



УДК 556.16

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.82>

Новая методика расчета теплового стока рек при отсутствии данных наблюдений

Д. В. Магрицкий*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Проведено сравнение и анализ ранее разработанных методов и подходов по оценке теплового стока рек, не охваченных стационарными гидрологическими наблюдениями, и предложена новая методика осуществления таких расчетов. В ее основе карты модуля годового теплового стока зональных рек, эмпирические зависимости теплового стока от средней высоты водосбора (для горных территорий) и карта уточняющих коэффициентов. Возможность построения первой карты проиллюстрирована представленной Картой модуля теплового стока рек северо-востока азиатской части России, созданной по данным 112 постов за единый многолетний период. Изложены общие рекомендации по вычислению годового теплового стока не охваченных наблюдениями средних по размеру рек, его внутригодового распределения, по определению теплового стока в устьях больших рек. В качестве примера реализации составленных рекомендаций приведены величины теплового стока, рассчитанные для морских устьев больших рек региона и участков морских побережий между этими устьями. Среди новых материалов, помогающих расчетам, карты среднемесячных температур воды (с мая по октябрь), зависимости температуры воды и теплового стока от средней высоты водосбора, районирование территории северо-востока азиатской части России на 10 высотнотермических зон, зависимости между тепловым стоком и водным стоком, площадью водосбора реки и др. Всего в исследовании использованы данные с 34 метеостанций, показатели температуры воды получены с 231 поста, параметры расхода воды – с 145.

Ключевые слова: река, пост, тепловой сток, методика расчета.

Для цитирования: Магрицкий Д. В. Новая методика расчета теплового стока рек при отсутствии данных наблюдений // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 40. С. 82–104. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.82>

Original article

A New Method for Calculating the Heat Flux of Rivers in the Absence of Gauging-Station Data

D. V. Magritsky*

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the paper, a comparative analysis of previously developed methods for calculating the heat flux of rivers in the absence of gauging-station data are given, and a new method for such calculations is proposed. It is based on the Maps of specific annual heat flux of zonal rivers and empirical dependencies of heat flux on the average height of the catchment area. An example of such a map is the “Map of specific annual heat flux (M_T , $10^9 \times \text{kJ/km}^2$) of rivers in the northeast of the Asian part of

Russia” plotted on the data for the period from 1950/1955 to 2018 and on the basis of data from 112 gauging stations. General recommendations for calculating the annual heat flux of medium-sized rivers that do not have posts, the intra-annual distribution of heat flux, the values of heat flux at the mouths of large rivers are set out in the paper. The values of heat flux calculated for the marine mouths of region large rivers and the sections of seacoasts between these mouths are given as an example of the implementation of the new recommendations. The list of new materials that help calculations includes new maps of average monthly water temperatures (May-October), the dependence of water temperature and heat flux on the average height of the catchment area, the division of the territory of the Northeast Asian part of Russia into 10 altitude-thermal zones, the relationship between heat flux and water runoff, the catchment area of the river and other materials. In total, data from 34 weather stations, 231 posts with water temperatures and 145 posts with water discharges were used in the research.

Keywords: river, post, heat flux, calculation method.

For citation: Magritsky D.V.A New Method for Calculating the Heat Flux of Rivers in the Absence of Gauging-Station Data. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 40, pp. 82-104. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.40.82> (in Russian)

Введение

Речные воды вместе с наносами, растворенными химическими веществами и биологическими субстанциями переносят тепловую энергию (или теплоту), русловой транзит которой образует так называемый тепловой сток реки. Он неотъемлемая часть речного стока в комплексном его понимании [Алексеевский, 2012].

Переносимая реками теплота, ее трансформация по длине реки и в течение года определяют термический режим реки, влияют на ледовые условия, скорость и характер химических процессов, возможности растворения и разрушения химических соединений, самоочищающую способность рек и в целом на гидроэкологическое состояние рек. В районах распространения многолетнемерзлых пород тепловой сток – важный фактор переформирования речных русел и берегов, ускоряющий термоэрозию [Fluvial thermal erosion ... , 2003]. Именно для холодных районов страны роль теплового стока многократно возрастает. Накопленное большими реками и переносимое далеко на север тепло оказывает свое воздействие на климат арктических и приарктических территорий, гидрологические и экологические условия прибрежной зоны арктических морей [Increasing riverine heat ... , 2020]. А это районы промыслового вылова рыбы, действующего Северного морского пути с постоянно растущим грузооборотом и расширением навигационного сезона, активно развивающейся добычи углеводородов на шельфах Баренцева, Карского и Лаптевых морей. Наглядным и известным примером отепляющего влияния больших северных рек служит смещение границы распространения лесов в сторону высоких широт по речным долинам.

Первые оценки количества тепловой энергии, выносимой северными реками России в арктические моря, были получены еще в 1914 г. В. Б. Шостаковичем [Шостакович, 1914], несмотря на весьма скудные гидрологические данные. В СССР к рассмотрению теплового стока приступили в 1930–1940-х гг., во время активного освоения Арктики, расширения здесь гидрометеорологической сети и изучения вопроса влияния тепловой энергии, пе-

реносимой большими реками, на температурные и ледовые условия как самих рек, так и арктических морей [Антонов, 1936; Зайков, 1936; Зотин, 1947; Коровкин, 1940, 1941; Материалы по гидрологии ... , 1937].

Новым и важным этапом в раскрытии факторов и особенностей изменчивости теплового стока, расчете его числовых характеристик стала подготовка и издание в 1960–1970-х гг. монографической части справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР», не имевшего аналогов в мире. К этому моменту количество постов в стране и объем данных наблюдений за температурами и расходами воды существенно увеличились. Предварительно были разработаны и опубликованы в 1961 г. методические рекомендации по расчетам и структуре описания в «Ресурсах поверхностных вод СССР» основных элементов гидрологического режима рек, среди которых были рекомендации по подготовке разделов «Термический и ледовый режим рек» с указаниями по расчетам и анализу теплового стока рек. С 1960-х по 1980-е гг. появляется несколько важных публикаций, где рассмотрены вопросы влияния водохранилищ и межбассейновой переброски стока больших северных рек на ледово-термический режим их низовьев, устьев и прибрежной зоны морей, приводятся уточненные оценки выноса реками в арктические моря России тепловой энергии, предлагаются разные методы расчета теплового стока рек, не охваченных стационарными гидрологическими наблюдениями, освещается ряд других вопросов [Антонов, 1976; Ёлшин, 1981, 1988; Иванов, Никифоров 1976; Иванов, Куржунов, 1980; Куржунов, 1984; Назаренко, Сахарова, 1982; Никифоров, Морецкий, Шпайхер, 1980; Одрова, 1984, 1987; Орлова, 1984; Советская Арктика, 1970].

Дополненные (по новым постам и за последние годы) данные наблюдений, значительные климатические изменения и реакция на них водных объектов, новые гидротехнические объекты, вопросы экономического и экологически безопасного развития Российской Арктики и другие задачи потребовали актуализации гидрологических данных, включая данные по тепловому состоянию и стоку северных рек страны. Правда, это произошло уже в XXI в. силами как отечественных, так и зарубежных специалистов [Геоэкологическое состояние арктического ... , 2007; Космаков, 2001; Магрицкий, 2009; 2015; Georgiadi, Kashutina, Milyukova, 2018; Lammers, Pundsack, Shiklomanov, 2007; Long-term open water ... , 2005; Liu, Yang, 2011; Features and evaluations ... , 2018; Increasing riverine heat ... , 2017; Yang, Ye, Kane, 2004; Yang, Liu, Ye, 2005; Arctic River Water ... , 2020; Global river temperatures ... , 2011; Warming water in ... , 2007]. И опять же, за некоторым исключением, основной акцент в изучении был сделан на тепловом стоке главных северных рек, на их замыкающих створах, тогда как остальные реки и территории, особенно не имеющие постов, так и остались «в тени». Мало того, в теории расчетов теплового стока нового почти ничего не появилось.

В 2021 г. автором в рамках грантов РФФИ № 18-05-60021 и РНФ № 21-17-00181 (для бассейна Лены) было выполнено комплексное исследование термического состояния и теплового стока рек северо-востока азиатской части России (АЧР), их пространственно-временной изменчивости. Данный

регион (в рассматриваемом исследовании) включает полностью Чукотский АО, северные улусы Республики Саха (Якутия) и районы Магаданской обл., относится к водосборам морей Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Охотского и Берингова. Регион находится полностью в зоне вечной мерзлоты, отличается суровым климатом и дефицитом тепла, сложным строением рельефа, обилием многочисленных рек – от самых малых до таких крупнейших, как Лена [Национальный атлас России, 2007; Ресурсы поверхностных вод ... , 1969, 1972]. Здесь много наледей, встречаются горные ледники.

Материалы и методы исследования

Исходными данными были электронные массивы гидрометеорологической информации (за весь период наблюдений и вплоть до 2018 г.): по среднемесячной температуре воздуха на 34 метеостанциях, взятые с сайта ВНИИГМИ-МЦД [Всероссийский научно-исследовательский ... , 2022], по среднедекадным и среднемесячным температурам воды на 231 посту и расходам воды на 145 постах из гидрологических ежегодников (по 2010–2012 гг.) и с сайта АИС ГМВО [Автоматизированная информационная система ... , 2022] за 2008–2018 гг.

