

УДК 556.16:556.51(268.46)

А.В. Толстиков¹, А.Ф. Балаганский², И.А. Чернов³

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СТОКА РЕК ВОДОСБОРА БЕЛОГО МОРЯ

Рассматривается тепловой сток рек водосбора Белого моря и его изменчивость. Для анализа выбран представительный 1990–2014 гг., в котором длина ряда позволяет оценить годовую изменчивость водного и теплового стока, а также температуру воды в районе устьевых участков рек водосбора Белого моря. Применялась стандартная формула оценки теплового стока, частные водосборы рек определялись по картам масштаба 1:1 000 000, далее для более точного определения – 1:200 000. Тепловой сток с водосборной площади Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5480,94 \times 10^{15}$ Дж. Показано повышение температуры воды устьев рек водосбора Белого моря за 1956–2015 гг., особенно ярко выраженное с 1990 г. Для выявления последствий изменчивости теплового стока использованы результаты математического моделирования, выполненные на программном комплексе JASMINE. Проведено тринадцать численных экспериментов, в качестве маркеров использовались даты перехода температуры воды в Двинском, Онежском и Мезенском заливах через 0,2; –0,5 и –1 °С весной и осенью. Эксперименты показали, что повышение или понижение среднемесячной температуры воды в реках на 2 °С, а также изменение их водного стока на 30% не приведет к существенному изменению сроков ледообразования и разрушения льда в заливах Белого моря, а лишь изменит температуру воды в теплое время года. Амплитуда колебания ее значений не достигнет больших величин (несколько десятых долей °С). Смещение модельных сроков ледообразования и разрушения льда при изменении среднемесячной температуры рек водосбора и их стока не превысит нескольких часов. И при потеплении, и при похолодании в первую очередь меняется весенняя и летняя температура поверхностного слоя воды в заливах, на больших глубинах подобное воздействие практически не заметно. Результаты модельных исследований доказывают устойчивость термодинамической системы Белого моря к внешним тепловым воздействиям рек его водосбора.

Ключевые слова: водный сток, климат, потепление, моделирование, JASMINE

Введение. Тепловой баланс Белого моря складывается из значений радиационного баланса, адвективно-диффузионного переноса и турбулентного теплообмена, затрат тепловой энергии на испарение и таяние льда, тепла речного стока, а также его выделения при ледообразовании и конденсации [Гидрометеорология..., 1991]. Тепловой сток – это важный фактор гидроэкологического состояния водных объектов, который зависит от размера самого объекта, его географического положения, термических и гидрологических условий в речном бассейне. Любые колебания в водном и тепловом балансе приводят к изменениям водного, руслового, ледотермического режимов и экологического состояния речных систем [Белое море..., 2007].

В Белом море основное количество теплоты зимой вносится течением Дерюгина из Баренцева моря [Наумов, Федяков, 1993]. Оно достаточно быстро расходуется на теплообмен с атмосферой на свободных ото льда участках моря [Елисов, Иванова, 1999]. Избыток теплоты в летнее время выносится стоковым течением Тимонова в Баренцево море [Наумов, Федяков, 1993]. Теплота речного стока составляет всего порядка 2% всей приходной

части теплового баланса Белого моря [Арсеньева, 1960; Гидрометеорология..., 1991], но, в силу ее подверженности межгодовой изменчивости, на реках водосбора могут меняться сроки наступления ледостава и ледохода. Так, например, колебания среднегодовой приустьевой температуры рек Карельского и Поморского берегов Белого моря за 1990–2014 гг. составили 1,3–1,8 °С, для р. Онеги – 2 °С, р. Северной Двины – 1,4 °С. Кроме того, объем воды, приходящейся на Двинский, Онежский, Мезенский заливы, принимающие крупнейшие реки водосбора, составляет около 15% объема всего моря [Елисов, Иванова, 1999]. Поэтому тепловой сток рек играет важную роль в его тепловом балансе.

Вопросами изучения теплового стока рек в разное время занимались [Елшин, 1981, 1988; Леонов, 1981; Магрицкий, 2009]. Из иностранных авторов следует отметить [Maskay, Maskay, 1975; Prowse, Flegg, 1998; Liu, Yang, 2011]. Эти работы посвящены теории определения теплового стока рек; в них приведены рассчитанные значения для различных водотоков. В районе водосбора Белого моря сейчас наблюдаются повышение температуры воздуха (особенно в зимний период года) [Фролова и др., 2018; Доклад...,

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, рук. Лаборатории географии и гидрологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: alexeytolstikov@mail.ru

² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Лаборатория географии и гидрологии, гл. гидролог; e-mail: kar_shuia@mail.ru

³ Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Лаборатория моделирования природно-технических систем, ст. науч. с., канд. физ.-мат. н.; e-mail: iachernov@yandex.ru

2019] и температуры воды в устьях рек, впадающих в Белое море, выражена тенденция увеличения годового водного стока многих рек бассейна Северного Ледовитого океана [Фролова и др., 2018].

Цель работы – определить величину теплового стока рек водосбора Белого моря в настоящее время и показать тенденции его изменчивости.

В формировании стока теплоты главную роль играет водный сток [Магрицкий, 2009], который является интегральным показателем гидрофизических процессов на водосборе [Климат Карелии..., 2004]. Он обусловлен климатическими характеристиками и хозяйственной деятельностью человека (например, сброс сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий).

