

УДК 630*116.2+551.583

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТОКА РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ СРЕДНЕЙ СИБИРИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕСИСТОСТИ И КЛИМАТА

Д. А. Прысов, Т. А. Буренина, А. В. Мусохранова, А. Д. Кошкарлов

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: prisov.krasn@gmail.com, burenina@ksc.krasn.ru, nastya.krasn@mail.ru,
koshkarov.al@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020 г.

Повышение температуры воздуха, происходящее в последние десятилетия как в глобальном масштабе, так и на территории Российской Федерации, оказывает влияние на многие природные процессы, в том числе на гидрологический режим рек. По данным метеостанций за 1952–2012 гг. оценено изменение основных климатических показателей на исследуемой территории Средней Сибири. Тренды температуры воздуха здесь характеризуются устойчивым повышением со скоростью 0.26–0.36 °C/10 лет, средние температуры воздуха за теплый (V–IX) и холодный (X–IV) месяцы также увеличиваются. На основе картографических материалов и космических снимков для девяти водосборов, расположенных в пределах трех ландшафтных зон – лесотундры, северной и средней тайги, получены данные по изменению их лесистости и создана региональная модель связи речного стока с лесистостью водосборов, географическими координатами и среднегодовой температурой воздуха. Численные эксперименты с этой моделью показали, что увеличение лесистости речного бассейна в северных широтах способствует росту годового стока, а в более южных районах – его снижению. Полученные результаты могут служить теоретической основой системы устойчивого управления лесами и достижения желательного гидрологического эффекта.

Ключевые слова: температурные тренды, осадки, речной сток, лесистость водосборов, гидрологическая роль лесов.

DOI: 10.15372/SJFS20210104

ВВЕДЕНИЕ

Согласно учению А. И. Воейкова (1948), основные факторы стока – климатические. Климатологическая концепция долгое время занимала ведущее место в гидрологии, поскольку динамика речного стока тесно связана с конкретными условиями увлажнения и испаряемости. В последние десятилетия ученые-гидрологи стали уделять больше внимания роли лесов в сохранении водных ресурсов (Высоцкий, 1938; Молчанов, 1952, 1960; Рахманов, 1962, 1984; Лебедев, 1982; Матвеев, 1984; Воронков, 1988; Wei et al., 2003; Sun et al., 2006; Карпечко, Бондарик, 2010; Буренина и др., 2012; Burenina et al., 2012; Казанкин, 2013; Liu et al., 2015; Онучин, 2015; Duan et al., 2017; Li et al., 2017; Онучин и

др., 2017). На 5-й конференции ИЮФРО по лесам и воде в изменяющейся окружающей среде (5th IUFRO Conference on Forests and Water in a Changing Environment) была выдвинута идея, что климат, лес, вода и человек являются компонентами единой сложной системы, которые следует изучать только с учетом их взаимосвязей и взаимовлияния.

Отдавая должное климатологической концепции стокоформирования, отметим, что для криолитозоны Средней Сибири, значительная часть территории которой покрыта лесами, изучение гидрологической роли «холодных» лесов (cool forests) и влияния лесистости на водность рек весьма актуально. Актуальность лесогидрологических исследований возрастает в связи с глобальным изменением климата. Как

показали многочисленные исследования (Шикломанов, 1994; Георгиевский и др., 1996; Arnell, 1999; Georgievsky, Shiklomanov, 2003; Onuchin et al., 2006; Джамалов и др., 2008; Dzhamalov et al., 2008; Burenina et al., 2015; Буренина и др., 2018; Джамалов, Сафронова, 2018; Dzhamalov, Safronova, 2018), в районах криолитозоны оно неоднозначно отражается на многолетних изменениях водных ресурсов, что определяется многими разнонаправленными процессами, комплексное влияние которых сложно прогнозировать. Оценка последствий влияния изменений климата на водные ресурсы, как правило, основывается на детерминистическом моделировании изменения составляющих водного баланса (Шмакова, Кондратьев, 2014; Shmakova, Kondrat'ev, 2014; Кондратьев, Шмакова, 2016).

Цель работы – изучить влияние динамики лесистости водосборов на речной сток при различных сценариях изменения климатических условий с учетом специфики формирования стока рек в условиях криолитозоны Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач исследования было подобрано 9 рек, отличающихся как по длине, так и по характеристикам водосборов (табл. 1).

Морфометрические характеристики водотоков и бассейнов приведены по данным Государственного водного реестра (2017). Для создания базы данных по стоку использованы фондовые

материалы Среднесибирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (2020) и литературные данные (Ресурсы..., 1973). Основным критерием при выборе рек была длительность рядов наблюдений за стоком, составляющая от 18 до 53 лет и включающая годы с различной гидроклиматической обстановкой. Для анализа климатических трендов в качестве исходных материалов использовались среднемесячные и среднегодовые показатели температуры воздуха за 1952–2012 гг. и атмосферных осадков за 1966–2012 гг., а также данные 12 метеостанций с одинаковыми рядами наблюдений (Специализированные массивы..., 2016; Источники..., 2017).

Лесной растительный покров исследуемого региона вследствие значительной протяженности с севера на юг и с запада на восток характеризуется неоднородностью (Карта..., 1963, 1990). Речные бассейны, расположенные в пределах одной ландшафтной зоны, имеют разные породный состав древостоев и подпоголовую растительность. В зоне лесотундры в бассейнах рек Гравийка и Советская основная лесообразующая порода – лиственница сибирская *Larix sibirica* Ledeb. Преобладают спелые и перестойные древостои полнотой 0.3 V класса бонитета. Значительная часть водосборных бассейнов рек Горбиачин и Курейка расположена на плато Путорана. Здесь представлены высотные пояса от горно-таежного до арктических пустынь. В составе горно-таежного и подгольцового высотных поясов преобладают леса из листвен-

Таблица 1. Характеристика исследуемых рек криолитозоны Средней Сибири

Река – пункт наблюдений	Длительность наблюдений, годы	Длина реки, км	Общая площадь водосбора, км²	Средняя высота водосбора, м	Средний многолетний сток, мм	Лесистость водосборов по годам, %		
						1963	1990	2015
Зона лесотундры								
Горбиачин – ГП Горбиачин	1982–2000	239	6250	600	600.1	28	38	34
Гравийка – ГП Игарка	1940–1993	45	337	94	491.1	80	90	69
Советская речка – пос. Советская Речка	1975–2012	98	1820	120	345.1	57	60	71
Курейка – Курейская ГЭС	1968–1998	888	44700	658	480.7	49	40	37
Зона северной тайги								
Турухан – фактория Янов Стан	1968–1993, 1995–2012	639	35800	150	253.2	57	60	71
Ерачимо – Большой порог	1968–2012	218	9140	375	515.3	80	85	94
Тембенчи – пос. Тембенчи	1967–1994	574	21600	75	440.9	65	63	75
Зона средней тайги								
Таймура – ГП Кербо	1975–1993	454	32500	374	179.9	90	88	90
Пос. Тунгуска – фактория Кузьмовка	1983–2012	1865	240000	510	240.4	84	96	96

