Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.16
DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.35

Изменение продолжительности стока рек Центральной Якутии под влиянием потепления климата

Д.О. Андреева[1], Л.С. Лебедева[1, 2]
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;*
[2]*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия*
e-mail: andasha02@mail.ru

Аннотация. На многих водотоках криолитозоны наблюдается прекращение стока в зимний период из-за их промерзания до дна на перекатах или на большом протяжении. Изучение характеристик бессточных периодов актуально в связи с вопросами организации бесперебойного водоснабжения, эксплуатации зимников и ледовых переправ. Также исследования по этой теме расширяют имеющиеся знания о реакции средних и малых водосборов, расположенных в зоне многолетней мерзлоты, на климатические изменения. Целью данного исследования является анализ изменений продолжительности стока и других гидрологических характеристик рек Центральной Якутии в условиях изменения климата. В качестве объектов исследования рассматривались 8 перемерзающих рек Центральной Якутии с площадью водосборов от 20,3 до 11 600 км². Выполнялась оценка трендов во временных рядах гидрологических и метеорологических характеристик, а также проводился корреляционный анализ для выявления связи между изменением характеристик продолжительности и объёма стока и температурными условиями и количеством осадков на водосборе. Выявлено, что на 7 реках из 8 годовой слой стока растёт, в половине случаев статистически значимо. Практически на всех рассмотренных водотоках наблюдается незначимое увеличение периода стока (на 1,3–4,8 дней/10 лет), обусловленное смещением на более раннее время даты начала стока весной и более поздним его окончанием осенью. Изменение даты начала стока вызвано ростом температуры воздуха в апреле и мае. На время окончания стока в большей степени влияют осадки тёплого периода на одних реках и температурные условия осенью и в начале зимы – на других. Также на 7 объектах присутствует тренд к смещению на более раннее время даты прохождения максимального суточного расхода воды за год (статистически значимый – на трёх постах). На одной реке выявлено увеличение длительности летнего пересыхания.

Ключевые слова: речной сток; перемерзание рек; изменение климата; продолжительность стока; малые и средние реки; Центральная Якутия**.**
Для цитирования: Андреева Д.О., Лебедева Л.С. Изменение продолжительности стока рек Центральной Якутии под влиянием потепления климата // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2025. Т. 7. Вып. 1. С. 35–47. DOI: 10.34753/HS.2025.7.1.35.

River runoff duration changes in Central Yakutia under the climate warming

Daria O. Andreeva[1], Lyudmila S. Lebedeva[1,2]
[1] *Saint-Petersburg Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia;*
[2] *Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia*
e-mail: andasha02@mail.ru

Abstract. Many rivers in the cryolithozone have no runoff in winter due to their freezing to the bottom at the river crossings or along a large length. The study of runoff duration is relevant in connection with the issues of water supply organization. Also, research on this topic expands the knowledge on the response of small and medium-sized catchments in the permafrost zone to climatic changes. Therefore, the aim of this study was to analyze changes in the runoff duration in Central Yakutia under the climate change influence. Eight river catchment with areas from 20.3 to 11 600 km² were considered as research objects. Trends in time series of hydrological and meteorological characteristics were assessed, and correlation analysis was carried out to identify the relationship between changes in runoff duration and volume characteristics and temperature and

precipitation conditions at the watershed. Annual runoff increases in 7 out of 8 rivers, in four cases changes are statistically significant. There is an insignificant increase in the runoff period on 7 rivers (1.3-4.8 days/10 years) due to the earlier runoff start date in spring and its later end in fall. The change in the runoff start date is caused by the increase in air temperature in April and May. The time of runoff end is influenced by precipitation of the warm period in some rivers and air temperature in autumn and early winter in others. Also, on 7 rivers the date of maximum daily water discharge shifts to earlier time (the change is statistically significant in three cases). The duration of summer drying increases on one river.

Key words: river runoff; freezing through of rivers; climate change; runoff duration; small and medium-sized rivers; Central Yakutia.

For citation: Andreeva D.O., Lebedeva L.S. River runoff duration changes in Central Yakutia under the climate warming. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2025, vol. 7, iss. 1, pp. 35–47. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS. 2025.7.1.35.

Введение

На многих реках Центральной Якутии наблюдается прекращение стока в зимний период из-за промерзания водотоков до дна на перекатах или на большом их протяжении. В зоне сплошной криолитозоны этому явлению подвергнуты реки с площадями водосборов до 50 000–75 000 км^2 [1]. Исследование изменений продолжительности и дат начала и окончания бессточных периодов на водотоках обладает практической значимостью в связи с вопросами организации бесперебойного водоснабжения в суровых климатических условиях, эксплуатации зимников и ледовых переправ. Кроме того, исследования по этой теме могут расширить имеющиеся знания о реакции средних и малых водосборов, расположенных в зоне многолетней мерзлоты, на климатические изменения, так как ранее продолжительность стока практически не рассматривалась в рамках оценок влияния изменения климата на речной сток.

Наиболее ярко климатические изменения выражаются в увеличении приземной температуры воздуха, достигающего в среднем для территории России до 0,50 °С/10 лет за период 1976–2024 гг., что более чем в два раза превосходит глобальный рост [2]. Для рек бассейна Лены в различных исследованиях отмечалось наличие таких тенденций, как увеличение зимнего, в меньшей степени годового стока рек, смещение дат ледовых явлений осенью на более поздние сроки, а весной – на более ранние [3–5]. Несмотря на выраженные изменения гидрологического режима в холодный период года, динамика продолжительности бессточных периодов на перемерзающих реках Якутии остаётся малоизученной. В связи с этим целью работы явился анализ изменений периода стока и других гидрологических характеристик рек Центральной Якутии и их связи с климатическими условиями.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны реки Центральной Якутии, характеризующиеся отсутствием стока в холодную часть года, для которых имеются ряды данных о среднесуточных расходах воды за период 1970–2022 гг. Всего было рассмотрено 8 водотоков с площадями водосбора от 20,3 до 11 600 км^2 (рисунок 1, таблица 1). Абсолютные отметки местности лежат в пределах от 45 до 540 м н.у.м. Среднемноголетние значения сумм осадков и температуры воздуха за год варьируют от 228 до 309 мм и от -11,4 до -6,2 °С.