В гидрологическом режиме рек бассейна Белого моря за многолетний период отмечается повышение водного стока с конца XIX в. до 1920-х гг., снижение стока в 1920–1960-х гг., рост с 1960 г. до начала 2000-х гг. [Карпечко и др., 2004]. Далее сток продолжал повышаться до 2007 г., после чего наметилась тенденция к понижению, сохранившаяся до 2015 г. (рис. 1). В 2016–2018 гг. с водосборной площади Белого моря, согласно данным Двинско-Печорского бассейнового водного управления [Двинско-Печорское..., 2019], отмечался сток, близкий к норме.

Реки водосбора Белого моря могут влиять на температурный режим водоема в первую очередь в устьевой зоне, оказывая обогревающее воздействие в мае–сентябре и охлаждающее в оставшиеся месяцы, начиная с октября [Елисов, Иванова, 1999].

Важно оценить степень этого влияния с учетом изменений, произошедших в последние годы, и рассмотреть их возможные сценарии в будущем.

Материалы и методы исследований. Исследование теплового стока рек в Белое море производилось по картам масштаба 1:1 000 000, далее для более точного определения – 1:200 000. Уточнялись площади всего бассейна Белого моря и водосборов притоков. Необходимо отметить различие величин, полученных в результате нашей работы, и площадей, опубликованных в материалах Гидрометеослужбы [Ресурсы поверхностных вод..., 1965], что связано с разной детализацией рельефа и гидрографии на картах различных масштабов. Тем не менее, это расхождение в среднем оценивается в 1%.

Весь водосбор Белого моря был разделен на секторы согласно принадлежности к стоку в пределах границ районов моря (Воронка, Горло, Бассейн, Кандалакшский, Онежский, Двинский и Мезенский заливы), принятых в лоции [Люция..., 1995]. Определение границ водосборов рек проводилось в программной среде MapInfo Professional 2.5.2.

Для анализа теплового стока рек выбран период с 1990 по 2014 г. Он является представительным [Руководящие указания..., 2017], длина ряда позволяет оценить годовую изменчивость водного и теплового стока, а также температуры воды в районе устьевых участков рек водосбора Белого моря.

Расчет теплового стока рек производился по стандартной формуле [Кухлинг, 1982]

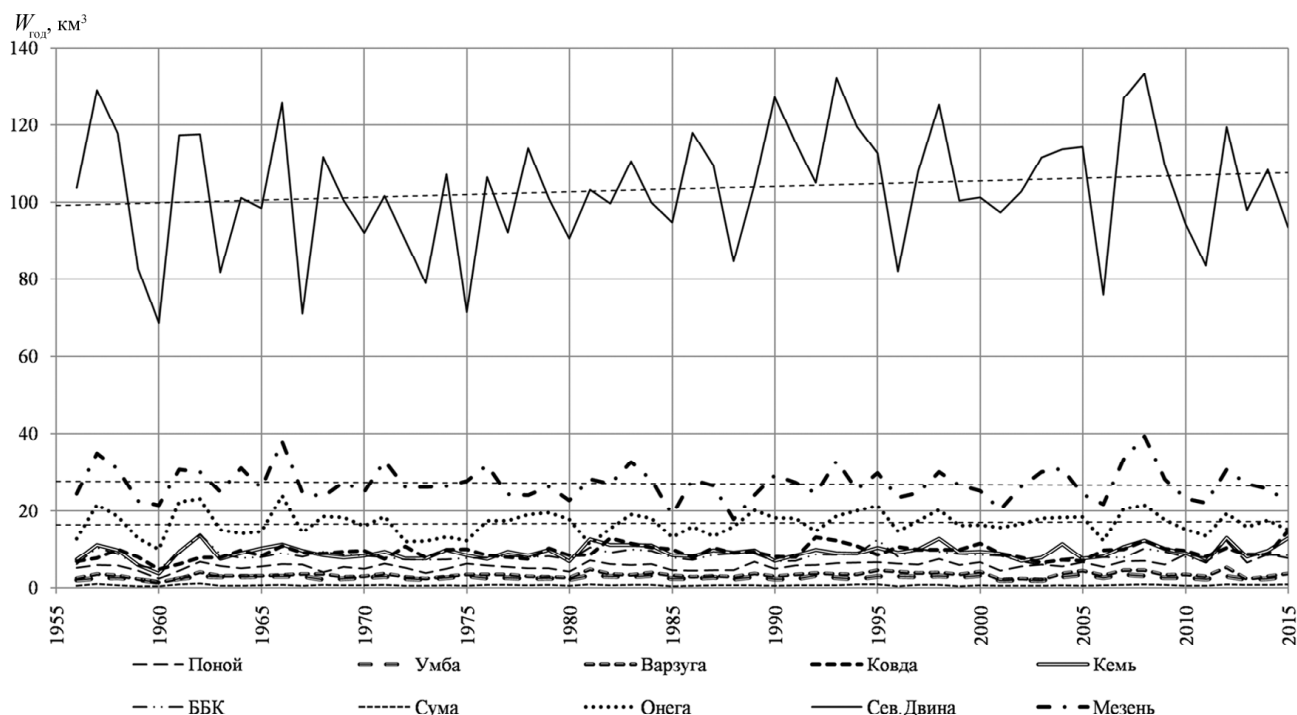


Рис. 1. Годовой объем стока основных притоков Белого моря с линейными трендами

Fig. 1. Annual runoff volume of the main inflows of the White Sea with linear trends

$$Q = cm\Delta T,$$

где Q – тепловой сток ($n \cdot 10^{15}$ Дж); c – удельная теплоемкость (Дж/(кг·°C)); m – масса (кг); ΔT – изменение температуры (°C). Плотность воды принята равной 1000 кг/м³.