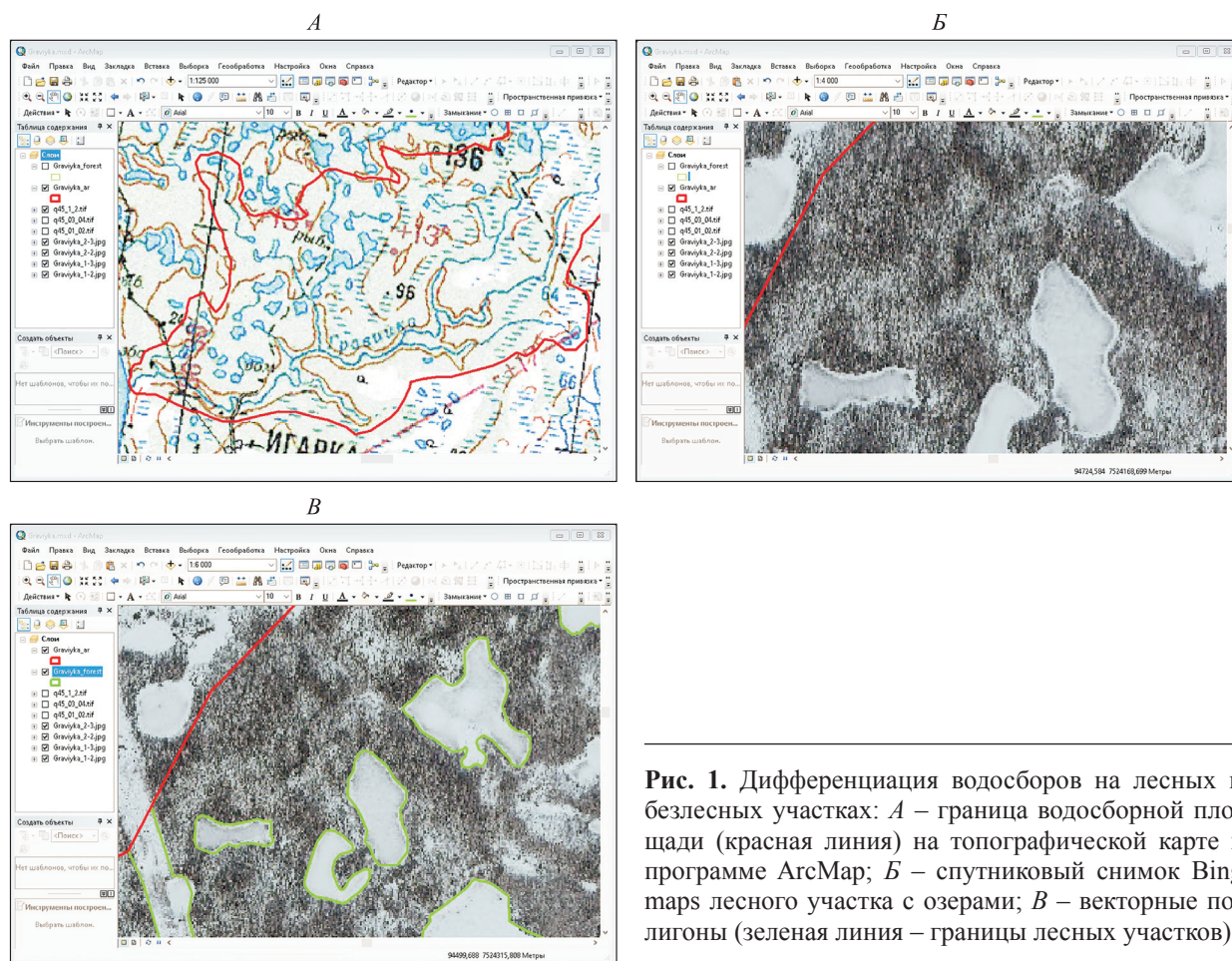


Рис. 1. Дифференциация водосборов на лесных и безлесных участках: *А* – граница водосборной площади (красная линия) на топографической карте в программе ArcMap; *Б* – спутниковый снимок Bing maps лесного участка с озерами; *В* – векторные полигоны (зеленая линия – границы лесных участков).

ницы даурской *Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen. В низовьях р. Курейки встречается лиственница сибирская. Господствуют спелые и перестойные древостои V класса бонитета полнотой 0.3–0.4. Кустарники представлены ерником из различных видов кустарниковых берез: кустарниковой *Betula fruticosa* Pall., карликовой *B. Nana* L., приземистой *B. humilis* Schrank и др.

Лесной покров в бассейнах рек северо-таежной зоны также значительно различается в зависимости от географического положения. Бассейн р. Турухан находится в приенисейской части Западно-Сибирской низменности. Наибольшее распространение здесь имеют леса из лиственницы сибирской и ели сибирской *Picea obovata* Ledeb. Около 20 % площади занимают березовые насаждения, представленные березой повислой *Betula pendula* Roth. Преобладают спелые и перестойные древостои V класса бонитета полнотой 0.4–0.5. В бассейнах рек Ерачимо и Тембенчи низкобонитетные лиственничные леса полнотой до 0.6 состоят из лиственницы даурской. Наиболее распространены лишайниковые и кустарничково-моховые типы леса.

Бассейн р. Подкаменная Тунгуска (включая водосборный бассейн р. Таймура) полностью находится в пределах среднетаежной зоны Средней Сибири, но характеризуется значительными различиями лесной растительности в восточной и западной частях. На востоке преобладают лиственница сибирская и сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. Насаждения преимущественно IV класса бонитета полнотой 0.6–0.7. В среднем течении Подкаменной Тунгуски в составе древостоя появляются ель сибирская и береза повислая, а в приустьевой (приенисейской) части бассейна значительное распространение получают елово-кедровые леса, представленные елью сибирской и сосной сибирской кедровой (кедром сибирским) *Pinus sibirica* Du Tour IV и V классов бонитета полнотой от 0.4–0.5 (Лесные экосистемы..., 2002).

Для определения лесистости бассейнов рек на первом этапе в ГИС-программе ArcMap на топографическую карту (с изображением рельефа горизонталями) наносили границу водосборной площади по водораздельным линиям, высотным отметкам, с учетом рек и тальвегов (рис. 1, А). Затем в электронную карту в качестве слоя по-

мешали космические снимки (доступны Bing – сервис спутниковых карт онлайн) местности с высоким разрешением, позволяющим идентифицировать покрытые лесом участки (рис. 1, Б).

Следующий этап – векторизация лесных участков территории путем создания полигонов в полуавтоматическом (поточном) или ручном режиме с дальнейшим измерением их площади. При наличии на местности необлесенных участков (полян, прогаин, болот, озер, просек и др.) учитывали их размер: открытые участки шириной менее 200 м включали в окружающий их лесной полигон. При высокой облесенности территории бассейна реки векторизация была обратного направления – создавали полигоны открытых необлесенных участков. После векторизации лесистость бассейна рассчитывали как отношение площади облесенной части территории бассейна реки к общей площади бассейна (рис. 1, В).

Полученные данные по лесистости за 1963–2015 гг. использовали для нахождения промежуточных значений. Применяли метод линейной интерполяции, который заключается в том, что заданные точки (x_i, y_i) при $(i = 0, 1, ..., n)$ соединяются прямолинейными отрезками и функция $f(x)$ – ломаной с вершинами в данных точках (Калиткин, 1978). Промежуточные значения лесистости за 1970, 1975, 1982, 1993, 1994, 1998, 2000 и 2012 гг. использовали для моделирования связи стока с лесистостью в различных географических зонах при различной среднегодовой температуре. Полученные данные обрабатывали методом множественного регрессионного ана-

лиза в программе Statsoft Statistica 10. Выделение трендов стока, осадков и температуры воздуха осуществлено при обработке временных рядов этих величин в программе Microsoft Excel и Statsoft Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территория Средней Сибири отличается контрастностью физико-географических условий, что отражается на распределении температуры воздуха и осадков как в широтном, так и в меридиональном направлении. Анализ пространственной вариабельности температуры воздуха показал, что разница между среднегодовыми температурами более выражена при движении с юга на север, чем с запада на восток (табл. 2).

Вследствие значительной протяженности исследуемого региона с севера на юг и возрастания континентальности климата с запада на восток показатели среднегодовой температуры воздуха и температуры по месяцам значительно различаются (см. табл. 2). Температурный минимум отмечается в январе ($-35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, метеостанция пос. Тура), максимум – в июле ($+17.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, метеостанция пос. Бор). Среднегодовая температура воздуха на метеостанциях с максимальными и минимальными значениями этого показателя различается на $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальные различия ($12\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$) характерны для весенних месяцев, а минимальные ($4\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$) – для августа и сентября.

Осадки в районе исследований на одних и тех же широтах убывают с запада на восток и с юга на север, минимальная сумма осадков отме-

Таблица 2. Средние многолетние показатели температурного режима за период 1952–2012 гг.

Метеостанция	Географические координаты		Средняя многолетняя температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$												
	с. ш.	в. д.	Месяц												Год
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Хатанга	71°98'	102°47'	-32.1	-31.5	-26.3	-17.2	-6.6	5.5	12.6	9.3	1.7	-12.1	-25.0	-28.9	-12.9
Волочанка	70°97'	94°50'	-30.3	-29.9	-23.8	-15.5	-5.8	6.0	12.9	9.7	2.5	-11.4	-23.7	-27.3	-11.7
Дудинка	69°40'	86°17'	-27.3	-27.0	-21.5	-14.8	-5.5	5.9	13.8	10.7	4.0	-8.1	-20.6	-24.7	-9.8
Игарка	67°47'	86°57'	-27.4	-26.1	-18.4	-10.8	-1.9	9.2	15.4	11.8	5.0	-6.6	-20.1	-25.1	-8.1
Агата	66°88'	93°47'	-33.6	-31.9	-21.5	-11.3	-1.4	8.0	13.9	10.7	3.9	-7.3	-24.1	-31.0	-10.7
Янов Стан	65°98'	84°27'	-27.0	-25.5	-17.0	-9.3	-0.5	10.2	15.3	11.4	5.0	-6.2	-19.6	-24.9	-7.6
Туруханск	65°78'	87°93'	-25.6	-23.9	-15.6	-7.8	0.7	10.9	16.4	12.5	5.7	-5.3	-18.6	-23.8	-6.4
Тура	64°27'	100°23'	-35.0	-31.2	-18.2	-6.8	3.2	12.7	16.7	12.5	5.0	-6.7	-24.3	-32.3	-9.0
Верхнеимбатск	63°15'	87°95'	-23.9	-21.7	-12.7	-4.7	3.2	12.8	17.4	13.3	6.7	-3.3	-16.1	-22.4	-4.4
Байкит	61°67'	96°37'	-29.8	-25.6	-13.9	-4.1	4.3	13.1	16.9	12.7	5.4	-4.6	-19.5	-28.4	-6.3
Бор	61°60'	90°02'	-23.8	-21.3	-11.7	-2.9	5.0	13.8	17.9	13.9	7.0	-2.2	-14.7	-22.1	-3.6
Ванавара	60°33'	102°27'	-28.7	-25.4	-14.5	-3.7	5.5	14.2	17.4	13.3	5.6	-4.2	-18.5	-27.3	-5.7

