Статья принята в печать и будет опубликована в журнале:
«Вестник Санкт- Петербургского университета. Науки о Земле»

Оценка изменения характеристик стока малых и средних рек Центральной Якутии под влиянием климатических изменений

Пряхина Галина Валентиновна, Распутина Валерия Алексеевна, Сумачев Александр Эдуардович, Лебедева Людмила Сергеевна

DOI: https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.406

Дата получения рукописи: 05.12.2022
Дата принятия рукописи в печать: 10.11.2023

Для цитирования: Пряхина, Г. В., Распутина, В. А., Сумачев, А. Э., Лебедева, Л. С. (2023) Оценка изменения характеристик стока малых и средних рек Центральной Якутии под влиянием климатических изменений. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле,* 68 (4).
https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.406

Это неотредактированный файл принятой к публикации рукописи. До публикации в окончательном виде она будет подвергнута редактированию и верстке. Обратите внимание, что во время производственного процесса могут быть выявлены ошибки, влияющие на содержание. К данной рукописи применяются все правовые оговорки, относящиеся к журналу.

ACCEPTED MANUSCRIPT

УДК 556.5

Оценка изменения характеристик стока малых и средних рек Центральной Якутии под влиянием климатических изменений[1].

Пряхина Галина Валентиновна[1,2], Распутина Валерия Алексеевна[1,2], Сумачев Александр Эдуардович[1], Лебедева Людмила Сергеевна[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9

[2]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Российская Федерация, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

Пряхина Г.В.: g65@mail.ru

Распутина В.А.: lerasputina88@gmail.com

Сумачев А.Э.: a-sumachev@mail.ru

Лебедева Л.С.: lyudmilaslebedeva@gmail.com

Аннотация

Реакция речных водосборов, расположенных на территории России, на изменение климата в последние десятилетия выразилась в появлении разнонаправленных тенденций в рядах годовых, максимальных расходов воды и величине зимнего стока. Однако реакция стока малых и средних рек на происходящее потепление климата достаточно слабо изучена в отличие от крупных водотоков. В настоящей работе выполнен комплексный анализ климатических и гидрологических характеристик малых и средних рек Центральной Якутии, и оценено влияние изменения климата на характеристики речного стока в различных условиях региона. Было установлено, что выявленные положительные тренды в рядах температуры воздуха соответствуют тенденциям, характерным для остальной части Российский Федерации. Реакция стока малых и средних рек на климатические изменения наиболее существенна в зимне-весенние месяцы года: происходит увеличение стока в весенний и зимний периоды и за

[1] Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда №22-17-20040 «Субаэральные и подозерные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

год в целом. Особенностью реакции водосборов исследуемой территории в сравнении с Европейской частью России и южной Сибирью является наличие статистически значимых трендов в рядах годовых расходов воды для подавляющего числа исследуемых створов. Наиболее заметные изменения (в процентном отношении к базовому периоду) произошли в годовом стоке малых рек, так как малые реки наиболее быстро реагируют на внешнее воздействие. Выраженность реакции стока рек определяется не только степенью изменений климатических характеристик, но и особенностями формирования стока на водосборах исследуемого района, в частности, наличием многолетней мерзлоты.

Ключевые слова: реки Центральной Якутии, изменение стока, климатические изменения.

Введение

Темпы потепления на территории РФ намного превышают средние значения по Земному шару. Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха в 1976-2018 гг. составила по данным ФГБУ «ИГКЭ» 0,47°С/10 лет, что в 2,5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период (0,17-0.18°С/10 лет), и более чем в 1,5 раза превышает среднюю скорость потепления приземного воздуха над сушей Земного шара (0,28-0,29°С/10 лет) (оценки по данным Центра Хэдли и Университета Восточной Англии: Had – CRU UEA; NOAA). Реакция речных водосборов в целом для территории России на нестационарную климатическую ситуацию в последние десятилетия выразилась в появлении разнонаправленных тенденций в рядах годовых, максимальных расходов воды и величине зимнего стока (Гельфан, 2021; Научно-прикладной справочник…, 2021; Фролова и др., 2022). В сибирских регионах начало изменений в водном режиме рек фиксируется позднее (вторая половина 1980-х гг.), чем на Европейской территории. На большинстве водосборов отмечается увеличение годового стока на 20–50% относительно базисного периода (Гельфан и др., 2021), снижение максимального стока в замыкающих створах рек Оби, Енисея, Лены и Колымы (Фролова и др., 2022), значительное увеличение водности в зимний период, что подтверждается выявленными положительными статистически значимыми трендами, в том числе и в бассейне реки Лены (Научно-прикладной справочник…, 2021; Tananaev et al., 2016). Территория центральной Якутии с гидрологической точки зрения полностью относится к бассейну р. Лены, характеризуется наличием сплошной многолетней мерзлоты,

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

прерываемой таликами разных типов, и, в этой связи, сложными условиями формирования стока. При увеличении температуры многолетней мерзлоты до рекордно высоких значений: в среднем на 0,29°С ± 0,12°С с 2007 по 2016 годы (Пряхина и др., 2022) реакция стока малых и средних рек остается мало изученной в отличие от крупных водотоков. В то же время, для оценки водообеспеченности региона на перспективу необходимо понимать тенденции в изменении стока в связи с происходящими климатическими флуктуациями. Целью настоящей работы является комплексный анализ климатических и гидрологических характеристик малых и средних рек Центральной Якутии, оценка влияния изменения климата на характеристики речного стока в различных условиях региона.

1. Материалы и методы исследования

В работе использованы ряды среднемесячных, среднегодовых и максимальных срочных расходов воды по 13 гидрологическим постам (табл. 1), которые расположены на реках с площадями водосборов от 170 до 32600 км^2, а также данные, находящиеся в свободном доступе, о среднегодовой (24 метеостанции) и среднесуточной температуре воздуха (8 метеостанций), осадках (11 метеостанций) и температуре почвы (2 метеостанции) за период с 1950 по 2019 гг. (рис. 1). Весь период наблюдений был разбит на базовый и контрольный с учетом нарушения стационарности рядов наблюдений за стоком рек. В качестве базового периода был выбран период 1950-1980 гг.