Для расчета годового поверхностного водного притока в Белое море использовались временные ряды объема годового стока рек за период с 1956 по 2015 г. из базы данных ИВПС КарНЦ РАН [Карпечко и др., 2018]. Пропуски в наблюдениях заполнены методом простой коррелятивной связи. Коэффициент корреляции во всех рядах был выше 0,8, для некоторых притоков выше 0,9. В сложных случаях, где парная корреляция была незначима (таких водотоков семь), применялся метод множественной корреляции. Для расчета теплового стока использовались значения среднегодовой температуры воды по данным устьевых постов рек [Автоматизированная система..., 2019]. Временные ряды формировались из опубликованной базы данных системы «Росгидромет» [Основные гидрологические характеристики, 1966, 1974, 1978; Многолетние данные..., 1986] и приобретались в Карельском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Чтобы оценить последствия возможных изменений теплового стока в Белое море в будущем, были использованы результаты модельных расчетов, полученные с помощью программного комплекса JASMINE [Толстиков и др., 2017; Chernov et al., 2018], который основан на модели термогидродинамики Северного Ледовитого океана ФЕМО [Яковлев, 2009] и содержит модель пелагической экосистемы моря BFM [Biogeochemical..., 2019]. Комплекс предназначен для совместного моделирования термогидродинамических и биогеохимических процессов в море. Расчеты с шагами 14,75' по долготе (от 10,5 до 12 км), 4,44' по широте (8 км), 5 минут по времени и 16 неравноотстоящими горизонтами по водной толще проводились на вычислительном кластере КарНЦ РАН [Вычислительный..., 2019]. Реки описаны как особые проливы с заданным среднемесячным и годовым стоком. Данные по водному стоку рек взяты из базы данных ИВПС КарНЦ РАН [Карпечко и др., 2018].

Результаты и обсуждение исследований. В результате проделанной работы была получена схема водосбора Белого моря с выделенными секторами притоков (рис. 2), по которым далее рассчитывался тепловой сток рек (табл.).



Рис. 2. Схема водосбора Белого моря с выделенными секторами притоков и площадями водосборов основных рек

Fig. 2. Scheme of the catchment area of the White Sea with sectors of the inflows and catchment areas of the main rivers

Таблица

Тепловой сток в прибрежную зону Белого моря за 1990–2014 гг.

Река	Общая площадь водосбора, км ²	Приток с водосборной площади, км ³	Температура воды в устьях рек, °С	% стока реки от общего объема	Теплосодержание I , кДж/кг	Тепловой сток Q , $n \cdot 10^{15}$ Дж
Воронка						
Секторы н/в*	8 088	2,993	3,9	1,33	32,36	48,42
Горло						
Поной	15 400	5,860	4,0	2,84	16,81	98,51
Секторы н/в*	17 089	6,115	5,0	3,10	42,03	124,77
Бассейн						
Варзуга	9 750	3,302	4,8	1,51	20,17	66,60
Гридина	549	0,170	5,5	0,08	23,12	3,93
Воньга	2 388	0,697	5,6	0,33	23,54	16,41
Кузема	874	0,261	5,7	0,12	23,96	6,25
Поньгома	1 221	0,351	5,9	0,16	24,80	8,70
Секторы н/в*	4 771	1,599	5,3	0,71	141,189	31,72
Кандалакшский залив						
Умба	6 413	2,563	5,1	1,11	21,43	54,93
Нива	12 890	5,334	5,3	2,38	22,28	118,84
Ковда	26 530	9,276	5,5	4,14	23,12	214,46
Кереть	3 350	1,009	5,6	0,46	23,54	23,75
Секторы н/в*	9 378	3,497	5,4	1,60	112,65	77,87
Онежский залив						
Кемь	26 840	8,73	5,8	3,79	24,0	209
Мягрека	398	0,12	5,9	0,06	24,8	2,98
Шуя	930	0,30	6,0	0,15	25,2	7,59
Нижний Выг	27 020	8,42	6,1	3,60	25,6	216
Сума	1 984	0,65	6,2	0,28	26,1	17,0
Колежма	796	0,26	6,2	0,11	26,1	6,78
Нюхча	1 796	0,61	6,3	0,24	26,5	16,2
Малошуйка	569	0,20	5,8	0,09	24,0	4,74
Онега	57 010	16,7	6,6	7,36	27,7	464
Секторы н/в*	11 535	3,61	6,1	1,57	255	93,9
Двинский залив						
Северная Двина	354 000	103	6,1	46,04	25,6	2652
Секторы н/в*	8 529	2,59	6,1	1,13	51,3	66,7
Мезенский залив						
Мезень	75 220	27,0	5,4	11,53	22,7	612
Секторы н/в*	28 085	9,33	5,4	4,16	45,4	217
Все реки	713 403	225	5,6	99,98	1181	5481

Примечание: * – поверхностный приток с секторов неизученных водосборов (по модулю стока, л/(с·км²)); удельная теплоемкость (c) для всех рек принята 4,19 кДж/(кг·°С).

Таким образом, суммарный тепловой сток рек с водосбора Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5481 \cdot 10^{15}$ Дж. Эта величина согласуется со значениями, полученными ранее другими авторами, например Магрицким Д.В., – $5860 \cdot 10^{15}$ Дж [Магрицкий, 2009]. Расхождение показателей можно связать с тем, что в указанной работе использована сумма среднемесячных значений теплового стока, для анализа данных был выбран другой период (1939–2004), а в расчетах применялась удельная теплоемкость в значениях от 4,174 до 4,212 кДж/(кг·°C).

Температура воды в устьях рек, впадающих в Белое море, за 1956–2015 гг. повышалась; особенно ярко положительный тренд выражен с середины 1990-х гг. (рис. 3).