По рядам данных о среднесуточных расходах определялись такие характеристики как продолжительность стока, даты его начала и окончания, годовой слой стока, дата и величина наибольшего расхода воды за год, а также продолжительность летнего пересыхания для рек, на которых наблюдается это явление.

Для анализа климатических изменений, произошедших за рассматриваемый период на исследуемой территории, и для выявления связи между изменением характеристик стока и метеорологическими условиями на водосборах были использованы ряды данных о среднегодовых и среднемесячных температурах воздуха по 15 метеостанциям и суммах осадков за год и за отдельные месяцы по 8 метеостанциям (рисунок 1).

Стационарность временных рядов гидрологических и метеорологических характеристик была проверена на наличие монотонных трендов с помощью непараметрических критериев ранговой корреляции Манна-Кендалла и Спирмена со значением $p < 0,05$ [6, 7]. В случаях, когда оба теста указывали на наличие тренда, проводилась проверка коэффициента автокорреляции ряда. При величине коэффициента автокорреляции $r < 0,20$ тренд принимался достоверным. При $r \geq 0,20$ для устранения автокорреляции в исходных рядах применялась процедура «предварительного очищения» («trend-free pre-whitening»). «Очищенные» ряды вторично тестировали с помощью непараметрического критерия Манна-Кендалла со значением $p < 0,05$, после чего делался окончательный вывод о наличии или отсутствии статистически значимого тренда. Величина линейного тренда оценивалась на основе непараметрического метода Тейла-Сена [8]. Величина тренда относится ко всему периоду 1970–2022 гг., внутри которого могут наблюдаться разнонаправленные краткосрочные изменения, которые не рассматриваются в этой работе. Для выявления его монотонности или наличия скачкообразных изменений применялся критерий Пети с $p < 0,05$ [9].

Также проводился расчёт коэффициентов корреляции (КК) Пирсона между временными рядами рассматриваемых характеристик стока и метеорологическими условиями на водосборах. Средние температуры воздуха и суммы осадков на водосборе определялись по данным наблюдений на ближайшей к нему метеостанции. В случае более крупных водосборов метеорологические характеристики рассчитывались по данным нескольких ближайших метеостанций (до трех) по методу среднего взвешенного. Определялась статистическая значимость КК при двустороннем уровне значимости 5 %.

Результаты

Климатические изменения на территории Центральной Якутии. На всех метеостанциях наблюдается статистически значимое увеличение среднегодовой температуры воздуха со скачкообразным изменением в период 1987–1992 гг. в пунктах, расположенных на западе и юго-востоке территории (Олёкминск, Килеер, Чаингда, Усть-Мая, Амга), и в 2000–2004 гг. на метеостанциях, находящихся в центральной части и на северо-востоке области (Якутск, Бердигестях, Верхоянский Перевоз, Крест-Хальджай, Ытык-Кюёль, Чурапча). Максимальные величины тренда в рядах среднегодовой температуры воздуха относятся к метеостанциям Якутск (0,70 °С/10 лет) и Хатырык-Хомо (0,67 °С/10 лет) (рисунок 1). В среднем по территории рост составляет 0,55 °С/10 лет. Наименее интенсивно среднегодовая температура изменяется на западе Центральной Якутии (до 0,50 °С/10 лет).

Также на всех метеостанциях статистически значимо растёт среднемесячная температура воздуха в апреле и июне. Скачкообразные изменения средних температур апреля выявлены в период 1995–2004 гг. почти во всех пунктах наблюдений (за исключением метеостанций Килеер, Олёкминск, Усть-Мая), июня – в период с 1991 по 1997 гг. практически на всех метеостанциях (кроме пунктов Усть-Мая и Верхоянский Перевоз, где перелом произошёл в 1987 и 2004 г. соответственно). Положительные статистически значимые тренды в рядах среднемесячных температур с января по август, октябрь и ноябрь были выявлены на 10 или более метеостанций из 15 (таблица 2).

Наиболее ранние скачкообразные изменения в рядах среднемесячных температур воздуха относятся к февралю (1984–1988 гг.). Однако в этом месяце точки перелома обнаружены только для метеостанции Якутск и ближайших к ней (Бердигестях, Ытык-Кюёль, Амга), а также метеостанции Исить. Кроме того, в 1985–1989 гг. в южной половине области произошло скачкообразное изменение среднемесячной температуры воздуха октября, в северной же части территории перелом произошёл только в 2005–2006 гг. Перелом в 1990 г. в рядах среднемесячной температуры января выявлен для большинства метеостанций. Скачкообразные изменения средних температур ноября зафиксированы в 1993–2000 гг. в большинстве пунктов наблюдений. Исключение составили метеостанции Чаингда, Килеер, Олёкминск, Тонгулах, Бердигестях и Исить.

В 1995–1996 гг. точки перелома присутствуют в рядах средних температур за июль в центральной части и на юго-востоке территории. Наиболее поздно скачкообразные изменения происходили в рядах температур марта (1999–2001 гг.) и мая (в 2004 г. на большинстве метеостанций).

Наиболее быстрый рост температуры воздуха наблюдается в ноябре, январе и марте, тренды составляют 0,82–0,96 °С/10 лет. Максимальная величина тренда была выявлена в ноябре на метеостанции Якутск и составила 1,33 °С/10 лет, рост температуры сопровождался скачкообразным изменением в 2000 г. Среднемесячная температура воздуха в сентябре и декабре стабильна. Присутствуют незначимые тренды, которые в сентябре лежат в пределах от 0,07 до 0,25 °С/10 лет, для декабря – от -0,41 до 0,54 °С/10 лет. При этом в декабре изменение температуры воздуха составило 0,25 °С/10 лет и менее на 13 из 15 метеостанций, в четырёх случаях были выявлены отрицательные незначимые тенденции (Олёкминск, Килеер, Чаингда, Чурапча).