Водосборы рек в основном располагаются в пределах Приленского плато и Центральноякутской низменности и относятся к бассейнам рек Вилюй, Лена и Алдан. Верховья рек Амга и Алдан текут по Алданскому нагорью. Приленское плато сложено преимущественно карбонатными, местами галогенными и гипсоносными палеозойскими породами (Ресурсы…, 1972). В сложении Центральноякутской низменности участвуют терригенные отложения юрского, мелового и в отдельных впадинах неогенового возраста. В верховьях Амги и Алдана, а также на водосборе р. Нюя сконцентрированы области сильного проявления карста, который может иметь значительное влияние на формирование стока этих рек.

Территория характеризуется суровым резко-континентальным климатом с очень низкими температурами зимой (до -60°С) и относительно высокими температурами летом (до +35°С). Среднегодовая многолетняя температура отрицательная и уменьшается от -4.7…-5.5°С на юго-западе региона (метеостанции Джикимда, Мача) до -11°С и ниже на северо-востоке (метеостанции Ытык-кюёль, Верхоянский перевоз).

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Основные влагонесущие массы поступают с запада. Годовые суммы осадков за многолетний период составляют от 250 мм/год и ниже в Центральноякутской низменности до 500 мм/год в горных верховьях Алдана и Амги. Устойчивый снежный покров устанавливается в октябре. Снеготаяние происходит в конце апреля и в мае.

Все реки находятся в зоне многолетней мерзлоты. Водосборы рек Намана. Ботома, Кэмпэндээйи, Шестаковка и Кэнкэмэ полностью относятся к сплошной криолитозоне. В бассейнах остальных рек присутствует как сплошная, так и прерывистая многолетняя мерзлота.

Для рассмотренных рек характерна глубокая зимняя межень, в отдельные годы даже на относительно крупных реках сток может отсутствовать за счет полного их промерзания. Зимняя межень начинается в октябре с формированием устойчивого ледостава на реках, при этом стоит отметить большую разность сентябрьских и октябрьских расходов воды. После формирования устойчивого ледостава расходы воды плавно снижаются до минимальных значений, которые наблюдаются с января по март. В апреле в отдельные годы начинается раннее половодье. Половодье длится до двух месяцев с мая по июнь. В мае расходы воды увеличиваются в 25-30 раз по сравнению с апрельскими.

Анализ ландшафтной структуры водосборов исследуемых рек показал, что согласно мерзлотно-ландшафтной карте республики Саха (Мерзлотно-ландшафтная карта..., 2018) на большинстве бассейнов распространены ландшафты с преобладанием лиственницы (до 80%), за исключением водосбора реки Ботома до створа Бролог, где 72% площади водосбора занята сосновыми лесами кустарничково-лишайниковыми.

Анализ рядов гидрометеорологических характеристик выполнен методом математической статистики (Сикан, 2007, Малинин, 2009) согласно рекомендациям, представленным в своде правил по проектированию и строительству СП 33-101-2003 (Определение…, 2003), а также рекомендаций ФГБУ «ГГИ» (Методические рекомендации…, 2007; Методические рекомендации…, 2010).

Для оценки статистической значимости линейных трендов были рассчитаны значения коэффициента корреляции Пирсона и его критические значения:

$$R_{\text{крит}} \approx \frac{2}{\sqrt{n+2}},$$

где $R_{\text{крит}}$ — критическое значение коэффициента корреляции Пирсона, n — число лет наблюдений.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

В случаях, когда $|R|>R_{крит}$ тренд признавался значимым при заданном уровне значимости в 5% (Малинин, 2009).

Гипотеза об однородности рядов по дисперсии проверялась с помощью теста Фишера, по среднему значению — теста Стьюдента. Для обоих тестов были рассчитаны значения *p-value*, представляющие минимальный уровень значимости опровержения нулевой гипотезы о равенстве двух характеристик, принятый двусторонний уровень значимости, использованный в работе, составляет 10%. Таким образом, если расчетное значение *p-value* для конкретного теста было менее 10%, то нулевая гипотеза о равенстве двух характеристик опровергалась при заданном уровне значимости.

Критериями для группировки рек являлись: результаты оценки рядов стока на однородность по критериям Стьюдента и Фишера, наличие статистически значимых трендов, а также наличие зимнего стока. При этом применялось медианное значение того или иного статистического теста, так как осреднение по небольшому количеству постов дает противоречивые результаты в связи с асимметричностью эмпирических распределений.

2. Результаты исследования и обсуждение

Внутригодовая и межгодовая изменчивость температур воздуха и осадков

Гипотеза об однородности рядов среднемесячной и среднегодовой температуры воздуха по критерию Стьюдента опровергается для 70% рядов, по критерию Фишера - в большинстве случаев только для среднемесячных величин в мае на метеостанциях Амга, Буяга, Тонгулах, Бердигестях, Ытык-Кюёль и Учур. Наличие статистически значимых положительных трендов в рядах среднегодовой температуры воздуха зафиксировано на всех рассмотренных метеорологических станциях (табл. 2, рис. 2). В среднем по территории увеличение по отношению к базовому периоду составило 1,4°С, наибольшим оно оказалось на метеостанции Буяга: 2,3°С.

Несмотря на то, что средняя месячная температура воздуха за все месяцы контрольного (1980-2019 гг.) периода повсеместно увеличилась относительно базового (1950-1980 гг.), статистически значимые тренды на разных метеостанциях были выявлены в разные месяцы года.

Желтым цветом выделены группы метеостанций, где статистически значимый тренд в рядах среднемесячной температуры воздуха наблюдался в течение всего года за исключением сентября (11 месяцев); синим - с января по июнь (в отдельных случаях по июль, 6-7 месяцев); зеленым - с февраля по сентябрь (8 месяцев); розовым- с октября по

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

июнь (9 месяцев); красным - с февраля по июль (4 месяца); серым – с ноября по июль (9 месяцев).

Рост температуры воздуха вызвал смещение дат перехода температуры воздуха через 0°С в весенний период в сторону более ранних, а в осенний период в сторону более поздних сроков, что привело к сокращению холодного периода. Это было зафиксировано на всех станциях с открытыми данными о суточной температуре воздуха (Джикимда, Исить, Килеер, Крест-Хальджай, Сеген-Кюэль, Тегюльтя, Учур и Якутск). В среднем по сравнению с базовым периодом сокращение составило от 2 до 8 дней. При этом в отдельные годы эта величина достигала 20 дней и более. Наиболее выраженным эффект оказался на востоке и северо-востоке исследуемого района (метеостанции Якутск, Крест-Хальджай, Сеген-Кюэль, Тегюльтя), где в отдельные годы сокращение достигало 29 дней.

