутии.

В таблице 2 приведены сведения о средней многолетней температуре воздуха по метеостанциям Витим, Алдан, Югоренок. Как видно из этой таблицы, в среднем по региону среднегодовая температура воздуха, начиная с 1988 года, повысилась на 1,2°C. Интенсивность потепления составила около 0,39°C за 10 лет. Следует отметить, что это существенно ниже, чем интенсивность потепления в Центральной Якутии, которая составила 0,55°C за 10 лет [18].

Таблица 2

Сведения о метеорологических станциях и средней многолетней температуре воздуха

Метеостанция	Широта (северная)	Долгота (восточная)	Высота над уровнем моря (м)	Средняя многолетняя температура воздуха от начала наблюдений до 1987 г.	Средняя многолетняя температура воздуха за период 1988-2018 гг.	Изменение средней многолетней температуры воздуха
Витим	59°272'	112°35'	186	-5,6	-4,0	+1,6
Алдан	58°362'	125°23'	678	-6,2	-5,2	+1,0
Югоренок	59°462'	137°40'	380	-10,1	-9,1	+1,0
Среднее значение по региону				-7,3	-6,1	+1,2

Прирост средней температуры в центральной (м/ст. Алдан) и восточной (м/ст. Югоренок) частях региона близки по величине, а тот же параметр в западной части (м/ст. Витим) существенно выше – на 0,6°С. Немаловажно отметить, что суровость климата увеличивается с запада на восток: средняя многолетняя температура на метеостанции Югоренок на 4.6°С ниже, чем на метеостанции Витим.

Об общем характере изменений параметров временных рядов стока можно судить по данным таблицы 3.

Таблица 3

Изменение средней многолетней величины (в модульных коэффициентах) и дисперсии годового стока воды за базовый (1953-1987 гг.) и современный (1988-2018 гг.) периоды

Пункты наблюдений за стоком (река, пост)	Средний многолетний сток за период:			Дисперсия годового стока за период:		
	базовый	современный	изменение (%)	базовый	современный	изменение (%)
Олекма, Куду-Кель	0,935	1,110	+18,7	0,064	0,069	+7,8
Чара, Токко	0,893	1,196	+33,9	0,043	0,152	+253,5
Тимптон, Усть-Тимптон	0,972	1,031	+6,1	0,032	0,059	+84,4
Учур, Чюльбю	1,000	1,000	0	0,037	0,036	-2,3
Мая, Чабда	1,003	1,037	+3,4	0,052	0,058	+11,5
Амга, Буяга	0,947	1,094	+15,5	0,067	0,117	+74,6

В целом, следует отметить общую тенденцию к росту среднего многолетнего стока в современный период по сравнению с базовым периодом, почти равным ему по длительности. Исключением явилась р. Учур с нулевым изменением среднего многолетнего стока. Наибольший рост пришелся на реки, расположенные в западной части рассматриваемого региона (Олекма, Чара). Менее всего тенденция повышения среднего многолетнего стока выражена в восточной части региона (Мая, Учур). Также возросла дисперсия годового стока, за исключением р. Учур, на которой наблюдалось небольшое снижение. Степень роста дисперсии отличается значительным диапазоном (от 7,8% до 253,5%) при отсутствии какой-либо географической закономерности.

В таблице 4 приведены аналогичные расчеты для более длинных рядов наблюдений (79-85 лет). Соответственно, в таблице 4 отсутствуют такие пункты, как Тимптон - Усть-Тимптон и Учур - Чюльбю, по которым такие длительные наблюдения отсутствуют.

Таблица 4

Изменение средней многолетней величины (в модульных коэффициентах) и дисперсии годового стока воды за периоды наблюдений до и после 1988 г.

Пункты наблюдений за стоком (река, пост, дата начала наблюдений)	Средний многолетний сток за период:			Дисперсия годового стока за период:		
	с начала наблюдений до 1987 г.	с 1988 по 2018 годы	Изменение (%)	с начала наблюдений до 1987 г.	с 1988 по 2018 годы	Изменение (%)
Олекма, Куду-Кель, 1939 г.	0,937	1,110	+18,5	0,057	0,069	+21,1
Чара, Токко, 1934 г.	0,888	1,196	+34,7	0,032	0,152	+375,0
Мая, Чабда, 1933 г.	0,978	1,037	+6,0	0,054	0,058	+7,4
Амга, Буяга, 1937 г.	0,943	1,094	+16,0	0,065	0,117	+80,0

