

Т.А. БУРЕНИНА, Д.А. ПРЫСОВ, А.В. МУСОХРАНОВА

Институт леса им. В.Н. Сукачёва СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28, Россия,
burenina@ksc.krasn.ru, prisov.krasn@gmail.com, nastya.krasn@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СЕВЕРНЫХ РЕК КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Для выявления региональных и локальных особенностей гидрологического режима рек криолитозоны на территории Красноярского края проанализирована в пространственном и временном аспектах динамика годового стока исследуемых водотоков региона и выполнен анализ трендов температуры воздуха и атмосферных осадков. В качестве тестовых полигонов выбраны девять речных бассейнов, расположенных в пределах трех ландшафтных зон: лесотундры, северной и средней тайги. Для формирования базы данных были привлечены фондовые материалы Среднесибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — данные многолетних наблюдений за стоком на гидрологических постах, температурой воздуха и осадками на метеостанциях исследуемого региона. Сформированная база данных была использована при построении моделей формирования годового стока рек в зависимости от климатических факторов и для анализа пространственно-временных особенностей формирования речного стока. Исследования показали, что ландшафтная дифференциация территории влияет на пространственное распределение климатических характеристик и, соответственно, на особенности гидрологического режима. Для всех исследуемых водосборов получены уравнения регрессии, отражающие связь речного стока с температурой воздуха и атмосферными осадками. Выявлено, что для среднего годового стока наиболее значимы зимние осадки и температура воздуха теплого периода, тогда как для зимней межени большую роль играют жидкие атмосферные осадки и температурный режим воздуха в зимние месяцы. Анализ линейных трендов среднегодовых температур воздуха и осадков показал, что с середины 1950-х гг. наблюдается устойчивая тенденция повышения температуры воздуха, тогда как тренды атмосферных осадков не только имеют значительные различия в абсолютных величинах, но различаются по знаку. Анализ динамики годового и минимального зимнего стока исследуемых рек за разные периоды наблюдений выявил, что для большей части рек отмечен положительный тренд годового стока от 0,57 до 4,76 мм/год. Зимний сток увеличился от 0,09 до 1,42 мм/год. Это указывает на общую тенденцию увеличения речного стока в исследуемом регионе. Установленная разнонаправленность трендов речного стока и атмосферных осадков показывает, что более значимым фактором в формировании стока рек криолитозоны становится оттаивание многолетнемерзлых грунтов, связанное с ростом температуры воздуха.

Ключевые слова: гидрологический режим, атмосферные осадки, динамика стока, климатические тренды, многолетняя мерзлота, Средняя Сибирь.

T.A. BURENINA, D.A. PRYSOV, A.V. MUSOKHRANOVA

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 660036, Krasnoyarsk,
Akademgorodok, 50/28, Russia, burenina@ksc.krasn.ru, prisov.krasn@gmail.com, nastya.krasn@mail.ru

THE INFLUENCE OF CLIMATIC CHANGES ON THE HYDROLOGICAL REGIME OF NORTHERN RIVERS OF KRASNOYARSK KRAI

The spatial and temporal aspects of the dynamics of the annual runoff and the trends in air temperature and precipitation were analyzed to identify regional and local features of the hydrological regime of rivers in the permafrost zone in the territory of Krasnoyarsk krai. Nine river basins located within three landscape zones: forest-tundra, and northern and middle taiga were selected as test sites. To make clear the influence of climatic factors on hydrological regime of the study area the database of long-term hydrological and meteorological observation data was created. Generation of the database used archival material of the Central-Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring: long-term observational data on the runoff at hydrological stations, and air temperature and precipitation at weather stations in the study area. The database thus generated was used in constructing models of annual river runoff formation depending on climatic factors, and in analyzing spatial-temporal characteristics of river runoff formation. Investigations showed that the landscape differentiation of the territory influences the spatial distribution of climatic characteristics and, accordingly, the features in the hydrological regime. For all the watersheds under study, regression equations were obtained, which reflect the relationship between river runoff and air tempera-

ture and precipitation. For the average annual runoff, precipitation and air temperature during a warm period are most significant, whereas for the winter runoff low the liquid precipitation and air temperature in the winter months are more important. Analysis of linear trends in average annual air temperatures and precipitation showed that since the mid-1950s there has been a steady increase in air temperature, whereas the precipitation trends have not only significant differences in absolute values but differ in sign. Analysis of the dynamics of the annual and minimum winter runoff of the rivers studied in different observation periods showed that most of the rivers are characterized by a positive trend of the annual runoff varying from 0.57 to 4.76 mm/year. The winter runoff increased from 0.09 to 1.42 mm/year. This indicates a general trend for an increase in river discharge in the study area. The opposing trends observed in the river runoff and precipitation show that the thawing of permafrost caused by an increase in air temperature becomes a more significant formation factor for the river runoff in the permafrost zone.