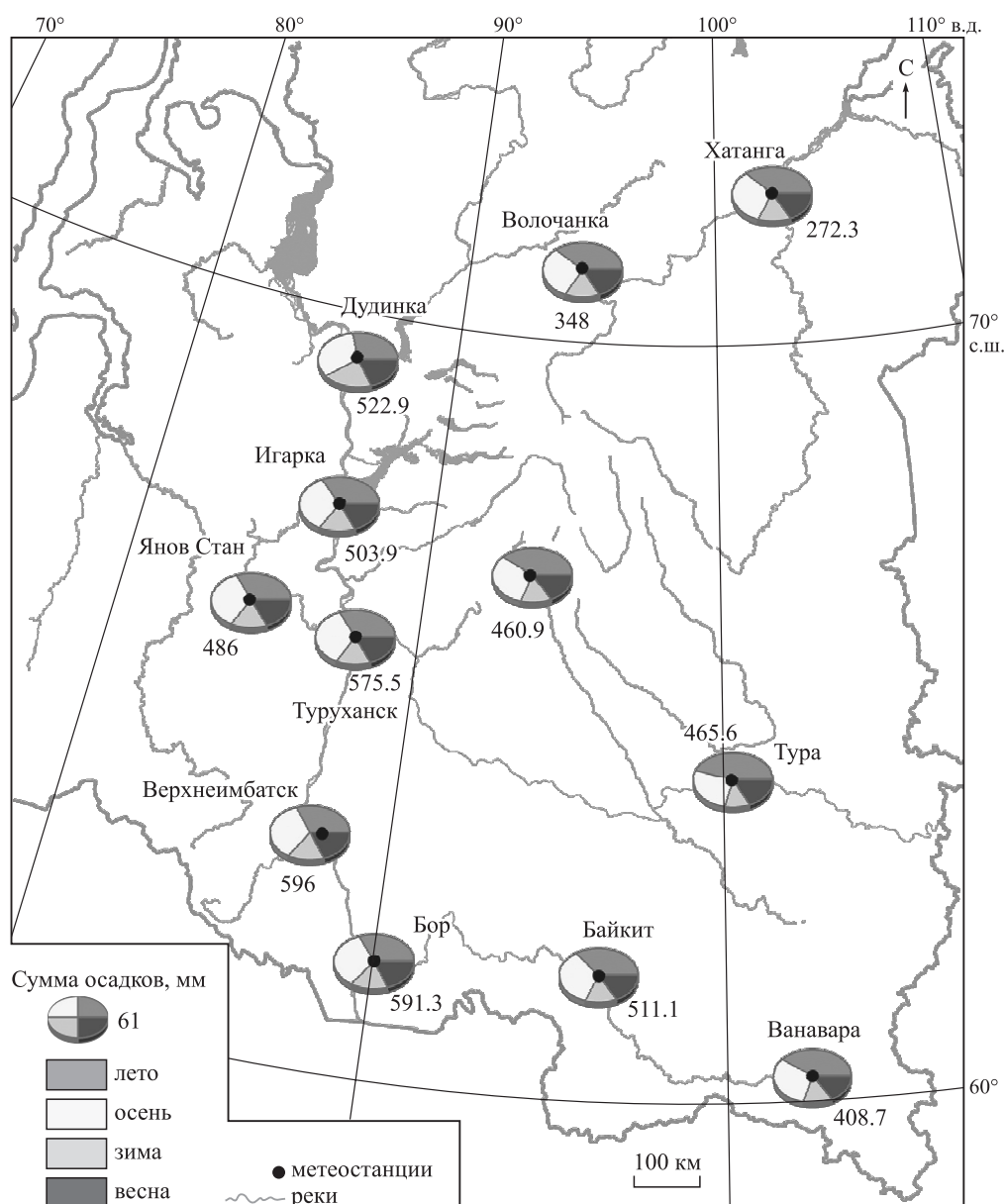


Рис. 2. Распределение годовых осадков.

чена для метеостанций, расположенных на северо-востоке (рис. 2).

Зонально-региональное распределение атмосферных осадков на данной территории – результат сочетания общих закономерностей циркуляции атмосферы, географического положения региона и особенностей орографии.

Изменения температуры воздуха по метеостанциям в течение года характеризуются определенной синхронностью: повышением с февраля по июль и спадом с июля по декабрь.

Синхронность в изменении среднегодовой температуры воздуха подтверждается статистически значимыми коэффициентами парной корреляции 0.60–0.98, что указывает на высокую

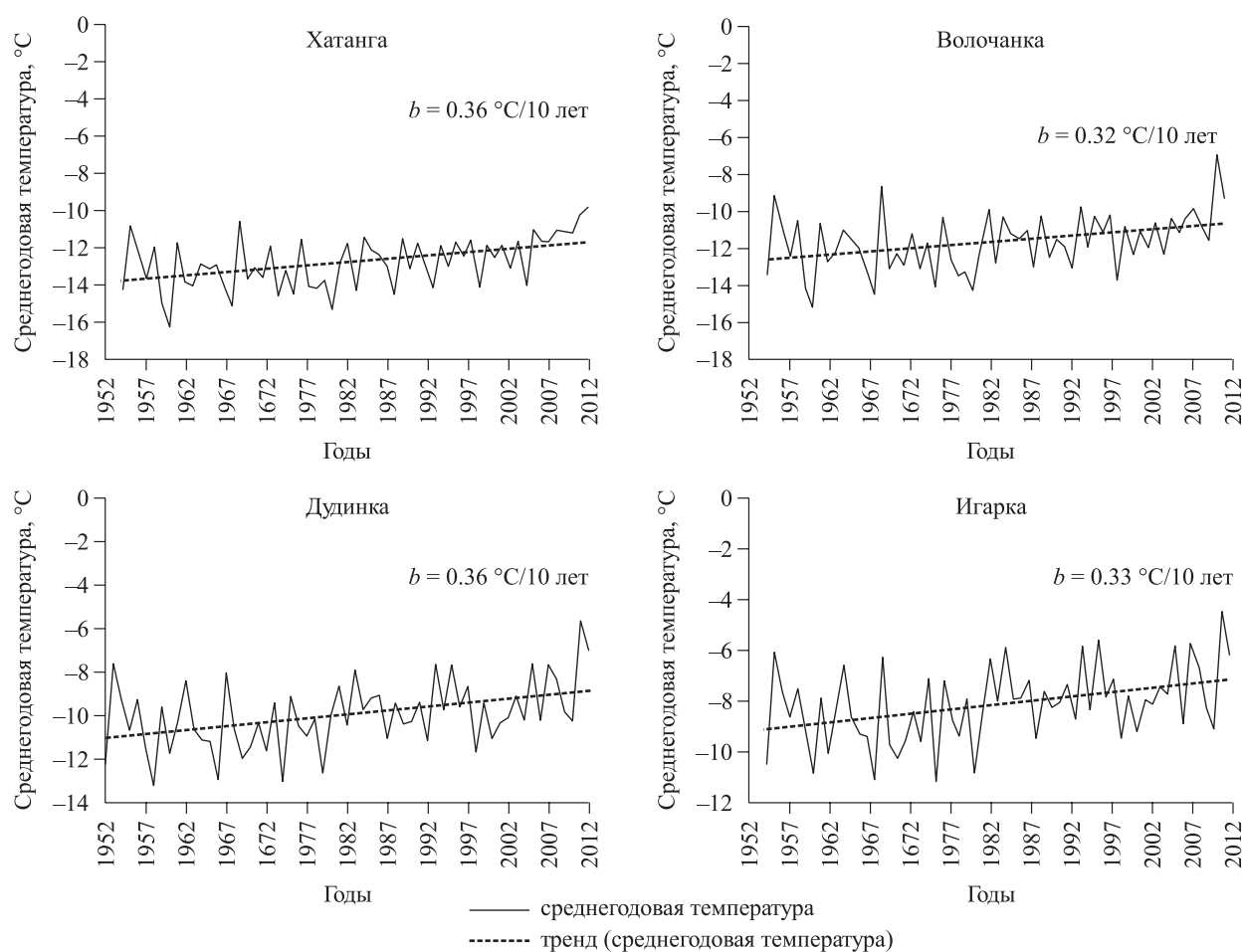
степень согласованности среднегодовых изменений температуры воздуха на исследуемой территории. Слабее всего связаны изменения температуры воздуха на самых удаленных друг от друга метеостанциях: Хатанга–Байкит (0.48), Хатанга–Бор (0.54) и Хатанга–Ванавара (0.49).

Анализ линейных трендов осредненных годовых температур приземного воздуха за период с 1952 по 2012 г. показал, что в районе исследований наблюдалось устойчивое повышение температуры воздуха от 0.26 до 0.36 °C за 10 лет (табл. 3).

Максимальные значения температурных трендов (0.33–0.36 °C/10 лет) характерны для более северных территорий (рис. 3).