Менее интенсивный рост температуры происходит на юго-западе Центральной Якутии (в районе метеостанции Олёкминск). Исключение составляет февраль, когда величина тренда температуры воздуха превышает среднюю по территории. Помимо этого, в большую часть года меньшие темпы изменения температуры воздуха наблюдаются на метеостанциях Килеер, Чаингда (запад территории), Крест-Хальджай, Верхоянский Перевоз, Ытык-Кюёль (северо-восток территории), Усть-Мая. В районе метеостанций Якутск, Бердигестях, Чурапча, Тонгулах, Амга и Вилюйск, основная часть из которых расположена в центральной части исследуемого района, темпы изменения температуры воздуха в большую часть года превышают средние по территории. Значимый тренд в рядах годовых сумм осадков выявлен только на метеостанции Исить (+15 мм/10 лет или 5 %/10 лет) со скачкообразным изменением в 2001 г. В целом положительные тенденции изменения годового количества осадков характерны для запада и юга территории. В районе метеостанций Хатырык-Хомо, Якутск, Крест-Хальджай тенденция отрицательная (рисунок 1). В рядах осадков за отдельные месяцы все обнаруженные значимые тренды положительные, в 3 из 4 случаев они относятся к метеостанции Вилюйск. Здесь значимый рост осадков характерен для части холодного периода года – месяцев с января по март – и составляет около 1 мм/10 лет (11–12 %/10 лет). В феврале статистически значимое изменение количества осадков также наблюдается в Олёкминске (9 %/10 лет). В отдельных случаях анализ выявил присутствие скачкообразных изменений в рядах месячных сумм осадков. Точки перелома были выявлены для осадков за февраль (1983 г., Вилюйск), декабрь (1993 г. в Якутске и 1988 г. в Хатырык-Хомо), апрель (1997 г., Исить) и июнь (2000 г., Якутск).

Изменение характеристик стока рек Центральной Якутии. Практически на всех рассмотренных гидрологических постах наблюдается тенденция к увеличению годового слоя стока на величину от 1,9 до 19,6 мм/10 лет. В 4 случаях этот рост является статистически значимым и составляет от 9 до 18 %/10 лет (таблица 1). Отсутствует изменение на р. Кэмпэндээйи (с. Кемпендяй), здесь тренд годового стока составляет около 1 %/10 лет. Наличие скачкообразного изменения в рядах годового слоя стока выявлено на 3 водотоках из 8: ручье Подгорном в 1988 г., реках Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда) в 1996 г. и Кэнгкэмэ в 2002 г.

Средняя продолжительность стока на исследуемых водотоках лежит в пределах от 99 до 355 дней. В целом она тем больше, чем крупнее речной водосбор. Среднемноголетняя дата начала стока составляет от 30 апреля до 10 мая. Дата окончания стока изменяется в более широких пределах: от 6 сентября на р. Чыалагас до 30 декабря на р. Синей.

На 7 гидрологических постах из 8 наблюдается тенденция к возрастанию продолжительности стока, однако это изменение не является статистически значимым (рисунок 2а, 2б). Период стока увеличивается на 1,3–4,8 дней/10 лет, в среднем на 3,1 день/10 лет. Статистически значимое отрицательное изменение продолжительности стока выявлено для створа р. Кэмпэндээйи – с. Кемпендяй, тренд составляет -8,8 дней/10 лет (рисунок 2в). На этом объекте