110 из рассмотренных постов, откуда поступали данные о температуре воды, расположены на средних (или зональных) реках, 41 пост на малых реках ($F < 1000 \text{ км}^2$). Посты охватывают как равнинную часть, так и горные территории региона. Вообще, массовые измерения температуры воды в регионе начались в 1940–1970-е гг., максимальное количество постов пришлось на 1950-е гг. В 1980-е гг. количество закрытых постов превысило число открытых, но кульминация закрытия пришлась на 1990-е гг. В настоящее время лишь 125 постов являются реально действующими. Температура воды на постах измеряется два раза в сутки (в 8.00 и 20.00) в течение теплого сезона года погружным родниковым ртутным термометром на глубине 0,3–0,5 м недалеко от берега. На части постов до 1950-х гг. измерения проводились один раз в сутки [Ресурсы поверхностных вод ... , 1969, 1972; Соколова 1951]. Другая проблема данных – их неполная репрезентативность по отношению к средней температуре воды в потоке [Гидрологические условия ... , 2022; Соколова, 1951; Features and evaluations ... , 2018]. Третья проблема – пропуски в многолетних рядах данных, а также позднее начало (в 1960-х или в 1970-х гг.) наблюдений и их завершение на многих постах в 1990-х гг. Восстановление отсутствующих значений и удлинение рядов (в пределах выбранного единого периода – 1955–2012/2018 гг.) производилось методом одномерной и иногда множественной регрессии по данным постов-аналогов, а также по температурам воздуха на ближайших репрезентативных метеостанциях.

Хотя в проведенном исследовании использованы надежные данные только 145 стоковых постов, всего постов, где осуществлялось измерение расходов воды (Q), в регионе было 262. Из них 36, 55, 41, 75 и 56 постов имеют 1–2, 3–10, 11–20, 21–50 и более 50 лет наблюдений соответственно. Посты с короткими рядами были оставлены только для районов с очень малой плотностью мониторинговой сети. 73 поста имеют площадь водосбора

меньше 500 км². 32, 111, 15 и 31 пост имеет водосбор 501–1000, 1001–25 000, 25 001–50 000 и более 50 000 км² соответственно. Отсутствующие Q восстанавливались по расходам воды постов-аналогов, эмпирическая связь с которыми характеризовалась коэффициентами корреляции (R) больше 0,7–0,8.

Еще одним важным источником информации стала многослойная ГИС (на весь регион) и определенные с ее помощью границы, геометрический центр и морфологические параметры речных водосборов. Часть этих параметров была взята из справочника «Основные гидрологические характеристики» (тома 17 и 19).

Тепловой сток (с декадной и месячной дискретностью) рассчитывался по формуле

$$W_T = c_p \rho t W, \quad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость воды (4,174–4,212 кДж/(кг·°C) при t от 0 до 30 °C), ρ – плотность воды (1000 кг/м³), t – средняя за декаду или месяц температура воды (°C), W – объем стока воды (м³) за декаду или месяц. Тепловой сток за год получается суммированием декадных или месячных величин за период формирования и переноса теплоты. Он включает дни с $t \geq 0,2$ °C. Причем, как показывают результаты сравнения величин годового теплового стока, полученные на основе месячных и декадных расходов и температур воды, между ними, во-первых, есть различия, которые можно охарактеризовать коэффициентами $K_{d/m} = W_T(\text{дек.})/W_T(\text{мес.})$, или попросту переходными коэффициентами. В среднем $K_{d/m}$ варьирует от 0,90 до 1,05, что довольно много. Во-вторых, обнаружена определенная географическая закономерность в распределении $K_{d/m}$ по территории, которую иллюстрируют данные по рекам севера Якутии (рис. 1): $K_{d/m} < 1$ к северу от бассейна р. Вилюй; $K_{d/m} > 1$ у рек в бассейне р. Вилюй, а также на приморских равнинах Яно-Колымского района и восточнее; $K_{d/m} \sim 1$ в верховьях и среднем течении рек Яны и Индигирки. Эти различия необходимо учитывать при расчете величин годового теплового стока, так как, безусловно, большая точность достигается при использовании декадных температур и расходов воды. Но чаще расчеты выполняют по месячным величинам (основной случай), существенно сокращая тем самым затраты на сбор данных и сами вычислительные операции! Выход – пересчитывать их, используя коэффициенты $K_{d/m}$.

Для приведения рядов W_T к единому многолетнему периоду были рассмотрены связи теплового стока с температурами воды и Q и сделан вывод о доминирующем влиянии именно стока воды на тепловой сток. Теснота связей $W_T = f(Q)$ характеризуется коэффициентами корреляции R от 0,8 до 0,95, возрастая у рек в бассейнах Яны и Индигирки, в верховьях Колымы, т. е. с переходным (между тьянь-шаньским и восточносибирским) типом водного режима, а также в нижней части бассейна р. Вилюй. Тогда как между тепловым стоком и температурой воды R не превышает 0,3–0,4. Однако хорошо фиксируемое климатическое потепление и прогрессирующий нагрев речных вод в регионе [Магрицкий, 2015, 2021] усиливают влияние температурного фактора на формирование теплового стока и уже сказываются на характере

связей $W_T = f(Q)$, «смещая» их вверх. Пока эти изменения незначимы и не затронули большинства гидропостов, по которым имеются ряды соответствующей продолжительности, охватывающие как современный, так и предыдущий периоды. Поэтому данный факт позволяет использовать зависимости $W_T = f(Q)$, построенные по всем наблюдениям. Формирование единичных новых связей $W_T = f(Q)$ обнаружено в районах заметного увеличения температур воды на ряде притоков среднего и нижнего участков Вилюя (реках Ичода, Ахтаранда, Ыгыатта, Тангнары и др.), на некоторых реках Янского, Эльгинского и Оймяконского плоскогорий, в верхней и средней частях бассейнов Яны и Индигирки, на ряде рек гористых верховьев Колымы и северного побережья Охотского моря. Для рек Моркока и Чилии (бассейн р. Вилюй), Чаркы (бассейн р. Адыча) установлено «смещение» зависимости $W_T = f(Q)$ вниз. Нарушение прежнего характера связи $W_T = f(Q)$ также присуще постам, расположенным ниже крупных водохранилищ, таких как Вилюйское и Колымское [Геоэкологическое состояние ... , 2007; Магрицкий, 2009, 2015], а также на замыкающем створе и в дельте Лены [Магрицкий, 2015; Features and evaluations ... , 2018].

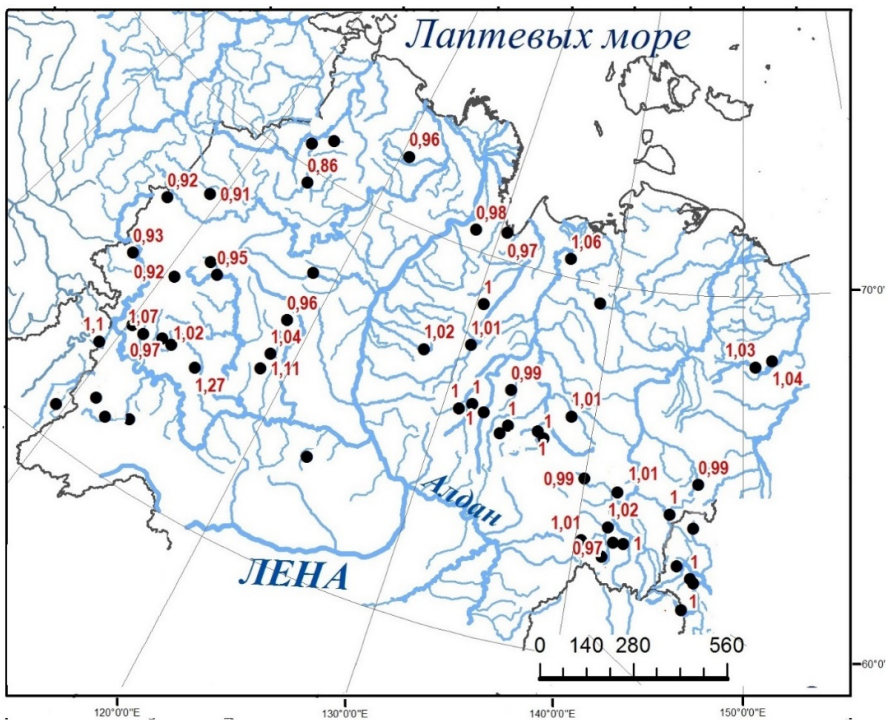


Рис. 1. Фрагмент карты пространственной изменчивости переходных коэффициентов ($K_{d/m}$) от величин теплового стока за год, полученных по месячным расходам и температурам воды, к годовому тепловому стоку, рассчитанному по декадным расходам и температурам. $K_{d/m}$ отнесены к центрам водосборов рек, замыкаемых гидропостами

На основе собранных, проверенных и дополненных данных по средне-месячной и среднедекадной температуре и расходам воды, рассчитанному на их основе тепловому стоку были построены 6 карт среднемесячных температур воды рек северо-востока АЧР (по данным постов с зональными величинами площади водосбора и за 1955–2012 гг., данные относились к створу постов), Карта модуля годового теплового стока ($10^9 \times \text{кДж/км}^2$) (по 112 постам на средних реках), отвечающая условиям периода 1950/1955–2018 гг.; эмпирические зависимости температуры воды, водного и теплового стока от средней высоты водосбора для предгорных и горных районов (при этом предварительно было выполнено разделение региона на однородные гидрологические и высотно-термические зоны); зависимости между годовым тепловым стоком, с одной стороны, и стоком воды, площадью водосбора – с другой. Все они могут служить инструментами для расчета теплового стока для рек и районов, где посты отсутствуют.