Причины этого повышения, вероятно, связаны с продолжающимся потеплением в высоких широтах Северного полушария [Крышнякова, Малинин, 2008], так как сброс сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий в последние годы либо остался на прежнем уровне, либо (в большей части районов) снизился [Отчет..., 2018]. Известно, что в районе водосбора Белого моря продолжается повышение температуры воздуха [Климат Карелии..., 2004; Белое море..., 2007; Система..., 2010; Толстиков, 2016]. По данным [ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2019], среднесезонная температура воздуха на береговых станциях Белого моря увеличилась на 1,4°C. В последнее десятилетие потепление усилилось, отмечается более раннее вскрытие северных рек и сокращение продолжительности снежного покрова в исследуемом районе [Доклад..., 2019; Красильникова, 2018; Фролова и др., 2018]. Потепление захватывает обширную территорию Северного полушария и проявляется, например, в районе Кольского меридиана [Архив ПИПРО, 2019].

Результаты моделирования. Для моделирования возможных последствий изменения теплового стока рек в Белое море в будущем были использованы результаты расчетов, полученные с помощью программного комплекса JASMINE [Толстиков и др., 2017; Chernov et al., 2018]. Рассматривались четыре сценария изменений теплового стока за 2000–2011 гг.: увеличение устьевой среднемесячной температуры одной из трех основных рек водосбора Белого моря (Северная Двина, Онега, Мезень) на 2°C; снижение устьевой температуры одной из этих рек на 2°C (но не менее, чем до 0°C); увеличение/снижение годового водного стока тех же рек на 30%. Всего 13 экспериментов, считая эталон, в качестве которого использовался модельный немодифицированный ряд значений температуры воды Белого моря. Оценивалась среднесуточная температура воды (по поверхности и по толще) в Белом море и отдельно в каждом районе (крупных заливах, Бассейне, Горле, Воронке) в сравнении с эталоном. Рабочая гипотеза состояла в том, что подобные воздействия на тепловой сток рек водосбора не будут ярко проявляться в изменении температуры воды Белого моря, поэтому для

расчетов был выбран относительно короткий период.

Анализ модельных сценариев показал, что и потепление, и похолодание в первую очередь сказываются на изменчивости весенней и летней температуры поверхностного слоя воды в заливах (рис. 4), на больших глубинах в заливах моря подобное воздействие практически не заметно. В качестве маркеров использовались даты перехода температуры воды в Двинском, Онежском и Мезенском заливах через 0,2; –0,5 и –1°C весной и осенью.

Расчеты показали, что вариации температуры воды и расходов рек не приводят к заметному смещению дат перехода через маркерные значения температуры в поверхностном слое и толще заливов Белого моря, смещения не превышают нескольких часов. По-видимому, это связано с большим значением отношения энтальпии плавления льда и удельной теплоты воды (примерно 80). Более теплая вода несет дополнительную теплоту, которая расходуется на плавление льда, однако приращение массы растаявшего льда не превосходит нескольких процентов. После полного разрушения льда дополнительная теплота уже заметно проявляется в виде приращения температуры поверхностного слоя воды залива. При образовании льда осенью различие снова практически полностью исчезает. Аналогично, хотя и слабее, происходит влияние пониженной температуры (сценарий уменьшения температуры в устьях рек на 2°C), а также вариаций водного стока рек (сценарии изменений водного стока на 30%). Отметим, что климатическое потепление, одинаковое для всех экспериментов, существенно сильнее, чем тренд за счет более теплой воды (он статистически незначим по расчетным данным).

Таким образом, модельные исследования демонстрируют устойчивость термогидродинамической системы Белого моря к внешним тепловым воздействиям рек его водосбора. Повышение/понижение температуры в устьях крупных рек на 2°C, равно как и повышение/снижение водного стока рек на 30%, не привело к существенным изменениям температуры воды районов Белого моря. Расчеты показывают, что такое локальное воздействие достаточно быстро «забывается» системой, на что ранее обращали внимание другие авторы [Семенов, 2004; Белое море..., 2007]. Однако, поскольку эти изменения наблюдаются в теплую часть года, когда сходит лед, увеличивается количество поступающей солнечной радиации, на реках водосбора проходит половодье, возрастает поступление биогенных элементов и отмечается интенсификация всех биогеохимических процессов [Толстиков, Чернов, 2019], такое воздействие может быть существенным для пелагической экосистемы Белого моря.

Выводы:

– расчет по выделенным секторам показал, что тепловой сток с водосборной площади Белого моря за 1990–2014 гг. составил $5481 \cdot 10^{15}$ Дж. Эта вели-