Сравнение с результатами аналогичного расчета, приведенными в таблице 3, показывает, что увеличение среднего многолетнего стока в период 1988-2018 годы по сравнению со средним многолетним стоком за более длительный, чем в предыдущем расчете, предшествующий период, отличается незначительно – от 0,1 до 0,8 процентных пункта. В то же время прирост дисперсии оказался существенно выше – от 5,4 до 121,5 процентных пункта. Исключение составила река Мая, на которой прирост дисперсии в период 1988-2018 гг. по сравнению с периодом от начала наблюдений до 1987 года оказался на 4,1 процентных пункта меньше, чем по сравнению с периодом 1953-1987 гг.

Определенные сведения о характере многолетних колебаний годового стока может дать постоянство (или непостоянство) закона распределения случайных величин, составляющих временной ряд. В таблице 5 приведены результаты оценки соответствия рядов годового стока нормальному закону распределения за базовый период (1953-1987 гг.) и за расчетный период (1953-2018 гг.).

Таблица 5

Оценка соответствия рядов стока нормальному распределению по W -критерию Шапиро-Уилка

Пункты наблюдений за стоком (река, пост)	Базовый период ($W_{кр} = 0,938$)		Расчетный период ($W_{кр} = 0,964$)	
	Значения критерия $W_{эмп}$	Оценка соответствия нормальному распределению	Значения критерия $W_{эмп}$	Оценка соответствия нормальному распределению
Олекма, Куду-Кель	0,970	соответствует	0,986	соответствует
Чара, Токко	0,937	не соответствует	0,911	не соответствует
Тимптон, Усть-Тимптон	0,985	соответствует	0,972	соответствует
Учур, Чюльбю	0,946	соответствует	0,950	не соответствует
Мая, Чабда	0,965	соответствует	0,983	соответствует
Амга, Буяга	0,966	соответствует	0,951	не соответствует

Как видно из таблицы 5, ряды годового стока в рассматриваемых пунктах за базовый период подчиняются нормальному закону распределения вероятностей, за исключением пункта р. Чара – с. Токко, причем и здесь эмпирическое значение W -критерия Шапиро-Уилка меньше критического всего на 0,001, то есть отличие от нормального закона минимально. Оценки соответствия нормальному закону распределения за расчетный период показали, что половина рядов перестали соответствовать нормальному закону.

Важнейшим параметром, характеризующим характер многолетних колебаний стока, является стационарность. Полная стационарность ряда определялась как совокупность условий стационарности средней величины и стационарности дисперсии.

По итогам расчета F -критерия Фишера (далее эмпирические значения критерия обозначены $F_{\text{эмп}}$, критические $F_{\text{кр}}$) получены следующие оценки: до 1988 года все ряды годового стока отличаются стационарностью дисперсий, но затем произошедшие изменения режима многолетних колебаний привели к нарушению этого параметра в пунктах р. Чара – с. Токко ($F_{\text{эмп}} = 3,55$, $F_{\text{кр}} = 2,64$), р. Тимптон – с. Усть-Тимптон ($F_{\text{эмп}} = 2,14$, $F_{\text{кр}} = 1,90$) и р. Амга – с. Буяга ($F_{\text{эмп}} = 2,12$, $F_{\text{кр}} = 2,01$).

В отличие от дисперсии, стационарность средней величины годового стока подтверждена по всем пунктам как в базовый (1953-1987 гг.), так и в расчетный (1953-2018 гг.) период. Оценка производилась по t -критерию Стьюдента.

Окончательно, получены следующие оценки стационарности временных рядов стока. До 1987 года включительно все ряды годового стока рек характеризуются как стационарные. В разрезе расчетного периода 1953-2018 гг. в трех пунктах – р. Чара – с. Токко, р. Тимптон – с. Усть-Тимптон, р. Амга – с. Буяга – ряды годового стока не являются стационарными по дисперсии. Причиной послужило увеличение изменчивости годового стока в период 1988-2018 гг. (см. таблицу 3). Полной нестационарности не наблюдается ни в одном пункте.