Keywords: hydrological regime, atmospheric precipitation, flow dynamics, climate trends, permafrost, Central Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в научной литературе всесторонне обсуждается проблема глобальных климатических изменений, обусловленных естественным ходом развития Земли. Особенно остро проблема глобального потепления климата, устойчивая тенденция которого наблюдается примерно с середины XX в., может затронуть регионы России, расположенные в зоне многолетнемерзлых пород [1–3]. Для Сибири эта проблема особенно актуальна, так как огромные ее площади приурочены именно к этой зоне. Оттаивание мерзлых грунтов представляет собой существенный дополнительный источник питания подземных и поверхностных вод, а это — нарушение установившегося влагооборота на речных водосборах и водно-солевого баланса Северного Ледовитого океана, куда впадают практически все сибирские реки. Оценки влияния изменения климатических условий на гидрологические ситуации весьма противоречивы из-за различий применявшихся методик прогноза, разных сценариев климатических изменений, разнонаправленности влияющих на водные ресурсы процессов, различной их изученности и т. д. [4–9]. Представленные данные касаются в основном крупных рек, информация об особенностях формирования водных ресурсов в бассейнах средних и малых рек с учетом климатических изменений представлена в меньшей степени [10–13].

Перед авторами настоящей работы стояла задача выявить связи климатических трендов с динамикой стока северных рек с учетом региональных и локальных особенностей проявления изменения климатических условий в районе исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи была проанализирована в пространственном и временном аспектах динамика стока девяти рек, водосборы которых расположены в пределах трех ландшафтных зон Средней Сибири: лесотундры, северной и средней тайги (рис. 1). Изучался сток как сравнительно небольших водотоков, таких как р. Гравийка с площадью бассейна 337 км², так и достаточно крупных рек — одного из главных притоков Енисея — р. Подкаменной Тунгуски с площадью бассейна 240 000 км². В работе использованы данные многолетних наблюдений за стоком на гидрологических постах [14, 15] и фондовые материалы Среднесибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). Основным критерием при выборе рек был критерий длительности рядов наблюдений за стоком. Длительность рядов наблюдений составляет от 18 до 53 лет и включает годы с различной гидроклиматической обстановкой.

Для анализа климатических трендов в качестве исходных материалов использовались показатели среднемесячных и среднегодовых температур воздуха за 1952–2012 гг. и годовые суммы осадков за 1966–2012 гг. [16, 17]. Наиболее длинные ряды наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками Средней Сибири имеются по ограниченному числу метеостанций. Поэтому для того, чтобы покрыть исследуемые речные бассейны метеоданными, были выбраны двенадцать метеостанций (см. рис. 1). В ходе обработки и анализа данных при построении зависимости годового стока рек от климатических факторов использовался метод множественного регрессионного анализа [18]. Для оценки пространственных закономерностей направленности и интенсивности изменений гидроклиматических параметров использованы результаты расчетов за период наблюдений по методике [19]. Выделение тренда и его анализ осуществлены методом наименьших квадратов. Построение коэффициентов линейных трендов годового и среднемесячного зимнего стока рек, температур воздуха и атмосферных осадков было осуществлено при обработке временных рядов этих величин в программе Microsoft Excel и Statsoft Statistica 10.