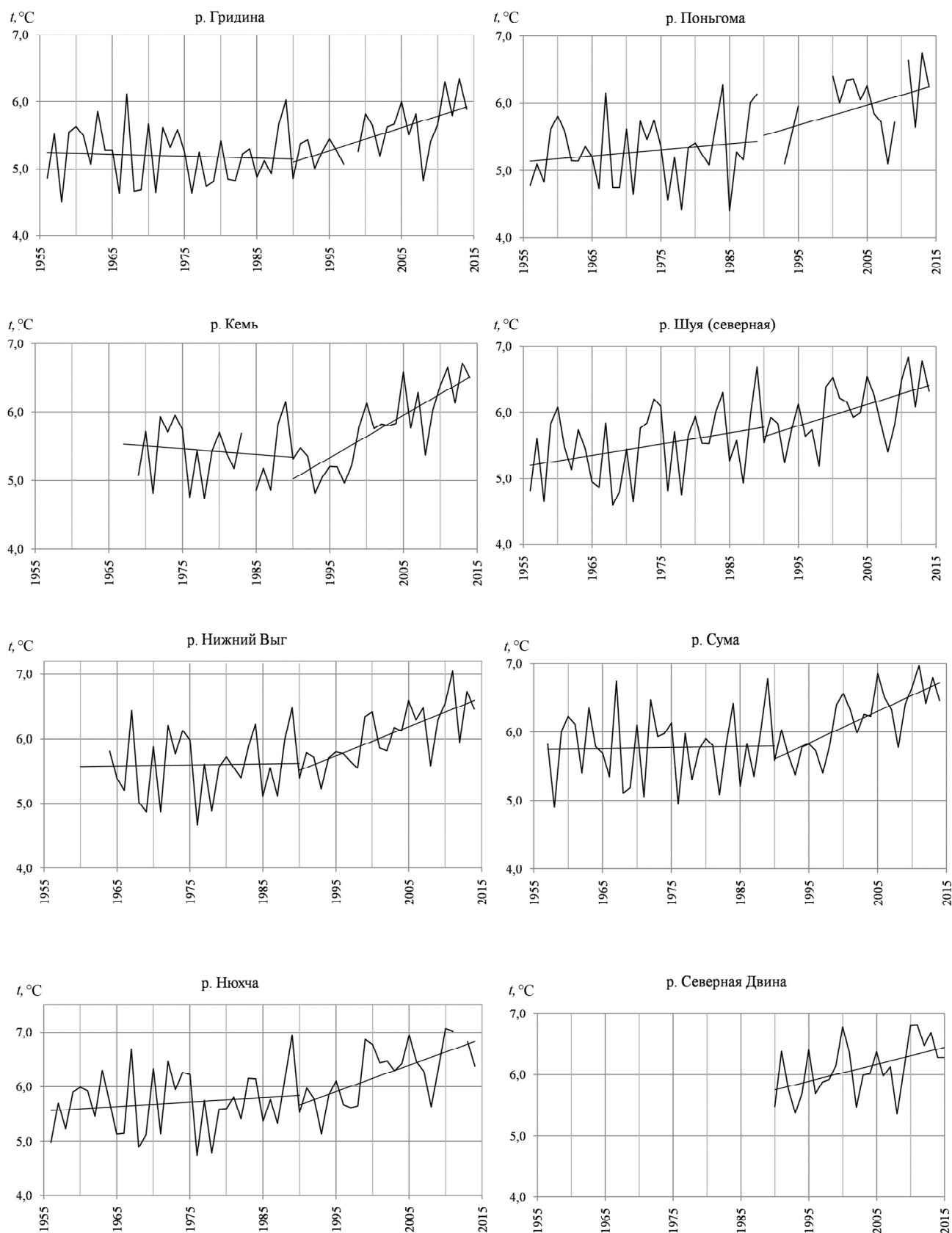


Рис. 3. Среднегодовая температура воды притоков Белого моря в устьях (линейные тренды построены отдельно для 1956–1990 и 1990–2014 гг.)

Fig. 3. Mean annual water temperature at the mouths of the inflows of the White Sea (linear trends are drawn separately for the periods 1956–1990 and 1990–2014)

