

## Современный тепловой сток горных рек криолитозоны: геоэкологические особенности формирования на примере Верхней Колымы

Николай Васильевич УХОВ

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
Институт биологических проблем Севера ДВРО РАН, Магадан, Россия  
nukhov@mail.ru, orcid 0000-0002-9333-3706

**Аннотация.** Цель работы – установить роль основных геоэкологических факторов на изменение водного и теплового стока горных рек криолитозоны в период глобальных климатических изменений. Актуальность исследования заключается в слабой изученности механизма формирования водного и теплового режимов рек в горных районах криолитозоны (Север Азии и Америки) в период глобального изменения климата. Для водотоков Верхней Колымы с различными размерами и степенью нарушенности долин вычислены средние температуры и расходы воды за 30-летние периоды (VI – IX мес.) до и после активной фазы потепления. Проведен анализ изменений гидрологических параметров водотоков с учетом мерзлотно-гидрогеологических и техногенных условий в их долинах. Прослежена устойчивая связь таяния многолетнего льда на водосборах с увеличением водности рек. Установлена важная роль мощности хорошо проницаемых галечниковых отложений и техногенных нарушений в поймах рек на их водный и тепловой режим. Для периода активной фазы потепления выявлена решающая роль расширения гидрогенных таликов в снижении расходов на водопостах. На примере рек бассейна верховий р. Колыма дано геоэкологическое обоснование дифференцированного отклика водного и теплового режима стока рек на глобальное изменение климата. В первом приближении установлены некоторые закономерности изменения водного и теплового стока зависимости от водопроницаемости прирусловых отложений и техногенных нарушений в долинах рек. Результаты рассматриваемой работы могут найти применение в оценке репрезентативности пунктов наблюдений за стоком рек, а значит, и современных ресурсов поверхностных и подземных вод в горных районах криолитозоны.

**Ключевые слова:** криолитозона, потепление климата, тепловой сток, водность, техногенез, талики

**Для цитирования:** Ухов Н.В. Современный тепловой сток горных рек криолитозоны: геоэкологические особенности формирования на примере Верхней Колымы // Тихоокеанская география. 2023. № 4. С. 64–73. [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2023\\_16\\_6](https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_6). EDN: TJVNRL.

# Contemporary heat flow of mountain rivers of the cryolithozone: geocological features of its formation by the example of the Upper Kolyma

Nicolay V. UKHOV

Candidate of Geological and mineralogical Sciences, Senior research associate  
Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, Magadan, Russia  
nukhov@mail.ru, orcid 0000-0002-9333-3706

**Annotation.** The aim of the work is to assess the influence of geocological factors on the water and thermal regime of rivers in the permafrost zone during the period of climate warming. The relevance of the work lies in a significant, often anomalous change of water flow and water temperature in mountain rivers in the permafrost zone (northern Asia and America). The formation mechanism of hydrological parameters dynamics of heat sink during the global warming has not been practically studied yet. Average temperatures and discharges (VI-IX months) were calculated for watercourses of the Upper Kolyma for 30-year periods before and after 1980. Based on these data, the components of the heat runoff of rivers were determined and analyzed with natural and technogenic parameters of floodplains. During the active phase of warming in the Upper Kolyma, a stable relationship was traced between the melting of perennial ice on watersheds and an increase in the total runoff of watercourses. For the period of warming, the role of the thickness of well-permeable pebble deposits and technogenic disturbances in the development of taliks on river floodplains was revealed. The decisive role of the expansion of taliks in reducing water content and heat flow has been found. The results of the work under consideration can be used in the assessment of modern water resources in the mountainous permafrost regions. Significant changes in the parameters of heat sink (water temperature and runoff) have been recorded for the rivers of the Upper Kolyma. Moreover, they are characterized by the opposite direction in watercourses with technogenic disturbance of valleys. Using the example of watercourses in the upstream of the Kolyma River, a geocological justification is given for the different responses of river flows to the active phase of global climate change.

**Keywords:** permafrost zone, climate warming, heat flow, river runoff, technogenesis, taliks

**For citation:** Ukhov N.V. Contemporary heat flow of mountain rivers of the cryolithozone: geocological features of its formation by the example of the Upper Kolyma. *Pacific Geography*. 2023;(4):64-73. (In Russ.). [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2023\\_16\\_6](https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_6).