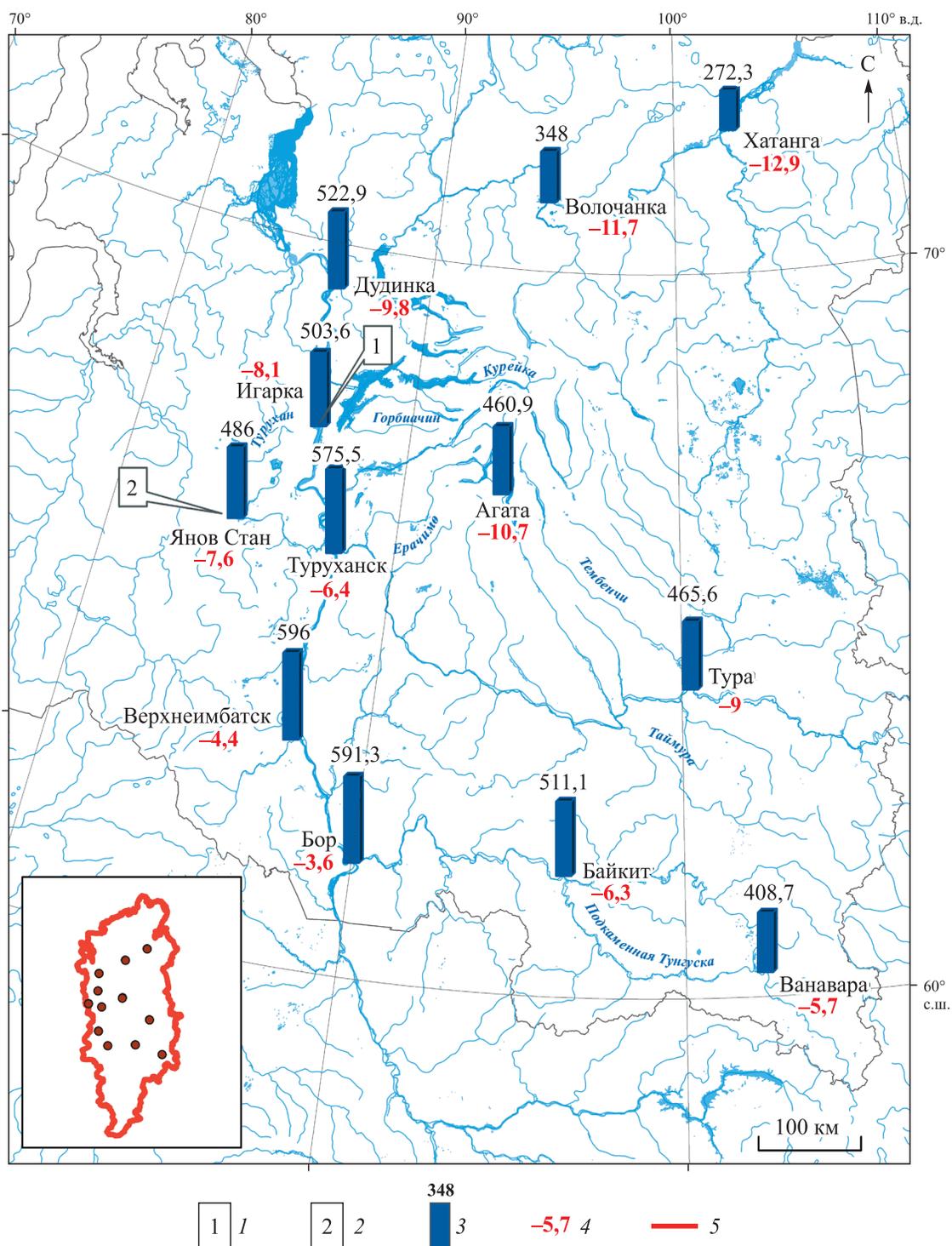


Рис. 1. Карта-схема района исследований в административных границах Красноярского края. Реки: 1 — Гравийка, 2 — Советская Речка. 3 — среднегодовое количество осадков, мм; 4 — среднегодовая температура, °С; 5 — граница Красноярского края.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зонально-региональное распределение гидроклиматических параметров. Основные особенности климата района исследований определяются его географическим положением и воздействием Северного Ледовитого океана. В целом климат региона резко континентальный с большими амплитудами температур теплого и холодного сезонов, что характеризует условия сурово-морозной зимы и умеренно-теплого лета. Вследствие значительной протяженности исследуемого региона с севера на юг и возрастания континентальности климата с запада на восток среднегодовые температуры воздуха значительно различаются (см. рис. 1).

Осадки в районе исследований на одних и тех же широтах убывают с запада на восток и с юга на север, минимальная сумма осадков отмечена для метеостанций, расположенных на северо-востоке. Зонально-региональное распределение атмосферных осадков на данной территории — результат сочетания общих закономерностей циркуляции атмосферы, географического положения региона и особенностей орографии.

Изменение температуры воздуха по метеостанциям в течение года характеризуется определенной синхронностью: отмечается повышение с февраля по июль, спад с июля по декабрь. Синхронность в изменении среднегодовой температуры воздуха подтверждается значениями коэффициентов корреляции 0,60–0,98, что указывает на достаточно высокую степень согласованности среднегодовых изменений температуры воздуха на исследуемой территории. Слабее всего связаны изменения температуры воздуха на самых удаленных друг от друга метеостанциях: Хатанга–Байкит (0,48), Хатанга–Бор (0,54), Хатанга–Ванавара (0,49).

Парные коэффициенты корреляции для временных рядов суммы годовых осадков менее значимы, чем для значений среднегодовой температуры воздуха. Для метеостанций, находящихся на близком расстоянии, прослеживается относительно синхронное изменение суммы осадков, коэффициенты корреляции статистически значимы — от 0,30 до 0,71. Для самых северных метеостанций Хатанга и Волочанка характерна очень слабая, а в некоторых случаях отрицательная корреляция с другими метеостанциями.

Известно, что такие гидрологические характеристики, как коэффициент стока, соотношение между зимним и годовым стоком, режим рек и их питание, являются зональными. Как показал анализ данных, основная доля стока (до 90–95 % от годового) приходится на теплый период года независимо от географической зоны. Благодаря тому, что изучаемая территория расположена в умеренном и, частично, в субарктическом поясах, основная часть стока создается за счет атмосферных осадков холодного периода года. Поэтому от 62 до 75 % годового стока приходится на весенне-летнее половодье. Зональные различия проявляются только во время прохождения высокой воды. Если в средне-таежной зоне более 50 % объема стока проходит в мае, то на реках северной тайги и лесотундры пик половодья наблюдается в июне–июле. В этот период проходит до 70 % годового стока. Сезонная динамика гидрологического режима рек, сток которых формируется в лесостепной зоне, характеризуется некоторой спецификой — ранним и коротким половодьем, бурными паводками, низкой летней меженью. Во временном разрезе продолжительность половодья определяется, прежде всего, ходом суточных температур, а также выпадением жидких атмосферных осадков в этот отрезок времени. В период летне-осенней межени происходит постепенное снижение уровня, которое растягивается на все лето и осень, вплоть до замерзания рек, и прерывается лишь дождевыми паводками.