Особый интерес из перечисленного, конечно, представляет первая в своем роде Карта модуля годового теплового стока ($10^9 \times \text{кДж/км}^2$) (рис. 2).

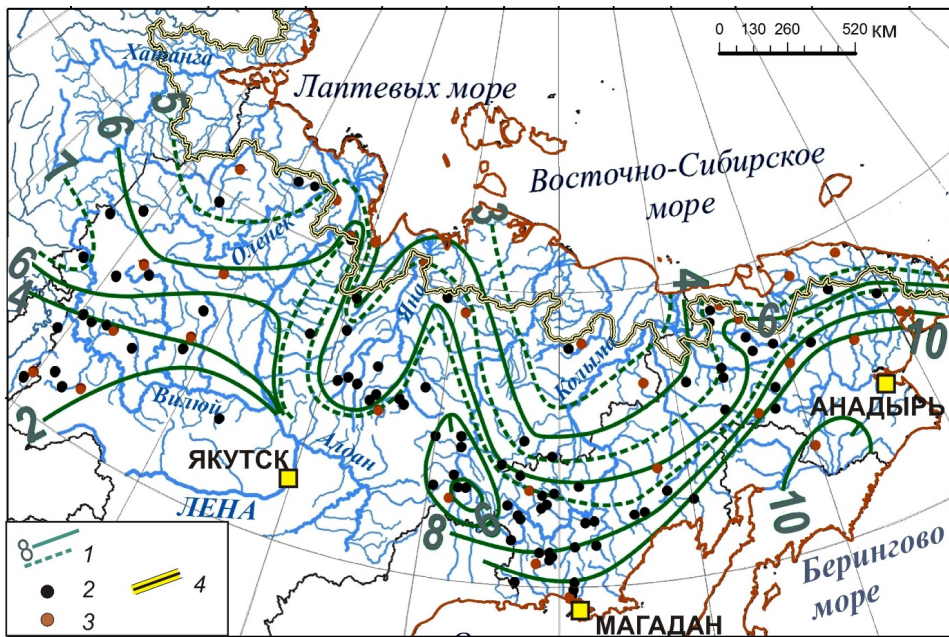


Рис. 2. Карта модуля годового теплового стока ($10^9 \times \text{кДж/км}^2$) зональных рек северо-востока АЧР. 1 – линии равных модулей теплового стока, 2, 3 – центры водосборов охваченных наблюдениями рек; коричневым цветом отмечены центры водосборов рек с очень непродолжительными на них гидрологическими наблюдениями, 4 – сухопутные границы территории, не охваченной в прошлом стационарными наблюдениями за расходами и температурой воды рек

При создании этой карты многолетние ряды ежегодных величин W_T были приведены к единому периоду. Для расчета ежегодных величин W_T привлекались месячные расходы и температуры воды. Вычислялись среднемноголетние модули годового теплового стока M_T как отношение годового теплового стока к площади водосбора. Они относились к центрам водосборов, замыкаемых стоковыми постами. Это решение объясняется тем, что, как уже ранее отмечено, существенно большее влияние на тепловой сток оказывает именно водный сток и его размер. Изолинии модуля теплового стока проводились методом линейной интерполяции и с учетом рельефа, влияние которого в гористых районах хорошо идентифицируется посредством связи $W_T = f(H_{cp})$, где H_{cp} – средняя высота водосбора над уровнем моря. Такие эмпирические связи тоже получены впервые.

Результаты исследований и их обсуждение

История вопроса. Для решения задачи оценки теплового стока неизученных рек или «доведения» теплового стока от замыкающего створа до устьев створа большой реки ранее уже предлагалось несколько подходов, в том числе с участием автора. Первые из них были разработаны в 1970–1980-е гг. из-за необходимости оценить влияние межбассейнового перераспределения стока больших североевропейских и западносибирских рек на ледово-термический режим их устьев и прибрежной зоны морей.

Первый хорошо проработанный подход подробно разобран в работе В. В. Иванова и А. Н. Куржунова (ААНИИ) [1980] на примере решения задачи определения среднемноголетнего теплового стока, поступающего в Обско-Тазовскую губу с разных участков ее побережья. Водно-балансовыми и стандартными гидрологическими расчетами оценивалась средняя многолетняя величина водного стока рек на не охваченной гидрометрической сетью территории, включая участки водосборов больших рек (Оби, Пура, Таза и Надыма) ниже их замыкающего створа (ЗС). Далее, исходя из предполагаемого (по рекам-аналогам) внутригодового распределения стока воды, годовая норма стока «разносилась» по месяцам теплого сезона года и сопоставлялась со среднемесячными температурами воды, определенными также по рекам-аналогам. Это позволяло рассчитать месячные и годовую величины теплового стока. Для главных рек полученные для не охваченных мониторингом участков водосбора величины теплового стока суммировались с величиной W_T в ЗС, чтобы получить тепловой сток в устье или на морском крае дельты, т. е. на выходе реки в губу.

Это наиболее понятный, относительно простой в исполнении подход. Но он имеет два важных недостатка. Первый связан с тем, что стандартными методами статистических и гидрологических расчетов мы получаем для неизученных рек и территорий среднемноголетние месячные расходы и температуры воды, а не за каждый год. По ним рассчитываемая за год величина теплового стока, по оценкам автора, на несколько процентов больше W_T , рассчитанной по ежегодным данным (табл. 1). И какой-то связи с длиной периода, размером и положением реки не видно.

Таблица 1

Сравнение величин теплового стока, рассчитанного по ежегодным и осредненным за многолетний период расходам и температуре воды

Река – пост	Период осреднения	Тепловой сток, $10^{12} \times \text{кДж/км}^2$		Разность, %
		по данным за каждый год	по осредненным данным	
Анабар – Саскылаах	1954–2018 гг.	354	369	4,2
Мал. Куонамка – Джалинда	1943–2018 гг.	97,2	105	8,0
Оленек – 7,5 км ниже устья р. Буур	1964–2017 гг.	1000	1040	4,0
Буур – Пур	1980–2017 гг.	67,8	72,2	6,5
Лена – Кюсюр	1936–2011 гг.	15900	15940	0,25
Омолрой – Намы	1979–1992 гг.	33,3	33,6	0,90
Яна – Джангкы	1938–1988 гг.	1180	1205	2,1
Индибирка – Воронцово	1939–1995 гг.	2100	2120	0,95
Колыма – Среднеколымск	1934–2018 гг.	2795	2860	2,3
Паляваам – 0,8 км	1971–1996 гг.	34,9	35,2	0,90

Второй, более серьезный недостаток связан с расчетом W_T ниже замыкающего створа и на выходе в море. Для рек, текущих с юга на север, характерны продольное увеличение стока воды и снижение (с определенного участка) температуры воды. Первое обусловлено боковой приточностью на участке «ЗС – вершина дельты (ВД), или устьевой створ», второе – закономерным уменьшением в северном направлении радиационного баланса и температуры воздуха. В результате действительная интенсивность продольного увеличения W_T может быть меньше расчетной, а с определенного участка W_T может даже снижаться, о чем свидетельствуют результаты расчетов в [Куржунов, 1984; Магрицкий, 2009; Features and evaluations ... , 2018]. Особенно это имеет значение для меридиональных рек, замыкающие створы на которых сильно удалены от устья, и вдольрусловая трансформация W_T определяется не столько боковой приточностью (ввиду ее малых величин), сколько заметным снижением температуры воды.

Второй подход, как раз не имеющий второго недостатка, был реализован в более поздней работе А. Н. Куржунова [1984] для устьевой участка Енисея ниже ЗС. Продольное изменение W_T ниже по течению от поста Игарка (ЗС) было получено на основе рассчитанных для постов Усть-Порт (вершина дельты) и Сопочная Карга (Енисейский залив) среднемесячных Q и реально измеряемой на этих постах температуры воды. Результаты расчетов наглядно показали, что сток теплоты Енисея уменьшается от Игарки по направлению к дельте на 10–15 %, а к Енисейскому заливу – почти в 2 раза. Это происходит, несмотря на существенное увеличение водного стока, которое в годовом измерении оценено автором этой статьи в $45 \text{ км}^3/\text{год}$ (1936–2015 гг.), или 7,7 % величины водного стока на посту Игарка. Результаты расчетов величин теплового стока на ЗС, в ВД и на выходе рек в моря, полученные автором в ходе настоящего исследования, доказали этот тезис. Например, тепловой сток рек Оленек, Яна и Индибирка на участке «замыкающий створ – море» способен уменьшаться на 25, 10 и 8,5 % соответственно.

Но это верно, если данные постов ниже по течению от ЗС и вблизи от моря репрезентативны.