Оценка рядов среднемесячных и среднегодовых сумм осадков на однородность по критериям Стьюдента и Фишера показала, что гипотеза об однородности опровергается в 50% и в 20% случаях соответственно. Анализ на наличие тренда в рядах среднегодовых сумм осадков выявил разнонаправленные тенденции: на востоке и северо-востоке центральной Якутии наблюдается статистически незначимое увеличение осадков (метеостанции Крест-Хальджай, Сеген-Кюэль, Тегюльтя, Учур, Батамай), незначимое снижение - на метеостанциях Якутск, Чурапча, Амга; отсутствие изменений - на метеостанции Килеер. Статистически значимый положительный тренд в рядах годовых сумм осадков получен на метеостанциях Джикимда и Исить, с увеличением по отношению к базовому периоду на 14,5 и 11,5 % соответственно. Тренды в рядах среднемесячных осадков в целом отражают вышеописанную тенденцию и в большинстве случаев не являются статистически значимыми. Исключение составляют многолетние ряды сумм осадков за декабрь: общая тенденция на снижение осадков; для станций Крест-Хальджай, Сеген-Кюэль, Амга, Якутск – отрицательные статистически значимые тренды. Тенденцию на увеличение сумм осадков можно проследить в феврале для всех станций за исключением Батамая и Чурапчи (Джикимда, Исить, Килеер - статистически значимый тренд), в мае за исключением Амги и Крест-Хальджая (Килеер и Тюгельтя- статистически значимый тренд) и сентябре. Для последнего положительные тренды являются статистически значимыми на метеостанциях Сеген-Кюэль и Амга. Выявленные разнонаправленные тенденции объясняются сложной циркуляцией воздушных масс и неоднородностью подстилающей поверхности исследуемого района. Вместе с тем отметим повсеместную (за исключением метеостанции Якутск) тенденцию

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

к увеличению сумм осадков за период с положительными температурами. Статистически значимый тренд зафиксирован в рядах данных на метеостанции Джикимда.

Временная изменчивость расходов воды

По наличию стока в зимние месяцы исследуемые реки были разделены на две группы: в первую группу вошли реки, имеющие постоянный зимний сток; во вторую - с отсутствием стока в результате промерзания (на рис. 4 показана изменчивость среднегодовых расходов воды для рек каждой группы). Анализ однородности рядов по критерию Стьюдента и Фишера среднемесячного и среднегодового стока рек первой группы (Нюя, Бирюк, Амга, Ботома, Алдан) показал, что гипотеза об однородности опровергается за исключением периода с апреля по июль. Статистически значимые положительные тренды были выявлены в рядах среднемесячного стока с января по март для всех рек; в декабре для всех, за исключением Алдана; в октябре - за исключением Нюи и Алдана, в ноябре - Алдана. В рядах среднегодовых расходов воды положительный статистически значимый тренд зафиксирован для 67% гидрологических постов (Нюя в створе Курум, Бирюк, Амга, Ботома) (рис. 3). Наиболее значительно по отношению к базовому периоду выросли средние значения месячных расходов воды с сентября по март (табл. 3)

Для второй группы рек (р. Кэнкэмэ - с. Второй Станок, р. Большая Черепаха - г.п. Бом, р. Кэмпэндээйи - с. Кемпендяй , р. Малая Черепаниха - с. Тюбя , р. Шестаковка - г.п. Камырдагыстах) характерно значимое изменение дисперсии. При этом, гипотеза об однородности рядов среднемесячных и среднегодовых расходов воды по критерию Стьюдента не опровергается (за исключением сентябрьских и годовых значений стока), что, в целом, может быть объяснено неравной дисперсией для двух периодов (классический тест Стьюдента подразумевает равенство дисперсий). Статистически значимые положительные тренды выявлены в рядах годовых и июльских расходов воды для всех рассмотренных гидрологических постов.

В третью группу вошли реки, которые по предложенным критериям не попали ни в одну из групп и рассматривались отдельно: Большой Патом и Намана (в створах Патом и Мекимдя соответственно). Для рядов стока реки Большой Патом практически во все месяцы года характерна однородность по критериям Стьюдента и Фишера, а линейные тренды являются незначимыми (рис. 4). Несмотря на однородность рядов стока реки Намана в створе Мекимдя, практически во все месяцы года значительно увеличивается

ACCEPTED MANUSCRIPT ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

дисперсия. В отличие от первой группы рек, среднемноголетнее значение годового расхода реки Намана относительно базового периода возросло за счет увеличения среднемноголетних месячных расходов воды в июне.

Анализ внутригодового распределения стока исследуемых рек показал, что в подавляющем большинстве случаев его характер при сравнении с базовым периодом не меняется и соответствует восточносибирскому типу (рис. 5). Для всех исследуемых рек выявлено статистически незначимое увеличение стока в самый многоводный месяц (май) по отношению к базовому периоду. Положительный статистически значимый тренд был выявлен только в ряду максимальных расходов воды реки Намана в створе Мекимдя (третья группа рек), где его величина оказалась равной 7.33%/10 лет. В то же время, на реках Нюя, Алдан, Бирюк (первая группа) на общем фоне увеличения была зафиксирована тенденция к снижению срочных максимальных расходов воды.

Анализ хода среднемесячной температуры почвы на глубинах 1,6 м, 2,4 м и 3,2 м в октябре на метеостанциях Якутск и Исить по данным, имеющимся в свободном доступе за период 1965-2013 гг. показал, что для метеостанции Якутск на глубине 1,2 м в тёплый период каждый год регистрировались положительные температуры, в то время как на горизонтах 2,4 и 3,2 температуры почвы до 1980 г. были отрицательные. После 1980 г. положительные температуры в осенний период на метеостанции Якутск встречаются чаще, а после 1990 года практически ежегодно. При этом период, в который они фиксируются, увеличивается и варьируется от 30 до 150 дней. Рост амплитуды температуры отмечается на всех глубинах после 1980 (на 1,6 м) и начала 2000-х годов (на 2,4 и 3,2 м). На метеостанции Исить, на всех горизонтах до начала 2000-х гг октябрьские температуры отрицательные. После 1980-го года начинается рост температуры на всех глубинах и после 2000-го года на горизонте 2,4 м температура почвы становится положительной (рис. 6). Данных о температуре на горизонте 1,6 м в открытом доступе не было.