Зависимости стока рек от климатических факторов. Как показывает анализ литературных [20–24] и наших собственных данных, изменение климатических условий по ландшафтным зонам определенным образом отражается на водном режиме водотоков. В более ранних работах для криолитозоны Средней Сибири нами были проанализированы зависимости стока рек от метеорологических факторов [25]. Модели регрессионного класса (табл. 1) достаточно хорошо отражают связь среднего годового стока с отдельными климатическими показателями. Наиболее тесная связь годового стока с твердыми осадками. Значения Т-критерия для всех водосборов составляют от 2,3 до 8,1 при достоверности 95 %. Выявлена неоднозначная связь величины годового стока рек с температурой воздуха в теплый период года.

Рост температуры воздуха в летние месяцы «работает» на увеличение годового стока рек (рис. 2, а), тогда как майские температуры имеют противоположную тенденцию (см. рис. 2, б). Приведенные графики представляют собой пример неоднозначного проявления влияния температуры воздуха на величину годового стока. Увеличение годового стока с ростом температур с июля по сентябрь косвенно свидетельствует о том, что в формировании стока этих рек определенное участие принимает

Таблица 1

Модели годового стока исследуемых рек Красноярского края [25]

Река	Модель	R^2	G	F
Горбиачин	$Y = -517,5 + 0,69 X_j + 2,9 X_i + 5,7 T_7$	0,84	46,3	28,1
Гравийка	$Y = 62,7 + 0,50 X_j + 1,1 X_i - 12,2 T_5$	0,46	76,7	14,3
Советская Речка	$Y = 157,9 + 0,26 X_j + 0,41 X_i - 10,1 T_5$	0,30	46,6	4,9
Курейка	$Y = -6,3 + 0,9 X_j + 9,4 T_9 + 0,00108 (X_p X_i)$	0,63	60,4	15,1
Турухан	$Y = 115,3 + 0,39 X_j + 0,53 X_i - 2,69 T_{(5+6)}$	0,45	44,0	10,9
Ерачимо	$Y = 154,5 + 0,37 X_p + 0,58 X_j - 10,1 T_5$	0,46	57,5	11,4
Тембенчи	$Y = -447,7 + 1,5 X_i + 32,0 T_7 + 1,7 X_9$	0,57	55,5	10,6
Таймура	$Y = -250,5 + 0,50 X_i + 10,6 T_7 + 0,57 X_8$	0,73	22,7	13,7
Подкаменная Тунгуска	$Y = 51,3 + 0,15 X_j + 0,41 X_i - 3,2 T_3$	0,70	19,4	20,3

Примечание. Y – годовой сток реки, мм; X_j – годовое количество жидких атмосферных осадков, мм; X_i – годовое количество твердых атмосферных осадков, мм; $X_{8,9}$ – среднемесячные осадки, соответственно, в августе и сентябре; X_p – сток предыдущего года; $T_{5,6,7}$ – среднемесячная температура воздуха, соответственно, в мае, июне и июле, °C; R^2 – коэффициент множественной детерминации; G – стандартная ошибка уравнения; F – критерий Фишера.

мерзлотная влага периодически оттаивающих верхних горизонтов почв. Снижение годового стока рек Гравийки, Турухана, Ерачимо и Подкаменной Тунгуски с ростом средней температуры в мае может быть связано с усилением физического испарения с поверхности снежного покрова и отсутствием осадков в этот период.

Тенденция увеличения стока рек в лесотундре и северной тайге при повышении температур в конце летнего периода наиболее четко проявляется при сочетании повышенных температур воздуха с выпадением жидких атмосферных осадков, проникающих к фронту промерзания и вызывающих таяние мерзлоты. Вовлечение во влагооборот мерзлотной влаги из верхних горизонтов почв отчетливее проявляется в условиях избыточного увлажнения территорий и наличия относительно влагоемких заболоченных почв. В бассейне р. Курейки, где по долинам рек распространены заболоченные почвы, годовая сумма атмосферных осадков в отдельные годы достигает 1500 мм. В этих условиях повышение среднемесячных сентябрьских температур воздуха на один градус в зависимости от атмосферного увлажнения вызывает увеличение стока на 10–40 мм.