Третий подход реализован в работах Ю. А. Ёлшина [1981, 1988]. Им предложено находить средний многолетний тепловой сток рек по формуле

$$W_T = 0,20qF, \quad (2)$$

где q – средний многолетний модуль годового стока воды, л/(с·км²), F – площадь водосбора, км², 0,20 – коэффициент теплового стока, единый для большинства рек, за рядом исключений, которых в действительности немало и которые требуют введения в эту формулу корректирующих коэффициентов, в том числе на $H_{\text{ср}}$. Коэффициент был определен Ю. А. Ёлшиным по данным с 1380 пунктов. Для рек водосборов морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского он больше 0,20 – соответственно 0,23, 0,32 и 0,21 (в среднем). Это позволило Ю. А. Ёлшину впервые обоснованно оценить приток теплоты во все моря Российской Арктики, дифференцировать его по отдельным участкам арктического побережья и по месяцам года, оценить числовые характеристики годового стока теплоты и рассмотреть их кривые обеспеченностей.

Четвертый подход представляет собой набор региональных зависимостей вида $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$. Он предложен автором в ранних работах [Геоэкологическое состояние ... , 2007; Магрицкий, 2009] для арктических и приарктических территорий России. Зависимости имеют линейный характер и довольно тесную связь ($R > 0,98$), поскольку, как уже ранее отмечено, в формировании теплового стока рек главную роль играет водный сток. Устойчивая и тесная связь, существующая между W_T и размерами водосбора реки, вытекает из физически понятной зависимости $W = f(F)$. Эмпирические зависимости $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$ были использованы автором при оценке выноса реками теплоты с межбассейновых водосборных территорий и бокового притока в главные арктические реки ниже их ЗС. Были рассчитаны (по состоянию на начало 2000-х гг.) величины суммарного годового теплового стока в моря Российской Арктики в [Магрицкий, 2009]. На рис. 3 для рек северо-востока АЧР приведены обновленные зависимости $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$ с учетом новых данных и добавленных постов. Как оказалось, единая зависимость $W_T = f(W)$ может применяться для больших и крупнейших рек Российской Арктики. Она приведена в [Геоэкологическое состояние арктического ... , 2007].

Главный недостаток этого подхода – в использовании для построения зависимостей $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$ данных постов, как правило, расположенных существенно южнее тех территорий, для которых требовалось оценить W_T с целью расчета выноса тепловой энергии в моря средними и малыми реками. Чем севернее (относительно постов) расположен рассматриваемый район, тем более завышенной получится по этим зависимостям величина теплового стока. Второй недостаток – пока незнание четких границ районов, в пределах которых эти зависимости следует применять.

Важно заметить, что все перечисленные отечественные подходы вида готовых рекомендаций так и не получили.

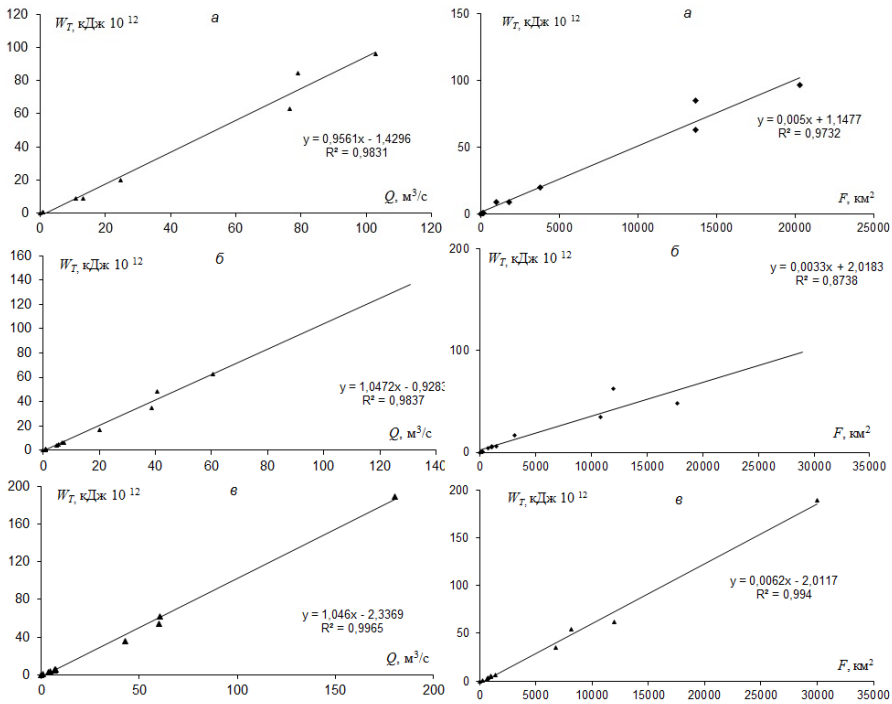


Рис. 3. Региональные зависимости суммарного за год стока теплоты (W_T) средних по размеру рек от средних многолетних среднегодовых расходов воды (левая колонка) и от площади водосбора (правая колонка). Районы: а – реки западного сектора побережья моря Лаптевых (между Хатангой и Омолоем), б – реки между Омолоем и Колымой, в – реки к востоку от Колымы

Пятый подход предложен в работе [Lammers, Pundsack, Shiklomanov, 2007]. Ее авторы определили суммарный тепловой сток с территории России в арктические моря двумя способами: 1) простой экстраполяцией осредненного по территории потока тепловой энергии ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на весь водосбор этих морей, 2) с поправками на широту к температуре воды в реках на не охваченных наблюдениями территориях.

В настоящей работе предлагается *шестой подход* для расчета теплового стока рек на не охваченных гидрометрической сетью территориях северо-востока АЧР, который вполне пригоден для применения на других территориях.

Новая методика расчета теплового стока неизученных рек и рекомендации по проведению таких расчетов. Она совершенно новая, ранее никем не применявшаяся и даже не предлагавшаяся. Методика близка к стандартным методам расчета водного стока, подробно изложенным еще в СНиП 2.01.14-83 (на смену ему пришел СП 33.101.2003), и разработанным под СНиП 2.01.14-83 картам и региональным зависимостям. Карта модуля годового теплового стока ($10^9 \times \text{kJ}/\text{km}^2$) позволяет при знании площади и центра водосбора рассчитать годовой тепловой сток для любого гидроствора и вынос теплоты в моря (см. рис. 2). Для предгорных и горных территорий автор предлагает использовать зависимости вида $W_T = f(H_{\text{ср}})$, пример которых приведен на рис. 4.

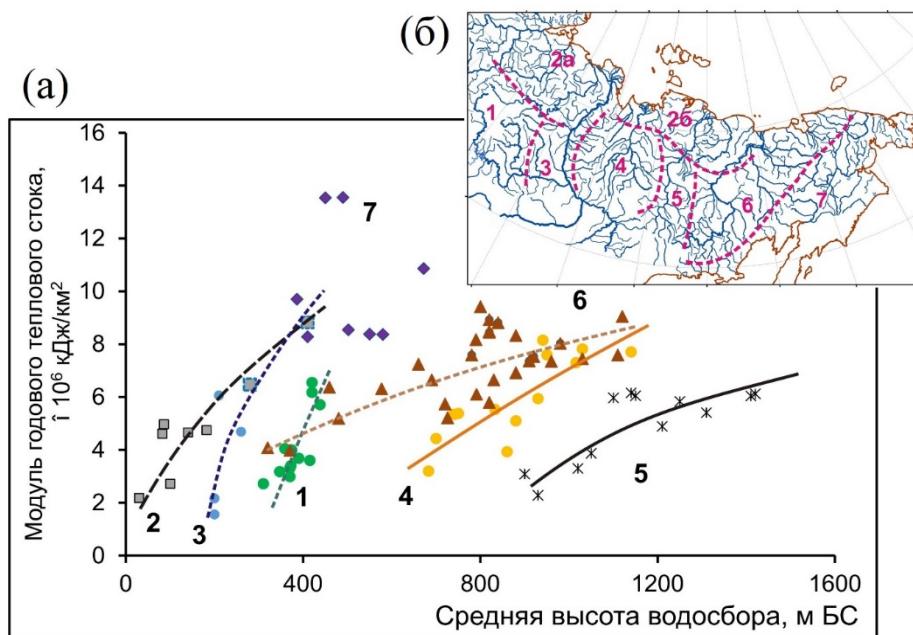


Рис. 4. Зависимости между модулями годового теплового стока и средней высотой водосбора для рек в разных гидротермически однородных районах (а) и карта приблизительных границ этих районов (б)

Вместе с другими инструментами, ранее созданными, эта карта и зависимости $W_T = f(H_{cp})$ легли в основу Рекомендаций по расчету теплового стока для не охваченных сетью наблюдений рек и территорий. В чем их суть?