## Введение

Территория Верхней Колымы расположена преимущественно в пределах одноименного нагорья. Она представляет собой типичное среднегорье, реже низкогорье, с отдельными вершинами высотой 1600–2220 м в пределах Яно-Чукотской мезозойской складчатой системы [1]. На склонах долин коренные породы, как правило, представлены песчано-глинистыми сланцами, покрытыми рыхлыми продуктами их выветривания, мощностью, обычно не превышающей 1.0–1.5 м. Горный рельеф территории предопределяет ограниченное развитие аллювия мощностью до 10–15 м и крупнообломочный, обычно галечниковый его состав. Преобладание песчаного, часто крупнозернистого заполнителя обуславливает высокую водопроницаемость аллювия [2, 3]. В поймах верховий рек, реже в среднем и нижнем течении аллювий слабо развит или практически отсутствует, например, в пойме р. Бохапча (приток р. Колыма). С поверхности русловый аллювий перекрыт маломощными (до 1.5–2.0 м) пойменными отложениями песчано-супесчаного состава [3, 4].

Низкие температуры воздуха в верховьях р. Колыма обуславливают сплошное развитие многолетнемерзлых пород мощностью до 500–550 м [2, 3]. Но вследствие отепляющего влияния водотоков эта мощность в долинах рек снижается по сравнению с водоразделами на 150–250 м. Под руслами, реже поймами рек в галечниковом аллювии широко развиты непромерзающие зимой талые породы, гидрогенные талики. Индикаторами развития таликов служат тополево-чозениевые леса, произрастающие вдоль русел водотоков [3]. Развитие таликов контролирует интенсивность теплообмена в системе «атмосфера – водоток – подземные воды – мерзлые породы» [3, 5]. Очевидно, что мощность относительно размеров водотока хорошо проницаемого галечникового аллювия прирусловой полосы в целом и предопределяет уровень теплообмена прирусловых поверхностных и подземных вод. Грунтовые воды таликов переносят тепло к окружающим его многолетнемерзлым породам.

Для долин рек Верхней Колымы характерны процессы техногенеза, т.к. основной отраслью экономики здесь является разработка месторождений различных полезных ископаемых, в т.ч. цветных металлов. При освоении россыпных месторождений золота в долинах и часто в поймах рек образуется контрастный техногенный рельеф (карьеры, отвалы, илоотстойники), связанный с перемещением русел водотоков. В процессе промывки золотоносных песков происходит разделение аллювия на мелкоземистую и крупнообломочные фракции. В результате этого водопроницаемость крупнообломочных возрастает на порядок и более, что не может не изменить режим поверхностных и грунтовых вод [6].

Кроме того, на берегах рек Верхней Колымы в районе населенных пунктов расположены объекты массовой застройки с тепловыделяющими зданиями и коммуникациями, под которыми формируются зоны растепления грунтов в виде чаш протаивания. В дальнейшем между грунтовыми водами природных гидрогенных талых зон и чашами протаивания устанавливается гидравлическая связь с формированием своеобразных мерзлотно-гидрогеологических структур – природно-техногенных таликов, например, в г. Сусуман и п. Ягодное [7].

В связи с глобальными изменениями климата за последние десятилетия во многих районах криолитозоны (север Восточной Сибири, Дальнего Востока, Канады, Аляски) прослеживается изменение гидрологических параметров рек [7–9]. В большинстве случаев водность рек увеличивается [8–16], реже – уменьшается [15, 17]. Кроме водности рек происходит также изменение температуры воды [16, 17], причем чаще всего ее повышение [16, 18]. Для Восточной Сибири и Севера Дальнего Востока выделяется активная фаза изменения климата, приуроченная к началу 80–х гг. прошлого столетия [13, 18].

Долины рек бассейна р. Колыма характеризуются высокой наледностью [1, 19, 20]. При потеплении климата происходит не только изменение температуры воздуха, но устойчивое повышение температуры почвогрунтов [21], в связи с чем активное таяние многолетнего подземного и поверхностного (наледи) льда на водосборах рек может служить источником дополнительной влаги, поступающей в водотоки. О динамике таяния льда на рассматриваемой территории можно судить по бассейну р. Детрин. Здесь площадь наледей уменьшилась с 1300 до 32 км<sup>2</sup>, а гигантская Анмангындинская наледь объемом около 8.5 млн м<sup>3</sup> уменьшилась на 33 % и трансформировалась в сезонную [19, 20].

