

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА

**А.Н. Василенко, Д.В. Магрицкий, Н.А. Фролова**

E-mail: saiiia24@mail.ru

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова», Москва, Россия*

**АННОТАЦИЯ:** Рассмотрены тенденции изменения термического режима рек Арктической зоны Российской Федерации. На основании данных о среднемесячных температурах воды с 1960 по 2012 гг. на 90 гидрологических постах произведены расчеты среднегодовой температуры воды по общепринятой методике за период с мая по сентябрь и по предлагаемой методике расчета за весь период с положительными температурами воды.

Показано, что вычисление среднегодовой температуры только по среднемесячным температурам (с мая по октябрь) занижает среднегодовую температуру воды. В работе оценены изменения среднегодовой температуры воды, определенной по обеим методикам за период 1991–2012 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. Данные периоды охватывают время интенсивных изменений климата, а также период после строительства крупнейших ГЭС. Проведен статистический анализ полученных рядов на наличие трендов (по критерию ранговой корреляции Спирмена) и нарушений однородности рядов (U-тест Манна–Уитни). Показано постепенное увеличение среднегодовой температуры воды на большинстве рек российской Арктики. Наибольшие изменения отмечаются на территории Якутии и Кольском полуострове.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** термический режим рек, температура воды, изменения климата, гидрологический режим, Арктическая зона России.

Под термическим режимом рек, как правило, понимается либо режим температуры воды, либо режим теплового стока реки, либо вся совокупность происходящих в реках тепловых процессов. В данной работе рассмотрен режим температур воды и его изменения в связи с изменениями климата.

Температура воды является важной гидроэкологической характеристикой, прямо или косвенно влияющей на ряд гидрологических и экологических процессов. В частности, от температуры воды зависит интенсивность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований – проект № 18-05-60021-Арктика

© Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.А., 2020

испарения с поверхности рек. Прогрев воды обуславливает величину прогрева грунтов русла и величину коэффициентов динамической и кинематической вязкости, регулирующих, в т. ч., интенсивность русловой эрозии. Формируемый реками тепловой сток частично влияет на тепловой режим прибрежной зоны морей. От температуры воды зависит содержание в ней растворенного кислорода, а, следовательно, интенсивность процессов самоочищения рек, выживаемость и видовой состав различных гидробионтов [1], в т. ч. ценных пород рыб.

В России к тематике данных исследований обращались В.Б. Шостакович и Г.Ю. Верещагин. В 1930-е годы в связи с освоением Северного морского пути Всесоюзным Арктическим институтом (ныне – ААНИИ) проводились активные исследования арктических рек для прогнозирования ледовой обстановки и влияния речного стока на гидрологический режим морей Северного Ледовитого океана. Однако термическому режиму в опубликованных результатах исследований уделялось сравнительно мало внимания. В 1951 г. опубликована монография «Термический режим рек СССР» [2], в предисловии к которой отмечено следующее: «...в области изучения термического режима сделано еще очень мало. И это понятно, т. к. в первую очередь разрабатывались вопросы, наиболее важные в практике гидротехнического строительства – режим стока, ледовый режим и др.». В конце 1950-х годов проводились расширенные наблюдения для определения репрезентативности данных измерений у берегов, на части гидрологических постов – в середине потока. Однако не было произведено смещения сроков наблюдений, хотя, соответствующие рекомендации обоснованы Е.М. Соколовой ранее [2].

В 1960–1980-е годы проведены статистические и географические обобщения данных о температуре воды рек СССР в изданиях справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР». Необходимо отметить, что в изданиях, посвященных арктическим рекам, зачастую анализ термического режима сводился к обобщению информации о средних температурах воды мая, июля и сентября. Тепловой сток же не рассчитывался, картографические материалы в области температур воды разрознены и не согласуются между собой. В это же время был выполнен ряд обобщений масштаба областей и республик, ряд статистических обобщений произведен для рек мира в рамках Международного гидрологического десятилетия 1965–1974 гг.

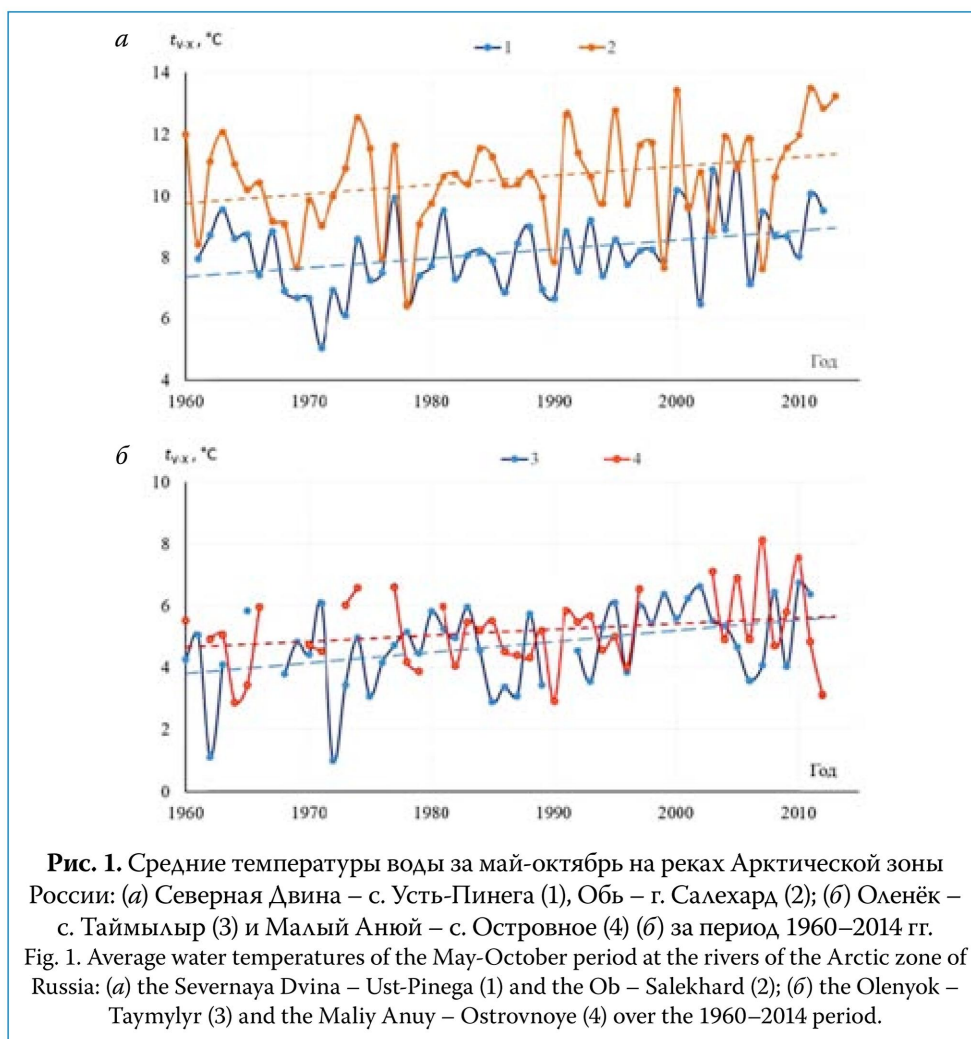
Несмотря на высокий интерес к рассматриваемой теме, существует очень малое количество публикаций по термическому режиму рек, посвященных регионам за пределами Европы и Северной Америки [3]. Данный раздел гидрологии можно считать одним из наименее изучаемых в настоящее время [4, 5]. Исследования теплового режима рек в России сосредоточены либо в устьевых областях крупнейших рек, в первую очередь Лены,