Во-первых, предлагается оценивать величину годового теплового стока неизученных рек несколькими методами. Первый метод, довольно простой и приблизительный, – по серии региональных зависимостей вида $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$, актуализированных автором в 2021 г. (см. рис. 3). Его недостатки изложены выше. Метод 2 – определение годовой величины W_T как суммы месячных величин – более точный. Он предложен в [Иванов, Куржунов, 1980]. Месячные величины W_T рассчитываются по средним месячным расходам и температурам воды. Расходы воды определяются стандартными методами, изложенными в СП 33-101-2003. Температуры воды автором рекомендуется узнавать несколькими способами: 1) по данным постов на реках-аналогах, 2) по картам среднемесячных температур воды (пример такой карты для рек северо-востока АЧР и средней июльской температуры приведен на рис. 5, а), 3) в горных районах – по зависимостям $t = f(H_{cp})$, которые автором также обоснованы после предварительного разделения региона на 10 высотно-термических зон (рис. 5, б), 4) по данным метеонаблюдений за температурой воздуха с использованием региональных переходных коэффициентов – от среднемесячной температуры воздуха к температуре воды. При этом следует помнить, что этим методом мы получаем несколько завышенные величины годового теплового стока – в среднем на 5 % (см. табл. 1).

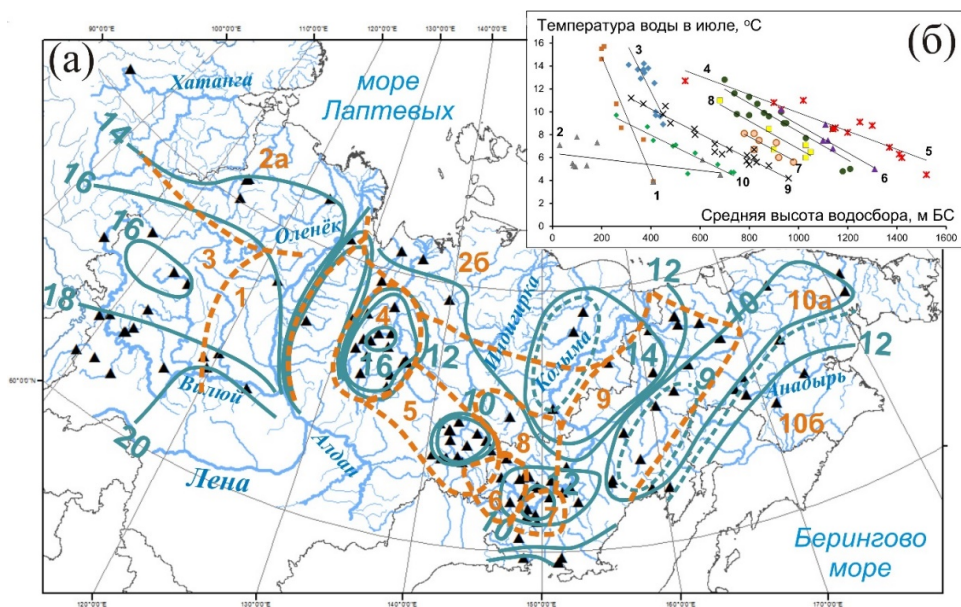


Рис. 5. Распределение средней июльской температуры воды по территории (а) и ее изменение со средней высотой водосбора (б) в реках северо-востока АЧР. Карта (а) построена по данным за период с 1955 по 2012 г.; треугольниками обозначено местоположение гидропостов; оранжевыми пунктирными линиями и цифрами – границы и условные номера высотно-термических зон и подрайонов. Нумерация линий на диаграмме (б) соответствуют нумерации высотно-термических зон на карте (а)

Метод 3, как основной, подразумевает использование Карты модуля годового теплового стока ($10^9 \times \text{кДж/км}^2$) (см. рис. 2) и эмпирических зависимостей теплового стока от средней высоты водосбора (см. рис. 4). Но более уверенные результаты, как полагает автор, дает реализация нескольких независимых методов. При этом следует помнить, что каждый последующий год или период необходима проверка адекватности применяемых инструментов на независимом и новом материале, в том числе из-за быстро меняющихся климатических условий.

Во-вторых, поскольку вышеописанные инструменты создавались на основе среднемесячных расходов и температур воды (из-за их доступности), для повышения точности определяемого годового теплового стока необходимо осуществить переход к величине годового теплового стока W_T (дек.), отвечающего расчетам по декадным значениям. Для этого предлагаются региональные обобщения пересчетных коэффициентов $K_{d/m} = W_T(\text{дек.})/W_T(\text{мес.})$ в виде карт. Одна из подобных карт приведена на рис. 1.

В-третьих, внутригодовое распределение теплового стока (по месяцам теплого сезона года) можно получить либо методом, изложенным в [Иванов, Куржунов, 1980], либо используя данные рек-аналогов или обобщенные (для однородных районов по режиму теплового стока) схемы относительного (%) внутригодового распределения W_T , которые еще следует подготовить.

В-четвертых, расчет W_T больших рек, текущих на север, на участках ниже замыкающего створа (самого нижнего стокового поста) и в устье можно выполнить двумя способами. Первый – это суммирование W_T на замыкающем створе и W_T притоков, впадающих ниже по течению:

$$W_T(\text{устье}) = W_T(\text{ЗС}) + \Sigma W_T(\text{ЗС} - \text{ВД}) + \Sigma W_T(\text{МВД}), \quad (3)$$

где $W_T(\text{ЗС})$ – величина теплового стока на замыкающем створе, рассчитанная по гидрометрическим данным, $\Sigma W_T(\text{ЗС} - \text{ВД})$ – тепловой сток, выносимый притоками в главную реку на участке ЗС – ВД, $\Sigma W_T(\text{МВД})$ – тепловой сток, поступающий в пограничные рукава с местного водосбора дельты. W_T притоков оценивается или по данным постов, или (если постов нет) вышеописанными методами. Этот метод не совсем точен, и, по сути, мы получаем приближенное представление о верхней границе искомой величины W_T . Второй способ, более надежный, предполагает расчет W_T в искомом створе по средним месячным расходам, рассчитанным по СП 33-101-2003, и температурам воды, реально измеренным на самом нижнем уровне поста. Пример его первой реализации содержится в работе [Куржунов, 1984]. Автором он реализован для нескольких больших рек рассматриваемого региона (табл. 2). Правда, он годится, если устьевой участок реки не замыкает большая и многоруканная дельта.

Таблица 2

Годовой тепловой сток главных рек северо-востока АЧР и в моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское, приведенный к периоду 1936–2017/2018 гг.

Реки и межбассейновые водосборные территории (МБВТ)	Тепловой сток, $10^{12} \times \text{кДж}$			Доля от суммарного стока в море, %
	на замыкающем створе ¹ (ЗС)	в вершине дельты ³ (ВД)	в море ³	
Море Лаптевых				
Восточное побережье п-ва Таймыр	–	–	159/179	0,7
Водосбор Хатангского залива (без р. Хатанги)	–	–	186/206	0,8
Хатанга	2120 ² (Хатанга)	–	2540/2540	11,5
Водосбор Анабарской губы (без р. Анабар)	–	–	93/102	0,4
Анабар	342 ² (Саскылаах)	–	434/444/375	2,0
Анабаро-Оленекский участок	–	–	26/30	0,1
Оленек	906 ² (7,5 км)	1005/1010/680	–	4,5
Лена ⁵	16590 ⁴ (Кюсюр)	15600-16000 ⁴	11750 ⁴	72,2
Лено-Омолыйский участок	–	–	74/80	0,3
Омолый	34,3 ² (Намы)	–	153/130/207	0,7
Омолый-Янский участок	–	–	13,5/14	0,1
Яна	1290 ² (Юбилейная)	1290 ²	1310/-/1160	5,8
От р. Яны до границы с водосбором Восточно-Сибирского моря	–	–	192/155	0,9
Всего в море			22185/-/17430	100/-/79

Окончание табл. 2

Реки и межбассейновые водосборные территории (МБВТ)	Тепловой сток, $10^{12} \times \text{кДж}$			Доля от суммарного стока в море, %
	на замыкающем створе ¹ (ЗС)	в вершине дельты ³ (ВД)	в море ³	
Восточно-Сибирское море				
От границы с водосбором моря Лаптевых до р. Индигирки	–	–	160/180	2,0
Индигирка	2240 ² (Воронцово)	2290/2300/2230	2380/-/2050	29,9
Индигирско-Алазейский участок	–	–	27/35	0,3
Алазея	59,5 ² (Андрюшкино)	–	158/182/130	2,0
Алазея-Колымский участок	–	–	137/165	1,7
<u>Колыма</u>	3975 ² (Колымское-1)	4570/–	4590/-	57,6
Колымо-Паляваамский участок	–	–	250/290	3,1
Паляваам	35,7 ² (0,8 км ниже устья Кооквын)	–	49/51	0,6
От р. Паляваам до границы с водосбором Чукотского моря	–	–	225/285	2,8
Всего в море			7975	100
Чукотское море				
От границы с водосбором Восточно-Сибирского моря до р. Амгуэмы	–	–	65/79	11,5
Амгуэма	219 ² (174-й км)	–	228/228	40,5
От р. Амгуэмы до Берингова пролива	–	–	270/304	48,0
Всего в море			563	100
моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское				
ВСЕГО (без островов)			30 720	

Примечания: ¹рассчитаны по декадным значениям, ²по приведенным к многолетнему периоду рядам, ³первое значение – сумма величин теплового стока на ЗС и поступающего с водами притоков на участке ниже ЗС (получено по карте с пересечением по $K_{d(m)}$), второе значение – сумма величин теплового стока на ЗС и поступающего с водами притоков на участке ниже ЗС (получено по региональным зависимостям с пересечением по $K_{d(m)}$), третье значение (если оно есть) – по приведенным к вершине дельты / устьевому створу расходам воды и по средним месячным температурам воды на самом нижнем гидрологическом посту, ⁴с учетом результатов, изложенных в [Features and evaluations ... , 2018].