Для рассматриваемой территории характерна высокая льдистость многолетнемерзлых грунтов за счет большого содержания в них ледяных прослоек, линз и жил [4]. «Срабатывание» так называемых вековых запасов воды в виде льда также может увеличивать водность рек. Так, в период активной фазы потепления впервые было установлено устойчивое снижение температуры и повышение расходов воды в руч. Талок, притоке р. Берелех (район г. Сусуман) [22]. Позже было зафиксировано как повышение, так и снижение водности на крупных реках Северо-Востока России: Сугой, Таскан (притоки р. Колыма), реках Паляваам и Пеймына (Западная Чукотка) [23, 24]. Авторы связывают уменьшение водности рек территории с увеличением потерь влаги на испарение, включая эвапотранспирацию.

Цель исследования заключается в оценке роли основных геоэкологических факторов в изменении теплового стока горных рек криолитозоны Верхней Колымы в период глобальных климатических изменений.

## Материалы и методы

Рассматривались реки с длительным периодом наблюдений и различной площадью водосбора: Бохапча – в 5.4 км выше устья, Кулу – п. Кулу, Детрин – устье р. Омчук, Оротукан – п. Оротукан, Омчук – п. Усть-Омчуг и руч. Ягодный – в 3.4 км выше устья (см. рис.).

Величины стока и температуры воды, описания условий гидрологических постов получены по данным государственного Водного кадастра и из фондовых материалов ФГБУ «Колымагидромет». В соответствии с описаниями выбраны створы гидрологических наблюдений на одно-рукавных, суженных отрезках русел водотоков с устойчивым ложем, что вполне соответствует нормативным требованиям их размещения [25]. Геоэкологические данные, включая мощность галечников в поймах рек в районе пунктов наблюдений, получены из отчетов инженерных изысканий и документов территориальных геологических фондов. Виды, степень нарушения днщ долин установлены по космоснимкам, картам, полевым обследованиям и фондовым источникам. Температура воздуха получена с сайта Мирового центра данных [26].

Расчеты теплового стока за тридцатилетние периоды (1951–80 и 1981–2010 гг.) за VI–IX месяцы проводились по формуле:

$$W_T = c_p \cdot t \cdot \tau W_b,$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость воды (4.17–4.21 КДж /кг);  $t$  – средняя температура воды за 30-летний период (VI–IX мес.), °C;  $\tau$  – плотность воды, кг /м<sup>3</sup>;  $W_b$  – объем стока (м<sup>3</sup>) теплого периода года (VI–IX мес.) за 30-летний период. Изменения величин  $c_p$  и  $\tau$  небольшие и на результаты вычислений теплового стока практически не влияют.

Для оценки изменений параметров водного и термического режима рек и их связи с геоэкологическими условиями, включая относительную мощность прируслового галечникового аллювия, виды и степень техногенных нарушений поймы, а также их сочетаний, использован метод сравнительного анализа.



Схема водотоков и гидрологических постов: 1 – р. Бохапча - в 5,4 км от устья; 2 – р. Кулу - п. Кулу; 3 – Ягодный – 3,4 км от устья; 4 – р. Омчук - п. Усть-Омчуг; 5 – р. Детрин - устье р. Омчук; 6 – р. Оротукан - п. Оротукан; 7 – р. Берелех – г. Сусуман.

Scheme of watercourses and watergates: 1 – Bohapcha River - 5.4 km upper from the mouth; 2 – Kulu River – Kulu village; 3 – Yagodny – 3.4 km upper from the mouth; 4 – Omchuk River – Ust-Omchug village; 5 – Detrin – the mouth of the Omchuk River; 6 – Orotukan – Orotukan village; 7 – Berelakh River – Susuman

## Результаты и их обсуждение

Для выбранных водотоков были рассчитаны средние температуры воды и расходы рек за тридцатилетние периоды (VI–IX мес.) – до и после 1980 г. (табл. 1).