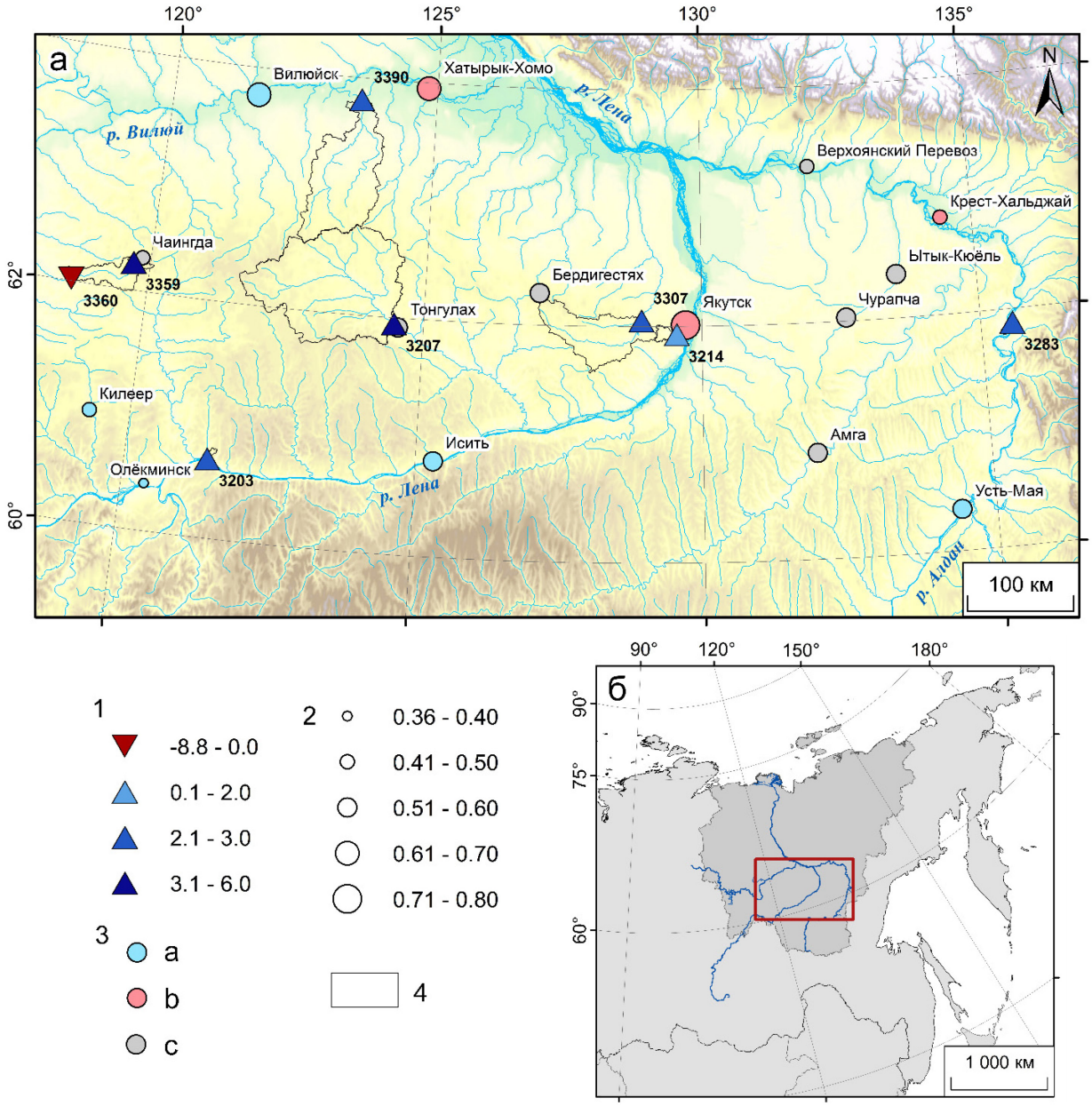


Рисунок 1. Схема расположения рассматриваемых гидрологических постов и метеостанций (а) и района исследования (б):

1 – гидрологические посты и тренд продолжительности стока, дней/10 лет; 2 – тренд среднегодовой температуры воздуха на метеостанциях, °С/10 лет; 3 – тенденция изменения годовой суммы осадков: *a* – положительная, *b* – отрицательная, *c* – отсутствие данных об осадках; 4 – границы водосборов

Figure 1. Scheme of hydrological gauges and weather stations (a) and study area location (b):

1 – hydrological gauges and runoff duration trends, days/10 years; 2 – weather stations and mean annual air temperature trends, °C/10 years; 3 – annual precipitation trend: a – positive, b – negative, c – no precipitation data; 4 – watershed boundaries

наблюдается как тенденция к смещению даты начала стока на более поздний срок (на 1,1 день/10 лет), так и статистически значимое изменение даты окончания стока в сторону более ранней (-6,9 дней/10 лет) (рисунок 2е, 2и). На остальных гидрологических постах происходит сдвиг даты начала стока на более раннее время, а окончания – на более позднее, причём последнее происходит с большей интенсивностью. Так, тренды в датах начала стока лежат в пределах

от -0,4 до -1,9 дней/10 лет, в то время как смещение даты окончания стока составляет от +1,0 до +5,0 дней/10 лет и для каждого поста, в том числе для створа р. Кэмпэндээйи – с. Кемпендяй, превышает скорости изменения даты начала стока. Менее интенсивно происходит смещение даты окончания стока на реках Шестаковка и Кэнгкэмэ, водосборы которых расположены в центральной части исследуемого района (до +1,5 дней/10 лет) (рисунок 2з). Статистически значимые тренды в датах начала стока выявлены на одном из объектов (река Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда)), в датах окончания – на двух (реки Кэмпэндээйи (с. Кемпендяй) и Чыалагас).

Скачкообразное изменение продолжительности стока произошло на половине объектов исследования, а именно на реках Кэмпэндээйи (в 1986 г. в створе с. Кемпендяй и в 1996 г. в створе ГМС Чайнгда), Тангнары (2001 г.) и Кэнгкэмэ (2002 г.). При этом на реках Кэнгкэмэ и Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда) переломы в рядах продолжительности стока были выявлены для тех же лет, что и в случае годового слоя стока. Скачкообразное изменение дат начала стока наблюдалось на 6-ти водотоках из 8. Наиболее рано перелом произошёл на р. Кэмпэндээйи: в 1984 г. в створе с. Кемпендяй и в 1992 г. в створе ГМС Чайнгда. На оставшихся реках скачкообразное изменение даты начала стока произошло в 1999–2004 гг., кроме рек Шестаковка и Тангнары, где перелом не был зафиксирован. Скачкообразное изменение даты окончания стока выявлено на реках Кэмпэндээйи (с. Кемпендяй) в 1987 г. и Чыалагас в 2003 г. (таблица 1).

Таблица 1. Характеристики исследуемых рек, тренды и точки перелома (подчёркнуты) в рядах годового слоя и продолжительности стока

Table 1. Characteristics of the studied watersheds, trends and change points (underlined) in series of annual runoff and runoff duration

Река - пост	Код пункта наблю-дений	Площадь водос-бора, км^2	Средний слой стока, мм/год	Тренд годового слоя стока, %/10 лет	Тренд продолжи-тельности стока, дней/10 лет	Среднемно-голетняя дата начала стока	Тренд даты начала стока, дней/10 лет	Среднемно-голетняя дата окончания стока	Тренд даты окончания стока, дней/10 лет
р. Чыалагас – с. Хоринцы	3203	52,3	100	5	2,2	3 мая	-0,8 2004	6 сентября	**5,0 2003**
р. Синяя – гм. ст. Тонгулах	3207	11600	57	9	4,7	2 мая	-1,2 1999	21 декабря	4,1
р. Шестаковка – г.п. Камырдагыстах	3214	170	24	7	1,3	30 апреля	-0,4	29 октября	1,0
руч. Подгорный – 3,0 км от устья	3283	20,3	167	**12 1988**	2,7	1 мая	-0,6 2001	10 октября	2,5
р. Кэнгкэмэ – з. Второй Станок	3307	3550	24	**11 2002**	3,0 2002	3 мая	-0,9 2003	15 ноября	1,5
р. Кэмпэндээйи – ГМС Чайнгда	3359	102	63	**18 1996**	4,8 1996	10 мая	**-1,9 1992**	4 ноября	3,0
р. Кэмпэндээйи – с. Кемпендяй	3360	1290	72	1	**-8,8 1986**	2 мая	1,1 1984	16 ноября	**-6,9 1987**
р. Тангнары – с. Чай	3390	5760	46	**9**	2,9 2001	3 мая	-0,7	5 декабря	2,4

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые тренды

Таблица 2. Тренды в рядах метеорологических характеристик
Table 2. Trends in the series of meteorological characteristics