В-пятых, расчет W_T малых рек, находящихся под сильным влиянием местных факторов, требует пересчета величин теплового стока, вычисленных вышеприведенными способами, для средних (зональных) рек посредством использования соответствующих коэффициентов. Их получение – важная методическая задача, которая, вероятно, в будущем будет успешно решена.

Реализация новых рекомендаций по расчету теплового стока неизученных рек для оценки стока теплоты в устья больших рек региона и арктические моря

Собранные данные и разработанные инструменты расчета теплового стока для территорий и рек, не охваченных гидрометрической сетью, позволили оценить величины теплового стока, поступающего в устья главных рек региона и арктические моря, в том числе с их межбассейновых водосборных территорий (см. табл. 2). На рис. 2 обозначены границы территории, занимающей все арктическое побережье и более южные районы, которые не были охвачены в прошлом стационарными наблюдениями за расходами и температурой воды рек. Новые оценки следует считать более обоснованными и точными по сравнению с приводимыми в [Геоэкологическое состояние арктического ... , 2007; Ёлшин, 1981, 1988; Магрицкий, 2009; Советская Арктика ... , 1970], поскольку применялся весь возможный инструментарий, доказавший свою эффективность, а также новые данные вплоть до 2017/2018 гг. по максимально возможному числу постов.

Согласно полученным результатам, можно заключить следующее.

Основной вынос теплоты в арктические моря осуществляют именно большие реки. Для моря Лаптевых их доля достигает 96 % (доля р. Лены – 72,2 %), Восточно-Сибирского моря – почти 90 %.

Большие реки, впадающие в арктические моря Российской Федерации, обычно имеют меридиональное (северное) направление и переносят огромное количество теплоты, накопленной в более южных частях их водосборов. Однако судить о ее величине по данным ЗС неверно, особенно если ЗС расположен далеко от моря или устьевой участок включает большую и много рукавную дельту. В этом случае доминирующим процессом продольной трансформации теплового стока ниже ЗС является не его увеличение благодаря боковой приточности, а, наоборот, отсутствие значимых изменений или даже снижение W_T (при условии слабого нарастания водного стока) из-за сильного метео- и мерзлотного охлаждения речных вод, особенно при их рассредоточении по мелким и протяженным русловым и дельтовым водотокам с еще сохранившимися навалами льда. Например, тепловой сток Оленька может уменьшаться на участке «ЗС – море» на 25 %, огромной Лены – на 29 % [Features and evaluations ... , 2018], Яны – на 10 %, Индигирки – на 8,5 %. Для Колымы оценки не получены из-за нерепрезентативности температурных наблюдений на посту Черский [Гидрологические условия в ... , 2022].

Оценки поступления W_T в арктические моря, полученные путем суммирования W_T на ЗС главных рек и W_T притоков, впадающих ниже ЗС, следует рассматривать как «верхнюю границу». В действительности приток теплоты в арктические моря России с речными водами объективно меньше. Например, для моря Лаптевых эта разница не меньше 20 %. Но несмотря на то что тепловой энергии с речными водами поступает в арктические моря меньше, чем принято думать, и до сих пор нет надежных связей между многолетними колебаниями теплового стока главных рек региона и ледовыми условиями арктических морей [Алексеевский, Магрицкий, Айбулатов, 2016], новые ре-

зультаты показывают значительную роль теплового стока арктических рек, в первую очередь впадающих с территории Российской Федерации, в динамике ледяного покрова этих морей, в потеплении воздуха в регионе и морских вод [Increasing riverine heat ... , 2020].

Заключение

Термический режим и тепловой сток арктических рек России, особенности их многолетних и пространственных изменений, связь с факторами по-прежнему изучены явно недостаточно, несмотря на важную (и пока до конца не оцененную) роль тепловой энергии, аккумулированной и переносимой речными водами, в ледово-термических и термоэрозионных процессах, на неопровержимое влияние теплоты на гидроэкологическое состояние рек и околоречные экосистемы, местный и региональный климат, тепловой баланс и ледовитость прибрежной зоны арктических морей. Ограничивают исследования малая плотность постов на севере страны, их значительное сокращение начиная с 1990-х гг., отсутствие открытых баз гидрологических данных, особенно по температуре и расходам воды, качество самих данных и продолжительность наблюдений. Кроме того, ввиду недостаточного интереса к тепловому стоку рек до недавнего времени, т. е. до масштабных гидроклиматических изменений в Арктике и приполярных регионах, до сих пор нет единой методики корректного расчета теплового стока для рек и территорий, не имеющих постов. А это значительная часть материковой и, конечно, островной части Российской Арктики и районов к югу от нее. Этим данным не хватает для более серьезных исследований, посвященных анализу современных и прогнозируемых гидроклиматических изменений в Арктике и установлению их главных причин.

Решением одной из названных проблем могли бы стать новая методика расчета теплового стока рек для условий отсутствия данных стационарных гидрологических наблюдений и базовые рекомендации по проведению таких расчетов, разработанные с учетом как ранее предлагавшихся и неплохо себя показавших методов расчета теплового стока (их недостатки и точность уже известны), так и совершенно новой методики. Возможности последней показаны на примере рек северо-востока азиатской части России, охватывающей северные районы Республики Саха (Якутия), Чукотский АО и север Магаданской области. Здесь термическое состояние рек определяется прежде всего климатическими условиями, высотным положением водосборов и русел рек, повсеместно распространенными многолетнемерзлыми породами, наледями, в горах – ледниками, разгрузкой подземных вод, направлением течения и размерами рек и др.

Главным инструментарием предлагаемой методики служат первые в своем роде Карта модуля годового теплового стока средних (зональных) рек северо-востока АЧР, эмпирические зависимости модуля годового теплового стока от средней высоты водосбора (для горных территорий) и Карта коэффициентов для пересчета величин теплового стока, рассчитанного по месячным значениям, в тепловой сток, соответствующий расчетам по среднеде-

кадным температурам и расходам воды. Чтобы их построить, были использованы данные с 34 метеостанций, 231 поста (данные температуры воды) и 145 постов (данные о расходах воды). Данные прошли полноценную проверку с восстановлением пропусков и удлинением рядов (до единого многолетнего периода с 1950/1955 г. и до 2018 г.). Одновременно построены карты среднемесячных температур воды, отвечающие условиям периода 1955–2012 гг., произведено районирование региона с выделением 10 высотно-термических районов и обоснованием для каждого из районов зависимости температуры от средней высоты водосбора. Построены эмпирические зависимости между температурами воды и воздуха, тепловым стоком и водным стоком, температурой воды, площадью водосбора, показана ведущая роль водного стока в формировании и изменениях теплового стока.

Успешным примером реализации разработанной методики стала оценка стока теплоты, выносимого большими реками малоизученного региона в их устья и всеми реками в моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское, причем с крупномасштабной дифференциацией по участкам арктического побережья. Вынос теплоты реками в эти моря оценен соответственно в 22 185, 7975 и 563 10^{12} кДж. Это его максимально возможные среднемноголетние величины. Основной вынос теплоты осуществляют большие реки: в море Лаптевых их доля 96 % (на Лену приходится 72,2 %), Восточно-Сибирское море – ~90 %. Доказана неоднозначность (и порой ошибочность) использования данных только по замыкающим створам больших рек меридионального направления при оценке теплового стока в их устьях либо посредством суммирования величины теплового стока на замыкающем створе с тепловым стоком притоков, впадающих ниже по течению.

Развитие новой методики может быть связано с более достоверными данными по стоку и температурам воды на межбассейновых водосборных территориях арктических морей, практически лишенных постов, путем построения современных карт модуля водного стока и температур воды, раскрытия закономерностей изменения характера связей между температурами воздуха и воды с продвижением на север и т. п., а также построения Карты модуля годового теплового стока рек для других участков Российской Арктики и приарктических территорий.

Важно отметить, что подобные карты можно составлять для каждого года и таким образом рассчитывать годовые величины теплового стока, формировать многолетние ряды, например выноса теплоты в моря с разных участков, которые необходимы при гидротермодинамическом моделировании морских и береговых процессов.

Список литературы

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 26.01.2022)

Алексеевский Н. И. Речной сток; географическая роль и индикационные свойства // Вопросы географии. 2012. № 133. С. 48–71.

Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Айбулатов Д. Н. Особенности и оценки пространственно-временной изменчивости речного стока в многоорукавной дельте р. Лены // Меняю-

щийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики : сб. М. : Лига-Вент, 2016. Т. 2. С. 65–95.

Антонов В. С. Великие сибирские реки // Серия «Науки о Земле». 1976. № 10. 44 с.

Антонов Н. Д. Количество тепла, вносимое реками в Карское море // Труды ААНИИ. 1936. Т. 35. С. 23–50.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 26.01.2022)

Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н. И. Алексеевского. М. : ГЕОС, 2007. 585 с.