Таблица 1  
Средние тридцатилетние гидрологические характеристики водотоков Верхней Колымы до и после активной фазы потепления

Table 1. Average hydrological parameters of watercourses over 30 years in the Upper Kolyma before and after the active phase of warming

Водотоки	Гидрологические характеристики		
	площадь водосбора, км <sup>2</sup>	средние значения за VI–IX мес.	
		сток, млн м <sup>3</sup>	температура воды, °С
Р. Бохапча	13600	<u>3210</u>	<u>8.9</u>
		44447	9.3
Р. Кулу	10300	<u>2534</u>	<u>8.9</u>
		<u>2678</u>	<u>7.2</u>
Руч. Ягодный	100	<u>17.0</u>	<u>4.3</u>
		17,1	4.2
Р. Детрин	490	<u>904</u>	<u>7.0</u>
		904	8.0
Р. Оротукан	740	<u>236</u>	<u>7.8</u>
		144	9.3
Р. Омчук	583	<u>108</u>	<u>7.3</u>
		86.3	8.0

Примечание. В числителе приведены параметры водотоков до 1980 г., знаменателе – после 1980 г.

мощностью галечникового аллювия. На поймах водотоков с малой мощностью галечника (менее 2.0–2.5 м) грунты в зимний период промерзают, и талики здесь, как правило, не образуются. При большой мощности галечников, 10–12 м и более, создаются более благоприятные условия развития таликов. На основании анализа имеющихся материалов проведена градация относительной мощности хорошо проницаемого галечникового аллювия на поймах рек. Так, большую мощность аллювия имеют реки Кулу, Детрин, Омчук, среднюю – р. Оротукан, руч. Ягодный, малую – р. Бохапча.

Для довольно крупных рек Кулу и Бохапча с площадью водосборов соответственно, 10.3 и 13.6 тыс. км<sup>2</sup> проанализированы связи параметров теплового стока с мерзлотно-гидрогеологическими показателями в поймах водотоков. Они характеризуются существенными различиями в строении. Так, пойма р. Кулу сложена преимущественно галечниковым аллювием сравнительно большой мощности (до 10–12 м), поэтому русло водотока меандрирует в этих отложениях. Вдоль русла реки произрастают тополево-чозениевые леса, которые подтверждают широкое распространение здесь подрусловых и пойменных таликов. Следует отметить, что реки характеризуются одинаковыми средними температурами воды в период до 1980 г.

Очевидно, что потепление климата сопровождается увеличением прихода тепла из атмосферы к речным водам, а также к почвогрунтам водосборов. В связи высокой льдистостью отложений в бассейне р. Кулу и широким распространением наледей в долине реки и ее притоков их таяние увеличивает расходы на 10 % (см. табл. 2). В этом случае одновременно с увеличением водности и прихода тепловой энергии из атмосферы к речным водам происходит возрастание притока энергии к грунтам прирусловой полосы. Одновременно с увеличением поверхностного стока р. Кулу отмечается существенное снижение теплового стока (19 %). Последнее свидетельствует об увеличении затрат тепла на очень энергоемкий процесс таяния льда в многолетнемерзлых грунтах при расширении таликов.

На фоне потепления климата изменения расходов и температуры воды в реках существенно различаются. Приращения этих показателей зависят от местных природных (например, мощности галечникового аллювия) и техногенных факторов, а также их сочетаний. Результаты расчета средних тридцатилетних показателей температуры и расходов воды, теплового стока и их изменений в период активной фазы потепления климата в различных природно-техногенных условиях приведены в табл. 2.

В первом приближении выделяются поймы с малой, средней и большой

Изменения средних 30-летних характеристик водного и теплового стока рек  
Table 2. Changes in the average 30-year parameters of water and heat runoff in rivers during climate warming