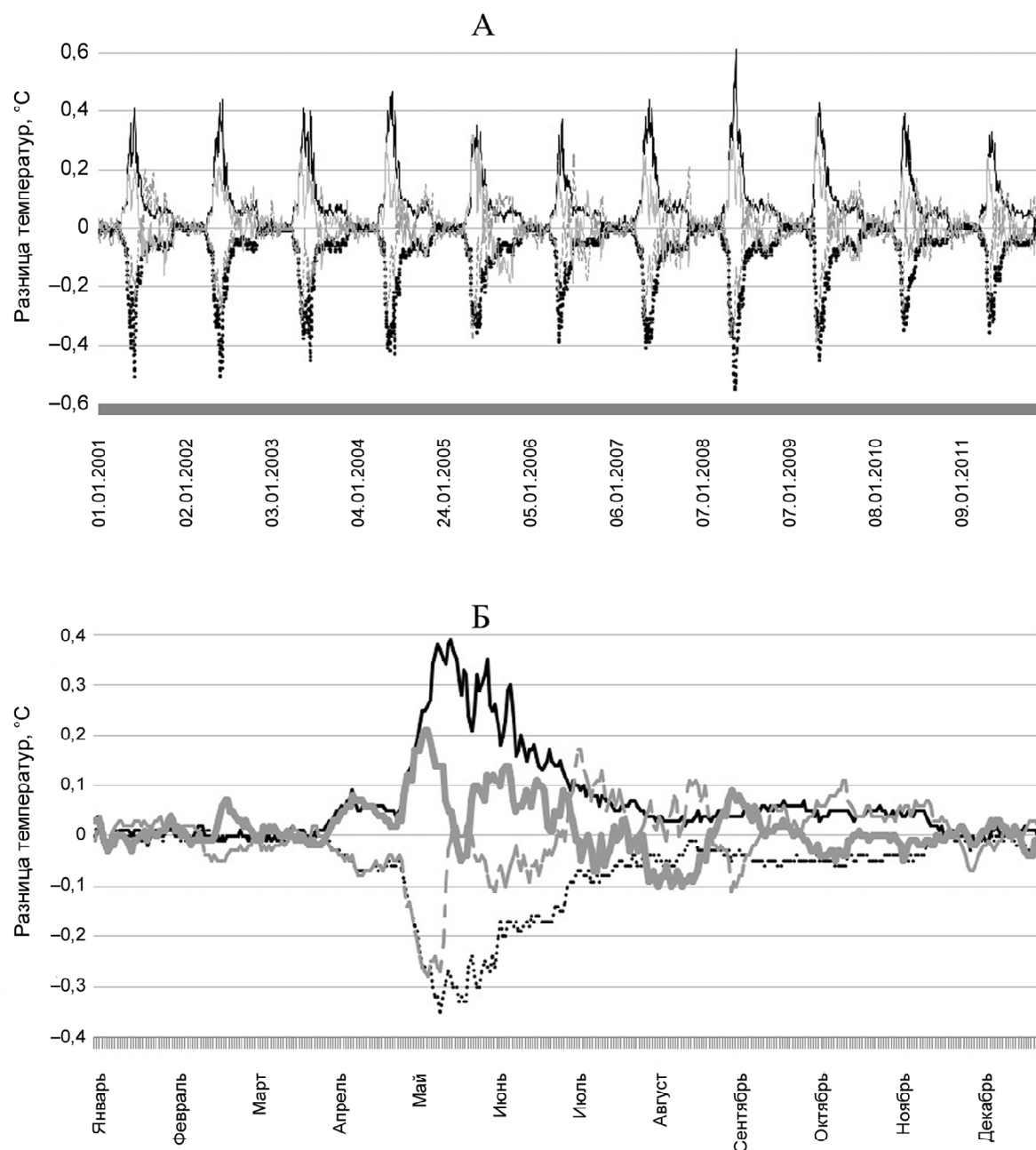


Рис. 4. Разница между средней температурой поверхностного слоя Двинского залива и эталонного расчета при модельной модификации температуры и расхода р. Северной Двины (1 – +2°C, 2 – -2°C, 3 – +30%, 4 – -30% расхода реки) за весь модельный период (А) и для 2010 г. (Б)

Fig. 4. The difference between the mean temperature of the surface layer of the Dvina Bay and the model analysis for the modified river runoff of Severnaya Dvina (1 – +2°C, 2 – -2°C, 3 – +30%, 4 – -30% of the runoff) simulation and the standard series, for the whole modeled period (A) and for 2010 (B)

чина согласуется со значениями, ранее полученными другими авторами;

– выявлено потепление в устьях рек водосбора Белого моря, которое особенно заметно с 1990 г. Указанная тенденция, вероятно, связана с продолжающимся потеплением в высоких широтах Северного полушария, так как объем сточных вод от промышленных и коммунально-бытовых предприятий на водосборе в последние годы либо остался без

изменений, либо (на большей части территории) продолжает сокращаться;

– расчеты на программном комплексе JASMINE показали, что повышение или понижение среднемесячной температуры воды в устьях рек в первую очередь сказывается на изменчивости температуры воды в заливах моря в конце весны и летом, однако амплитуда колебаний ее значений не достигает больших величин (несколько десятых долей °C);

– влияние модельного повышения или понижения температуры воды в устьях крупных рек на 2°C, равно как и повышение или снижение водного стока рек на 30% в конце лета и осенью, заметно слабее по сравнению с весенними месяцами. С началом

становления ледяного покрова в заливах оно полностью исчезает. Смещения модельных сроков ледообразования и разрушения льда при изменении среднемесячной температуры рек водосбора и их стока не превосходят нескольких часов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Госзадания ИВПС КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арсеньева Н.Я. Многолетние изменения теплового состояния вод Белого моря // Труды ГОИН. 1960. Вып. 55. С. 30–63.

Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 335 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Белое море. Справочник «Проект «Моря СССР». Т. II. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет, 2019. 79 с.

Елисов В.В., Иванова Г.П. Особенности формирования термохалинной структуры вод Белого моря // Материалы международного науч. конф. «Европейский Север России: прошлое, настоящее, будущее». Архангельск, 1999. С. 61–96.

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

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

Карпечко В.А., Махальская Н.И., Балаганский А.Ф., Толстиков А.В. Сток рек бассейна Белого моря // Свид. о гос. рег. базы данных № 2018621833. 19 ноября 2018 г.

Карпечко Ю.В., Нестеренко И.М., Осипов В.В. Изменения стока с осушаемых болот и заболоченных земель при их эксплуатации в сельскохозяйственном производстве // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 4. С. 401–406.

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.

Красильникова В.В. Анализ многолетней изменчивости приземной температуры воздуха в районе Двинского залива Белого моря за период 1915–2015 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 110–119.

Крышнякова О.С., Малинин В.Н. Особенности потепления климата европейской территории России в современных условиях // Общество. Среда. Развитие. 2008. № 2. С. 115–124.

Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 210 с.

Леонов Е.А. Изменение температуры воды крупных рек под влиянием хозяйственной деятельности // Межвед. сб. «Исследования формирования речного стока и его расчеты». Л.: ЛПИ, 1981. Вып. 76. С. 107–116.

Лоция Белого моря. СПб.: Мин. обороны СССР, ГУНиО, 1995. № 1110. 336 с.

Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. С. 69–77.

Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I. Вып. 8: Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 392 с.

Наумов А.Д., Федяков В.В. Вечно живое Белое море. СПб.: Изд-во СПб. городского дворца творчества юных, 1993. 336 с.

Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 700 с.

Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 774 с.

Основные гидрологические характеристики. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 670 с.

Отчет о научно-исследовательской работе по проекту «Динамика водных экосистем внутренних морей Северо-Запада России (заключительный)». Петрозаводск: ИВПС КарНЦ РАН, 2018. 319 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 2: Карелия и Северо-Запад / под ред. Е.Н. Таракановой. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 700 с.

Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. № 1203. 2017. 32 с.

Семенов Е.В. Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 128–141.

Система Белого моря. Природная работа по водосбору Белого моря. М.: Научный мир, 2010. Т. 1. 480 с.