Наличие положительных температур и увеличение периода их продолжительности может указывать на увеличение глубины деятельного слоя и возможность поступления большего количества воды в зону аэрации.

Выявленные тенденции в рядах расходов воды рек Центральной Якутии, с одной стороны, свидетельствует о реакции водосборных бассейнов в целом на нестационарную климатическую ситуацию, иными словами о степени их устойчивости на внешнее воздействие, а с другой стороны указывает вектор изменения водных ресурсов территории. Проведенный анализ позволил выявить увеличение среднегодовых

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

расходов воды для всех рассмотренных створов исследуемого региона (за исключением р. Большой Патом у села Патом). Наибольшее увеличение месячного стока по отношению к базовому периоду произошло в период с декабря по март для всех гидрологических постов, на которых наблюдается зимний сток. В отличие от Европейской территории и некоторых районов южной Сибири (Гельфан и др., 2021; Научно-прикладной справочник…, 2021; Фролова и др., 2022) на сегодняшний день можно говорить об отсутствии внутригодового перераспределения стока за счет снижения объемов весеннего половодья и увеличения зимнего стока без статистически значимого изменения стока за год.

Увеличение стока в меженный период обусловлено изменением характера зимнего питания рек и может свидетельствовать об изменениях естественных ресурсов подземных вод. В зоне распространения сплошной мерзлоты питание рек зимой обеспечивается подрусловыми таликами, увеличение обводненности которых может происходить за счет увеличения количества поступающих жидких осадков в следствие увеличения продолжительности осеннего периода с положительными температурами, а также более глубокого сезонного протаивания почвы, что подтверждается результатами анализа температуры почвы и литературными данными (Frauenfeld et al. 2004).

Все реки первой группы (за исключением Ботомы) находятся в зоне распространения несплошной мерзлоты, где создаются более благоприятные условия для увеличения меженного питания в зимний период. Что касается реки Ботомы, то вероятно, это связано с наличием карста в бассейне.

Увеличение объемов весеннего половодья и роста максимальных расходов на большинстве исследуемых рек при практически неизменном количестве зимних осадков и характере промерзания почво-грунтов, с нашей точки зрения, может объясняться увеличением интенсивности стаивания за счет роста температур в период половодья, с одной стороны и увеличения количества осадков в мае, с другой.

3. Заключение

Тренды метеорологических характеристик, таких как температура воздуха и осадки, в центральной Якутии в целом соответствуют общей тенденции их изменения в связи с потеплением климата на территории России. Реакция стока малых и средних рек наиболее существенно выражена в зимние и весенние месяцы года. Она определяется, помимо изменений климатических характеристик, особенностями формирования стока района, в частности, наличием многолетней мерзлоты и процессами, протекающими в

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

подземной составляющей речных водосборов. По мнению авторов, эти обстоятельства отразились на характере произошедших изменений стока: увеличение в весенний и зимний периоды и за год в целом. Наиболее заметные изменения (в процентном отношении к базовому периоду) произошли в годовом стоке малых рек, что вполне объяснимо: малые реки наиболее быстро реагируют на внешнее воздействие. Особенностью реакции водосборов исследуемой территории в сравнении с Европейской частью России и южной Сибирью является наличие статистически значимых трендов в рядах годовых расходов воды для подавляющего числа исследуемых створов.

Литература

Гельфан, А.Н., Фролова, Н.Л., Магрицкий, Д.В., Киреева, М.Б., Григорьев, В.Ю., Мотовилов, Ю.Г., Гусев, Е.М. (2021). Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз. *Фундаментальная и прикладная климатология*, 7 (1), 36-79.

Малинин, В.Н. (2008). *Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Учебник.* СПб.: изд. РГГМУ. 408 с

Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. (2007). Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 133 с. (методические рекомендации)

Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. (2010). СПб: Нестор-История. 162 с. (методические рекомендации)

Определение основных расчетных гидрологических характеристик. (2003). М.: Госстрой России — СП 33-101-2003.

Пряхина, Г.В., Распутина, В.А., Сумачев, А.Э., Лебедева, Л.С. (2022). Оценка изменчивости стока рек Центральной Якутии в условиях нестационарного климата. В: *Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии»*. Барнаул: изд-во «Пять-плюс», 2022. Том 1, 223-228.

Федоров, А.Н., Торговкин, Я.И., Шестакова, А.А., Васильев, Н.Ф., Макаров, В.С. и др. (2018). *Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:1500000.* Гл. ред. М.Н. Железняк. Фонды ИМЗ, ИМЗ СО РАН, г. Якутск. 2 л.

Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации под ред. В.Ю. Георгиевского. (2021). СПб.: ООО «РИАЛ». 190 с.

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. (1972). СПб.: Гидрометеоиздат. 651 с.

Сикан, А.В. (2007). *Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник.* СПб.: изд. РГГМУ. 279 с.

Фролова, Н.Л., Магрицкий, Д.В., Киреева, М.Б., Григорьев, В.Ю., Гельфан, А.Н., Сазонов, А.А., Шевченко, А.И. (2022). Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений. *Водные ресурсы*, 49 (3), 251–269.

Frauenfeld, O.W., Zhang, T., Barry, R.G. (2004). Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research*, 109 (D05101), 1-12.

Tananaev, N. I., Makarieva, O. M., Lebedeva, L. S. (2016) Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 43, https://doi.org/10.1002/2016GL070796.

StatSoft.ru (2022). *StatSoft*. [online]. Доступно на: http://statsoft.ru/ [Дата доступа 13.11.2022].