Средние характеристик поверхностных вод за период июнь–сентябрь (VI–IX мес.)					Мощность галечника	Нарушенные				
приращение			параметры теплового стока			горными работами	строит.-хоз. деятельностью			
поверхностного стока		температуры	ГДж	приращение						
млн м <sup>3</sup>	%	°С		%	ГДж	%				
р. Бохапча – 5.4 км от устья										
868	18	0.4	4	$\frac{124642}{137656}$	41866	27	М	–	–	
р. Кулу – п. Кулу										
147	10	–1.7	–19	$\frac{90560}{101512}$	–9848	11	Б	–	–	
руч. Ягодный – в 3.4 км от устья										
0.1	1	–0.1	–2	$\frac{306.0}{300.6}$	–5.4	–2	С	–	–	
р. Детрин – устье р. Омчук										
0	0	1	14	$\frac{26486}{30270}$	3784	14	Б	+	+	
р. Оротукан – п. Оротукан										
–91.8	–39	1.5	19	$\frac{7708}{5718}$	–2874	–37	С	+	–	
р. Омчук – п. Усть-Омчуг										
–21.6	–20	0.7	10	$\frac{396}{2890}$	–406	–47	Б	+	+	

Примечание. Тепловой сток, знаменатель – до 1980 г. включительно, числитель – после 1980 г. Относительная мощность галечника: М – малая, С – средняя, Б – большая; виды нарушения долин рек: (+) присутствуют, (–) – отсутствуют.

Расчеты показывают, что величина так называемой потери энергии (9848 ГДж) достаточна для таяния 29526 м<sup>3</sup> льда или 295262 м<sup>3</sup> мерзлого грунта, например, галечника, при 10 % весовой льдистости.

Русло р. Бохапча и его притоков практически повсеместно порожистое, дно и отчасти берега сложены в основном коренными породами и маломощным галечниковым аллювием. Здесь возможно лишь ограниченное развитие подрусловых таликов, совпадающих, как правило, с углублениями русла реки. Поскольку основная часть энергии, поступающей из атмосферы к речным водам, расходуется на увеличение их теплосодержания, основные гидрологические параметры реки повышаются: температура воды – на 4 %, поверхностный сток – на 18 %, а тепловой сток – на 27 % (см. табл. 2). В этой связи несколько заниженная величина приращения тепла в речных водах (41866 ГДж) будет соответствовать в первом приближении энергии, получаемой из атмосферы.

Следовательно, потепление климата вызывает дифференцированный отклик теплового режима рек. Так, в р. Кулу и р. Бохапча средние температуры за тридцатилетние периоды до 1980 г. одинаковые, а после 1980 г. – различаются на 2.1 °С.

Ручей Ягодный характеризуется наименьшей из рассматриваемых водотоков площадью водосбора и средней мощностью галечникового аллювия, поэтому здесь отмечается незначительное снижение температуры и теплового стока на фоне слабого увеличения водности.

В долинах рек Детрин, Оротукан и Омчук интенсивно разрабатываются россыпные месторождения золота с нарушением днищ долин и в первую очередь пойм. Расходы воды

в водотоках с сильно нарушенными горным и строительно-хозяйственным комплексом долинами не увеличиваются, а, как правило, уменьшаются (см. табл. 2). Для этих водотоков после 1980 г. произошло существенное (не менее 0.7 °С) увеличение температуры воды. Наибольшее приращение температуры воды (1.5 °С) и уменьшение стока (39 %) отмечено для р. Оротукан. Пойма реки до начала горных работ характеризовалась средней относительной мощностью галечникового аллювия. В процессе разработки россыпей мощность аллювия на большей части поймы реки уменьшилась из-за создания отвалов и частичного его перемещения от русла водотока к бортам долины.

В днище долин рек Омчук и Детрин залегает сравнительно мощная (до 12 м, местами более) толща галечникового аллювия. В процессе освоения россыпей в этом районе талый аллювий перерабатывался плавучими фабриками, драгами на глубину до 12 м. Бассейн р. Детрин характеризуется высокой наледностью [17, 21, 23]. Воду от таяния наледей можно рассматривать как дополнительный источник пополнения стока. По данным метеостанции Усть-Омчуг в бассейнах этих рек в период потепления увеличилось на 52 мм годовое количество атмосферных осадков, большая часть которых выпадает в августе. Анализ этих данных однозначно свидетельствует об увеличении стока. Однако в р. Омчук средние расходы воды существенно уменьшились, а в р. Детрин – остались без изменений. На примере пунктов наблюдений на реках Детрин и Омчук, расположенных близко друг к другу, можно сделать вывод о снижении измеряемой величины поверхностной составляющей стока и увеличении при этом его подземной части.