либо сосредоточены в южных регионах страны. Большая часть исследований ограничивается рассмотрением термического режима больших рек (за исключением рек, протекающих на Кольском полуострове и в Карелии, где в силу геолого-геоморфологических особенностей не сформированы бассейны со значительными площадями, а также малых рек Колымского нагорья, на которых в последние годы был выполнен ряд исследований соотношений компонент теплового баланса рек [6, 7]). Нельзя не отметить, что тепловые характеристики рек часто, в т. ч. в последние годы, описываются в рамках работ биологической тематики (альгология, ихтиология), однако, как правило, это ограниченные во времени экспедиционные наблюдения.

В настоящее время интерес к рассматриваемой теме обусловлен необходимостью изучения проявлений изменений климата в термическом режиме рек. Климатические изменения обусловили повышения как среднегодовых, так и максимальных годовых температур воды многих рек мира [8]. Изменения температуры воды за многолетние периоды для некоторых рек Арктической зоны приведены ниже (рис. 1).

В текущих климатических условиях исследования термического режима рек имеют большое значение для арктического региона как с точки зрения освоения территорий богатых полезными ископаемыми, так и сохранения речных экосистем, в т. ч. в вопросах воспроизводства популяций рыб. В последние десятилетия повышение температуры воды, особенно в реках, протекающих по территориям распространения многолетнемерзлых пород, приводит, с одной стороны, к интенсификации термоабразионных процессов на берегах, с другой, – упрощает и удешевляет дноуглубительные работы в связи с усилением протаивания грунтов русел рек. С повышением температуры воды также связано увеличение теплозапасов рек, в первую очередь осенних, что способствует смещению на более поздние даты сроков ледообразования и установления ледостава, это может увеличивать продолжительность навигации на реках. Рост теплового стока в арктические моря может способствовать интенсификации термоабразионных процессов на их побережьях. Таким образом, исследования термического состояния рек приобретают большое значение.

В Арктическом регионе происходит постепенное увеличение меженного стока, в первую очередь зимнего, и снижение величин максимального стока. При этом в последние десятилетия наблюдается устойчивый рост годовых температур воздуха, опережающий соответствующие изменения в расположенных южнее регионах. Обобщение термического режима теплового стока арктических рек выполнено в последние десятилетия в работах [9–11]. Однако в этих исследованиях не учтены данные наблюдений за термическим режимом рек северо-востока России (Чукотского полуострова), а также дан-



ные о термическом режиме малых и средних рек, при их достаточно высокой экологической и климатической значимости. Большинство обобщений выполнены на данных, не охватывающих полностью первое десятилетие XXI в. Данные по 2000–2010 гг. и более поздним периодам приведены в работах, посвященных исследованию изменений теплового стока больших рек [12–14].

Данное исследование ставит своей целью восполнение отмеченных выше пробелов. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения расчетов теплового стока в арктические моря и процессов его формирования, а также для оценки гидроэкологической безопасности арктических территорий.