По данным следующей таблицы 6 можно судить о динамике изменений характера многолетних колебаний годового стока – по количеству и частоте наступления в современном периоде экстремальных по отношению к базовому периоду событий. Под экстремальными в данном случае понимаются случаи наступления годового стока, превысившего исторический максимальный годовой сток базового периода (N_{max}), или наступления годового стока, меньшего, чем исторический минимальный сток базового периода (N_{min}). Исторический максимальный годовой сток базового периода – наибольший наблюдаемый годовой сток периода 1953-1987 гг., а исторический минимальный – наименьший наблюдаемый годовой сток периода 1953-1987 гг. Кроме того, современный период 1988-2018 гг. поделен на три примерно равных по длительности подпериода (11 + 10 + 10 лет), и количество указанных событий определялось за каждый подпериод.

Таблица 6

Число наступления в современный период экстремальных по отношению к базовому периоду событий

Пункты наблюдений за стоком (река, пост)	Подпериод современного периода наблюдений						Всего по пункту
	1988-1998		1999-2008		2009-2018		
	N_{max}	N_{min}	N_{max}	N_{min}	N_{max}	N_{min}	
Олекма, Куду-Кель	1	0	0	0	5	0	6
Чара, Токко	0	0	3	0	3	0	6
Тимптон, Усть-Тимптон	1	0	2	0	1	0	4
Учур, Чюльбю	0	0	0	1	0	0	1
Мая, Чабда	0	1	0	0	0	0	1
Амга, Буяга	0	0	1	0	1	0	2
Всего	2	1	6	1	10	0	20

Данные таблицы 6 показывают, что интенсивность возникновения экстремальных явлений увеличивается со временем: от 3 случаев в первые 11 лет периода до 10 случаев в последние 10 лет. Подавляющее большинство случаев, 18 из 20, – превышение исторического максимального годового стока базового периода. Прослеживается и пространственная закономерность – наибольшее число случаев приходится на реки, расположенные в западной части рассматриваемого региона (Олекма, Чара – по 6 случаев), наименьшее – на реки восточной части (Учур, Мая – по 1 случаю).

Подобный анализ был проведен и для предшествующего периода 1953-1987 гг., считая за базовый по отношению к нему период, начиная с даты начала наблюдений (1934 – 1939 для разных пунктов) до 1952 года. Так как такие длительные периоды наблюдений имеются не на всех пунктах, то подобный расчет оказался возможным только для Олекмы, Чары, Май и Амги. Отмечено следующее число экстремальных

случаев: Куду-Кель – 0, Токко – 5, Чабда – 1, Буяга – 3. В целом, можно видеть, что, по крайней мере, для данных пунктов, количество экстремальных случаев в период 1953-1987 гг. существенно ниже, чем в период 1988-2018 гг. Для указанных четырех пунктов это соотношение составляет: 9 случаев в период 1953-1987 гг. против 15 случаев (см. таблицу 6) в период 1988-2018 гг.

Выводы

В условиях активного потепления, начало которого отнесено нами к 1988 году, на рассмотренных реках региона Южной Якутии и прилегающих районов российского Дальнего Востока отмечено общее повышение водности, достигающее для отдельных рек значений роста в 16–34%. На 5 из 6 рек существенным образом возросла дисперсия годового стока. Наиболее высокий рост дисперсии на отдельных реках достигает 75 – 254%.

На рассмотренных реках региона многолетние ряды годового стока до начала устойчивого потепления оцениваются как стационарные. Последовавшие затем изменения в характере многолетних колебаний привели к тому, что ряды стока рек Чары, Тимптона, Амги утратили стационарность по дисперсии, на трех остальных реках стационарность рядов сохранилась.

В современный период 1988-2018 гг. на реках Южной Якутии участилось (по сравнению с базовым периодом сравнимой продолжительности 1953-1987 гг.) появление экстремальных событий в виде годового стока, превышающего исторический максимальный годовой сток базового периода или годового стока, меньшего, чем исторический минимальный годовой сток базового периода. Для четырех рек с наиболее длинными рядами наблюдений (Олекма, Чара, Мая, Чабда) можно привести следующее соотношение: 15 экстремальных событий в период 1988-2018 гг. против 9 случаев в период 1953-1987 гг.