На реках с ненарушенными техногенезом долинами изменение климата сопровождается изменением температуры речных вод. Понижение температуры воды связано со значительными затратами тепла на нагревание подземных вод, а также таяние многолетнего льда и нагревание окружающих таликов, грунтов. Существенное ее повышение свидетельствует о низкой интенсивности теплообмена с окружающими русло породами и слабом развитии таликов.

Считаем, что в условиях глобального изменения климата на горных реках криолитозоны, поймы которых сложены хорошо фильтрующими отложениями, процесс расширения гидрогенных таликов может также распространяться на территорию расположения пунктов гидрологических наблюдений. В этом случае не учитывается часть стока, которая стала его подземной составляющей.

### **Заключение и выводы**

Для горных рек криолитозоны на территории Верхней Колымы прослеживается дифференцированный отклик водного и теплового стока на изменение климата в зависимости от местных геоэкологических условий: относительной мощности галечникового аллювия и характера техногенных нарушений пойм, а также их сочетаний.

Для водотоков с ненарушенными техногенезом долинами и большой мощностью галечникового аллювия характерно понижение температуры воды и теплового стока, а с маломощным аллювием, наоборот, имеет место повышение их теплосодержания. В период активной фазы потепления снижение теплового стока рек служит своего рода показателем степени развития таликов и тенденции их расширения, в т.ч. это возможно и в местах расположения постов гидрологических наблюдений.

В результате нарушения пойм водотоков в период активной фазы потепления отмечается повышение температуры воды и существенное изменение, как правило снижение, теплового стока. Выявлено, что потепление климата и расширение таликов сопровождаются снижением поверхностной и увеличением подземной составляющей стока.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках договора № 427 от 22.04.2021. Автор благодарен к.г.н. В.М. Ушакову за помощь в получении исходной гидрометеорологической информации.

**Acknowledgments.** The work was performed under contract No. 427 dated April 22, 2021. The author is grateful to Dr. Ushakov V.M. for assistance in getting initial hydrometeorological information.