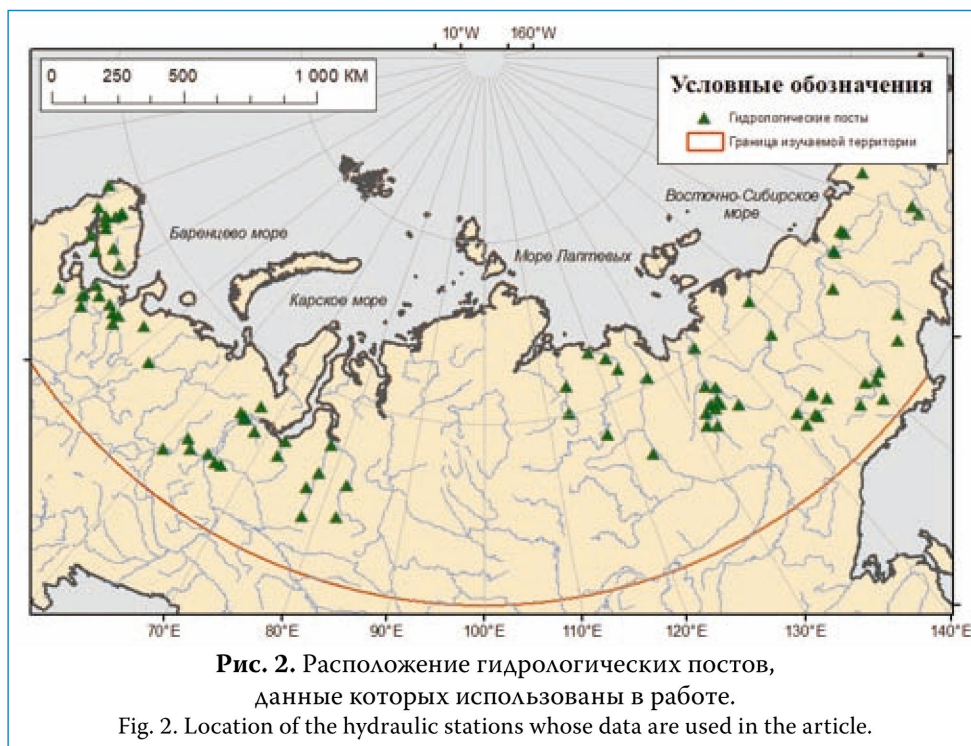
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общепринятый на сегодняшний день метод расчета среднегодовой температуры воды связан с использованием информации по 4–6 месяцам: май–октябрь, июнь–сентябрь. Считается, что разрушение ледяных образований в воде происходит только при ее температуре выше  $0,2^{\circ}\text{C}$  [9], следовательно, к теплomu сезону относить период до и после перехода температур через  $0,2^{\circ}\text{C}$  весной и осенью нельзя. При этом большая часть безледного периода на реках приходится именно на эти месяцы. Во-вторых, выполняемые в апреле, мае, октябре, ноябре измерения производятся в закраинах, а при ледоходе измеряются у берега, даже если установлено, что средняя температура по потоку должна измеряться на середине реки.

Для проведения исследования была расширена база данных о температуре воды, собранная на кафедре гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова. В настоящее время она включает информацию по 101 гидрологическому посту. Посты расположены на больших (31 пост), средних (50 постов) и малых (20 постов) реках (рис. 2). Все посты действуют в настоящее время, что обеспечивает в перспективе дальнейший мониторинг воздействия климатических изменений на температуру воды рек. Практически все посты, кроме расположенных на Оби и Енисее, находятся на незарегулированных водохранилищами рек.

По данным о среднемесячных температурах воды вычислены среднегодовые температуры двумя возможными способами: 1) с мая по октябрь; 2) за весь период с положительными температурами воды. Месяц был отнесен к теплomu периоду года, если хотя бы в одну декаду наблюдались температуры выше  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Среднемесячная температура при этом вычислялась путем осреднения по декадам. Такая методика использовалась по двум причинам. Во-первых, при расчетах среднегодовой температуры за периоды май–октябрь или июнь–сентябрь случаи раннего прогрева водных масс рек (апрель) и позднего их остывания (ноябрь) в отдельные годы не учитываются, помимо этого, в весенние и осенние месяцы (обычно май, сентябрь, октябрь) температура воды приравнивается к  $0^{\circ}\text{C}$  и соответственным образом учитывается в вычислениях, в то время как на реках Якутии вскрытие рек происходит в конце мая–середине июня. Во-вторых, несмотря на занижение температуры воды при измерениях во время ледовых явлений, имеющиеся данные позволяют судить о направленном повышении температуры, влияющем на разрушение ледяного покрова. В период весенних ледовых явлений температура воды также зачастую превышает  $0,2^{\circ}\text{C}$  (обычно переход через это значение происходит в течение первой пентады после вскрытия), что, согласно общепринятой методике, требует учета данных периодов и оценки их характеристик. Кроме того, в

условиях потепления климата при сокращении периода с ледовыми явлениями на реках требуется расширение периода оценок температуры воды как минимум на апрель и ноябрь [15].



В данном исследовании не учтены различия между односрочными и двухсрочными наблюдениями за температурой воды в связи с недостаточностью материалов для сравнения результатов вычисления среднемесячных температур по данным только утренних, утреннего и вечернего времени наблюдений. Такое сравнение сроков в изданиях «Гидрологического ежегодника» для Кольского полуострова за 1958–1962 гг. показало, что при вычислениях средних температур декады и месяца при использовании только утренних сроков происходит занижение на 0,1–0,3 °C. В связи с тем, что даже при систематическом занижении температуры воды возможно отслеживать общие тенденции происходящих изменений, в этом случае наблюдения на этих постах также использованы в работе. По различным причинам в некоторые декады на ряде постов измерения в отдельные дни проведены только в утренние часы. По причине небольшого предположительного занижения и редкостью подобных ситуаций в многолетних рядах данные по температуре воды в эти декады также приняты в расчетах.

Изменчивость температуры воды определяли с помощью критерия тренда Спирмена. Изменение среднегодовых и среднемесячных значений температуры воды оценивали за период 1961–2012 гг., включающего интенсивные изменения климата. Данные до 1960 г. не использовали, поскольку для ряда гидрологических постов они не являются репрезентативными в связи со сменой мест измерений. Также, до конца 1950-х годов на значительной части постов наблюдения производили только утром. Кроме того, ряд гидрологических постов на северных реках СССР был открыт только в начале 1960-х годов. Обобщение данных с 1960 г. позволяет по однородному ряду оценить температурный режим зарегулированной большим водохранилищем реки – Оби – после строительства и ввода в эксплуатацию плотины Новосибирской ГЭС и температурный режим р. Енисей, начиная с 1970-х, после заполнения Красноярского водохранилища.

Количественную оценку величин изменений выполняли на основании сравнения среднемноголетних годовых и месячных температур воды в периоды 1961–1990 гг. и 1991–2012 гг., соответствующие периодам климатических норм, установленных до 2015 г. По этим же периодам производили оценку однородности рядов наблюдений с использованием непараметрического U-теста Манна–Уитни, позволяющего оценивать ряды общей длиной менее 20 значений.