Общее количество экстремальных явлений на рассмотренных реках в период 1988-2018 гг. составляет 20, из которых 18 – превышение исторического максимального годового стока базового периода. Интенсивность возникновения экстремальных явлений увеличивается со временем: от 3 случаев в первые 11 лет современного периода до 10 случаев в последние 10 лет. Прослеживается и пространственная закономерность – наибольшее число случаев приходится на реки, расположенные в западной части рассматриваемого региона (Олекма, Чара – по 6 случаев), наименьшее – на реки восточной части (Учур, Мая – по 1 случаю). С учетом результатов оценки стационарности временных рядов можно сделать общий вывод о том, что в наибольшей степени изменение характера многолетних колебаний стока затронуло реки западной части Южной Якутии, в наименьшей степени – реки восточной части.

Список литературы:

1. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия Российской Академии наук. Серия географическая. 2014. №2. С. 71-83.
2. Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Региональные особенности изменений во времени притока речных вод в Северный Ледовитый океан / Полярная криосфера и воды суши. М.: Paulsen, 2011. С. 252–264.
3. Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Речной сток в бассейне реки Лены в условиях вероятного глобального потепления климата // Вычислительные технологии. Т. 11. Ч. 2. Специальный выпуск. 2006. С. 166–174.
4. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы / Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
5. Джамалов Р.Г., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И. Современные изменения водных ресурсов в бассейне Лены // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, №2. С. 131–145.
6. Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2014. – 192 с. URL: https://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/publik_html/guid_normal_tets.pdf
7. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. №6. С. 85–95.
8. Мелешко В.П. Изменения гидрологического цикла в Северной Евразии, обусловленные потеплением климата // Вычислительные технологии. Т.11. Ч.1. Специальный выпуск. 2006. С. 29–38.

9. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт». Санкт-Петербург: Нестор-история, 2010. 162 с.
10. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2007. 279 с.
11. Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. №6. С. 62–70.
12. Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Auzel G.V. Impact of Possible Climate Change on Extreme Annual Runoff from River Basins Located in Different Regions of the Globe // Water Resources. 2019. 46(S1). P. 126–136. DOI: 10.1134/S0097807819070108
13. Houghton J.E.T., Ding Y.H., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P., Dai X., Maskell M., Johnson C.A. The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge Univ. Cambridge, New York, 2001. 881p.
14. Min X., Shichang K., Xiaoming W., Hao W., Didi H., Daqing Y. Climate and hydrological changes in the Ob River Basin during 1936–2017 // Hydrological Processes. 2020. 34(15). P. 1–16. DOI: 10.1002/hyp.13695
15. Nohara D., Kitoh A., Hosaka M., Oki T. Impact of climate change on river runoff // Journal of Hydrometeorology. 2006. 7(5). P. 1076–1089.
16. Phillips T.J., Gleckler P.J. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations: Utility of multi-model statistics // Water Resources. 2005. 42. W03202.
17. Sa-Cheol S. Analysis of River Flow Change Based on Some Scenarios of Global Warming // Journal of Korea Water Resources Association. 2000. 33 (5).
18. Shpakova R.N. Changes in the Behavior of Long-Term Waterflow Variations in the Middle Part of Yakutia under the Global Warming Conditions // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. 666 042010 DOI:10.1088/1755-1315/666/4/042010
19. Shpakova R.N., Kusatov K.I., Mustafin S.K. Spatiotemporal Trends in Changes in the River Water Contents in the Sakha Republic (Yakutia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 459 052062. DOI:10.1088/1755-1315/459/5/052062.
20. Shpakova R., Kusatov K., Mustafin S., Trifonov A. Changes in the Nature of Long-Term Fluctuations of Water Flow in the Subarctic Region of Yakutia: A Global Warming Perspective // Geosciences. 2019. 9. 287. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070287>
21. Stagl J.C., Hattermann F.F. Impacts of Climate Change on Riverine Ecosystems: Alterations of Ecologically Relevant Flow Dynamics in the Danube River and Its Major Tributaries // Water. 2016. 8(12). 566. <https://doi.org/10.3390/w8120566>
22. Tananaev N.L., Makarieva O.M. and Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett. 2016. 43, 10,764–10,772. doi: 10.1002/2016GL070796

References:

1. Georgievsky V.Yu. Shalygin A.L. Hydrological regimen and water resources, in *Metody ocenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system (Methods of evaluation of the effects of climate changes on physical and biological systems)*. Moscow: Rosgidromet, 2012, pp. 53–86.
2. Yumina N.M., Tereshina M.A. Estimating long-term changes of river runoff in the Viluy river basin. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 5 Geogr.*, 2017, no 6, pp. 62–70. (In Russ.)
3. Houghton J.E.T., Ding Y.H., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P., Dai X., Maskell M. and Johnson C.A. *The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge Univ. Cambridge, New York, 2001. 881 p.
4. Phillips T.J. and Gleckler P.J. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations: Utility of multi-model statistics // *Water Resources*. 2005. 42. W03202.
5. Meleshko V.P. Change in hydrologic cycle in the Northern Eurasia conditioned by global warming. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2006, vol.11(1), pp. 29–38. (In Russ.)
6. Sa-Cheol S. Analysis of River Flow Change Based on Some Scenarios of Global Warming. *Journal of Korea Water Resources Association*. 2000. 33 (5).
7. Stagl J.C. and Hattermann F.F. Impacts of Climate Change on Riverine Ecosystems: Alterations of Ecologically Relevant Flow Dynamics in the Danube River and Its Major Tributaries. *Water*. 2016. 8(12). 566. <https://doi.org/10.3390/w8120566>

8. Georgiadi A.G., Milukova I.P. River run-off in the Lena river basin in the conditions of eventual global warming. *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2006, vol. 11(6), pp. 166–174. (In Russ.)
9. Nohara D., Kitoh A., Hosaka M. and Oki T. Impact of climate change on river runoff. *Journal of Hydrometeorology*. 2006. 7(5). P. 1076–1089.
10. Shpakova R., Kusatov K., Mustafin S. and Trifonov A. Changes in the Nature of Long-Term Fluctuations of Water Flow in the Subarctic Region of Yakutia: A Global Warming Perspective. *Geosciences*. 2019. 9. 287. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070287>
11. Shpakova R.N. Changes in the Behavior of Long-Term Waterflow Variations in the Middle Part of Yakutia under the Global Warming Conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. 666 042010 DOI:10.1088/1755-1315/666/4/042010
12. Magritskiy D.V. Features and regularities of the long-term fluctuations of water flow, suspended sediment and heat runoff in the lower Lena and Viluy rivers. *Vestnik Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geografiya*. 2015. no 6, pp. 85–95. (In Russ.)
13. Georgiadi A.G. and Kashutina Ye.A. Regional features of the time changes in river runoff to the Arctic Ocean, in *Polyarnaya kriosfera I vody sushi (Polar Cryosphere and Land Waters)*. Moscow: Paulsen Publ., 2011, pp. 252–264.
14. Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E. and Auzel G.V. Impact of Possible Climate Change on Extreme Annual Runoff from River Basins Located in Different Regions of the Globe. *Water Resources*. 2019. 46(S1), p. 126–136. DOI: 10.1134/S0097807819070108
15. Shpakova R.N., Kusatov K.I. and Mustafin S.K. Spatiotemporal Trends in Changes in the River Water Contents in the Sakha Republic (Yakutia). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 459 052062. DOI:10.1088/1755-1315/459/5/052062.
16. Dzhamalov R.G., Krichevets G.N., Safronova T.I. Current changes in water resources in Lena river basin. *Water Resources*. 2012, vol.39, no 2, pp.147-160.
17. Georgiadi A.G., Kashutina Ye.A. The features of long-term annual and seasonal runoff changes for Lena basin rivers. *Izvestiya Rossijskoj Akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2014, no 2, pp. 71-83. (In Russ.)
18. Tananaev N.L., Makarieva O.M. and Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.* 2016, 43, 10,764-10,772. doi: 10.1002/2016GL070796
19. Min X., Shichang K., Xiaoming W., Hao W., Didi H. and Daqing Y. Climate and hydrological changes in the Ob River Basin during 1936–2017. *Hydrological Processes*. 2020, 34(15), p. 1–16. DOI: 10.1002/hyp.13695
20. Lemeshko B. YU. *Kriterii proverki otkloneniya raspredeleniya ot normal'nogo zakona (Criteria for checking the deviation of the distribution from the normal law)*, Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ., 2014. (In Russ.)
21. Sikan A.V. *Metody statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informacii (Statistical Methods of Processing Hydrometeorological Information)*, Saint Petersburg: Intensive Technologies Publ., 2007. (In Russ.)
22. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredeleniyu ih raschetnyh znachenij po neodnorodnym dannym (Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data)*. Saint-Petersburg: Nestor-history Publ, 2010. 162 p. (In Russ.)