### Литература

1. Шило А.Н. Рельеф и геологическое строение // Север Дальнего Востока / под ред. Н.А. Шило. М.: Наука, 1970. С. 21–83.
2. Гольдман В.Г. Перенос тепла надмерзлотными водами и некоторые предпосылки формирования таликов // Гидрогеология СССР. Т. 26. Северо-Восток СССР / под ред. О.Н. Толстихина. М.: Недра, 1972. С. 17. 64–69.
3. Калябин А.И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР // Тр. ВНИИ золота и редких металлов. 1960. Т. 18. 471 с.
4. Ухов Н.В. Криогенные процессы и явления в долинах рек горных районов Северо-Востока России // Естественные и технические науки. 2008. № 6 (38). С. 185–191.
5. Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск: ГЕОС, 2013. 244 с.
6. Глотова Л.П., Глотов В.Е. Трансформация стока малых горных водотоков бассейна р. Колыма при обработке россыпей // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий: Материалы XI сессии СВО ВМО. Т. 3. Четвертичная геология, геоморфология, россыпи. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 125–127.
7. Ухов Н.В., Басистый В.А. Геокриологические исследования в притальниковых зонах речных долин Северо-Востока России при их массовой застройке // Инженерные изыскания. 2013. № 4. С. 58–64.
8. Магрицкий Д.В. Особенности изменений теплового стока рек северо-востока азиатской части России и оценка его величины // Динамика и взаимодействие геосфер Земли: Материалы Всерос. конф. с международным участием: в 3 т. Том 2. Томск: Томский ЦНТИ, 2021. С. 57–60.
9. Burn D.H. Hydrologic effects of climatic change in west-central Canada // Journal of Hydrology. 1994. Vol. 160, N 1/4. P. 53–62.
10. Rawlins M.A., Cai L., Stuefer S.L., Nicolsky D. Changing characteristics of runoff and freshwater export from watersheds draining northern Alaska // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 3337–3352.
11. Прысов Д.А., Мусохранова А.В. Влияние климатических факторов на годовой сток рек криолитозоны Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2016. № 1. С. 39–46.
12. Magritsky D.V., Alexeevsky N.I., Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Gorelkin A. Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta // Polarforschung. 2018. N 87 (2). P. 89–110.
13. Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя // Вестник Московского ун-та. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 62–70.
14. Им С.Т., Харук В.И. Динамика водной массы мерзлотной зоны Средней Сибири по данным гравиметрической съемки спутниками GRACE // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 1. С. 53–69.
15. Ушаков М.В., Лебедева Л.С. Климатические изменения режима формирования притока воды в Колымское водохранилище // Научные Ведомости Бел. ГУ. Естественные науки. 2016. Вып. 37 (246), № 25. С. 120–127.
16. Ухов Н.В. Анализ современной водности горных рек криолитозоны (на примере Верхней Колымы) // Материалы XVI Совещания географов Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2021. С. 188–192.
17. Miller J.R., Russell G.L. The impact of global warming in river runoff // Journal of Geophysical Research. 1992. N 9. P. 2757–2764
18. Ushakov M.V., Ukhov N.V. Modern changes in the Thermal Regime of Mountain Rivers in the Permafrost Zone (A Case Study for the Upper Kolyma) // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. P. 858–863.
19. Атлас гигантских наледей-гарынов Северо-Востока России. Новосибирск: СО РАН, 2021. 302 с.
20. Землянскова А.А., Алексеев В.Р. и др. Многолетняя динамика гигантской Анмангындинской наледи на Северо-Востоке России (1962–2021 гг.) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. Якутск: СВФУ, 2020. С. 381–384.
21. Сточките Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на Крайнем Северо-Востоке России // Географический вестник. 2016. 2 (37). С. 84–96
22. Самохвалов В.Л., Ухов Н.В. Температурные условия в малых водотоках бассейна Верхней Колымы на примере ручья Талок // Глобальные климатические процессы и их влияние на экосистемы арктических и субарктических регионов. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2011. С. 174–175.
23. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 6. С. 33–44.
24. Глотов В.Е., Глотова Л.П. Изменения ресурсов пресных природных вод в горных районах криолитозоны при глобальном потеплении климата (на примере Северо-Востока России) // Известия Самарского НЦ РАН. Т. 13 (39). 2011. № 1 (6). С. 1408–1412.
25. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 384 с.

26. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 13.04.2021).