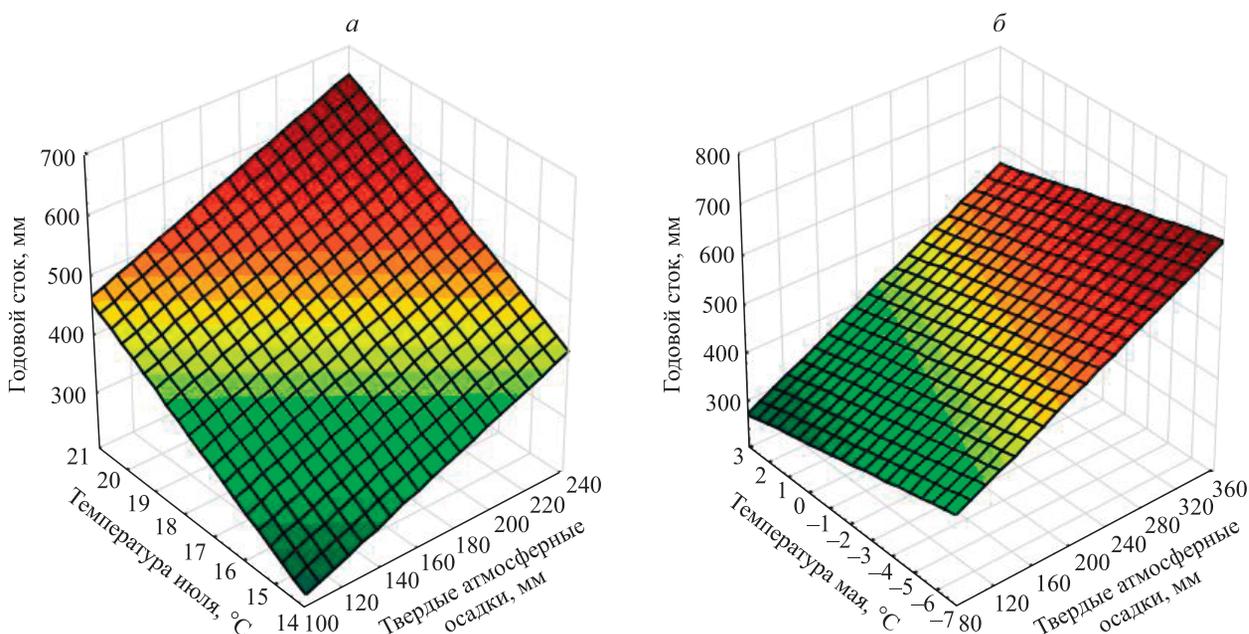


Рис. 2. Графики зависимости годового стока рек Тембенчи (а) и Гравийки (б) от гидроклиматических параметров.

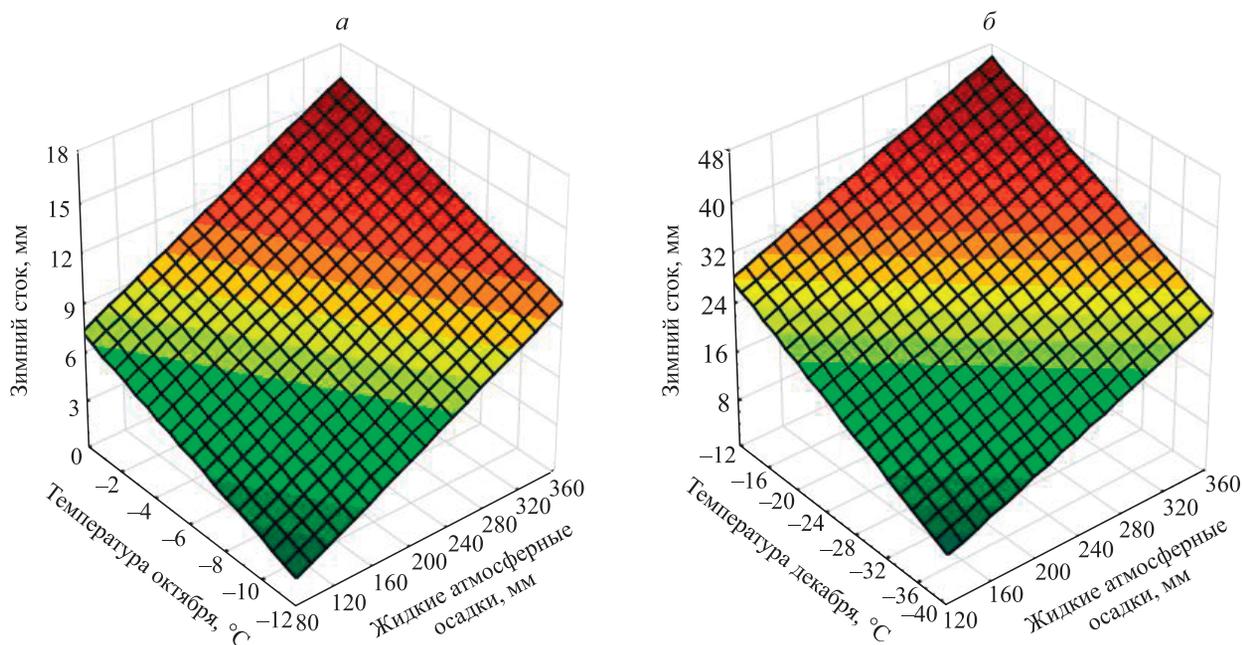


Рис. 3. Графики зависимости минимального зимнего стока рек Таймуры (а) и Горбиачин (б) от гидроклиматических параметров.