Гидрологические условия в устье р. Колымы летом 2019 г. / Д. В. Магрицкий, Н. Л. Фролова, С. А. Агафонова, В. А. Ефимов, А. Н. Василенко, А. А. Сазонов, Л. Е. Ефимова // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2022. № 1. С. 134–151.

Ёлишин Ю. А. Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 63–68.

Ёлишин Ю. А. Тепловой сток рек европейской территории СССР // Метеорология и гидрология. 1981. № 9. С. 85–93.

Зайков Б. Д. Речной сток в море Лаптевых и Восточно-Сибирское и количество переносимого им в эти моря тепла // Труды Арктического института. 1936. Т. 35. С. 51–84.

Зотин М. И. Жидкий и тепловой сток в море Лаптевых // Труды Арктического НИИ. 1947. Т. 198. 63 с.

Иванов В. В., Никифоров Е. Г. Пути оценки возможных изменений гидрологического режима Карского моря под влиянием межбассейновой переброски стока рек // Труды ААНИИ. 1976. Т. 314. С. 176–182

Иванов В. В., Куржунов А. Н. Тепловой сток рек в Обско-Тазовскую губу // Труды ААНИИ. 1980. Т. 358. С. 102–110.

Коровкин И. П. Материалы по гидрологии реки Хатанги // Северный морской путь. 1940. Т. 16. С. 79–98.

Коровкин И. П. О термическом режиме и влиянии теплового стока сибирских рек на ледовитость морей // Проблемы Арктики. 1941. № 1. С. 23–29.

Космаков И. В. Термический и ледовый режим в верхних и нижних бьефах высоконапорных гидроэлектростанций на Енисее. Красноярск : Кларетрианум, 2001. 144 с.

Куржунов А. Н. Тепловой сток Енисея в устьевой области // Труды ААНИИ. 1984. Т. 394. С. 66–74.

Магрицкий Д. В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2015. № 6. С. 85–95.

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 междунар. участием. Томск : Изд-во Том. ЦНТИ, 2021. Т. 2. С. 57–60.

Магрицкий Д. В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Серия География. 2009. № 5. С. 69–77.

Материалы по гидрологии реки Анабар // Труды Арктического института. 1937. Т. 106. 53 с.

Назаренко С. Н., Сахарова Н. Б. Изменение ледотермического режима р. Вилюй в нижнем бьефе Вилюйской ГЭС I–II // Гидротехническое строительство. 1982. № 8. С. 23–26.

Национальный атлас России. Природа, экология. М. : Роскартография, 2007. Т. 2. 496 с.

Никифоров Е. Г., Морещкий В. Н., Шнайхер А. О. Изменчивость гидрологического режима Северного Ледовитого океана и проблемы, возникающие в связи с переброской стока рек его бассейна // Проблемы Арктики и Антарктики. 1980. № 55. С. 67–78.

Одрова Т. В. Изменение режима рек Енисея и Ангары в результате зарегулирования стока // Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях Крайнего Севера. Якутск, 1987. С. 84–95.

Одрова Т. В. Условия формирования теплового стока рек Сибири // Динамика и термика рек и водохранилищ, М., 1984. С. 239–246.

Орлова Г. А. Изменение термического режима Енисея и Оби ниже водохранилищ Красноярской и Новосибирской ГЭС // Пути преобразования речного стока на юге Сибири. Новосибирск, 1984. С. 23–39.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Лено-Инди́гирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 17. 652 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. Т. 19. 280 с.

Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана. М.: Наука, 1970. С. 155–156.

Соколова Е. М. Термический режим рек СССР / Тр. ГГИ. 1951. Вып. 30 (84). 74 с.

Шостакович В. Температура рек Сибири и количество переносимого ими в Северный Ледовитый океана тепла // Записки по гидрографии. 1914. Вып. XXXIII. С.123–152.

Arctic River Water Temperatures and Thermal Regimes / D. Yang, H. Park, A. Peterson, B. Liu // Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. Switzerland: Springer Nature, 2020. P. 287–314.

Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta / D. V. Magritsky, N. I. Alexeevsky, D. N. Aybulatov, V. V. Fofonova, A. Gorelkin // Polarforschung. 2018. Iss. 87 (2). P. 89–110.

Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia) / F. Costard, L. Dupeyrat, E. Gautier, E. Carey-Gailhardis // Earth Surf. Process. Landforms. 2003. Iss. 28. P. 1349–1359.

Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. Iss. 87 (2). P. 167–176.

Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow / M. T. van Vliet, H. F. Ludwig, J. J. G. Zwolsman, G. P. Weedon, P. Kabat // Water Resources Research. 2011. Vol. 47, Iss. 2. <https://doi.org/10.1029/2010WR009198>

Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming / H. Park, E. Watanabe, Yo. Kim, I. Polyakov, K. Oshima, X. Zhang, J. Kimball, D. Yang // Science Advances. 2020. Vol. 6, Iss. 45. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc4699>

Lammers R., Pundsack J., Shiklomanov A. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. G04S59. P. 1–15.

Liu B., Yang D. Siberia Lena River heat flow regime and change // IAHS Publ. 2011. Vol. 346. P. 71–76.

Long-term open water season stream temperature variations and changes over Lena river basin in Siberia / B. Liu, D. Yang, B. Ye, S. Berezovskaya // Global Planet Change. 2005. Vol. 48(1–3). P. 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.12.007>

Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change / H. Park, Y. Yoshikawa, D. Yang, K. Oshima // Journal of Hydrometeorology. 2017. 18(7). P.1983–1995. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0260.1>

Yang D., Liu B., Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32, N 5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021568>

Yang D., Ye B., Kane D.L. Stream-flow changes over Siberian Yenisei River Basin // Journal of Hydrology. 2004. Vol. 296. P. 59–80.

References

Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'yektov [Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO)]. Available at: <https://gmvo.skniivh.ru/> (date of access: 26.01.2022) (in Russian)

Alekseevskii N.I. Rechnoi stok; geograficheskaya rol i indikatsionnye svoystva [River flow; geographical role and indicative properties]. *Voprosy geografii* [Questions of Geography], 2012, no.13, pp. 48–71 (in Russian)

Alekseevskij N.I., Magrickij D.V., Ajbulatov D.N. Osobennosti i ocenki prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti rechnogo stoka v mnogorukavnoj delte r. Leny [Features and estimates of the spatial-temporal variability of river flow in the multi-arm delta of the Lena River]. *Menyayush-*

chijsya klimat i socialno-ekonomicheskij potencial Rossijskoj Arktiki [Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic]. Vol. 2. Moscow, Liga-Vent Publ., 2016, pp. 65-95. (in Russian)

Antonov N.D. Kolichestvo tepla, vnosimoe rekami v Karskoe more [The amount of heat transferred by rivers into the Kara Sea]. *Trudy AANII* [Proceedings of AARI]. 1936, vol. 35, pp. 23-50 (in Russian)

Antonov V. S. Velikie sibirskie reki [Great Siberian rivers]. *Seriya "Nauki o Zemle"* [Series "Earth Sciences"]. 1976, no.10, 44 p. (in Russian)

Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii– Mirovoy tsentr dannykh (VNIIGMI-MTSD) [All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (VNIIGMI-WDC)]. Available at: <http://meteo.ru/> (date of access: 26.01.2022) (in Russian)

Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost prirodopolzovaniya [Geocological state of the Arctic coast of Russia and safety of environmental management]. Moscow, GEOS Publ., 2007, 585 p. (in Russian)

Elshin Yu.A. Teplovoi stok rek evropeiskoi territorii SSSR [Heat flux of rivers of the European territory of the USSR]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 1981, no. 9, pp. 85-93 (in Russian)

Elshin Yu. A. Teplovoi stok v morya Severnogo Ledovitogo okeana [Heat flux in the Arctic Ocean seas]. *Vodnye resursy* [Water resources]. 1988, no. 5, pp. 63-68 (in Russian)

Zaikov B.D. Rechnoi stok v more Laptevykh i Vostochno-Sibirskoe i kolichestvo perenosimogo im v eti morya tepla [River runoff in the Laptev and East Siberian Seas and the amount of heat transferred by them to these seas]. *Trudy Arkticheskogo instituta* [Proceedings of AARI], 1936, vol. 35, pp. 51-84 (in Russian)

Zotin M.I. Zhidkii i teplovoi stok v more Laptevykh [Water runoff and heat flux into the Laptev Sea]. *Trudy Arkticheskogo instituta* [Proceedings of AARI], 1947, vol. 198, pp. 63 (in Russian)

Ivanov V.V., Nikiforov EG. Puti otsenki vozmozhnykh izmenenii gidrologicheskogo rezhima Karskogo morya pod vliyaniem mezhbasseinovoi perebroski stoka rek [Ways to assess possible changes in the hydrological regime of the Kara Sea under the influence of the inter-basin transfer of river flow]. *Trudy AANII* [Proceedings of AARI], 1976, vol. 314, pp.176-182 (in Russian)

Ivanov V.V., Kurzunov A.N. Teplovoi stok rek v Obsko-Tazovskuyu gubu. [Heat flux of rivers in the Ob-Taz]. *Trudy AANII* [Proceedings of AARI], 1980, vol. 358, pp. 102-110 (in Russian)