Таблица 3. Оценки линейного тренда температуры приземного воздуха, осредненной за год (декабрь-январь) и по сезонам (°C/10 лет)

Метеостанция	Температура воздуха, °C/10 лет (1952–2012 гг.)						
	Год	Зима	Весна	Лето	Осень	V–IX	X–IV
Хатанга	0.36	0.34	0.48	0.13	0.50	0.24	0.44
Волочанка	0.32	0.24	0.51	0.08	0.45	0.21	0.40
Дудинка	0.36	0.33	0.50	0.19	0.41	0.25	0.42
Игарка	0.33	0.32	0.52	0.15	0.34	0.23	0.42
Агата	0.29	0.23	0.50	0.19	0.24	0.23	0.34
Янов Стан	0.33	0.23	0.62	0.17	0.32	0.26	0.41
Туруханск	0.29	0.24	0.50	0.14	0.28	0.20	0.38
Тура	0.34	0.34	0.54	0.13	0.33	0.18	0.46
Верхнеимбатск	0.29	0.21	0.51	0.13	0.31	0.17	0.41
Байкит	0.26	0.22	0.45	0.09	0.29	0.14	0.37
Бор	0.31	0.30	0.53	0.11	0.30	0.14	0.46
Ванавара	0.32	0.26	0.51	0.20	0.29	0.24	0.40

**Рис. 3.** Изменения среднегодовой температуры по репрезентативным метеостанциям за период 1952–2012 гг.; b – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет.

Анализ линейных трендов температуры воздуха по сезонам показал, что максимальные тренды ($0.45\text{--}0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) наблюдаются весной, значительное потепление отмечено и в осенние месяцы ($0.24\text{--}0.50\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). Летом и зимой они не столь значительны, но отражают динамику потепления климата.

Минимальное повышение средней температуры воздуха теплого периода (май–сентябрь) отмечено метеостанциями Бор и Байкит ($0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), максимальное – метеостанцией Янов Стан ($0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$). В холодный период рост температуры воздуха выражен значительнее. Статистически достоверный рост средней температуры в холодный период за 1952–2012 гг. наблюдался на всех рассмотренных метеостанциях и в среднем составлял $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ (см. табл. 3). Максимальное увеличение этого показателя отмечено на метеостанциях Хатанга ($0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$), Тура ($0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) и Бор ($0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$).

Атмосферные осадки – основное звено в цепи влагооборота, во многом определяющее гидрологический режим экосистем суши. Характер увлажнения территории является одним из ведущих факторов дифференциации ландшафтов. Неравномерное распределение осадков по территории связано с особенностями атмосферной циркуляции в данном регионе и характером подстилающей поверхности. На метеостанциях, находящихся на близком расстоянии, прослеживается относительно синхронное изменение суммы осадков, коэффициенты корреляции статистически значимы – от 0.30 до 0.71. Корреляция данных по осадкам самых северных метеостанций Хатанга и Волочанка с данными других метеостанций очень слабая, а в некоторых случаях отрицательная. Также следует отметить неравномерность выпадения осадков по сезонам: в летне-осенний период выпадает до 65.7 % от их годовой суммы, зимой и весной – 17.1 и 17.2 % соответственно (см. рис. 2).

Коэффициенты трендов атмосферных осадков в отличие от температурных имеют различия не только в абсолютных величинах, но и по знаку. На пяти метеостанциях из 12 коэффициенты линейных трендов атмосферных осадков имеют знак минус, а для семи характерны тенденции их увеличения. Интенсивность увеличения годовой суммы осадков составляет $3.1\text{--}21.1\text{ мм}/10\text{ лет}$.

Зональность климатических факторов влияет на пространственное распределение влаги, поступающей на земную поверхность. Направлен-

ность изменений поверхностного стока зависит в основном от широтного перераспределения годовых и сезонных сумм осадков. Характерной особенностью распределения среднего многолетнего стока на территории Сибири является его широтная зональность, наиболее отчетливо выраженная в равнинных частях региона. Наблюдаемая тенденция уменьшения стока с запада на восток связана с возрастанием континентальности климата: сумма годовых осадков снижается от 520 до 460 мм, происходит увеличение испарения снега за счет снижения зимних температур и усиления ветровой активности. Наряду с этим, как известно, формирование стока зависит от ландшафтной, геоморфологической и других структур водосборных бассейнов. Так, в работе Т. Ю. Браславской с соавт. (2020) обсуждается применение геоинформационной модели речных бассейнов с выделением так называемых операционно-территориальных единиц (ОТЕ).

Исследуемые водосборы Средней Сибири по типам формирования стока делятся на две группы: аккумулятивные ОТЕ (равнинные) – Советская речка, Турухан и транзитные ОТЕ (горные) – Горбиачин, Курейка, Гравийка, Таймура, Тембенчи, Ерачимо и Подкаменная Тунгуска.

Лесные экосистемы оказывают существенное влияние на трансформацию структуры водного баланса и перераспределение потоков влаги между суммарным испарением и стоком. Несмотря на то что сформулирована концепция географически детерминированной роли бореальных лесов, позволяющая объяснять причины существующих противоречий (Онучин, 2015; Онучин и др., 2017; Прысов, Онучин, 2019), фактических данных, посредством которых можно смоделировать и оценить трансформацию гидрологической роли лесов в связи с изменением фоновых ландшафтных и климатических условий, очень мало.

В результате обработки исходных данных методом множественного регрессионного анализа получено уравнение

$$Y = -5847.6 + 76.3Long - 64.0Long^{(1-(1/L))} + 0.02 X/(Tg + 15)(Lat^{(1-(1/L))}) + 76.9Lat^{(1-(1/L))}, (1)$$

$$R^2 = 0.61, G = 85.4, F = 110.6,$$

где Y – годовой сток, мм; Lat – градусы с. ш.; $Long$ – градусы в. д.; L – лесистость, %; X – годовая сумма осадков, мм; Tg – среднегодовая температура, $^{\circ}\text{C}$; R^2 – коэффициент множественной детерминации; G – стандартная ошибка; F – критерий Фишера.

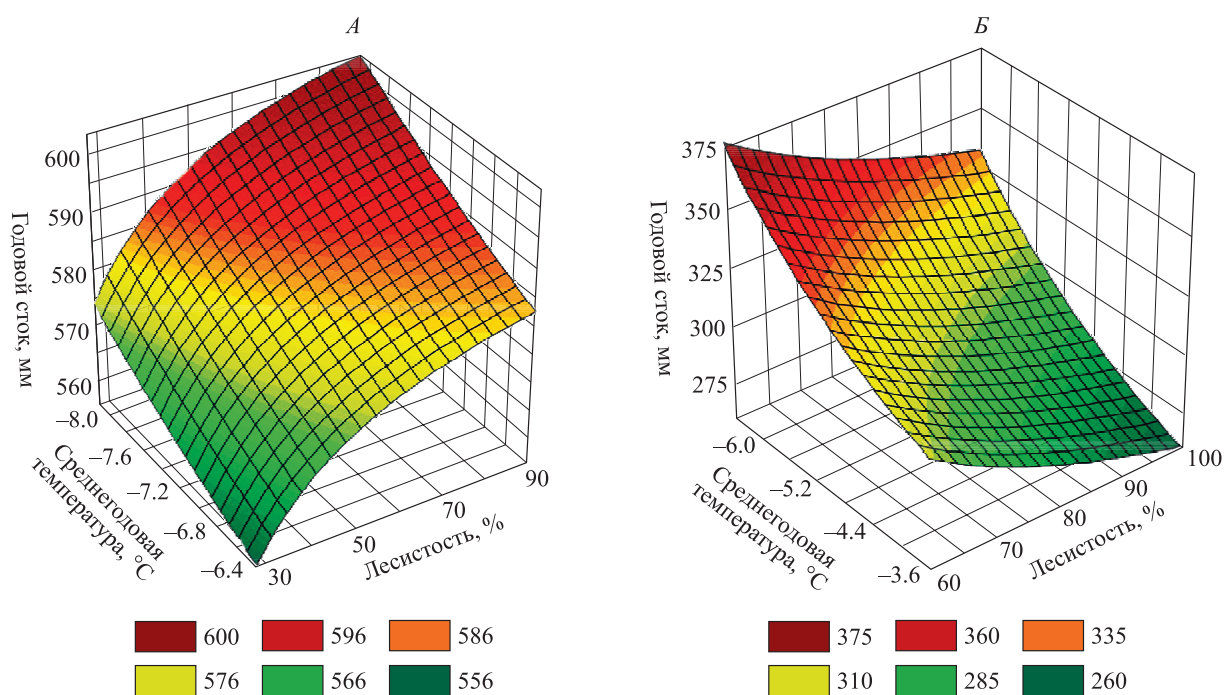


Рис. 4. Связь годового стока рек криолитозоны Средней Сибири с лесистостью и среднегодовой температурой: *А* – зона лесотундры; *Б* – зона северной и средней тайги.

Анализ модели свидетельствует о снижении стока с ростом температуры воздуха и уменьшением годовой суммы осадков. Влияние лесистости на сток проявляется неоднозначно в зависимости от географического положения водосборов. С целью оценки вероятных флуктуаций стока рек с различной лесистостью водосборов в связи с изменением температуры воздуха были выполнены численные эксперименты с моделью (1). В процессе численных экспериментов значения широты и долготы для зоны лесотундры принимались равными 70° с. ш., 79° в. д., для зоны северной и средней тайги равными соответственно 62° с. ш., 95° в. д.; годовые суммы осадков – 540 и 500 мм соответственно.