Еще одна особенность формирования речного стока северных рек в условиях избыточного увлажнения и низкой испаряемости — это влияние на сток гидрологических условий предшествующего года. Определенная часть влаги, поступившая на водосборы, не успевает израсходоваться в текущем году и с наступлением отрицательных температур воздуха консервируется в переувлажненных почвогрунтах. Эта влага включается в активный влагооборот только на следующий год, принимая участие в формировании стока. В бассейне р. Курейки каждые 10 мм стока текущего года обеспечивают увеличение стока последующего года на 3 мм.

Для установления зависимости зимнего меженного стока от климатических факторов были использованы следующие гидрометеорологические характеристики: средний минимальный сток за период зимней межени, среднемесячные температуры воздуха, сумма жидких осадков за теплый период. Твердые осадки не принимались в расчет, так как, согласно материалам [26], теснота связей зимнего стока с твердыми осадками весьма слабая.

Исследования показали, что зимний меженный сток исследуемых рек связан с ростом суммы жидких атмосферных осадков и температурой воздуха в период с августа по февраль (рис. 3, а). Согласно полученным уравнениям, наряду с температурой воздуха августа и сентября достаточно высокую значимость имеют средние температуры зимних месяцев (см. рис. 3, б).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что такие климатические факторы, как температура воздуха и осадки, по-разному влияют на количественные показатели годового стока и зимней межени. Выпавшие зимой осадки практически не участвуют в формировании зимней водности рек. Как правило, заметное влияние зимних осадков отмечается весной или в следующие за ней сезоны. Для зимней межени более значимы осадки летнего и осеннего периодов. В отличие от годового стока, для зимней межени, наряду с летними, также значимы температуры воздуха зимних месяцев.

Тенденции изменения гидроклиматических параметров во временном аспекте. Как уже отмечалось выше, для районов распространения многолетней мерзлоты весьма актуальна проблема изменения водных ресурсов в условиях потепления климата. Анализ линейных трендов осредненных годовых температур приземного воздуха за 1952–2012 гг. (табл. 2) показал, что в районе исследований за этот период наблюдалась устойчивая тенденция к повышению температуры воздуха от 0,26 до 0,36 °C за 10 лет. Максимальные значения температурных трендов (0,33–0,36 °C/10 лет) характерны для более северных территорий. Наиболее интенсивно увеличение температуры происходит в северо-восточной части п-ова Таймыр, что подтверждают наибольшие по величине коэффициенты линейного тренда.

Анализ линейных трендов температуры воздуха по сезонам показал, что максимальные тренды температуры воздуха (0,45–0,62 °C/10 лет) наблюдаются весной, значительное потепление отмечено

Таблица 2

Коэффициенты линейных трендов температуры воздуха и осадков по данным реперных метеостанций (°С/10 лет)

Метеостанция	Коэффициенты линейных трендов									
	температура воздуха (1952–2012 гг.)					атмосферные осадки (1966–2012 гг.)				
	год	зима	весна	лето	осень	год	зима	весна	лето	осень
Хатанга	0,36	0,34	0,48	0,13	0,50	3,1	0,5	0	2,6	-0,1
Волочанка	0,32	0,24	0,51	0,08	0,45	6,4	2,3	0,5	5,5	-1,9
Дудинка	0,36	0,33	0,50	0,19	0,41	-7,8	-0,6	-2,3	-1,0	-3,9
Игарка	0,33	0,32	0,52	0,15	0,34	20,0	5,4	4,8	5,8	4,1
Агата	0,29	0,23	0,50	0,19	0,24	-0,4	-3,3	0,1	4,3	-1,5
Янов Стан	0,33	0,23	0,62	0,17	0,32	-9,5	2,4	-0,2	-9,4	-2,4
Туруханск	0,29	0,24	0,50	0,14	0,28	21,1	0,9	4,9	9,6	5,6
Тура	0,34	0,34	0,54	0,13	0,33	0,3	-2,3	1,1	3,0	-1,5
Верхнеимбатск	0,29	0,21	0,51	0,13	0,31	13,6	3,9	-0,5	5,2	5,0
Байкит	0,26	0,22	0,45	0,09	0,29	-6,7	-0,1	-3,2	-0,5	-3,0
Бор	0,31	0,30	0,53	0,11	0,30	-7,6	-0,4	-3,8	1,4	-4,8
Ванавара	0,32	0,26	0,51	0,20	0,29	8,0	-0,8	1,1	1,3	6,3

также и в осенние месяцы (0,24–0,50 °С/10 лет). Летом и зимой температурные тренды менее значительны, тем не менее они отражают динамику потепления климата.