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Таблица 1. Гидрографические характеристики водосборов исследуемых рек

№	Название	Код поста	Площадь, кв.км	Залесенность, %	Заболоченность, %	Озерность, %	Средняя высота водосбора, м	Сплошная мерзлота, %	Прерывистая мерзлота, %
1	р.Намана-Мекимдя	3202	16600	95	<5	<1	290	100	0
2	р.Амга-с.Буяга	3291	23900	85	<5	<1	540	59	41
3	р.Ботома-г.п.Бролог	3210	12200	80	<5	<1	370	100	0
4	р.Кэмпэндээйи-с.Кемпендяй	3360	1290	95	<5	1	280	100	0
5	р.Алдан-г.п.Суон-Тит	3218	18500	75	<5	<1	-	93	7
6	р.Шестаковка-г.п.Камырдагыстах	3214	170	90	0	<1	250	100	0
7	р.Кэнкэмэ-з.Второй станок	3307	3550	95	<5	<1	280	100	0
8	р.Бирюк-с.Бирюк	3159	9700	90	<5	<1	340	73	27
9	р.Нюя-с.Курум	3156	32600	95	<5	<1	390	53	47
10	р.Нюя-г.п.Комака	3155	11700	95	5	<1	430	52	48
11	р.Малая Черепаниха-с.Тюбя	3161	469	95	<5	<1	300	7	93
12	р.Большая Черепаниха-г.п.Бом	3160	1750	95	<5	<1	340	39	61
13	р.Большой Патом-с.Патом	3157	27600	75	<5	<1	770	-	-

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Таблица 2. Характеристики метеорологических станций.

Индекс	Название	Координаты		Среднемноголетняя сумма осадков*, мм	Среднемноголетняя температура воздуха, °С	Значимый тренд среднегодовой температуры	Величина тренда среднегодовой температуры, °С/10 лет
		X	Y				
24928	Комака	60,27	111,73	-	-6,42	положительный	0,4
24737	Крестях	60,27	116,15	-	-7,97	положительный	0,4
24739	Чаингда	62,28	119,85	-	-8,14	положительный	0,34
30074	Мача	59,93	117,6	-	-5,46	положительный	0,4
30173	Тяня	59	119,8	-	-6,79	положительный	0,4
31011	Буяга	59,67	127,05	-	-8,60	положительный	0,6
31016	Угино	58,63	128,5	-	-7,25	положительный	0,4
24962	Амга	60,9	131,98	270	-10,28	положительный	0,4
24843	Тонгулах	61,92	124,55	-	-9,26	положительный	0,5
24843	Бердигестях	62,27	127,07	-	-9,93	положительный	0,5
24758	Чурапча	62,03	132,6	261	-10,54	положительный	0,4
24768	Ытык-кюёль	62,37	133,55	-	-11,27	положительный	0,45
24766	Верхоянский перевоз	63,32	132,02	-	-11,37	положительный	0,25
24668	Батамай	63,52	129,48	308	-10,94	положительный	0,2
24656	Сого-Хая	64,28	126,45	-	-9,55	положительный	0,3
24557	Бестяхская звероферма	65,3	124,12	-	-11,02	положительный	0,4
24449	Джикимда	59,02	121,77	374	-4,67	положительный	0,4
30089	Исить	60,81	125,31	315	-7,73	положительный	0,3
24951	Килеер	60,95	119,3	302	-7,48	положительный	0,3
24933	Крест-Хальджай	62,82	134,43	279	-10,87	положительный	0,3
24763	Сеген-Кюель	64	130,3	407	-11,10	положительный	0,3
24661	Тегюльтя	60,47	130	290	-9,58	положительный	0,4
24967	Учур	58,73	130,62	411	-6,08	положительный	0,3
31026	Якутск	62,01	129,71	237	-9,26	положительный	0,5

* - пропуски на тех метеостанциях, где не было данных наблюдений за осадками в свободном доступе

Таблица 3. Изменение среднемноголетнего месячного расхода воды по отношению к базовому периоду

Месяц / Река-створ	Нюя-Курум	Амга-Буяга	Алдан-Суон-Тит	Ботома-Бролог	Нюя-Комака	Бирюк-Бирюк
	Приращение среднемноголетнего месячного расхода воды по отношению к базовому периоду (1950-1980) в %					
Сентябрь	67	9	5	135	8	58
Октябрь	42	52	9	80	5	49
Ноябрь	73	41	26	62	20	61
Декабрь	98	35	60	44	23	33
Январь	95	36	60	56	37	28
Февраль	95	8	70	21	58	33
Март	86	11	82	38	55	37

ACCEPTED MANUSCRIPT ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Рисунки

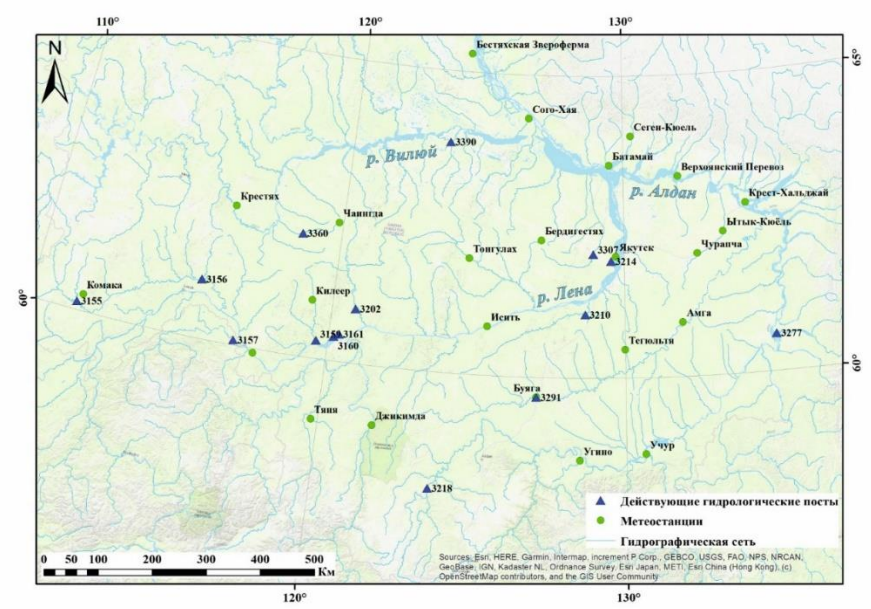

Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций и гидрологических постов. Источник подложки схемы: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P. Corp. GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN.