Korovkin I. P. Materialy po gidrologii reki Khatangi [Materials on the hydrology of the Khatanga River]. *Severnii morskoi put* [Northern Sea Route], 1940, vol. 16 (in Russian)

Korovkin I.P. O termicheskom rezhime i vliyanii teplovogo stoka sibirskikh rek na ledovitost morei [the thermal regime and the influence of heat flux of Siberian rivers on ice coverage of seas]. *Problemy Arktiki* [Problems of the Arctic], 1941, no. 1, pp. 23-29 (in Russian)

Kosmakov I.V. *Termicheskii i ledovyy rezhim v verkhnikh i nizhnikh b'efakh vysokonapornykh gidroelektrostantsii na Enisee* [Thermal and ice regime in the upper and lower reaches of high-pressure hydroelectric power plants on the Yenisei]. Krasnoyarsk, Klaretianum Publ., 2001, 144 p. (in Russian)

Kurzunov A.N. Teplovoi stok Eniseya v ust'evoi oblasti [Heat flux of the Yenisei in the estuary region]. *Trudy AANII* [Proceedings of AARI], 1984, vol. 394, pp. 66-74 (in Russian)

Magritskii D.V. Faktory i zakonornosti mnogoletnikh izmenenii stoka vody, vzveshennykh nanosov i teploty Nizhnei Leny i Vilyuya [Factors and trends of the long-term fluctuations of water, sediment and heat runoff in the lower reaches of the Lena River and the Vilyui River]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow State University. Series 5, Geography], 2015, no. 6, pp. 85-95 (in Russian)

Magritskii D.V. Osobennosti izmenenii teplovogo stoka rek Severo-vostoka aziatskoi chasti Rossii i otsenka ego velichiny [Features of changes in the heat flux of rivers in the North-East of the Asian part of Russia and an assessment of its value]. *Dinamika i vzaimodeistvie geosfer Zemli. Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the All-Russian Conference with international participation "Dynamics and interaction of the Earth's geospheres"], 2021, vol. 2, pp. 57-60 (in Russian)

Magritskii D.V. Teplovoi stok rek v morya Rossiiskoi Arktiki i ego izmeneniya [Heat flux of rivers into the seas of the Russian Arctic and its changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow State University. Series 5. Geography], 2009, vol. 5, pp. 69-77 (in Russian)

Magritskii D.V., Frolova N.L., Agafonova S.A., Efimov V.A., Vasilenko A.N., Sazonov A.A., Efimova L.E. Gidrologicheskie usloviya v ust'e r. Kolymy letom 2019 g. [Hydrological conditions at the mouth of the Kolyma River in the summer of 2019]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow State University. Series 5, Geography], 2022, no. 1, pp. 134-151 (in Russian)

Kashcheev M.A., Kolgushkin V.V., Reshetov V.N., Istomin M.P., Chernyakhovskiy F.G., Shalaev V.A., Schreibe B.E. Materialy po gidrologii reki Anabar [Materials on the hydrology of the Anabar River]. *Trudy AANII* [Proceedings of AARI], 1937, vol. 106, pp. 1-53 (in Russian)

Nazarenko S.N., Sakharova N.B. Izmenenie ledotermicheskogo rezhima r.Vilyui v nizhnem b'efe Vilyuiskoi GES I-II [Changing the ice-thermal regime of the Vilyuy River in the lower reaches of the Vilyuiskaya HPP I-II]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction], 1982, no. 8, pp. 23-26 (in Russian)

Natsionalnyi atlas Rossii. T. 2. Priroda, ekologiya [National Atlas of Russia. Vol. 2. Environment, ecology]. Moscow, Roskartografiya Publ., 2007, 496 p. (in Russian)

Nikiforov E.G., Moretskii V.N., Shpaikher A.O. Izmenchivost' gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana i problemy, voznikayushchie v svyazi s perebroskoi stoka rek ego basseina [Variability of the hydrological regime of the Arctic Ocean and problems arising in connection with the transfer of river flow in its basin]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic], 1980, no. 55, pp. 67-78 (in Russian)

Odrova T.V. Izmenenie rezhima rek Eniseya i Angary v rezultate zaregulirovaniya stoka [Changing the regime of the Yenisei and Angara rivers as a result of flow regulation]. *Vliyanie GES na okruzhayushchuyu sredu v usloviyakh Krainego Severa* [The impact of hydroelectric power plants on the environment in the Far North]. Yakutsk, Academy of Sciences of the USSR, 1987, pp. 84-95 (in Russian)

Odrova T.V. Usloviya formirovaniya teplovogo stoka rek Sibiri [Conditions for the formation of the flux of Siberian rivers]. *Dinamika i termika rek i vodokhranilishch* [Dynamics and thermics of rivers and reservoirs]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1984, pp. 239-246 (in Russian)

Orlova G.A. Izmenenie termicheskogo rezhima Eniseya i Obi nizhe vodokhranilishch Krasnoyarskoi i Novosibirskoi GES [Changes in the thermal regime of the Yenisei and the Ob below the reservoirs of the Krasnoyarsk and Novosibirsk hydroelectric power plants]. *Puti preobrazovaniya rechnogo stoka na yuge Sibiri* [Ways to transform river flow in the south of Siberia]. Novosibirsk, Academy of Sciences of the USSR, 1984, pp. 23-39 (in Russian)

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 17. Leno-Indigirskii raion [Surface water resources of the USSR. Vol. 17. Lena-Indigirka area]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 652 p. (in Russian)

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 19. Severo-Vostok [Surface water resources of the USSR. Vol. 19. North-East]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 280 p. (in Russian)

Sovetskaya Arktika. Morya i ostrova Severnogo Ledovitogo okeana [Soviet Arctic. Seas and islands of the Arctic Ocean]. Moscow, Nauka Publ., 1970 (in Russian)

Sokolova E.M. Termicheskii rezhim rek SSSR [Thermal regime of the rivers of the USSR]. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta* [Proceedings of the State Hydrological Institute]. 1951, no. 30(84), 74 p. (in Russian)

Shostakovich V. Temperatura rek Sibiri i kolichestvo perenosimogo imi v Severnyi Ledovitoy okeana tepla [Temperature of Siberian rivers and the amount of heat transferred by them to the Arctic Ocean]. *Zapiski po gidrografii* [Proceedings on hydrography], 1914, vol. 33, pp. 123-152 (in Russian)

Yang D., Park H., Peterson A., Liu B. *Arctic River Water Temperatures and Thermal Regimes in Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Switzerland, Springer Nature, 2020, pp. 287-314.

Magritskiy D.V., Alexeevskiy 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, iss. 87 (2), pp. 89-110.

Costard F., Dupeyrat L., Gautier E., Carey-Gailhardis E. Fluvial thermal erosion investigations along a rapidly eroding river bank: Application to the Lena River (Central Siberia). *Earth Surf. Process. Landforms*, 2003, iss. 28, pp. 1349–1359.

Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers. *Polarforschung*, 2018, iss. 87 (2), pp. 167-176.

van Vliet M. T., Ludwig H. F., Zwolsman J. J. G., Weedon G. P., Kabat P. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. *Water Resources Research*, 2011, vol. 47, iss. 2. doi: 10.1029/2010WR009198

Park H., Watanabe E., Kim Yo., Polyakov I., Oshima K., Zhang X., Kimball J., Yang D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming. *Science Advances*, 2020, vol. 6, iss. 45. doi: 10.1126/sciadv.abc4699

Lammers R., Pundsack J., Shiklomanov A. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *Journal of Geophysical Research*, 2007, vol. 112, G04S59, pp. 1-15.

Liu B., Yang D. Siberia Lena River heat flow regime and change. *IAHS Publ.*, 2011, vol. 346, pp. 71-76.

Liu B., Yang D., Ye B., Berezovskaya S. Long-term open water season stream temperature variations and changes over Lena river basin in Siberia. *Global Planet Change*, 2005, vol. 48(1–3), pp. 96-111. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.12.007>

Park H., Yoshikawa Y., Yang D., Oshima K. Warming water in Arctic terrestrial rivers under climate change. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(7), pp.1983-1995. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0260.1>

Yang D., Liu B., Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia. *Geophysical Research Letters*, 2005. vol. 32, no. 5. doi: 10.1029/2004GL021568

Yang D., Ye B., Kane D.L. Stream-flow changes over Siberian Yenisei River Basin. *Journal of Hydrology*, 2004, vol. 296, pp. 59-80.

Сведения об авторе

Магрицкий Дмитрий Владимирович
кандидат географических наук, доцент,
кафедра гидрологии суши
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы,
ГСП-1
e-mail: magdima@yandex.ru

Information about the author

Magritskiy Dmitry Vladimirovich
Candidate of Geographical Sciences,
Associate Professor, Department of Hydrology
Lomonosov Moscow State University
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991,
Russian Federation
e-mail: magdima@yandex.ru

Коды научных специальностей: 1.6.16

Статья поступила в редакцию 07.02.2022; одобрена после рецензирования 10.03.2022; принята к публикации 07.06.2022.
The article was submitted **February, 7, 2022**; approved after reviewing **March, 10, 2022**; accepted for publication **June, 7, 2022**