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Температура воздуха													
n	11	12	13	15	11	15	10	13	0	14	12	0	15
m, °С/10 лет	0,89	0,71	0,82	0,62	0,38	0,66	0,37	0,38	0,16	0,70	0,96	0,08	0,55
max, °С/10 лет	1,20 Исить	1,03 Исить	1,13 Ытык-Кюёль	0,86 Вилюйск	0,56 Чаингда	0,91 Вилюйск	0,46 Тонгулах	0,48 Тонгулах	0,25 Чурапча	0,80 Ытык-Кюёль	1,33 Якутск	0,54 Якутск	0,70 Якутск
min, °С/10 лет	0,56 Верхоянский Перевоз	0,42 Верхоянский Перевоз	0,40 Чаингда	0,40 Усть-Мая	0,28 Олёкминск	0,48 Усть-Мая	0,21 Хатырык-Хомо	0,19 Олёкминск	0,07 Олёкминск	0,51 Олёкминск	0,43 Олёкминск	-0,41 Олёкминск	0,36 Олёкминск
Осадки													
n	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
m, мм/10 лет	0,33	0,54	0,42	0,38	1,41	-1,12	0,52	0,40	1,48	0,31	0,48	-0,29	5,25
max, мм/10 лет	1,20 Вилюйск	1,11 Олёкминск	1,06 Вилюйск	1,41 Исить	2,23 Усть-Мая	2,50 Килеер	2,11 Крест-Хальджай	4,52 Вилюйск	3,65 Олёкминск	1,43 Усть-Мая	1,14 Усть-Мая	0,28 Олёкминск	14,56 Исить
min, мм/10 лет	-0,11 Хатырык-Хомо	-0,20 Хатырык-Хомо	0,14 Усть-Мая	-0,22 Килеер	0,00 Хатырык-Хомо	-3,21 Якутск	-0,49 Килеер	-4,00 Усть-Мая	-0,82 Вилюйск	-0,92 Килеер	-0,36 Хатырык-Хомо	-1,01 Хатырык-Хомо	-2,95 Хатырык-Хомо

n – число метеостанций, для которых был выявлен статистически значимый тренд в изменении характеристики (температуры – из 15 метеостанций, для осадков – из 8 метеостанций); m – средняя величина тренда; max и min – наибольшая и наименьшая величина тренда и метеостанции, на которых они были зафиксированы

Также на продолжительность стока некоторых рек оказывает влияние изменение периода их летнего пересыхания. На двух водотоках из числа рассмотренных в данном исследовании регулярно наблюдается это явление. На руч. Подгорном не было обнаружено тенденции к изменению продолжительности периода пересыхания. На р. Чыалагас было выявлено наличие положительного статистически значимого тренда – продолжительность летнего пересыхания увеличивалась примерно на 8,6 дней/10 лет в период 1970–2022 гг. с переломом в 1992 г. За счёт этого рост продолжительности стока на этой реке происходил медленнее, чем на большей части остальных исследуемых водотоков, хотя темп смещения даты окончания стока на более позднее время на р. Чыалагас больше, чем на всех других рассмотренных реках (таблица 1). Наиболее длительное пересыхание на р. Чыалагас, продолжавшееся 101 день, наблюдалось в 2021 г.

Наибольший суточный расход воды за год на рассматриваемых реках формируется как в половодье, так и в период дождевых паводков. На р. Синей – гм. ст. Тонгулах и р. Кэмпэндээйи – с. Кемпендяй он во все годы проходил до середины июня. На остальных реках в преобладающем числе случаев максимальный расход тоже наблюдается при прохождении половодья, но в отдельные годы и в дождевые паводки. Чаще, чем на остальных реках, формирование наибольшего расхода в паводок встречается на небольших водотоках. Например, на руч. Подгорном такая ситуация за рассматриваемый период наблюдалась в трети случаев, на р. Чыалагас в 10 % случаев наибольший за год расход был сформирован при паводке.

Значения максимальных расходов имеют тенденцию к возрастанию на всех рассматриваемых постах, в одном из восьми случаев это изменение статистически значимое (р. Кэмпэндээйи – ГМС Чайнгда). Здесь тренд составил +20 %/10 лет (+0,6 м^3/с /10 лет) со скачкообразным изменением в 1997 г. Перелом в ряде максимальных расходов также зафиксирован на ручье Подгорном в 1991 г. Незначимые тренды максимальных расходов воды за год лежат в пределах +1– +9 %/10 лет.

На 7 гидрологических постах из 8 выявлена тенденция к смещению даты максимального расхода на более ранние числа на -0,8–-2,9 дней/10 лет. На одном из постов изменение не наблюдается (руч. Подгорный). На трёх объектах смещение даты максимального расхода статистически значимо (реки Синяя, Кэнгкэмэ и Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда)). Скачкообразное изменение даты максимального расхода выявлено для рек Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда) и Кэнгкэмэ в 2001 г. и 2002 г. соответственно, а также для р. Тангнары в 2004 г.

Обсуждение

Годовой слой стока. Несмотря на практически полное отсутствие значимых трендов в рядах годовых сумм осадков, на всех рассмотренных реках наблюдается увеличение годового слоя стока, на 4 реках значимое. На 5 водотоках из 8 наиболее крепкой является связь слоя стока с осадками за год, коэффициенты корреляции составили от 0,34 до 0,63 (таблица 3). Также корреляционный анализ показал наличие слабой связи между слоями стока за год и количеством осадков в мае на большинстве водотоков (значимые КК до 0,45). Эта зависимость может объясняться тем, что, с одной стороны, тенденции изменения осадков в этом месяце неотрицательны по данным всех рассмотренных метеостанций, а с другой – выпавшие в мае осадки с меньшими потерями попадают в сток за счёт менее интенсивного испарения, чем, например, в летний период. На р. Чыалагас также отмечается более выраженное влияние на сток осадков за июль (КК 0,49) (таблица 3). Значимые невысокие коэффициенты корреляции были выявлены между годовым слоем стока и температурами воздуха в месяцы с апреля по июнь (КК до 0,37), т.е. в период, когда тает снег, на реках возобновляется сток после зимнего перемерзания и протекает половодье. Увеличение годового стока может быть связано с увеличением его продолжительности в переходные периоды, когда испарение незначительно.