Анализ остатков значений годового стока, вычисленных по модели (1), не выявил их зависимости от типов формирования стока (аккумулятивный, транзитный), что может быть связано как с объемом выборки, так и с влиянием на сток других неучтенных факторов.

Результаты численных экспериментов отражают графические формы модели (рис. 4), позволяющие констатировать, что при потеплении климата будет наблюдаться трансформация структуры водного баланса с перераспределением его составляющих в пользу суммарного испарения с соответствующим уменьшением стока.

Роль лесной растительности в формировании стока рек проявляется неоднозначно: на се-

вере, в зоне лесотундры, повышение лесистости водосборов сопровождается увеличением стока рек (см. рис. 4, *А*), в таежной зоне лес становится фактором снижения стока (см. рис. 4, *Б*). Такой эффект обусловлен относительно небольшим зимним испарением в северных редколесьях по сравнению с безлесными территориями. В лесах, произрастающих в холодном климате, зимнее испарение невелико, поскольку с понижением температуры воздуха и снижением полноты древостоев снижается и перехват твердых атмосферных осадков пологом леса. В то же время на открытых участках в условиях суровых зим с увеличением скорости ветра испарение возрастает гораздо сильнее, чем в условиях мягких зим (Онучин, 2015). Подтверждением этому служат результаты активных экспериментов, проведенных А. А. Онучиным (1987) в аэродинамической трубе. В условиях северной и средней тайги, где лесистость выше, лес по сравнению с безлесными угодьями работает как испаритель (см. рис. 4, *Б*). Это можно объяснить двумя причинами: во-первых, снижением непродуктивного испарения снеговой влаги на открытых участках, где плотный и влажный снег не подвержен ветровому переносу (во время переноса испарение растет по экспоненте с увеличением скорости ветра), во-вторых, с повышением температуры воздуха возрастает перехват снега пологом леса. Эффект увеличения перехвата снега пологом с

Таблица 4. Трансформация годового стока при различных сценариях изменения климатических условий и лесистости водосборов

Повышение среднегодовой температуры, °С	Лесистость, %	Сток, мм		
		современный	прогнозируемый годовой	снижение
Зона лесотундры				
1.5 °С	28–90	603.0	584.3	–18.7
2 °С	28–90	603.0	579.5	–23.5
3 °С	28–90	603.0	571.3	–31.7
Зона северной и средней тайги				
1.5 °С	60–100	376.9	329.6	–47.3
2 °С	60–100	376.9	319.5	–57.4
3 °С	60–100	376.9	303.8	–73.1

увеличением температуры обусловлен изменением физических свойств снега – увеличением его пластичности и способности к слипанию частиц снега как друг с другом, так и с кронами деревьев, что приводит к снижению годового стока водосборов (Онучин, 2015).

В современной климатологии рассматриваются несколько десятков различных сценариев изменения климата (Шполянская, 1981; Гаврилова, 1992; Зукерт, Замолотчиков, 1997; Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999, 2019; Павлов, Гравис, 2000; Израэль и др., 2006; Павлов, Малкова, 2010; Ипполитов и др., 2014; Ippolitov et al., 2014; Anisimov et al., 2019) и существует большое число моделей динамики климатических систем под влиянием антропогенных факторов, обобщение которых дано в работах: Борзенкова и др., 1987; Болин и др., 1989; Павлов, 1997а, б; Onuchin et al., 2014. В этих исследованиях прогнозируемые разными авторами тренды потепления климата на севере России находятся в пределах 0.01–0.085 °С/год (в среднем 0.041 °С/год). Наибольшие региональные тренды за последние 30–35 лет характерны для центральных районов севера Западной Сибири, Якутии, Прибайкалья и Забайкалья, юга Сибири (0.042–0.046 °С/год). Посредством региональной гидроклиматической модели (1) проведена прогнозная оценка реакции стока рек криолитозоны Средней Сибири на повышение температуры воздуха. Пределы ее повышения на обозримую перспективу приняты в диапазоне от 1.5 до 3 °С, поскольку, как уже сказано, такие значения рядом экспертов считаются наиболее вероятными. Так, специальный доклад о глобальном потеплении на 1.5 °С утвержден Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) 8 октября 2018 г.

в Инчхоне, Республика Корея (Специальный доклад..., 2018).

Из табл. 4 следует, что сток рек в зонах лесотундры, северной и средней тайги имеет тенденцию к снижению, причем интенсивнее он проявляется в зоне северной и средней тайги, где отмечен максимальный показатель его уменьшения (73.1 мм). В зоне лесотундры такой эффект менее выражен.

Как считают авторы, это обусловлено относительно низкими значениями фоновых температур воздуха, что сдерживает рост испарения, но может способствовать оттаиванию вечной мерзлоты, увеличивая в первую очередь зимний сток (Аржакова, 2001; Onuchin et al., 2006; Джамалов и др., 2008; Dzhamalov et al., 2008; Буренина и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальные климатические изменения последних десятилетий, связанные с повышением температуры воздуха, которые отчетливо прослеживаются в том числе в Средней Сибири, не могут не иметь серьезных экологических последствий, которые будут проявляться не только в изменении растительности, но и вызовут трансформацию структуры водного баланса. В таежной зоне потепление, очевидно, будет сопровождаться перераспределением составляющих водного баланса в пользу суммарного испарения за счет снижения стока рек. В лесотундре такой эффект, скорее всего, будет менее выражен не только из-за изменения среднегодовой температуры воздуха, но и сезонной специфики ее динамики, поскольку повышение осенней температуры в лесотундре сопровождается, как отмечалось выше, оттаиванием вечной мерзлоты и

увеличением стока рек. На фоне возрастающего дефицита чистой пресной воды в ряде регионов прогнозные оценки региональных тенденций изменения стока рек с учетом динамики лесного покрова, обусловленной как хозяйственной деятельностью, так и климатическими факторами, будут весьма актуальны и востребованы при разработке стратегий социально-экономического развития субъектов РФ.

Численные эксперименты с региональной гидроклиматической моделью, учитывающей изменение лесистости водосборов, позволяют констатировать, что увеличение лесистости в зоне лесотундры способствует росту годового стока, а в таежной зоне приводит к его снижению. Предполагается что при повышении среднегодовой температуры воздуха от 1.5 до 3.0 °C в таежной зоне может произойти уменьшение годового стока рек на 47.3–73.1 мм, а в лесотундре надежность таких прогнозов будет невысока.

Результаты исследований позволяют оценивать реакцию стока рек криолитозоны на прогнозируемые климатические изменения, а также могут служить основой устойчивого управления лесами с целью получения желательного гидрологического эффекта с учетом природных условий регионов.

Работа выполнена при поддержке базового проекта ИЛ СО РАН «Теоретические основы сохранения экологического и ресурсного потенциала лесов Сибири в условиях возрастающего антропогенного пресса и климатических аномалий» № АААА-А17-117101940014-9 (0356-2019-0027) и гранта РФФИ «Исследование особенностей гидрологического цикла в речных бассейнах таежной зоны Средней Сибири при усилении антропогенного пресса на лесные экосистемы в условиях меняющегося климата» № 20-05-00095.

Авторы выражают благодарность канд. биол. наук А. С. Прокушкину за полезные советы, комментарии и замечания, способствовавшие существенно улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Анисимов О. А., Жильцова Е. Л., Шаповалова К. О., Ершова А. А. Анализ индикаторов изменения климата. Ч. 1. Восточная Сибирь // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 12. С. 31–42 [Anisimov O. A., Zhil'tsova E. L., Shapovalova K. O., Ershova A. A. Analiz indikatorov izmeneniya klimata. Chast' 1. Vostochnaya Sibir' (Analysis of climate change indicators. Pt. 1. Eastern Siberia) // *Meteorologiya i gidrologiya* (Meteorology and Hydrology). 2019. N. 12. P. 31–42 (in Russian with English abstract)].
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э. Прогноз изменения мерзлотных условий в Северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы // *Криосфера Земли*. 1998. № 2. С. 53–57 [Anisimov O. A., Nelson F. E. Prognoz izmeneniya merzlotnykh usloviy v Severnom polusharii: primeneniye rezul'tatov balansovykh i tranzitivnykh raschetov po modelyam obshchey tsirkulyatsii atmosfery (Forecast of changes in permafrost conditions in the northern hemisphere: application of the results of balance and transitive calculations using models of general atmospheric circulation) // *Kriosfera Zemli* (Cryosphere of the Earth). 1998. N. 2. P. 53–57 (in Russian with English abstract)].
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., Павлов А. В. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // *Криосфера Земли*. 1999. Т. 3. № 4. С. 15–25 [Anisimov O. A., Nelson F. E., Pavlov A. V. Prognoznyye stsennarii evolyutsii kriolitozony pri global'nykh izmeneniyakh klimata v XXI veke (Forecast scenarios of permafrost evolution under global climate changes in the XXI century) // *Kriosfera Zemli* (Cryosphere of the Earth). 1999. V. 3. N. 4. P. 15–25 (in Russian with English abstract)].
- Аржакова С. К. Зимний сток рек криолитозоны России. СПб.: РГГМУ, 2001. 205 с. [Arzhakova S. K. Zimniy stok rek kriolitozony Rossii (Winter runoff of rivers of the cryolithozone of Russia). St. Petersburg: RGGMU (Rus. St. Hydro-Meteorol. Univ.), 2001. 205 p. (in Russian)].
- Болин Б., Ягер Дж., Деес Б. Р., Воррик Р. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы / Под ред. Б. Болина. Пер. с англ. под ред. М. Я. Антоновского. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 556 с. [Bolin B., Jager J., Dees B. R., Worric R. Parnikovy effekt, izmenenie klimata i ekosistemy / Pod red. B. Bolina. Per. s angl. pod red. M. Ya. Antonovskogo (Greenhouse effect, climate change and ecosystems / Ed. B. Bolin. Transl. English. M. Ya. Antonovsky (Ed.)). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 556 p. (in Russian)].
- Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К. Антропогенные изменения климата / Под ред. М. И. Будыко, Ю. А. Израэля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 405 с. [Borzenkova I. I., Budyko M. I., Byutner E. K. Antropogennyye izmeneniya klimata (Anthropogenic climate changes) / M. I. Budyko, Yu. A. Izrael (Eds.). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 405 p. (in Russian)].
- Браславская Т. Ю., Колбовский Е. Ю., Есиповас Е. С., Коротков В. Н., Немчинова А. В., Чуракова Е. Ю., Козыкин А. В., Кулясова Е. А., Алейникова А. А. Ландшафтно-бассейновый подход к экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2020. № 6. Т. 84. С. 905–919 [Braslavskaya T. Yu., Kolbovskiy E. Yu., Esipovas E. S., Korotkov V. N., Nemchinova A. V., Churakova E. Yu., Kozykin A. V., Kulyasovae A. A., Aleynikova A. A. Landshaftno-basseynovy podkhod k ekologicheskoy otsenke malonarushennykh lesov Onezhskogo poluostrova (The landscape-basin approach for ecological evaluation of intact forest areas on the Onega peninsula) // *Izv. RAN. Ser. geogr.* (Proc. Rus. Acad. Sci. Ser. Geogr.).