В представленной работе, как и в большинстве опубликованных обобщений, не рассматриваются данные по стоку рек западного побережья Белого моря в связи с небольшим количеством данных о температуре воды на сети наблюдений после 1980 гг.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты среднегодовой температуры воды по двум методикам показали, что на 33 гидрологических постах (34 %) расчет среднегодовой температуры за май–октябрь превышает значения по сравнению с расчетом для всего теплого периода. Данные посты расположены на территории севера Европейской территории России (ЕТР), на ряде левых притоков Оби (реки Северная Сосьва, Казым), левых притоков Енисея (реки Большой и Малый Кас) и в среднем течении Енисея (Енисейск, устье Подкаменной Тунгуски), а также на некоторых водотоках Чукотки (реки Омичкан, Омсучан). Завышение температуры составляет 0,5–1 °С в пределах севера ЕТР и Кольского полуострова, 0,1–0,3 °С на левобережье Оби, 0,1–1 °С на Енисее и в пределах 0,2 °С на Чукотке. Наибольшие различия (2,5–3 °С) отмечены в центральной части Кольского полуострова. Значительные различия, по-видимому, обусловлены расположением постов в истоках озер, где круглогодично наблюдаются положительные температуры, а также характером течения горных рек, ледостав на которых не устанавливается или устанавливается не



полностью. В то же время на севере Сибири (68 постов – 66 %) расчет среднегодовой температуры воды по данным за май–октябрь занижает значения по сравнению с расчетом для всего теплого периода года. Подобные различия обусловлены, в первую очередь тем, что теплый период года на реках севера Сибири не всегда охватывает период с мая по сентябрь, хотя в последние годы прослеживается тенденция к его увеличению.

Занижение температуры в пределах 1–2 °С отмечено на 20 постах на реках Пур, Таз, на некоторых реках бассейна р. Надым, в низовьях Енисея, в бассейне Анабара на р. Оленек, в бассейне Яны, в нижнем течении Индигирки. Для большинства из них характерна значительная суровость климатических условий бассейна, приводящая к сокращению теплого периода. На других реках севера Сибири занижение среднегодовой температуры находится в пределах 1 °С.

Среднегодовые значения температуры воды за период с 1961 по 2012 гг. колеблются от 2 до 12 °С по всей рассматриваемой территории. При расчете за весь теплый период с 1961 по 2012 гг. максимальная температура не превышает 11 °С. Наиболее высокие среднегодовые значения характерны для севера Европейской территории России и Кольского полуострова. Наименьшие – для рек северо-востока (табл. 1, табл. 2, табл. 3).

При расчете за май–сентябрь статистически значимые тренды среднегодовой температуры воды наблюдаются на 35 % гидрологических постов: на 3 постах на Северо-востоке и левобережье Енисея отмечено значимое снижение рассматриваемой характеристики, связанное, вероятно, с территориальными условиями формирования температурного режима. Снижение температуры воды зафиксировано также на 13 постах, по большей части расположенных на севере Якутии. На 31 посту наблюдается значимое повышение среднегодовой температуры воды в пределах 1° С. При расчете рассматриваемой величины для всего теплого периода, значимые изменения отмечаются на 13 % постов. Так, значимые снижения отмечены только на 2 постах, расположенных на Чукотке. При этом, снижение температуры воды отмечается на 33 реках (34 %) и составляет менее 0,5 °С. Рост температур в пределах 0,5–1 °С зафиксирован на других постах (76 %), на 9 из них повышение температур является значимым.

Нарушение однородности в рядах среднегодовой температуры, рассчитанной за май–октябрь, выявлено на 29 % постов. Нарушение однородности выявлено на 6 постах Севера ЕТР и Кольского полуострова, прочие нарушения отмечены на севере Сибири. Нарушение однородности в рядах среднегодовой температуры, рассчитанной за теплый период, определено на 8 % постов. Все они, кроме постов на реках Мезень и Пеза, находятся в пределах севера Сибири. Практически на всех гидрологических постах, где зафиксировано значимое нарушение однородности, отмечается и значимый тренд.



**Таблица 1.** Среднегодовые характеристики температуры воды на реках гидрологических районов (по изданиям Государственного водного кадастра) Кольского полуострова, Севера и Нижней Оби и их изменения за период 1991–2012 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.

Table 1. Average annual characteristics of water temperature on the rivers of hydrological zones (according to the State Water Cadaster publications) of the Cola Peninsula, the North and the Lower Ob rivers and their changes over 1991–2012 in comparison with the 1961–1990 period.