Продолжительность стока. Длительность периода стока зависит от дат его начала и окончания в весенний и осенне-зимний сезон, а также от продолжительности бессточных периодов летом.

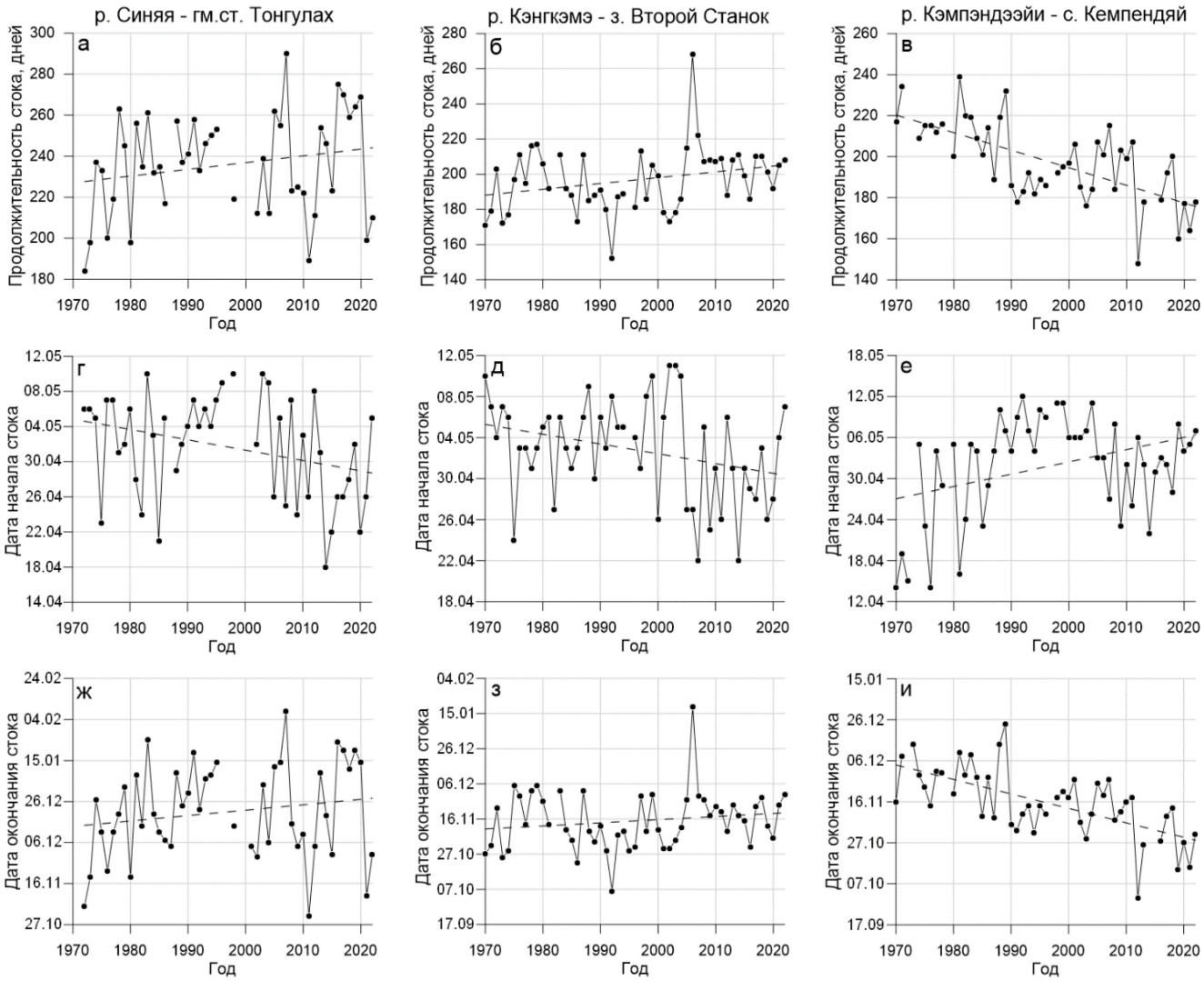


Рисунок 2. Изменение продолжительности (а-в), даты начала (г-е) и окончания стока (ж-и) рек Центральной Якутии: Синей (слева), Кэнгкэмэ (в центре) и Кэмпэндээйи (справа)

Figure 2. Changes in the runoff duration (а-в), flow start (г-е) and end date (ж-и) of Central Yakutia rivers: Sinaya (left), Kengkeme (center) and Campendeyi (right)

Смещение даты начала стока на более раннее время вызвано повышением температуры воздуха в апреле и мае. Статистически значимые коэффициенты корреляции между этими характеристиками присутствуют на 7 объектах из 8 (исключением является р. Кэмпэндээйи (с. Кемпендяй)) и составляют до -0,68 в апреле и до -0,56 в мае (таблица 3). Для даты начала стока на р. Кэмпэндээйи (с. Кемпендяй) выявлен единственный статистически значимый коэффициент корреляции со среднемесячной температурой августа (0,41).

Дата окончания стока слабее связаны с метеорологическими условиями на водосборе, чем дата начала стока. Коэффициенты корреляции практически на всех объектах не превышают 0,5 (см. таблицу 3). Исключением является только река Чыалагас, на которой выражена связь даты конца стока с годовыми осадками (КК = 0,54). На части других рек дата окончания стока также зависит от количества осадков за год (КК до 0,46). Более выражено влияние сумм осадков за август (статистически значимые КК до 0,42), которыми восполняется запас влаги на водосборе, что способствует продлению периода стока. Прослеживается, что на водотоках тем сильнее связь с выпадающими осадками, чем раньше наблюдается прекращение стока. Возникновение бессточных периодов в холодную часть года может быть вызвано истощением запасов подземных вод в речном бассейне или явлениями, связанными с

промерзанием: нарастанием льда на мелководных участках водотоков или аккумуляцией речного стока в наледях [1]. В связи с этим более значимое воздействие на начало бессточного периода осадки оказывают на тех реках, где окончание стока происходит раньше наступления отрицательных температур воздуха и не связано с процессами промерзания. Например, на водотоках с меньшими площадями водосбора.