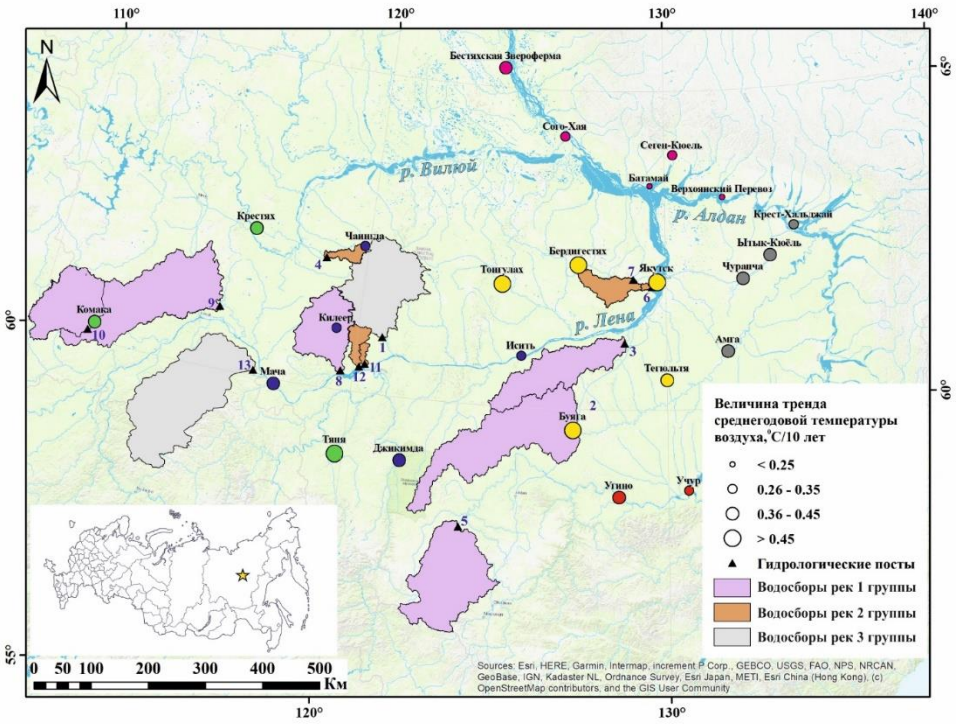

Рис. 2. Величина тренда среднегодовой температуры воздуха, выраженная в ^{0}C/10 лет Источник подложки схемы: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P. Corp. GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN.

ACCEPTED MANUSCRIPT

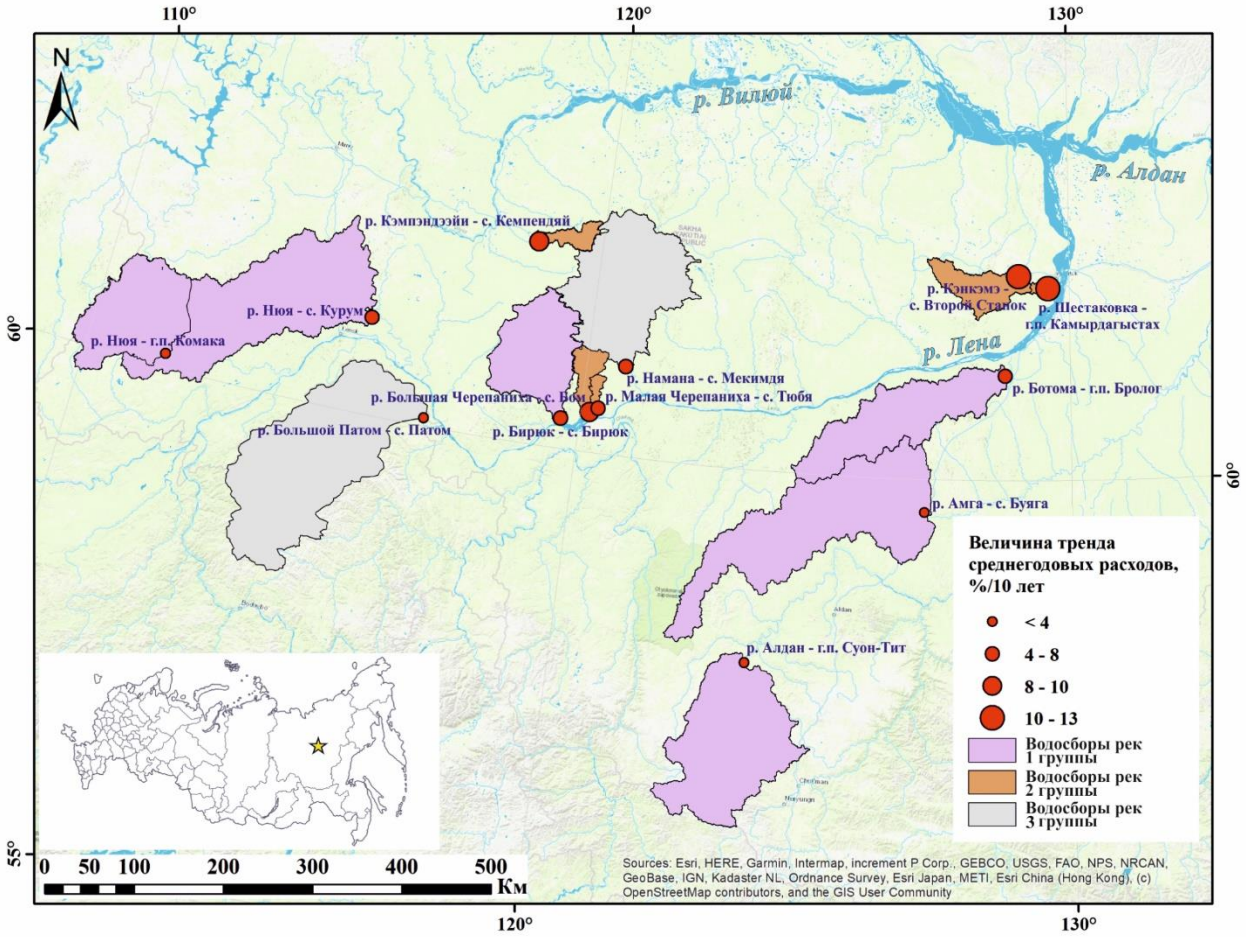

Рис. 3. Величина тренда среднегодовых расходов на исследуемых реках, выраженная в %/10 лет. Источник подложки схемы: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P. Corp. GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN.