2020. N. 6. V. 84. P. 905–919 (in Russian with English abstract)].
- 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 [Burenina T. A., Prysov D. A., Fedotova E. V. Vliyaniye klimaticheskikh i antropogennykh faktorov na gidrologicheskiy rezhim rek yuga Krasnoyarskogo kraya (The influence of climatic and anthropogenic factors on hydrological regime of rivers at the south of Krasnoyarsk Krai) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2018. N. 2. P. 48–60 (in Russian with English abstract)].
- Буренина Т. А., Федотова Е. В., Овчинникова Н. Ф. Изменение структуры влагооборота в связи с возрастной и восстановительной динамикой лесных экосистем // Сиб. экол. журн. 2012. Т. 19. № 3. С. 435–445 [Burenina T. A., Fedotova E. V., Ovchinnikova N. F. Izmeneniye struktury vlogooborota v svyazi s vozrastnoy i vosstanovitel'noy dinamikoyleсных ekosistem (Change in the structure of the hydrological cycle in connection with the age and recovery dynamics of forest ecosystems) // Sib. ekol. zhurn. (Sib. Ecol. J.). 2012. V. 19. N. 3. P. 435–445 (in Russian with English abstract)].
- Воейков А. И. Климаты земного шара, в особенности России. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 750 с. [Voeykov A. I. Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii (Globe climates, especially in Russia). Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1948. 750 p. (in Russian)].
- Воронков Н. А. Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 286 с. [Voronkov N. A. Rol' lesov v okhrane vod (The role of forests in water conservation). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 286 p. (in Russian with English abstract)].
- Высоцкий Г. Н. О гидрологическом влиянии лесов. М.: Гослестехиздат, 1938. 68 с. [Vysotskiy G. N. O gidrologicheskom vliyaniilesov (On the hydrological influence of forests). Moscow: Goslестехиздат, 1938. 68 p. (in Russian)].
- Гаврилова М. К. Предстоящие изменения климата и вечная мерзлота // Рациональное природопользование в криолитозоне: сб. науч. тр. М.: Наука, 1992. С. 8–12 [Gavrilova M. K. Predstoyashchie izmeneniya klimata i vechnaya merzlota (Upcoming climate change and permafrost) // Ratsional'noe prirodopol'zovanie v kriolitozone: sb. nauch. tr. (Rational nature management in the permafrost zone: Coll. sci. works). Moscow: Nauka (Science), 1992. P. 8–12 (in Russian)].
- Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин 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 [Georgievskiy V. Yu., Ezhov A. V., Shalygin A. L., Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I. Otsenka vliyaniya vozmozhnykh izmeneniy klimata na gidrologicheskiy rezhim i vodnye resursy rek territorii byvshego SSSR (Assessment of the effect of possible climate changes on hydrological regime and water resources of rivers in the former USSR) // Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and Hydrology). 1996. N. 11. P. 89–99 (in Russian with English abstract)].
- Государственный водный реестр. М.: Фед. агентство водных ресурсов (Росводресурсы). Мин-во природ. рес. и экол. РФ, 2017 [Gosudarstvenny vodny reestr (State water register). Moscow: Fed. agentstvo vodnykh resursov (Rosvodresursy). Min-vo prirod. res. i ekol. RF (Fed. Agency for Water Res. (Rosvodresurs). Ministry Nat. Res. Environ. Rus. Fed.), 2017 (in Russian)].
- 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 // Водн. ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 17–24 [Dzhamalov R. G., Zektser I. S., Krichevets G. N., Safronova T. I., Sotnikova L. F., Gromova Yu. V. Izmeneniye podzemnogo stoka pod vliyaniem klimata i antropogennykh vozdeystviy (Changes in groundwater runoff under the effect of climate and anthropogenic impact) // Vodn. resursy (Water Res.). 2008. V. 35. N. 1. P. 17–24 (in Russian with English abstract)].
- Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И. Влияние многолетне-мерзлых пород на формирование водных ресурсов Восточной Сибири (на примере отдельных рек Восточной Сибири) // Водн. ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 341–352 [Dzhamalov R. G., Safronova T. I. Vliyaniye mnogoletnemerzlykh porod na formirovaniye vodnykh resursov Vostochnoy Sibiri (na primere otdel'nykh rek Vostochnoy Sibiri) (Effect of permafrost rocks on water resources formation in Eastern Siberia: case study of some rivers in Eastern Siberia) // Vodn. resursy (Water Res.). 2018. V. 45. N. 4. P. 341–352 (in Russian with English abstract)].
- Зукерт Н. В., Замолодчиков Д. Г. Изменение температуры воздуха и осадков в тундровой зоне России // Метеорология и гидрология. 1997. № 8. С. 45–52 [Zukert N. V., Zamolodchikov D. G. Izmeneniye temperatury vozdukha i osadkov v tundrovoy zone Rossii (Changes in air temperature and precipitation in the tundra zone of Russia) // Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and Hydrology). 1997. N. 8. P. 45–52 (in Russian with English abstract)].
- Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А., Мяч Л. Т., Шерстюков Б. Г. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2006. № 5. С. 27–38 [Izrael Yu. A., Pavlov A. V., Anokhin Yu. A., Myach L. T., Sherstyukov B. G. Statisticheskie otsenki izmeneniya elementov klimata v rayonakh vechnoy merzloty na territorii Rossiyskoy Federatsii (Statistical estimates of changes in climate elements in permafrost areas on the territory of the Russian Federation) // Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and Hydrology). 2006. N. 5. P. 27–38 (in Russian)].
- Ипполитов И. И., Логинов С. В., Харюткина Е. В., Морару Е. И. Изменчивость климата азиатской территории России в 1975–2012 годах // Геогр. и природ. ресурсы. 2014. № 4. С. 13–21 [Ippolitov I. I., Loginov S. V., Kharyutkina E. V., Moraru E. I. Izmenchivost klimata aziatskoy territorii Rossii v 1975–2012 godakh (Climate variability over the Asian territory of Russia during 1975–2012) // Geogr. i prirod. resursy (Geogr. Nat. Res.). 2014. N. 4. P. 13–21 (in Russian with English abstract)].
- Источники метеорологических данных на территорию РФ по станциям, 2017 [Istochniki meteorologicheskikh