## References

1. Shilo, A.N. Relief and geological structure. In *North of the Far East*; Nauka: Moscow, USSR, 1970, 21-83. (In Russian)
2. Goldman, V.G. Heat transfer by supra-permafrost waters and some prerequisites for the formation of taliks. In *Hydrogeology of the USSR. Volume XXVI. North-East USSR*; Nedra: Moscow, USSR, 1972, 17, 64-69. (In Russian)
3. Kalyabin, A.I. Permafrost and hydrogeology of the North-East of the USSR. In *Proceedings of the All-Union Research Institute of Gold and Rare Metals*; 1960, vol. XVIII; 471. (In Russian)
4. Ukhov, N.V. Cryogenic processes and phenomena in river valleys of mountainous regions of the North-East of Russia. *Natural and technical sciences*. 2008, 6 (38), 185-191. (In Russian)
5. Mikhailov, V.M. Floodplain taliks of North-East Russia. GEOS Academic Publishing House: Novosibirsk, Russia, 2013; 244 p. (In Russian)
6. Glotova, L.P.; Glotov, V.E. Transformation of the runoff of small mountain streams in the Kolyma River basin during the mining of placers. In *Problems of geology and metallogeny of North-East Asia at the turn of the millennium: proceedings of the 11th session of the North-Eastern Branch of the WMO (Magadan, May 16–18, 2001), V. 3. Quaternary geology, geomorphology, placers*. NECRI FEB RAS: Magadan, 2001, 125–127. (In Russian)
7. Ukhov, N.V.; Basisty, V.A. Geocryological studies in the talik zones of river valleys in the North-East of Russia during their mass development. *Engineering surveys*. 2013, 4, 58-64. (In Russian)
8. Magritsky, D.V. Features of changes in the thermal runoff of rivers in the northeast of the Asiatic part of Russia and assessment of its magnitude. In *Dynamics and interaction of the Earth's geospheres. Proceedings of the All-Russian conference with international participation. In 3 volumes. Volume II*; Tomsk CNTI: Tomsk, Russia, 2021, 57-60. (In Russian)
9. Burn, D.H. Hydrologic effects of climatic change in west-central Canada. *Journal of Hydrology*. V.160, 1/4, 53-62.
10. Rawlins, M.A.; Cai, L.; Stuefer, S.L.; Nicolsky, D. Changing characteristics of runoff and freshwater export from watersheds draining northern Alaska. *The Cryosphere*. 2019, 13, 3337-3352.
11. Prysov, D.A.; Musokhranova, A.V. Influence of climatic factors on the annual runoff of rivers in the permafrost zone of Central Siberia. *Bulletin of KrasGAU*. 2016, 1, 39–46. (In Russian)
12. Magritsky, D.V.; Alexeyevsky, N.I.; Aybulatov, D.N.; Fofonova, V.V.; Gorelkin, A. Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta. *Polarforschung*. 2018, 87(2), 89–110.
13. Yumina, N.M.; Tereshina, M.A. Long-term changes in river flow of the Vilyui basin. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2017, 6, 62–70. (In Russian)
14. Im, S.T.; Kharuk, V.I. Dynamics of the water mass of the permafrost zone of Central Siberia according to gravimetric survey data by GRACE satellites. *Geophysical processes and biosphere*. 2015, V. 14, 1, 53–69. (In Russian)
15. Ushakov, M.V.; Lebedeva, L.S. Climatic changes in the regime of formation of water inflow into the Kolyma Reservoir. *Scientific bulletins of Belgorod State University. Natural Sciences*. 2016, Iss. 37(246), 25, 120–127. (In Russian)
16. Ukhov, N.V. Analysis of modern water content of mountain rivers in the permafrost zone (using the example of Upper Kolyma). In *Proceedings of the XVI Meeting of Geographers of Siberia and the Far East (September 28 – October 1, 2021)*, PGI FEB RAS: Vladivostok, Russia, 2021, 188–192. (In Russian)
17. Miller, J.R.; Russell, G.L. The impact of global warming in river runoff. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 9, 2757–2764
18. Ushakov, M.V.; Ukhov, N.V. Modern changes in the Thermal Regime of Mountain Rivers in the Permafrost Zone (A Case Study for the Upper Kolyma). *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020, 45, 858–863.
19. Atlas of giant auefises of the North-East of Russia. SB RAS: Novosibirsk, Russia, 2021; 302 p. (In Russian)
20. Zemlyanskova, A.A.; Alekseev, V.R. et al. Long-term dynamics of the giant Annangyndin floodplain icing in the North-East of Russia (1962–2021). In *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the XI All-Russian scientific and applied conference*; NEFU: Yakutsk, Russia, 2020, 381–384. (In Russian)
21. Stochkute, Yu.V.; Vasilevskaya, L.N. Long-term changes in air and soil temperature in the extreme northeast of Russia. *Geographical Bulletin*, 2016, 2(37), 84-96 (In Russian)
22. Samokhvalov, V.L.; Ukhov, N.V. Temperature conditions in small watercourses of the Upper Kolyma basin using the example of the Talok stream. In *Global climatic processes and their influence on the ecosystems of the Arctic and subarctic regions. Proceedings of international scientific conference*. Publishing house of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: Apatity, Russia, 2011, 174–175. (In Russian)
23. Glotov, V.E.; Ushakov, M.V. Climatically determined changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka. *Cryosphere of the Earth*. 2020, V. 24, 6, 33–44. (In Russian)

24. Glotov, V.E.; Glotova, L.P. Changes in fresh natural water resources in mountainous areas of the permafrost zone during global climate warming (on the example of the North-East of Russia). *Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011, V. 13(39), 1(6), 1408–1412. (In Russian)

25. Manual for hydro-meteorological stations and posts. Vol. 6. Part I. Hydrological observations and work on large and medium-sized rivers. Gidrometeoizdat: Leningrad, USSR, 1978; 384 p. (In Russian)

26. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center. Available online: <http://meteo.ru/data> (accessed on 13 April 2021). (In Russian)

Статья поступила в редакцию 15.12.2022; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 17.03.2023.

The article was submitted 15.12.2022; approved after reviewing 01.03.2023; accepted for publication 17.03.2023.