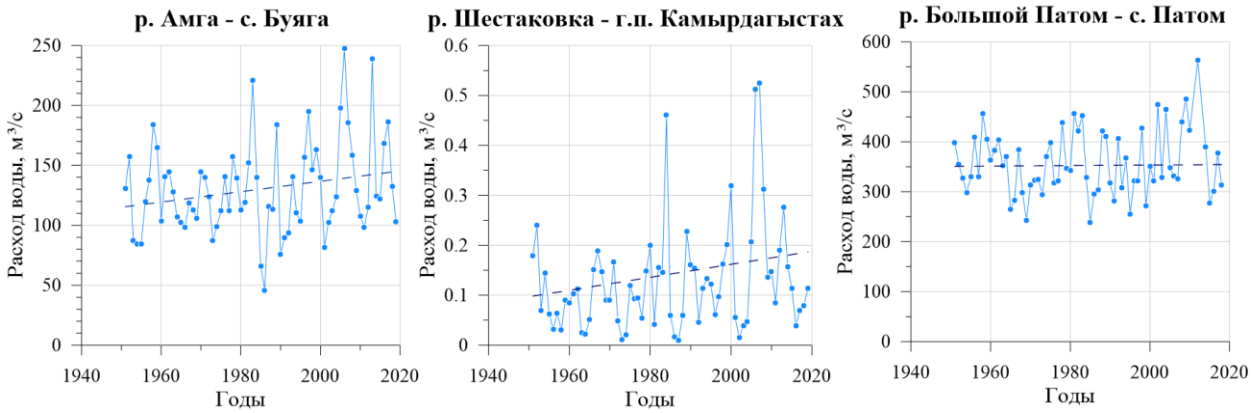

Рис. 4. Ход среднегодовых расходов воды для рек разных групп (р. Амга – 1-я группа, р. Шестаковка – 2-я группа, р. Большой Патом – 3-я группа).

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

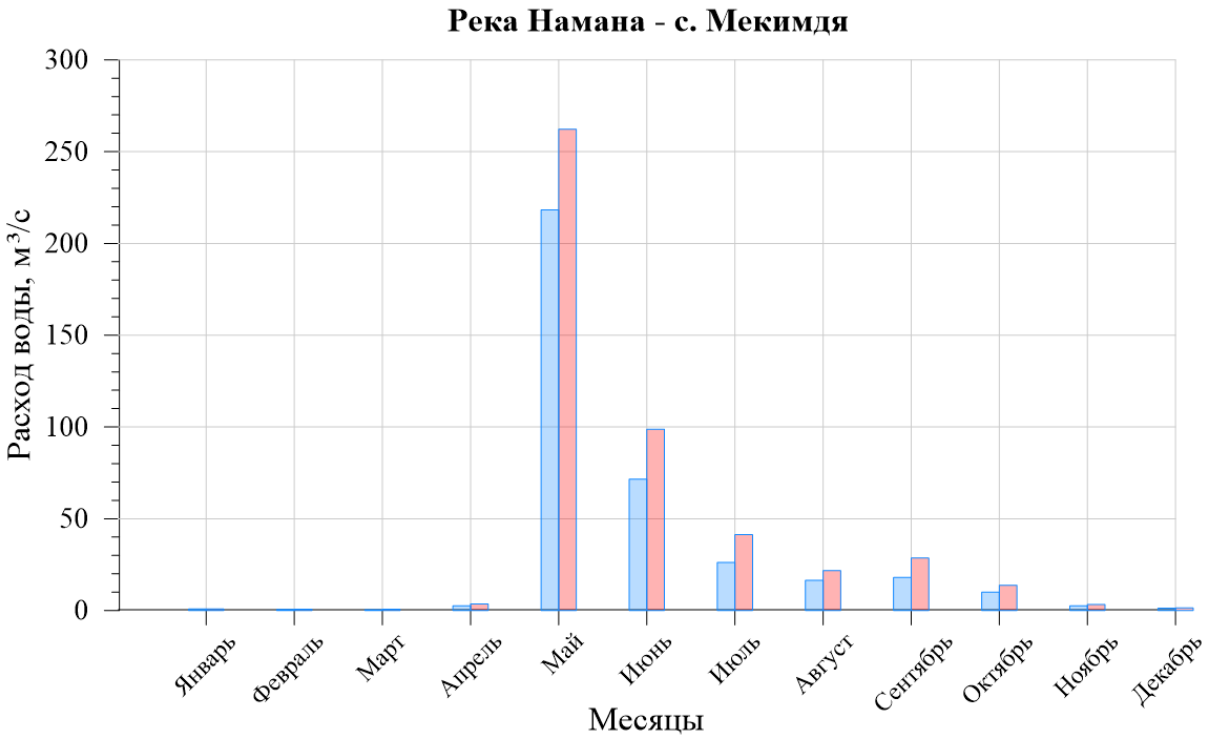

Рис. 5. Среднемноголетние гидрографы стока рек Намана (синий цвет – до 1980 г., красный цвет – после 1980 г.)