| Гидрологический район | Река – пост                           | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Среднегодовая температура воды, °С |                | Изменения среднегодовых температур воды |                |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|                       |                                       |                                    | За теплый период                   | За май-октябрь | За теплый период                        | За май-октябрь |
| Кольский п-ов         | р. Лотта – пор. Каллокоски            | 2540                               | 7,82                               | 8,41           | 0,38                                    | 1,05           |
|                       | р. Кола – 1429-ый км Октябрьской ж.д. | 3780                               | 7,88                               | 8,27           | 0,13                                    | 0,49           |
|                       | р. Кица – ст. Лопарская               | 1150                               | 7,3                                | 7,95           | -0,07                                   | 0,8            |
|                       | р. Поной – с. Краснощелье             | 3810                               | 7,9                                | 8,47           | 0,38                                    | 0,89           |
|                       | р. Поной – с. Каневка                 | 10200                              | 7,5                                | 7,98           | 0,69                                    | 1,25           |
|                       | р. Ена – пос. Ена                     | 1620                               | 6,56                               | 7,06           | 0,06                                    | 0,65           |
|                       | р. Монча – г. Мончегорск              | 1480                               | 4,83                               | 7,7            | 0,52                                    | 0,16           |
|                       | р. Куреньга – г. Оленегорск           | 509                                | 5,69                               | 8,23           | 0,05                                    | 0,51           |
| Север                 | р. Малая Белая – ст. Хибины           | 79,9                               | 2,74                               | 4,7            | 0,4                                     | 0,74           |
|                       | р. Мудьюга – д. Патракеевская         | 1840                               | 8,21                               | 9,01           | 0,18                                    | 0,73           |
|                       | р. Золотица – д. Верхняя Золотица     | 5570                               | 7,9                                | 8,83           | -0,42                                   | 0,01           |
|                       | р. Сояна – д. Сояна                   | 1240                               | 7,01                               | 7,69           | 0,49                                    | 1,02           |
|                       | р. Пеза – д. Игумново                 | 12000                              | 8,11                               | 8,74           | -1,39                                   | -0,66          |
|                       | р. Пеша – д. Волоковая                | 2780                               | 7,92                               | 8,04           | 0,01                                    | 0,4            |
|                       | р. Северная Двина – с. Усть-Пинега    | 348000                             | 8,98                               | 10,56          | -0,27                                   | 1,1            |
|                       | р. Онега – д. Порог                   | 55700                              | 9,2                                | 11,11          | 0,61                                    | 1,09           |
|                       | р. Мезень – д. Малонисогорская        | 56400                              | 8,68                               | 9,3            | 0,51                                    | 0,46           |
|                       | р. Мезень – с. Дорогорское            | 74100                              | 8,59                               | 9,17           | 0,2                                     | 0,13           |
| Нижняя Обь            | р. Печора – с. Усть-Цильма            | 248000                             | 7,76                               | 8,16           | -0,03                                   | 0,68           |
|                       | р. Казым – г. Белоярск                | 29500                              | 9,15                               | 9,21           | 1,3                                     | 1,51           |
|                       | р. Амня – с. Казым                    | 7100                               | 7,71                               | 7,79           | 0,05                                    | 0,48           |
|                       | р. Северная Сосьва – пос. Няскимволь  | 9850                               | 8,28                               | 8,56           | 0,45                                    | 0,74           |
|                       | р. Северная Сосьва – д. Сартынья      | 69100                              | 8,84                               | 8,94           | -0,03                                   | 0,28           |
|                       | р. Северная Сосьва – д. Березово      | 91500                              | 9,44                               | 9,37           | 0,46                                    | 0,46           |
|                       | р. Шома-Я – изб. Шома-Я               | 468                                | 6,62                               | 6,54           | 0,99                                    | 1,07           |
|                       | р. Сыня – пгт Овгорт                  | 9880                               | 7,96                               | 7,95           | -0,11                                   | 0,57           |
|                       | р. Собь – пгт Харп                    | 1240                               | 5,03                               | 4,36           | 0,65                                    | 0,94           |
|                       | р. Полуй – ТДС Полуй                  | 15100                              | 7,98                               | 7,54           | 0,25                                    | 0,93           |
|                       | р. Щучья – факт. Лаборовая            | 1680                               | 5,14                               | 4,74           | -0,51                                   | -0,06          |
|                       | р. Пяку-пур – пос. Тарко-Сале         | 31400                              | 9,1                                | 8,3            | -0,59                                   | 0,53           |
|                       | р. Таз – с. Красноселькуп             | 87200                              | 8,84                               | 8,18           | -0,76                                   | 0,06           |
|                       | р. Обь – г. Салехард                  | 2950000                            | 8,24                               | 8,16           | 0,27                                    | 1,02           |
|                       | р. Надым – с. Надым                   | 48000                              | 8,08                               | 7,63           | 0,19                                    | 0,59           |
|                       | р. Ныда – с. Ныда                     | 6700                               | 8,04                               | 6,72           | -0,15                                   | 0,6            |
|                       | р. Таз – с. Тазовское                 | 128000                             | 8,21                               | 6,65           | -0,36                                   | -0,14          |

**Таблица 2.** Среднегодовые характеристики температур воды на реках гидрологических районов (по изданиям Государственного водного кадастра) Енисея, Лены и их изменения за 1991–2012 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг.

Table 2. Average annual characteristics of water temperature on the rivers of hydrological zones (according to the State Water Cadaster publications) of the Yenisey and Lena rivers and their changes over 1991–2012 in comparison with the 1961–1990 period