Таблица 3. Наибольшие статистически значимые коэффициенты корреляции между рядами гидрологических и метеорологических характеристик

Table 3. The highest statistically significant correlation coefficients between series of hydrological and meteorological characteristics

Характеристика стока	Гидрологический пост							
	3203	3207	3214	3283	3307	3359	3360	3390
H	год Р 0,59	год Р 0,45	год Р 0,34	год Р 0,63	июнь Т 0,28	май Р 0,34	июнь Т 0,37	год Р 0,50
	июль Р 0,49	апрель Р 0,31	май Т 0,33	май Р 0,42	август Р 0,28	год Р 0,31	апрель Т 0,33	май Р 0,38
	май Р 0,45		май Р 0,30	июль Р 0,36		февраль Р 0,29	год Р 0,31	год Т 0,37
D	год Р 0,58	апрель Т 0,41	апрель Т 0,52	год Р 0,55	август Р 0,40	май Т 0,48	февраль Р -0,33	ноябрь Т 0,36
	июль Р 0,55	год Т 0,38	май Т 0,49	апрель Т 0,42		год Р 0,48		январь Т 0,31
	август Т -0,48	декабрь Т 0,37	декабрь Т 0,39	июль Р 0,39		февраль Т -0,37		май Р 0,29
Дата начала стока	апрель Т -0,68	апрель Т -0,56	апрель Т -0,58	апрель Т -0,64	апрель Т -0,62	май Т -0,56	август Т 0,41	апрель Т -0,63
	май Т -0,34	май Т -0,37	май Т -0,44	май Т -0,45	май Т -0,43	июнь Т -0,52		май Т -0,39
		год Т -0,28		год Т -0,33	март Т -0,39	год Т -0,41		июнь Р 0,33
Дата окончания стока	год Р 0,54	сентябрь Т 0,40	декабрь Т 0,37	год Р 0,42	август Р 0,42	год Р 0,46		ноябрь Т 0,35
	август Р 0,42	декабрь Т 0,38	год Т 0,32	май Т 0,41		апрель Т 0,36		год Р 0,32
	сентябрь Р 0,35	год Т 0,35	год Р 0,32	август Р 0,35		июль Р 0,30		январь Т 0,31
Q_{max}	май Р 0,41	год Р 0,33	май Т 0,31	год Р 0,44	июнь Т 0,28	февраль Р 0,28	июнь Т 0,32	июнь Т 0,35
	год Р 0,34	апрель Р 0,31		ноябрь Р 0,28			май Т 0,29	год Т 0,30
								февраль Р 0,28
Дата Q_{max}	июль Р 0,44	апрель Т -0,39	июль Р 0,41	год Р 0,44	июнь Т -0,42	май Т -0,33	июнь Т -0,37	сентябрь Р 0,37
	год Р 0,38	март Р -0,30	июнь Т -0,30	октябрь Т -0,29	июль Р 0,34	август Р 0,31	декабрь Т -0,37	ноябрь Р 0,35
	март Р -0,31	июнь Т -0,30		ноябрь Р 0,28	июнь Р 0,28		май Т -0,36	год Р 0,29
d	сентябрь Р 0,37	не пересыхает	не пересыхает	декабрь Р -0,38	не пересыхает	не пересыхает	не пересыхает	не пересыхает
	июнь Т 0,32			июль Р -0,33				

Обозначения: Т – температура воздуха, Р – осадки, Н - годовой слой стока, D – продолжительность стока, Qmax – максимальный суточный расход, d – продолжительность летнего пересыхания

На реках, где сток прекращается позднее, дата его окончания в большей степени зависит от температуры воздуха осенью или в начале зимы. Так, на реках Тангнары и Синяя начало бессточного периода в среднем наблюдается в начале и конце декабря соответственно. На р. Тангнары дата прекращения стока сильнее связана со средней температуры ноября (КК = 0,35, значимый), на р. Синей – со среднемесячной температурой воздуха сентября и декабря (КК 0,40 и 0,38 соответственно, значимые). В тёплые годы промерзание мелководных участков рек происходит медленнее, в результате чего сток наблюдается дольше.

На р. Чыалагас, где прекращение периода стока часто происходит в летний период, влияние на дату его окончания также оказывает средняя температура воздуха в августе (КК = -0,34, значимый). При более высоких температурах интенсивнее происходит испарение, что ведёт к уменьшению запаса доступной для формирования речного стока влаги на водосборе, результатом чего может являться раннее окончание периода стока. По этой же причине, по-видимому, продолжительность летнего пересыхания на р. Чыалагас увеличивается в связи с ростом температуры воздуха в июне (КК = 0,32).

На р. Кэмпэндээйи (пост с. Кемпендяй), где направление смещения дат начала и окончания периода стока отличается от тенденций, характерных для других исследуемых объектов, не было обнаружено значимой связи между интенсивно изменяющейся датой окончания стока и временными рядами температур воздуха или осадков. Это может свидетельствовать о том, что изменение метеорологических условий на водосборе реки Кэмпэндээйи не является причиной наблюдаемого здесь уменьшения продолжительности стока.

Величина и дата максимального расхода. На половине объектов исследования статистически значимые коэффициенты корреляции были выявлены между величиной наибольшего за год расхода и среднемесячными температурами мая или июня, однако эта связь слабая (КК от 0,28 до 0,35). Влияние роста температур на максимальные расходы объяснялось увеличением интенсивности стаивания [10]. На остальных реках больше выражено влияние осадков за год и за такие месяцы, как февраль, апрель и май, то есть осадков, выпадающих в период половодья либо перед ним. При этом коэффициенты корреляции также невысоки и составляют до 0,41 (таблица 3).