Толстиков А.В. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М.: ГЕОС, 2016. 212 с.

Толстиков А.В., Чернов И.А. Изменчивость биогеохимических процессов в Белом море для разных климатических условий по данным моделирования // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 6. С. 1–11. DOI: 10.17076/eb95.

Толстиков А.В., Чернов И.А., Мурзина С.А., Мартынова Д.М., Яковлев Н.Г. Разработка комплекса Green JASMINE для изучения и прогнозирования состояния экосистем // Труды КарНЦ РАН. 2017. № 5. С. 23–32. DOI: 10.17076/eb501.

Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишников Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. Гидрологические исследования / под ред. В.М. Котлякова, Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабановой. М.: Издательский дом «Кодекс», 2018. Сб. 145. С. 233–251.

Яковлев Н.Г. Воспроизведение крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948–2002 гг. Ч. 1: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 3. С. 1–16.

Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study, *Journal of Marine Systems*, 2018, no. 187, p. 23–35.

Liu B., Yang D. Siberian Lena River heat flow regime and change, *Cold Region Hydrology in a Changing Climate*, Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011, IAHS Publ., 346, 2011, p. 71–76.

Mackay J.R., Mackay D.K. Heat energy of the Mackenzie River, *Further Hydrologic Studies in the Mackenzie Valley*, Canada (Environmental-Social Committee Northern Pipelines. Task Force on Northern Oil Development report, Report 74–35), Ottawa, Information Canada, 1975, p. 1–23.

Prowse T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: A review of contributing areas, *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* Lewis E.L., Jones E.P., Lemke P., Prowse T.E., Wadhams P. (eds), Proc. NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia, 27 April – 1 May 1998, Kluwer Acad., Norwell, Massachusetts, USA, 2000, p. 269–280.

Электронные ресурсы

Автоматизированная система учета наблюдательных подразделений Росгидромета. URL: http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/selviewu.jsp (дата обращения 21.12.2020).

Архив ПИНРО. URL: <http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec1.htm> (дата обращения 21.12.2020).

Двинско-Печорское бассейновое водное управление. URL: <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv> (дата обращения 21.12.2020).

Вычислительный кластер КарНЦ РАН. URL: <http://cluster.krc.karelia.ru/> (дата обращения 21.12.2020).

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: <http://meteo.ru/component/content> (дата обращения 21.12.2020).

Biogeochemical Flux Model (BFM). URL: <http://bfm-community.eu> (дата обращения 21.12.2020).

Поступила в редакцию 13.08.2020

После доработки 16.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

A.V. Tolstikov¹, A.F. Balaganskiy²,
I.A. Chernov³

ESTIMATION OF HEAT RUNOFF OF THE RIVERS IN THE WHITE SEA CATCHMENT AREA

Heat runoff of the rivers of the White Sea catchment area and its variability are discussed. A representative time span of 1990–2014 has been chosen to estimate the annual variability of water and heat runoff and the water temperature in river mouths of the White Sea catchment area. A standard formula was used for estimating the heat runoff; partial watersheds of individual rivers were determined using the 1:1 000 000 maps and refined using 1:200 000 maps. For the period of 1990–2014 the heat runoff from the White Sea catchment area was $5480.94 \cdot 10^{15}$ J. The increase in water temperature in river mouths of the White Sea catchment area is shown for the period of 1956–2015, which was particularly pronounced since 1990. To identify the consequences of heat runoff variability, we used the results of mathematical modeling by the JASMINE software package. Thirteen numerical experiments were carried out; the dates of water temperature transition through 0,2; –0,5 and –1°C in spring and autumn for the Dvina, Onega and Mezen bays were used as markers. The experiments have shown that an increase or decrease in the mean monthly water temperature in rivers by 2°C, as well as the change of their water runoff by 30%, would not lead to a significant change in the timing of ice formation and ice destruction in the White Sea bays, but will only change water temperature during the warm season. The amplitude of temperature fluctuations will not be great, i.e. just several tenths of a degree of Celsius. The shift in model dates of ice formation and ice destruction under changing mean monthly temperature of rivers and their runoff in the catchment area would not exceed several hours. During both warming and cooling, the spring and summer temperatures of the surface sea layer in bays change first of all; such an effect is practically unnoticeable at greater depths. The results of the model studies prove the resistance of thermohydrodynamic system of the White Sea to external thermal effects of the rivers within its catchment area.

Key words: river runoff, climate, warming, modeling, JASMINE

Acknowledgements. The work was carried out under the theme of the State Task for the Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS.

¹ Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, Acting Head of the Laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail:* alexeytolstikov@mail.ru

² Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Geography and Hydrology, Chief Hydrologist; *e-mail:* kar_shuia@mail.ru

³ Institute of Applied Mathematical Research of Karelian Research Centre of the RAS, Laboratory of Natural-Technical System Modelling, Senior Scientific Researcher, PhD in Phys. and Math.; *e-mail:* iachernov@yandex.ru