В отличие от температурных трендов, коэффициенты трендов атмосферных осадков имеют не только значительные различия в абсолютных величинах, но различаются по знаку. На пяти метеостанциях из двенадцати коэффициенты линейных трендов атмосферных осадков имеют знак «минус», а для семи метеостанций характерны тенденция увеличения осадков, интенсивность увеличения годовой суммы осадков составляет 3,1–21,1 мм/10 лет.

Пространственное распределение трендов осадков не связано с географической зональностью, отрицательные тренды осадков отмечены для метеостанций, расположенных в центральной части Эвенкии. Очевидно, разнонаправленность трендов осадков зависит от особенностей атмосферной циркуляции и расположения пункта наблюдений по отношению к влагонесущим воздушным массам. Таким образом, ландшафтная дифференциация территории отражается не только на пространственном распределении климатических характеристик, но и обуславливает неодинаковые тенденции изменения климатических параметров во временном аспекте.

Для того чтобы оценить роль мерзлотной влаги периодически оттаивающих верхних горизонтов почв в формировании стока рек исследуемого региона, рассчитывались линейные тренды годового и межлетнего стока. Анализ динамики годового и минимального зимнего стока исследуемых рек за разные периоды наблюдений (табл. 3) показал, что для шести рек из девяти отмечен положительный

Таблица 3

Параметры линейного тренда стока рек Средней Сибири

Река	Гидрологический пост	Годы наблюдений (лет)	Параметры линейного тренда	
			годового стока, мм/год	зимнего межлетнего стока, мм/год
Зона лесотундр и северных редколесий				
Горбиачин	ГП Горбиачин	1982–2000 (18)	-0,16	-0,55
Гравийка	ГП Игарка	1940–1993 (53)	+0,62	+0,18
Курейка	Курейская ГЭС	1968–1998 (30)	+4,70	–
Советская Речка	Пос. Советская Речка	1975–2012 (37)	-1,35	+0,26
Северная тайга				
Турухан	Фактория Янов Стан	1950–2012 (62)	+0,89	+0,10
Ерачимо	Большой порог	1950–2012 (62)	+1,33	+0,70
Тембенчи	Пос. Тембенчи	1950–1994 (44)	+1,62	+0,11
Средняя тайга				
Таймура	ГП Кербо	1961–1993 (32)	-0,79	-0,02
Подкаменная Тунгуска	Фактория Кузьмовка	1940–2012 (72)	+0,45	+0,07

тренд годового стока от 0,45 до 4,70 мм/год. Зимний сток увеличился на шести реках от 0,07 до 0,70 мм/год. Это указывает на общую тенденцию увеличения речного стока в исследуемом регионе. Исключение составляют реки Горбиачин и Таймура, для которых в обоих случаях отмечены отрицательные тренды. Река Советская Речка при отрицательном тренде годового стока характеризуется увеличением минимального зимнего стока. При этом, как мы отмечали выше, тренды осадков для большинства метеостанций отрицательные. В основном это касается твердых осадков. Тенденция к снижению осадков холодного периода подтверждается динамикой максимальных запасов воды в снежном покрове на метеостанции Норильск [27]. Разнонаправленность трендов речного стока и атмосферных осадков в большей степени присуща восточным областям исследуемого региона. Это указывает на то, что в более континентальных районах Средней Сибири значимым фактором в формировании стока становится оттаивание многолетнемерзлых грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно полученным результатам, можно констатировать, что ландшафтная дифференциация территории не только влияет на пространственное распределение климатических характеристик, но и обуславливает неодинаковые тенденции изменения климатических параметров во временном аспекте. Динамика годового и минимального зимнего стока исследуемых рек имеет общую тенденцию к увеличению, при этом роль осадков в формировании как годового, так и межлетнего стока ослабляется на фоне пополнения водных запасов водотоков за счет таяния многолетней мерзлоты.

Разнонаправленность трендов речного стока и атмосферных осадков, которая характерна для более континентальных районов исследуемой территории, показывает, что более значимым фактором в формировании стока рек криолитозоны становится оттаивание многолетнемерзлых грунтов, тем самым подтверждая роль динамики климатических условий в изменении водных ресурсов региона.

Полученные результаты будут использованы при анализе водного баланса в бассейнах рек северо-таежной зоны и лесотундры Средней Сибири для объяснения значительного роста значений модуля стока в последние десятилетия, не связанного с увеличением годовой суммы осадков в регионе и исследованиях условий стокообразования с позиций ландшафтной дифференциации территории. Представленная работа — одно из направлений в гидрологических исследованиях северных рек Средней Сибири, ориентированное на анализ динамики влагооборота водосборов в условиях меняющегося климата и усиления антропогенного воздействия на лесные экосистемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке базового проекта Института леса СО РАН «Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного пресса и климатических аномалий» (проект АААА-А17-117101940014-9 (0356-2019-0027)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А. Современные изменения климата в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. — 2003. — № 1. — С. 18–30.
2. Зукерт Н.В., Замолотчиков Д.Г. Изменение температуры воздуха и осадков в тундровой зоне России // Метеорология и гидрология. — 1997. — № 8. — С. 45–52.
3. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И. Изменчивость климата азиатской территории России в 1975–2012 годах // География и природ. ресурсы. — 2014. — № 4. — С. 13–21.
4. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шальгин А.Л., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. — 1996. — № 11. — С. 89–99.
5. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Сотникова Л.Ф., Громова Ю.В. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. — 2008. — Т. 35, вып. 1. — С. 17–24.
6. Фролов А.В., Георгиевский В.Ю. Изменения водных ресурсов в условиях потепления климата и их влияния на приток к крупным водохранилищам России // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 6. — С. 67–76.
7. Miller J.R., Russell G.L. The impact of global warming on river runoff // Journ. Geophys. Res. — 1992. — Vol. 97 (D3). — P. 2757–2764.
8. Arnell N.W. Climate change and global water resources // Global Environmental Change. — 1999. — Vol. 9. — P. 31–49.