| Гидрологический район | Река – пост                               | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Среднегодовая температура воды, °С |                | Изменения среднегодовых температур воды |                |
|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|                       |                                           |                                    | За теплый период                   | За май-октябрь | За теплый период                        | За май-октябрь |
| Енисей                | р. Енисей – г. Енисейск                   | 1400000                            | 8,77                               | 10,16          | -0,37                                   | -0,15          |
|                       | р. Енисей – с. Подкаменная Тунгуска       | 1760000                            | 8,44                               | 8,71           | -0,57                                   | 0,13           |
|                       | р. Кас – шл. Александровский              | 7640                               | 7,76                               | 8,86           | 0,18                                    | 0,31           |
|                       | р. Малый Кас – шл. Марьина Грива          | 428                                | 7,61                               | 8,61           | -0,48                                   | -1,05          |
|                       | р. Подкаменная Тунгуска – факт. Кузьмовка | 218000                             | 7,57                               | 7,51           | -0,45                                   | -0,14          |
|                       | р. Елогуй – факт. Келлог                  | 16300                              | 8,55                               | 8,59           | 0,26                                    | 0,53           |
|                       | р. Нижняя Тунгуска – д. Подволошино       | 8270                               | 9,41                               | 9,28           | 0,13                                    | -0,03          |
|                       | р. Нижняя Тунгуска – с. Ербогачен         | 77400                              | 9,62                               | 9,53           | 0,65                                    | 1,09           |
|                       | р. Нижняя Тунгуска – факт. Большой Порог  | 438000                             | 8,21                               | 7,72           | -0,3                                    | 0,08           |
|                       | р. Тембенчи – с. Тембенчи                 | 18900                              | 6,42                               | 5,55           | 0,72                                    | 0,18           |
|                       | р. Ерачимо – факт. Большой Порог          | 9100                               | 8,03                               | 7,21           | -0,36                                   | 0,56           |
|                       | р. Турухан-факт. Яков Стан                | 10100                              | 8,47                               | 7,38           | -0,24                                   | 0,5            |
|                       | р. Енисей – г. Игарка                     |                                    | 9,04                               | 7,95           | 0,11                                    | 0,64           |
| Лена                  | р. Лена – с. Жиганск                      | 2260000                            | 8,48                               | 8,14           | 0,19                                    | 0,39           |
|                       | р. Малая Куонапка – с. Джалиа             | 20300                              | 8,14                               | 6,22           | -1,6                                    | -0,62          |
|                       | р. Оленёк – ГМС Сухана                    | 127000                             | 8,21                               | 6,99           | -0,06                                   | 0,47           |
|                       | р. Яна – г. Верхоянск                     | 45300                              | 7,96                               | 7,27           | 0,28                                    | 0,51           |
|                       | р. Яна – пос. Батагай                     | 48400                              | 9,22                               | 7,02           | 1,4                                     | 0,34           |
|                       | р. Сартанг – с. Юнкюр                     | 11800                              | 7,62                               | 6,79           | -0,33                                   | 0,51           |
|                       | р. Сартанг – с. Бала                      | 16700                              | 9,01                               | 8              | -0,25                                   | 0,48           |
|                       | р. Дулгалаах – ГМС Екючю                  | 20800                              | 5,99                               | 5,45           | 0,32                                    | 0,36           |
|                       | р. Дулгалаах – с. Томтор                  | 23900                              | 7,21                               | 6,15           | 0,28                                    | 0,3            |
|                       | р. Адыча (Адыаччы) – ГМС Усть-Чаркы       | 52800                              | 6,54                               | 5,67           | 0,11                                    | 0,4            |
|                       | р. Адыча (Адыаччы) – г. п. Юрдюк-Кумах    | 89600                              | 7,74                               | 7,08           | -0,12                                   | 0,24           |
|                       | р. Боруулаах (Буралаах) – с. Томтор       | 7570                               | 8,71                               | 7,33           | 0,23                                    | 0,33           |
|                       | р. Бытантай – г. п. Асар                  | 40000                              | 7,33                               | 6,09           | -0,21                                   | -0,13          |
|                       | р. Иигирка – с. Оймякон                   | 24500                              | 5,47                               | 5,09           | -0,48                                   | 0,07           |
|                       | р. Иигирка – ГМС Юрты                     | 51100                              | 5,76                               | 5,48           | 0,32                                    | 0,81           |
|                       | р. Иигирка – г. п. Иигирский              | 83500                              | 6,29                               | 5,91           | -0,02                                   | 0,51           |
|                       | р. Иигирка – пос. Белая Гора              | 287000                             | 7,77                               | 7,05           | 0,83                                    | 0,2            |

## Продолжение таблицы 2.

| Гидрологический район | Река – пост                    | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Среднегодовая температура воды, °С |                | Изменения среднегодовых температур воды |                |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|                       |                                |                                    | За теплый период                   | За май-октябрь | За теплый период                        | За май-октябрь |
| Лена                  | р. Агаякан – ГМС Агаякан       | 7630                               | 4,79                               | 4,56           | 0,76                                    | 0,77           |
|                       | р. Артык-Юрх – 3.5 км от устья | 644                                | 6,32                               | 5,71           | -0,62                                   | -0,17          |
|                       | р. Нера – г. п. Ала-Чубук      | 22300                              | 5,57                               | 5,44           | 0,45                                    | 0,58           |
|                       | р. Делянكير – с. Делянكير      | 3070                               | 5,01                               | 4,74           | -0,41                                   | -0,1           |
|                       | руч. Ближний – 0.3 км от устья | 23                                 | 3,25                               | 2,75           | -0,34                                   | -0,03          |
|                       | р. Анабар – с. Саскылах        | 78800                              | 5,98                               | 4,36           | -0,11                                   | 0,31           |
|                       | р. Оленёк – п. ст. Тюмяти      | 198000                             | 7,3                                | 5,56           | 0,52                                    | 0,8            |
|                       | р. Оленек – Таймылыр           | 207000                             | 6,46                               | 4,72           | 1,17                                    | 1,04           |
|                       | р. Оленёк – с. Усть-Оленёк     | 219000                             | 6,57                               | 4,83           | 0,51                                    | 0,83           |
|                       | р. Лена – с. Кюсюр             | 2430000                            | 7,05                               | 6,27           | 0,55                                    | 0,58           |
|                       | р. Яна – п. ст. Юбилейная      | 224000                             | 7,58                               | 5,93           | 0,35                                    | 0,59           |
|                       | р. Иигирка – п. Чокурдах       | 322000                             | 7,56                               | 6,31           | 0,56                                    | 0,57           |

**Таблица 3.** Среднегодовые характеристики температур воды на реках гидрологических районов (по изданиям Государственного водного кадастра) Северо-востока России и их изменения за 1991–2012 гг. по сравнению с периодом 1961–1990 гг.