- dannyykh na territoriyu RF po stantsiyam, 2017 (Sources of meteorological data on the territory of the Russian Federation by stations, 2017) (in Russian)]. <http://gis-lab.info/qa/meteo-stationsources.html>
- Казанкин А. П. Экологическая роль горных лесов Кавказа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 365 с. [Kazankin A. P. Ekologicheskaya rol' gornyykh lesov Kavkaza (Ecological role of mountain forests in the Caucasus). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN (Sib. Br. Rus. Acad. Sci. Publ.), 2013. 365 p. (in Russian)].
- Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с. [Kalitkin N. N. Chislennyye metody (Numerical methods). Moscow: Nauka (Science), 1978. 512 p. (in Russian)].
- Карпечко Ю. В., Бондарик Н. Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне европейского Севера России. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2010. 225 с. [Karpechko Yu. V., Bondarik N. L. Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaystvennykh i lesopromyshlennyykh rabot v taezhnoy zone evropeyskogo Severa Rossii (Hydrological role of forestry and timber industrial works in the taiga zone of the European North of Russia). Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr RAN (Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci.), 2010. 225 p. (in Russian)].
- Карта лесов Красноярского края. М 1 : 750 000. Красноярск: Вост.-Сиб. лесоустр. предпр., 1963 [Karta lesov Krasnoyarskogo kraya. M 1 : 750 000 (Map of forests of Krasnoyarsk Krai. Scale 1 : 750 000). Krasnoyarsk: Vost.-Sib. lesoustr. predpr. (East Sib. For. Plan. Enterpr.), 1963 (in Russian)].
- Карта «Леса СССР» М 1:2 500 000 / Под ред. М. Г. Гарсия. М.: ГУГК, 1990 [Karta «Lesa SSSR» M 1:2 500 000 / Pod red. M. G. Garsiya (Map «Forests of the USSR» Scale 1:2 500 000 / M. G. Garsiya (Ed.)). M.: GUGK (Main Administration of Geodesy and Cartography), 1990 (in Russian)].
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование стока реки Невы в условиях возможного изменения климата // Уч. зап. РГТМУ. 2016. № 42. С. 24–32 [Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Matematicheskoe modelirovanie stoka reki Nevy v usloviyakh vozmozhnogo izmeneniya klimata (Mathematical modeling of the river Neva runoff in conditions of possible climate change) // Uch. zap. RGGMU (Sci. Proc. Rus. St. Hydro-Meteorol. Univ.). 2016. N. 42. P. 24–32 (in Russian with English abstract)].
- Лебедев А. В. Гидрологическая роль горных лесов Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 182 с. [Lebedev A. V. Gidrologicheskaya rol' gornyykh lesov Sibiri (Hydrological role of Siberian mountain forests). Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie (Sci. Sib. Br.), 1982. 182 p. (in Russian)].
- Лесные экосистемы Енисейского меридиана / Ред. Ф. И. Пешиков. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 356 с. [Lesnye ekosistemy Eniseyskogo meridiana (Forest ecosystems of the Yenisei meridian) / F. I. Pleshikov (Ed.). Novosibirsk: Sib. Br. Rus. Acad. Sci. Publ., 2002. 356 p. (in Russian with English title, summary and contents)].
- Матвеев П. Н. Гидрологическая и защитная роль горных лесов Киргизии. Фрунзе: Илим, 1984. 240 с. [Matveev P. N. Gidrologicheskaya i zashchitnaya rol' gornyykh lesov Kirgizii (Hydrological and protective role of mountain forests in Kyrgyzstan). Frunze: Ilim, 1984. 240 p. (in Russian)].
- Молчанов А. А. Гидрологическая роль сосновых лесов на песчаных почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 487 с. [Molchanov A. A. Gidrologicheskaya rol' sosnovyykh lesov na peschanykh pochvakh (Hydrological role of pine forests on sandy soils). Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1952. 487 p. (in Russian)].
- Молчанов А. А. Гидрологическая роль леса. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 487 с. [Molchanov A. A. Gidrologicheskaya rol' lesa (Hydrological role of forest). Moscow: Izd-vo AN SSSR (USSR Acad. Sci. Publ.), 1960. 487 p. (in Russian)].
- Онучин А. А. Трансформация твердых атмосферных осадков горными лесами Хамар-Дабана: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск: Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1987. 19 с. [Onuchin A. A. Transformatsiya tverdykh atmosferynykh osadkov gornymi lesami Khamar Dabana: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk (Transformation of solid precipitation by the mountain forests of Hamar Daban: Cand. Agr. Sci. (PhD) thesis). Krasnoyarsk: In-t lesa i drevesiny im. V. N. Sukacheva SO AN SSSR (V. N. Sukachev Inst. For. & Timber, Sib. Br. USSR Acad. Sci.), 1987. 19 p. (in Russian)].
- Онучин А. А. Причины концептуальных противоречий в оценке гидрологической роли бореальных лесов // Сиб. лесн. журн. 2015. № 2. С. 41–54 [Onuchin A. A. Prichiny kontseptual'nykh protivorechiy v otsenke gidrologicheskoy roli boreal'nykh lesov (The reasons for conceptual contradictions in evaluating hydrological role of boreal forests) // Sib. lesn. zhurn. (Sib. J. For. Sci.). 2015. N. 2. P. 41–54 (in Russian with English abstract)].
- Онучин А. А., Буренина Т. А., Прысов Д. А. Зонально-географические особенности гидрологических функций бореальных лесов // Бореальные леса: состояние, динамика, экосистемные услуги. Тез. докл. Всерос. науч. конф., посвящ. 60-летию Ин-та леса Карел. науч. центра РАН. Петрозаводск, 11–15 сент. 2017 г. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2017. С. 108–109 [Onuchin A. A., Burenina T. A., Prysov D. A. Zonal'no-geograficheskie osobennosti gidrologicheskikh funktsiy boreal'nykh lesov (Zonal-geographical features of hydrological functions of the boreal forests) // Boreal'nye lesa: sostoyanie, dinamika, ekosistemnye uslugi. Tez. dokl. Vseros. nauch. konf., posvyashch. 60-letiyu In-ta lesa Karel. nauch. tsentra RAN. Petrozavodsk, 11–15 sent. 2017 g. (Boreal forests: state, dynamics, and ecosystem services. Abstr. All-Rus. sci. conf., dedicated 60th anniversary Inst. For. Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci. Petrozavodsk, 11–15 Sept. 2017). Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr RAN (Karel. Sci. Center Rus. Acad. Sci.), 2017. P. 108–109 (in Russian)].
- Павлов А. В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997а. Т. 1. № 1. С. 47–58 [Pavlov A. V. Merzlotno-klimaticheskii monitoring Rossii: metodologiya, rezul'taty nablyudeniya, prognoz (Permafrost-climatic monitoring of Russia: methodology, observation results, forecast) // Kriosfera Zemli (Cryosphere of the Earth). 1997a. V. 1. N. 1. P. 47–58 (in Russian with English abstract)].