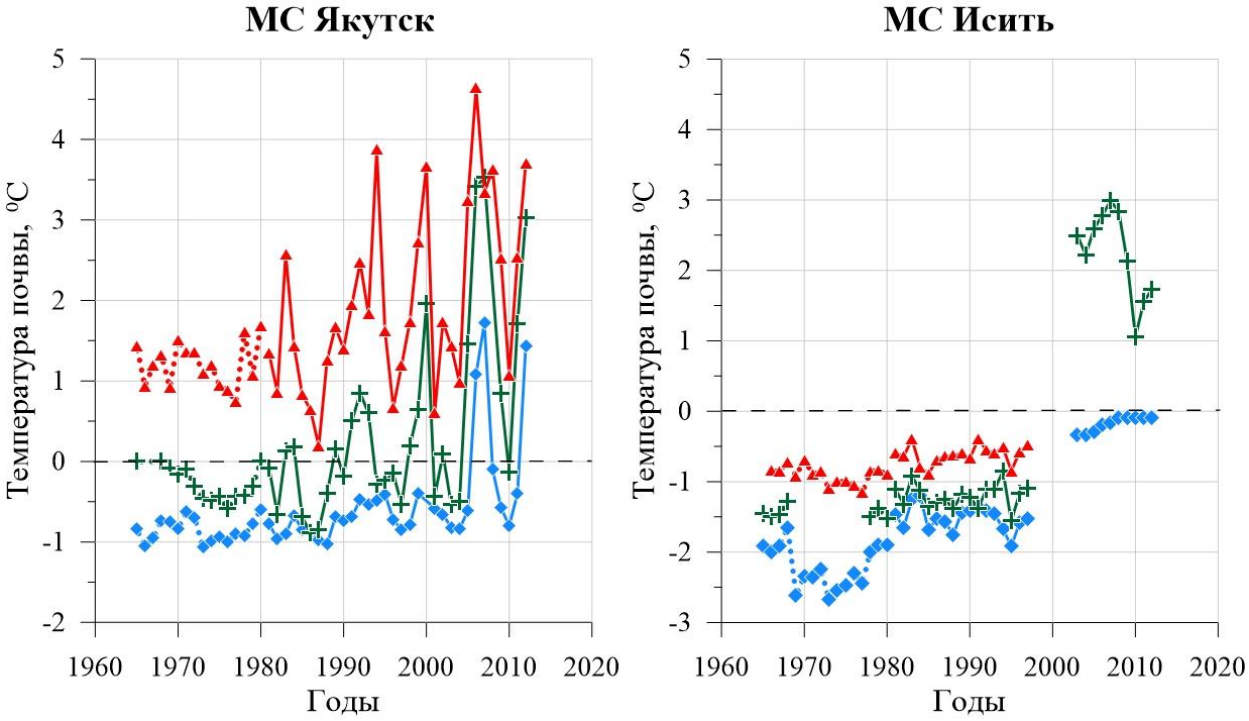

Рис. 6. Температуры почвы на глубинах 1,6 м (красная линия), 2,4 м (зелёная линия) и 3,2 м (синяя линия) за осенний период на метеостанциях Якутск и Исить.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Assessment of runoff characteristics changes of small and medium-sized rivers in Central Yakutia under the climate change influence[2]

Galina V. Pryakhina [1,2], Valeriia A. Rasputina [1,2], Aleksandr E. Sumachev [1], Lyudmila S. Lebedeva [2]

[1]St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

[2]Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 36, Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russian Federation

Pryakhina G. g65@mail.ru

Rasputina V. lerasputina88@gmail.com

Sumachev A. a-sumachev@mail.ru

Lebedeva L. lyudmilaslebedeva@gmail.com

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

Annotation

The response of river catchments located on the territory of Russia to climate change in recent decades has been expressed in the emergence of multidirectional trends in the series of annual runoff, maximum water discharges and the value of winter runoff. However, the response of small and medium-sized rivers to the ongoing climate warming has been poorly studied, in contrast to large rivers. In this paper, a comprehensive analysis of the climatic and hydrological characteristics of small and medium-sized rivers of Central Yakutia as well as an assessment of the climate change impact on the river runoff characteristics in various conditions of the region were carried out. It has been established that the revealed positive trends in temperature correspond to the trends typical for the rest of the Russian Federation. The response of the runoff of small and medium-sized rivers to climate change is most significant in the winter-spring months of the year: there is an increase in runoff in the spring and winter periods and for the year as a whole. A feature of the response of the river catchments of the study area in comparison with the European part of Russia and southern Siberia is the presence of

[2] The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Yakutia Science Foundation No. 22-17-20040 «Subaerial and sublake taliks in the continuous permafrost zone of Eastern Siberia: origin, current state and response to climate change»

ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

statistically significant trends in the series of annual water discharges for most of the studied water gauges. The most noticeable changes (as a percentage of the base period) occurred in the annual runoff of small rivers, because small rivers respond most quickly to external influences. Its expressiveness is determined not only by the degree of changes in climatic characteristics, but also by the features of runoff formation in the watersheds of the study area, in particular, the presence of permafrost.

Key words: rivers of Central Yakutia, runoff change, climate change

References

Gel'fan, A.N., Frolova, N.L., Magrickij, D.V., Kireeva, M.B., Grigor'ev, V.Ju., Motovilov, Ju.G., Gusev, E.M. (2021). The impact of climate change on the annual and maximum runoff of rivers in Russia: assessment and forecast. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiia*, 7 (1), 36-79. (In Russian)

Malinin, V.N. (2008). *Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information. Coursebook.* St. Petersburg: RSHU publ. 408 p. (In Russian)

Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the presence of data from hydrometric observations. (2007). Nizhny Novgorod: Vector-TiS Publ. 133 p. (In Russian)

Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values from heterogeneous data. (2010). St. Petersburg: Nestor-Istorija Publ. 162 p. (In Russian)

Determination of the main calculated hydrological characteristics. (2003). Moscow: Gosstroy of Russia Publ. - SP 33-101-2003

Pryakhina, G.V., Rasputina, V.A., Sumachev, A.E., Lebedeva, L.S. (2022). Assessment of river flow variability in Central Yakutia under unstationary climate. In: *Materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Tsentral'noi Azii»*. Barnaul: Pyat-plus publ., 2022. Vol. 1, 223-228. (In Russian)

Fedorov, A.N., Torgovkin, Ja.I., Shestakova, A.A., Vasil'ev, N.F., Makarov, V.S. et al. (2018). *Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1:1500000.* Ch. ed. M.N. Zheleznyak. Funds of Melnikov Permafrost Institute, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk. 2 p. (In Russian)

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ

ACCEPTED MANUSCRIPT

Scientific and Applied Handbook: Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation, ed. V.Yu. Georgievsky. (2021). St. Petersburg: RIAL LLC Publ. 190 p. (In Russian)

Resources of surface waters of the USSR. Vol. 17. Leno-Indigirsky district. (1972). St. Petersburg: Gidrometeoizdat publ. 651 p. (In Russian)

Sikan, A.V. (2007). *Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Coursebook.* St. Petersburg: RSHU publ. 279 p. (In Russian)

Frolova, N.L., Magrickii, D.V., Kireeva, M.B., Grigor'ev, V.Y., Gelfan, A.N., Sazonov, A.A., Shevchenko, A.I. (2022). Streamflow of Russian Rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water resources*, 49 (3), 251–269

Frauenfeld, O.W., Zhang, T., Barry, R.G. (2004). Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research*, 109 (D05101), 1-12

Tananaev, N. I., Makarieva, O. M., Lebedeva, L. S. (2016) Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.*, 43, https://doi.org/10.1002/2016GL070796

StatSoft.ru (2022). *StatSoft*. [online]. Available at: http://statsoft.ru/ [Accessed 13.11.2022]

ACCEPTED MANUSCRIPT
ПРИНЯТО В ПЕЧАТЬ