Table 3. Average annual characteristics of water temperature on the rivers of hydrological zones (according to the State Water Cadaster publications) of the Northeastern part of Russia and their changes over 1991–2012 in comparison with the 1961–1990 period

| Гидрологический район | Река – пост                                | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | Среднегодовая температура воды, °С |                | Изменения среднегодовых температур воды |                |
|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|----------------|
|                       |                                            |                                    | За теплый период                   | За май-октябрь | За теплый период                        | За май-октябрь |
| Северо-восток         | р. Кулу – с. Кулу                          | 10300                              | 4,84                               | 4,71           | -0,33                                   | -0,17          |
|                       | р. Бохапча – в 5,4 км от устья             | 13600                              | 5,52                               | 5,25           | 0,06                                    | 0,25           |
|                       | руч. Ягодный – в 1,6 км от устья           | 102                                | 3,08                               | 3,07           | -0,09                                   | -0,07          |
|                       | р. Оротукан – рп. Оротукан                 | 771                                | 5,46                               | 4,98           | 0,95                                    | 0,85           |
|                       | р. Омчикчан – рп. Омсукчан                 | 1720                               | 4,52                               | 4,6            | -0,39                                   | -0,33          |
|                       | р. Берёзовка – с. Берёзовка                | 15400                              | 7,35                               | 6,81           | 0,86                                    | 1,15           |
|                       | р. Омолон – гм. ст. Лабазная               | 3710                               | 4,38                               | 3,99           | 0,2                                     | 0,17           |
|                       | р. Малый Анюй – с. Островное               | 30000                              | 5,58                               | 5,17           | 0,67                                    | 0,76           |
|                       | р. Малый Анюй – с. Анюйск                  | 48600                              | 6,79                               | 6,13           | 0,42                                    | 0,55           |
|                       | руч. Мухтуя – с. Островное                 | 23,7                               | 2,38                               | 2,06           | 0,26                                    | 0,54           |
|                       | р. Погыен – устье р. Инкуливеем            | 12000                              | 5,99                               | 5,39           | 0,47                                    | 0,59           |
|                       | р. Инкуливеем – в 2.0 км от устья          | 242                                | 6,37                               | 5,27           | -0,57                                   | -0,22          |
|                       | р. Майн – с. Ваеги                         | 18600                              | 5,83                               | 5,65           | 0,63                                    | 0,76           |
|                       | р. Большой Анюй – гм. ст. Константиновская | 49600                              | 6,77                               | 6,57           | 0,86                                    | 1              |
|                       | р. Омчук – рп. Усть-Омчук                  | 583                                | 4,65                               | 4,66           | 0,08                                    | 0,3            |

## ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования установлено, что значимые изменения термического режима, в первую очередь, наблюдаются либо на очень малых реках, расположенных в горных или предгорных районах, либо на реках с площадью водосбора более 7000 км<sup>2</sup>, что, по всей видимости, связано с особенностями питания и режима данных рек.

Различия в расчетах показывают систематическое занижение средне-многолетней температуры воды при осреднениях за май-октябрь по сравнению с осреднением за весь теплый период на севере ЕТР и завышения на севере азиатской части России. Причем величина занижения зависит от географического положения и озерности бассейна. Наибольшие различия получены для Якутии и озерных рек Кольского полуострова.

Расчеты наличия значимых трендов показывают значительный вклад в повышение температуры воды месяцев, не включенных в общепринятый период осреднения (май–сентябрь), в особенности на севере Европейской территории России.

Полученные выводы можно использовать для оценок термического режима рек в условиях изменяющегося климата при проектировании гидротехнических сооружений, проведении оценок воздействия на окружающую среду, разработку прогнозов термического режима рек. В дальнейшем, на базе полученных результатов планируется разработка прогнозов изменений температур воды в реках Арктической зоны России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webb B.W., Hannah D.M, Moore R.D et al. Recent advances in river and stream temperature // *Hydrological Processes*. 2008. No. 22. P. 902–918.
2. Соколова Е.М. Термический режим рек СССР // *Труды ГГИ*. 1951. Вып. 30(84). С. 1–112.
3. van Vliet, M.T.H., F. Ludwig, J.J.G. Zwolsman, G.P. Weedon and Kabat P. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow // *Water Resour.* 2011. Res. 47. W02544. DOI: 10.1029/2010WR009198.
4. Hannah D.M., Garner G. River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century // *Prog. Phys. Geogr.* 2015. No. 39. P. 68–92.
5. Алексеевский Н.И., Е.О. Кузьмина, А.А. Базелюк. Термический режим рек на юге Европейской территории России // *Известия РАН. Сер. географическая*. 2014. № 5. С 56–66.
6. Михайлов В.М. Основные закономерности формирования термического режима рек и водоемов на северо-востоке Азии // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2009. № 4. С 27–34.
7. Самохвалов В.А., Ухов Н.В. Температурный режим водотоков разных порядков в бассейне верхней Колымы // *Вестник ВГУ*. 2018. Сер. География. Геоэкология. № 4. С. 48–51.



8. Jackson F.L., Fryer R.J., Hannah D.M., Millar C.P., Malcolm I. A. A spatio-temporal statistical model of maximum daily river temperatures to inform the management of Scotland's Atlantic salmon rivers under climate change, *Science of the Total Environment*. 2018. 612. P. 1543–1558, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.010>.
9. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. 736 с.
10. Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. 2009. Сер. 5. География. № 5. С. 69–77.
11. Lammers R.B., Pundsack J.W., Shiklomanov A.I. Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *J. Geophys. Res.* 2007. 112. G04S59 <http://dx.doi.org/10.1029/2006JG000370>.
12. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. 2015. Сер. 5. География. № 6. С. 85–95.
13. 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*. 2017. No. 87 (2). P. 167–176.
14. Yang D., Liu B. and Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // *Geophys. Res. Lett.* 2005. No. 32. L05401. DOI: 10.1029/2004GL021568.
15. Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P. Modern characteristics of the ice regime of russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century // *Geography, environment, sustainability*. 2017. Vol. 10. No. 4. P. 4–15.

*Для цитирования:* Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // *Водное хозяйство России*. 2020. № 2. С. 8–22.