Даты прохождения максимальных расходов воды слабо коррелируют со средними температурами воздуха мая на расположенных на востоке реках (КК составили -0,36 – -0,30), июня – на основной части водотоков территории (-0,42 – -0,30). Рост температуры воздуха весной приводит к более раннему протеканию половодья. На отдельных объектах зафиксированы значимые коэффициенты корреляции даты максимального расхода с температурой апреля (-0,39), декабря (-0,37), октября (-0,29). Также на исследуемых реках была обнаружена слабая связь даты наибольшего расхода с осадками: обратная – с осадками за февраль, март (КК до -0,31), прямая – с суммами осадков за месяцы летнего или осеннего периода, особенно июля (КК до 0,44). Обратная зависимость даты максимального расхода от февральских осадков может объясняться тем, что при большем количестве снега на водосборе в предшествующий половодью период выше будут величины расходов, сформированные при его таянии. В результате меньше вероятность того, что расходы, формирующиеся впоследствии дождевыми паводками, превысят эту величину, и наибольший за год расход будет наблюдаться весной, при прохождении половодья. Осадки за летние или осенние месяцы оказывают противоположное влияние – чем их больше, тем выше вероятность, что в случае их выпадения в короткий срок максимальный расход будет зафиксирован позднее – при прохождении паводков.

Сопряженность происходящих изменений

Изменение различных характеристик стока на одних и тех же постах во многих случаях соотносится друг с другом. Например, наиболее интенсивное увеличение как продолжительности стока, так и его годового слоя происходит в створе ГМС Чайнгда р. Кэмпэндээйи. Здесь же наиболее значительно изменяются максимальный суточный расход, его дата и дата начала стока. В целом на р. Кэмпэндээйи (ГМС Чайнгда) наблюдается статистически значимое изменение

всех исследуемых характеристик стока, кроме его продолжительности и даты окончания. Помимо этого, здесь совпадает год перелома в рядах годового слоя и длительности стока (см. таблицу 1). Аналогичная ситуация наблюдается в случае р. Кэнгкэмэ, где скачкообразное изменение этих двух характеристик также произошло одновременно – в 2002 г.

В то же время на водотоках, где темпы возрастания годового слоя стока ниже, менее интенсивно протекает и рост продолжительности стока. Примерами таких объектов являются реки Чыалагас, Шестаковка (таблица 1). В створе с. Кемпендяй р. Кэмпэндээйи, где, в отличие от остальных водотоков, продолжительность стока уменьшается, не наблюдается характерное для других рек увеличение годового слоя стока.

Заключение

Проведённый анализ позволил выявить тенденции в изменении продолжительности и других характеристик стока 8 малых и средних рек Центральной Якутии за 1970–2022 гг. и рассмотреть влияние климатических факторов на этот процесс. Практически на всех реках годовой слой стока растет, в 4 из 8 случаев статистически значимо. Максимальный расход за год тоже увеличивается, статистически значимо только на одном посту. Его прохождение смещается на более ранние даты (статистически значимо – на трёх постах). Практически на всех исследуемых водотоках наблюдалось незначимое увеличение периода стока с величинами трендов от 1,3 до 4,8 дней/10 лет, которое было обусловлено смещением на более раннее время даты начала стока весной и на более позднее – дня его окончания осенью. Изменение даты начала стока вызвано ростом температуры воздуха в апреле и мае. Время окончания стока имеет слабую и сложную связь с климатическими факторами. На одной из рек происходит увеличение длительности летнего пересыхания. На части объектов прослеживается сопряжённость изменений годового слоя и продолжительности стока. На реках с меньшими темпами увеличения слоя стока длительность стока возрастает незначительно либо уменьшается, в то время как на одном из водотоков происходит более интенсивный, чем на остальных реках, рост обеих характеристик.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках НИОКТР №122012400106-7 (Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН).

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the R&D №122012400106-7 (Melnikov Permafrost Institute SB RAS).

Литература / References

1. Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России. СПб: РГГМУ, 2001. 209 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 104 стр.
3. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual andextreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. Geophys. Res. Lett., 2016, vol. 43, pp. 10.764-10.772. DOI: 10.1002/2016GL070796
4. 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. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-2-71-83.
   Georgiadi A.G., Kashutina E.A. The Features of Long-term Annual and Seasonal Runoff Changes for Lena Basin Rivers. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series, 2014, no. 2, pp. 71–83. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-2-71-83. (In Russian; abstract in English).
5. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. № 55. С. 86–98. DOI 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98.

Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of the ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climate changes. Scientific notes of the RSHU, 2019, no. 55, pp. 86–98. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-86-98. (In Russian; abstract in English).

6. Kendall M.G. Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1975.
7. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, vol. 13, pp. 245–259.
8. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. J. Amer. Statist. Assoc., 1968, vol. 63, pp. 1379–1389.
9. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change point problem. Appl. Statist., 1979, vol. 28, pp. 126–135.
10. Пряхина Г.В., Распутина В.А., Сумачев А.Э., Лебедева Л.С. Оценка изменения характеристик стока малых и средних рек Центральной Якутии под влиянием климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2023. Т. 68. № 4. С. 717–732. DOI: 10.21638/spbu07.2023.406.

Pryakhina G.V., Rasputina V.A., Sumachev A.E., Lebedeva L.S. Assessment of runoff characteristics changes of small and medium-sized rivers in Central Yakutia under the climate change influence. Bulletin of the St. Petersburg University. Earth Sciences, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 717–732. DOI: 10.21638/spbu07.2023.406. (In Russian; abstract in English).

Поступила в редакцию / Received 12.05.2025
Принята к публикации / Accepted 28.05.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Дарья Олеговна, студент, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, https://orcid.org/0009-0000-1565-1728, SPIN: 7092-5386, e-mail: andasha02@mail.ru

Лебедева Людмила Сергеевна, канд. геогр. наук, в.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия, https://orcid.org/0000-0002-7498-9902, ResearcherID: J-6959-2016, e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Daria O. Andreeva, student, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, https://orcid.org/0009-0000-1565-1728, SPIN: 7092-5386, e-mail: andasha02@mail.ru

Lyudmila S. Lebedeva, Ph.D. (Geography), leading researcher, Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, https://orcid.org/0000-0002-7498-9902, ResearcherID: J-6959-2016, e-mail: lyudmilaslebedeva@gmail.com