9. **Shkolnik I., Pavlova T., Efimov S., Zhuravlev S.** Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario // *Climate Dynamics*. — 2018. — Vol. 50, N 1–2. — P. 215–230.
10. **Буренина Т.А., Прысов Д.А., Федотова Е.В.** Влияние климатических и антропогенных факторов на гидрологический режим рек юга Красноярского края // *Сиб. лесн. журн.* — 2018. — № 2. — С. 48–60.
11. **Красногорская Н.Н., Фашевская Т.Б., Головина А.В., Ферапонтов Ю.И., Жданова Н.В.** Климатические особенности формирования стока реки Белая // *Метеорология и гидрология*. — 2012. — № 1. — С. 82–91.
12. **Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Пичура В.И.** Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменений климата // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 6. — С. 1–9.
13. **Сафина Г.Р., Голосов В.Н.** Влияние изменений климата на внутригодовое распределение стока малых рек южной половины европейской территории России // *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естественные науки*. — 2018. — Т. 160, № 1. — С. 115–125.
14. **Государственный водный реестр** [Электронный ресурс]. — <http://www.textual.ru/gvr/> (дата обращения 01.11.2017).
15. **Ресурсы** поверхностных вод СССР: Ангаро-Енисейский район / Под ред. А.П. Муранова. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — Т. 16, вып. 1. — 724 с.
16. **Главная страница сайта Среднесибирского УГМС** [Электронный ресурс]. — <http://meteo.krasnoyarsk.ru> (дата обращения 01.11.2017).
17. **Специализированные массивы данных для климатических исследований** [Электронный ресурс]. — <http://meteo.ru/it/178-aisori> (дата обращения 01.11.2017).
18. **Львовский Е.Н.** Статистические методы построения эмпирических уравнений. — М.: Высш. шк., 1988. — 239 с.
19. **Шелутко В.А.** Численные методы в гидрологии. Гидрология суши. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 238 с.
20. **Кузин П.С., Бабкин В.И.** Географические закономерности гидрологического режима рек. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 200 с.
21. **Duan L., Man X., Kurylyk V.L., Cai T., Li Q.** Distinguishing streamflow trends caused by changes in climate, forest cover, and permafrost in a large watershed in northeastern China // *Hydrological Processes*. — 2017. — N 31 (10). — P. 1938–1951.
22. **Земцов В.А., Паромов В.В., Савичев О.Г.** Изменения водного стока крупных рек юга Западной Сибири в XX столетии // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия: Материалы Междунар. науч. конф.* — Томск, 2000. — С. 321–324.
23. **Onuchin A., Balster H., Borisova H., Blitz E.** Climatic and geographic patterns of river runoff formation in Northern Eurasia // *Adv. Water Res.* — 2006. — N 29. — P. 1314–1327.
24. **Буренина Т.А., Прысов Д.А.** Зонально-климатические особенности формирования стока рек Средней Сибири // *Экология и климат: Всерос. науч. конф. с междунар. участием (25–26 февраля 2020 г., Санкт-Петербург)*. — СПб.: ИПК «Прикладная экология», ИИУНЦ «Стратегия будущего», 2020. — С. 99–112.
25. **Burenina T., Onuchin A., Guggenberger G., Musokhranova A., Prysov D.** Dynamics of hydrological regime in permafrost zone of Central Siberia // *Environmental Chemistry and Biology*. — 2015. — Vol. 90. — P. 125–132.
26. **Аржакова С.К.** Зимний сток рек криолитозоны России. — СПб.: Изд-во Рос. гидромет. ун-та, 2001. — 209 с.
27. **Годовой отчет о научных исследованиях по разделу Wp-3 в. Будущее углеродных природных экосистем на вечной мерзлоте в Сибири, анализ процессов и уязвимость (Грант 14.B25. 31. 0031)**. — Красноярск: Изд-во Ин-та леса СО РАН, 2014 [Электронный ресурс]. — <http://forest.akadem.ru/> (дата обращения 01.11.2017).

Поступила в редакцию 21.08.2019

После доработки 14.01.2020

Принята к публикации 25.03.2021