#### **Сведения об авторах:**

**Василенко Александр Николаевич**, аспирант, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: saiiia24@mail.ru

**Магрицкий Дмитрий Владимирович**, канд. геогр. наук, доцент, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: magdima@yandex.ru

**Фролова Наталья Леонидовна**, д-р геогр. наук, профессор, заведующая кафедрой гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: frolova\_nl@mail.ru

**PATTERNS OF CHANGES IN AVERAGE ANNUAL WATER TEMPERATURE OF THE  
RIVERS OF THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA ASSOCIATED WITH CLIMATE CHANGE**

**Aleksandr N. Vasilenko, Dmitriy V. Magritskiy, Natalya L Frolova**

E-mail: saiiia24@mail.ru

*M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**Abstract:** The paper considers changes in temperature regime of rivers flowing northerner than 60th latitude. The investigation bases on data about average monthly water temperatures from 90 hydrological gages for the period 1960-2012. Annual water temperatures for this period were calculated according to the generally accepted method as average monthly temperature from May to September and according to the proposed in this paper calculation method for the entire period with positive water temperatures. It is shown that the calculation of annual water temperatures only from the average monthly temperatures from May to October, underestimates annual water temperature. The paper estimates changes in the average annual water temperatures calculated by both methods over the period 1991–2012 compared to 1961-1990. These periods cover intensive climate change, as well as the time after the construction of the largest hydroelectric power stations. Statistical analyzes of the obtained series for trends (according to the Spearman rank correlation test) and series uniformity disturbances (Mann-Whitney U-test) were carried out. A significant increase in the average annual water temperatures in rivers on most rivers of the Russian Arctic is shown. The greatest changes are observed in the territories of Yakutia. Significant changes are also noted on the Kola Peninsula. At the same time, the magnitude of the changes depends on various hydrological characteristics of the basin. Significant changes to date have occurred in less than 50% of the investigated rivers.

**Key words:** thermal regime of rivers, water temperature, climate change, changes in the hydrological regime.

**About the authors:**

Alexander N Vasilenko, post-graduate student, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory,1, Moscow, 119991, Russia; e-mail: saiiia24@mail.ru

Dmitriy V. Magritskiy, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory,1, Moscow, 119991, Russia; e-mail: magdima@yandex.ru

Frolova Natalia L., Doctor of Geographic Sciences, Professor, Head of Department, M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory,1, Moscow, 119991, Russia; e-mail: frolova\_nl@mail.ru

**For citation:** *Vasilenko A.N., Magritskiy D.V., Frolova N.L. Patterns of Changes in Average Annual Water Temperature of the Rivers of the Arctic Zone of Russia Associated with Climate Change // Water Sector of Russia. 2020. No. 2 P. 8–22.*

**REFERENCES**

1. Webb B.W., Hannah D.M., Moore R.D et al. Recent advances in river and stream temperature // *Hydrological Processes*. 2008. No. 22. P. 902–918.
2. Sokolova E.M. Termicheskiy rezhim rek SSSR [Thermal regime of the rivers of the USSR]. // *Trudy GGI*. 1951. Vyp. 30(84). P. 1–112
3. van Vliet, M.T.H., F. Ludwig, J.J.G. Zwolsman, G.P. Weedon and Kabat P. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow // *Water Resour*. 2011. Res. 47. W02544, DOI: 10.1029/2010WR009198.

4. *Hannah D.M., Garner G.* River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century // *Prog. Phys. Geogr.* 2015. No. 39. P. 68–92.
5. *Alekseyevskiy N.I., E.O. Kuz'mina, Bazelyuk A.A.* Termicheskiy rezhim rek na yuge Evropeyskoy territoriyi Rossii [Thermal regime of the rivers in the South of the Russian European territory] // *IZVESTIYA RAN. SERIYA GEOGRAFICHESKAYA.* 2014. № 5. P. 56–66.
6. *Mikhaylov V.M.* Osnovnye zakonomernosti formirovaniya termicheskogo rezhima rek i vodoyomov na severo-vostoke Aziyi [Main regularities of the thermal regime formation in the rivers and water bodies of the northeast of Asia] // *Vestnik SVNC DVO RAN.* 2009. № 4. P. 27–34.
7. *Samokhvalov V.L., Uhov N.V.* Temperaturniy rezhim vodotokov raznykh poryadkov v basseynе verkhney Kolymy [Temperature regime of different order watercourses in the Upper Kolyma basin] // *Vestnik VGU.* 2018. Ser. Geografija. Geoekologiya. № 4. P. 48–51.
8. *Jackson F.L., Fryer R.J., Hannah D.M., Millar C.P., Malcolm I.A.* A spatio/temporal statistical model of maximum daily river temperatures to inform the management of Scotland's Atlantic salmon rivers under climate change, *Science of the Total Environment.* 2018. 612. P. 1543–1558, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.010>.
9. Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezhya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya. [Geographical status of the Russian Arctic coast and safety of the nature use] M.: GEOS, 2007. 736 p.
10. *Magrickiy D.V.* Teplovoy stok rek v morya rossiyskoy Arktiki i yego izmeneniya [Thermal runoff of rivers to the Russian Arctic seas and its changes] // *Vestnik Moskovskogo universiteta.* 2009. Ser. 5. Geografija. № 5. P. 69–77.
11. *Lammers R.B., Pundsack J.W., Shiklomanov A.I.* Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass. *J. Geophys. Res.* 2007. Res. 112. G04S59 <http://dx.doi.org/10.1029/2006JG000370>.
12. *Magrickiy D.V.* Faktory i zakonomernosti mnogoletnikh izmeneniy stoka vody, vzvesheniykh nanosov i teploty Nizhney Leny i Vilyuya [Factors and regularities of the many-year changes of the water flow, suspended sediments and heat in the Lower Lena and Viluy] // *Vestnik Moskovskogo universiteta.* 2015. Ser. 5. Geografija. № 6. P. 85–95
13. *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.* 2017. No. 87 (2). P. 167–176.
14. *Yang D., Liu B. and Ye B.* Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // *Geophys. Res. Lett.* 2005. No. 32. L05401. DOI: 10.1029/2004GL021568.
15. *Agafonova S.A., Frolova N.A., Surkova G.V., Koltermann K.P.* Modern characteristics of the ice regime of Russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century // *Geography, environment, sustainability.* 2017. Vol. 10. No. 4. P. 4–15.