- Павлов А. В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 1997b. № 4. С. 61–75 [Pavlov A. V. Zakonomernosti formirovaniya kriolitozony pri sovremennykh izmeneniyakh klimata (Patterns of the formation of the permafrost zone under modern climate changes) // Izv. RAN. Ser. geogr. (Proc. Rus. Acad. Sci. Ser. Geogr.). 1997b. N. 4. P. 61–75 (in Russian with English abstract)].
- Павлов А. В., Гравис Г. В. Вечная мерзлота и современный климат // Природа. 2000. № 4. С. 10–18 [Pavlov A. V., Gravis G. V. Vechnaya merzlota i sovremenny klimat (Permafrost and contemporary climate) // Priroda (Nature). 2000. N. 4. P. 10–18 (in Russian with English abstract)].
- Павлов А. В., Малкова Г. В. Динамика криолитозоны России в условиях современных изменений климата XX–XXI веков // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 44–51 [Pavlov A. V., Malkova G. V. Dinamika kriolitozony Rossii v usloviyakh sovremennykh izmeneniy klimata XX–XXI vekov (Dynamic of permafrost zone of Russia under changing climate conditions) // Izv. RAN. Ser. geogr. (Proc. Rus. Acad. Sci. Ser. Geogr.). 2010. N. 5. P. 44–51 (in Russian with English abstract)].
- Прысов Д. А., Онучин А. А. Влияние лесистости на годовой сток северных рек Средней Сибири // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: сб. мат-лов Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 25–26 апр. 2019 г. / Под общ. ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 60–62 [Prysov D. A., Onuchin A. A. Vliyaniye lesistosti na godovoy stok severnykh rek Sredney Sibiri (The influence of forest cover on the annual runoff of the northern rivers of the Central Siberia) // Molodye uchenye v reshenii aktualnykh problem nauki: sb. mat-lov Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Krasnoyarsk, 25–26 aprelya 2019 g. (Young scientists in solving actual problems of science: Proc. All-Rus. sci.-pract. conf. students, PhD students, and young scientists, Krasnoyarsk, 25–26 Apr. 2019) / Yu. Yu. Loginov (Ed.). Krasnoyarsk: SibGU im. M. F. Reshetneva (Reshetnev Sib. St. Univ. Sci. Technol.), 2019. P. 60–62 (in Russian with English abstract)].
- Рахманов В. В. Водоохранная роль лесов. М.: Гослесбумиздат, 1962. 235 с. [Rakhmanov V. V. Vodookhranaya rol lesov (Water protective role of forests). Moscow: Goslesbumizdat, 1962. 235 p. (in Russian)].
- Рахманов В. В. Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 241 с. [Rakhmanov V. V. Gidroklimaticheskaya rol lesov (Hydroclimatic role of forests). Moscow: Lesn. prom-st (Timber Indust.), 1984. 241 p. (in Russian)].
- Ресурсы поверхностных вод СССР: Ангаро-Енисейский район / Под ред. А. П. Муранова. Т. 16. Вып. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 724 с. [Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Angaro-Eniseyskiy rayon (Resources of surface waters of the USSR: Angaro-Yenisei region) / A. P. Muranov (Ed.). V. 16. Iss. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 724 p. (in Russian)].
- Специализированные массивы для климатических исследований, 2016 [Spetsializirovannye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy (Specialized arrays for climate studies), 2016 (in Russian)]. <http://meteo.ru/it/178-aisori>
- Специальный доклад МГЭИК о глобальном потеплении на 1.5 °C, 2018 [Spetsialny doklad MGEIK o globalnom potepnenii na 1.5 °C, 2018 (IPCC Special report on global warming by 1.5 °C, 2018) (in Russian)]. <http://www.igce.ru/2018/10/специальный-доклад-мгэик-о-глобально/>
- Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2020 [Srednesibirskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoring okruzhayushchey sredy, 2020 (Central Siberian Administration on Hydrometeorology and Environmental Monitoring) (in Russian)]. <http://meteo.krasnoyarsk.ru>
- Шикломанов А. И. О влиянии антропогенных изменений глобального климата на сток в бассейне Енисея // Метеорология и гидрология. 1994. № 2. С. 84–93 [Shiklomanov A. I. O vliyaniy antropogennykh izmeneniy globalnogo klimata na stok v basseynе Yeniseya (Influence of anthropogenic global climate change on runoff in the basin of Yenisei) // Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and Hydrology). 1994. N. 2. P. 84–93 (in Russian with English abstract)].
- Шмакова М. В., Кондратьев С. А. Стохастическая модель погоды в системе детерминированно-стохастического моделирования стока и биогенной нагрузки // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 74–84 [Shmakova M. V., Kondrat'ev S. A. Stokhasticheskaya model pogody v sisteme determinirovanno-stokhasticheskogo modelirovaniya stoka i biogennoy nagruzki (The stochastic weather model in the system of deterministic and stochastic modeling of runoff and nutrient load) // Meteorologiya i gidrologiya (Meteorology and Hydrology). 2014. N. 9. P. 74–84 (in Russian with English abstract)].
- Шполянская Н. А. Мерзлая зона литосферы Западной Сибири и тенденции ее развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 168 с. [Shpolyanskaya N. A. Merzlaya zona litosfery Zapadnoy Sibiri i tendentsii ee razvitiya (Permafrost zone of the lithosphere of Western Siberia and its development trends). Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta (Moscow Univ. Publ.), 1981. 168 p. (in Russian)].
- Anisimov O. A., Zhil'tsova E. L., Shapovalova K. O., Ershova A. A. Analysis of climate change indicators. Pt. 1. Eastern Siberia // Rus. Meteorol. Hydrol. 2019. V. 44. Iss. 12. P. 810–817 (Original Rus. Text © O. A. Anisimov, E. L. Zhil'tsova, K. O. Shapovalova, A. A. Ershova, 2019, publ. in Meteorologiya i Gidrologiya. 2019. N. 12. P. 31–42).
- Arnell N. W. Climate change and global water resources // Glob. Environ. Change. 1999. V. 9. Iss. 1. P. 31–49.
- Burenina T. A., Fedotova E. V., Ovchinnikova N. F. Change in the structure of the hydrological cycle in connection with the age and recovery dynamics of forest ecosystems // Contemp. Probl. Ecol. 2012. V. 5. N. 3. P. 323–331 (Original Rus. Text © T. A. Burenina, E. V. Fedotova, N. F. Ovchinnikova, 2012, publ. in Sib. ekol. zhurn., 2012. V. 19. N. 3. P. 435–445).
- Burenina T., Onuchin A., Guggenberger G., Musokhranova A., Prysov D. Dynamics of hydrological regime in permafrost zone of Central Siberia // Int. Proc. Chem., Biol. Environ. Engineer. 2015. V. 90. P. 132–139.
- Duan L., Man X., Kurylyk B. L., Cai T., Li Q. Distinguishing streamflow trends caused by changes in climate, forest

- cover, and permafrost in a large watershed in northeastern China // *Hydrol. Proces.* 2017. V. 31. Iss. 10. P. 1938–1951.
- Dzhamalov R. G., Safronova T. I. Effect of permafrost rocks on water resources formation in Eastern Siberia: Case study of some rivers in Eastern Siberia // *Water Res.* 2018. V. 45. Iss. 4. P. 455–465 (Original Rus. Text © R. G. Dzhamalov, T. I. Safronova, 2018, publ. in *Vodnye Resursy*. 2018. V. 45. N. 4. P. 341–352).
- Dzhamalov R. G., Zektser I. S., Krichevets G. N., Safronova T. I., Sotnikova L. F., Gromova Yu. V. Changes in groundwater runoff under the effect of climate and anthropogenic impact // *Water Res.* 2008. V. 35. N. 1. P. 15–22 (Original Rus. Text © R. G. Dzhamalov, I. S. Zektser, G. N. Krichevets, T. I. Safronova, L. F. Sotnikova, Yu. V. Gromova, 2008, publ. in *Vodnye Resursy*. 2008. V. 35. N. 1. P. 17–24).
- Georgievsky V. Y., Shiklomanov I. A. Climate change and water resources // *World water resources at the beginning of the 21st century*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press., 2003. P. 390–413.
- Ippolitov I. I., Loginov S. V., Kharyutkina E. V., Moraru E. I. Climate variability over the Asian territory of Russia during 1975–2012 // *Geogr. Nat. Res.* 2014. V. 35. Iss. 4. P. 310–318 (Original Rus. Text © I. I. Ippolitov, S. V. Loginov, E. V. Kharyutkina, E. I. Moraru, 2014, publ. in *Geografiya i Prirodnye Resursy*. 2014. N. 4. P. 13–21).
- Li Q., Wei X., Zhang M., Liu W., Fan H., Zhou G., Giles-Hansen K., Liu S., Wang Y. Forest cover change and water yield in large forested watersheds: A global synthetic assessment // *Ecohydrology*. 2017. V. 10. Iss. 4. P. 1–7.
- Liu W., Wei X., Liu S., Liu Y., Fan H., Zhang M., Yin J., Zhan M. How do climate and forest changes affect long-term streamflow dynamics? A case study in the upper reach of Poyang River basin // *Ecohydrology*. 2015. V. 8. Iss. 1. P. 46–57.
- Onuchin A., Balzter H., Borisova H., Blyth E. Climatic and geographic patterns of river runoff formation in Northern Eurasia // *Adv. Water Res.* 2006. V. 29. N. 9. P. 1314–1327.
- Onuchin A., Korets M., Shvidenko A., Burenina T., Musokhranova A. Modeling air temperature changes in Northern Asia // *Glob. Planet. Change*. 2014. V. 122. P. 14–22.
- Shmakova M. V., Kondrat'ev S. A. The stochastic weather model in the system of deterministic and stochastic modeling of runoff and nutrient load // *Rus. Meteorol. Hydrol.* 2014. V. 39. Iss. 9. P. 620–628 (Original Rus. Text © M. V. Shmakova, S. A. Kondrat'ev, 2014, publ. in *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2014. N. 9. P. 74–84).
- Sun G., Zhou G., Zhang Z., Wei X., McNulty S. G., Vose J. M. Potential water yield reduction due to reforestation across China // *J. Hydrol.* 2006. V. 328. P. 548–558.
- Wei X., Zhou X. F., Wang C. K. Impacts of the temperate forests on hydrology, Northeast of China // *For. Chron.* 2003. V. 79. P. 297–300.

TRANSFORMATION OF RIVER RUNOFF IN PERMAFROST ZONE OF THE CENTRAL SIBERIA UNDER VARIOUS SCENARIOS OF FOREST COVER AND CLIMATE CHANGE

D. A. Prysov, T. A. Burenina, A. V. Musokhranova, A. D. Koshkarov

*V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Science, Siberian Branch
Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: prisov.krasn@gmail.com, burenina@ksc.krasn.ru, nastya.krasn@mail.ru,
koshkarov.al@ksc.krasn.ru

The rise in air temperature that has taken place in recent decades both globally and on the territory of the Russian Federation has an impact on many environmental processes, including the hydrological regime of rivers. According to the data of meteorological stations for 1952–2012, the change in the main climatic indicators in the studied territory of the Central Siberia was estimated. Analysis of meteorological data confirms that over the past decades, there has been a change in the average annual air temperature. Changes of air temperature in the study area are characterized by a stable tendency to warming at a rate of 0.26–0.36 °C/10 years. The average air temperatures for the warm (V–IX) and cold (X–IV) months have a positive tendency to increase. Based on cartographic materials and satellite images, data on dynamic of forest cover were obtained for nine catchments located within three landscape zones – forest-tundra, northern and middle taiga. A regional model of the relationship between river runoff with forest cover of catchments, geographical coordinates and average annual air temperature was development. Numerical experiments with the obtained model showed that an increase in the forest cover of the river catchments in northern latitudes contributes to an increase in the annual runoff, and in southern regions, to its decrease. The results obtained can serve as a theoretical basis for a sustainable forest management in order to obtain the desired hydrological effect.

Keywords: *temperature trends, precipitation, river runoff, forest cover of catchments, hydrological role of forests.*

How to cite: Prysov D. A., Burenina T. A., Musokhranova A. V., Koshkarov A. D. Transformation of river runoff in permafrost zone of the Central Siberia under various scenarios of forest cover and climate change // *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.). 2021. N. 1. P. 30–44 (in Russian with English abstract and references).