REFERENCES

- Arsen'yeva N.Ya. [Long-term changes in the thermal state of waters of the White Sea], *Trudy GOIN* [Proceedings of GOIN], 1960, iss. 55, p. 30–63. (In Russian)
- Beloye more i yego vodosbor pod vliyaniyem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov [The White Sea and its catchment area under the impact of climatic and anthropogenic factors], N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevnik (eds.), Petrozavodsk, Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2007, 335 p. (In Russian)
- Chernov I., Lazzari P., Tolstikov A., Kravchishina M., Iakovlev N. Hydrodynamical and biogeochemical spatiotemporal variability in the White Sea: A modeling study, *Journal of Marine Systems*, 2018, no. 187, p. 23–35.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2018 god [A Report on Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2018], Moscow, Rosgidromet Publ., 2019, 79 p. (In Russian)
- Elisov V.V., Ivanova G.P. [Specific features of thermohaline structure of waters of the White Sea], *Evropeyskiy Sever Rossii: proshloye, nastoyashcheye, budushcheye* [European North of Russia: past, present, future], Materialy mezhdunar. nauch. konf., Arkhangel'sk, 1999, p. 61–96. (In Russian)
- Elshin Yu.A. Teplovoj stok rek evropeyskoj territorii SSSR [Heat runoff of the rivers of the European territory of Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, 1981, no. 9, p. 85–93. (In Russian)
- Elshin Yu.A. Teplovoj stok v morya Severnogo Ledovitogo okeana [Heat runoff to the Arctic Ocean seas], *Vodnye resursy*, 1988, no. 5, p. 63–68. (In Russian)
- Frolova N.L., Magrickij D.V., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Povalishnikova E.S. Antropogennyye i klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya stoka vody i ledovykh yavleniy rek Rossiyskoy Arktiki [Runoff and ice phenomena dynamics on the rivers of Russian Arctic due to anthropogenic and climate changes], *Voprosy geografii, Gidrologicheskie issledovaniya*, V.M. Kotlyakov, N.I. Koronkevich, E.A. Barabanova (eds.), Moscow, Izdatel'skiy dom "Kodeks", 2018, iss. 145, p. 233–251.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Beloye more. Spravochnik [Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas of the USSR. The White Sea. The Reference Book], Projekt "Morya SSSR", vol. II, iss. 1. Gidrometeorologicheskiye usloviya, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 240 p. (In Russian)
- Karpechko V.A., Makhal'skaya N.I., Balaganskiy A.F., Tolstikov A.V. Stok rek basseyna Belogo morya [River runoff within the White Sea catchment area], *Svid. o gos. reg. bazy dannykh* no. 2018621833, 19 noyabrya 2018 g. (In Russian)
- Karpechko Yu.V., Nesterenko I.M., Osipov V.V. Variations in runoff from drained swamps and swampy lands involved in agricultural production, *Water resources*, 2004, vol. 31, no. 4, p. 363–368.
- Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyaniye na vodnyye ob'yekty i vodosbory [Climate of Karelia: variability and influence on water objects and catchment areas], N.N. Filatov (ed.), Petrozavodsk, KarNTS RAN Publ., 2004, 224 p. (In Russian)
- Krasil'nikova V.V. Analiz mnogoletney izmenchivosti prizemnoy temperatury vozdukh v rayone Dvinskogo zaliva Belogo morya za period 1915–2015 gg. [Analysis of the long-term variability of air temperature in the area of the Dvina Bay of the White Sea during 1915–2015], *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2018, no. 2(368), p. 110–119. (In Russian)
- Kryshnyakova O.S., Malinin V.N. Osobennosti potepeniya klimata Yevropeyskoy territorii Rossii v sovremennykh usloviyakh [Specific features of actual climate warming on the European territory of Russia], *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye*, 2008, no. 2, p. 115–124. (In Russian)
- Kuchling H. Physik. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1980, 210 p.
- Leonov E.A. [Changes of water temperature of large rivers under the economic activities], *Issledovaniya formirovaniya rechnogo stoka i ego raschety* [Investigation of the river runoff formation and its calculations], Leningrad, LPI Publ., 1981, iss. 76, p. 107–116. (In Russian)
- Liu B., Yang D. Siberian Lena River heat flow regime and change. Cold Region Hydrology in a Changing Climate (Proceedings of symposium H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011), IAHS Publ., 346, 2011, p. 71–76.
- Lotsiya Belogo morya [Pilots of the White Sea], Saint-Petersburg, Min. oborony SSSR, GUNiO Publ., 1995, no. 1110, 336 p. (In Russian)
- Mackay, J.R., Mackay, D.K. Heat energy of the Mackenzie River, *Further Hydrologic Studies in the Mackenzie Valley*, Canada (Environmental-Social Committee Northern Pipelines. Task Force on Northern Oil Development report, Report 74–35), Ottawa, Information Canada, 1975, p. 1–23.
- Magritskiy D.V. Teplovoj stok rek v morya Rossiyskoy Arktiki i yego izmeneniya [Heat runoff to the Russian Arctic seas and its changes], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 5, p. 69–77. (In Russian)
- Mnogoletnie dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi [Long-term data on the regime and resources of the continental surface waters], vol. I, iss. 8, Bassejny rek Baltijskogo morya, Onezhskogo i Ladozhskogo ozer. Gidrometeoizdat Publ., 1986, 392 p.
- Naumov A.D., Fedyakov V.V. Vечно живое Белое море [Ever-living White Sea], St-Peterburg, SPb gorod. dvorets tvorchestva yunych Publ., 1993, 336 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1966, 700 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1974, 774 p. (In Russian)
- Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki [Basic hydrological characteristics], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 670 p. (In Russian)
- Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote po projektu "Dinamika vodnykh ekosistem vnutrennih morey Severo-Zapada Rossii (zaklyuchitel'nyy)" [Report on the research on the project Dynamics of water ecosystems of the inner seas of the North-West of Russia (final)], Petrozavodsk, IWPS KarNTS RAN Publ., 2018, 319 p. (In Russian)
- Prowse, T.D., Flegg P.O. Arctic river flow: A review of contributing areas, *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean* (ed. by E.L. Lewis, E.P. Jones, P. Lemke, T.E. Prowse, P. Wadhams) (Proc. NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia, 27 April – 1 May 1998), Kluwer Acad., Norwell, Massachusetts, USA, 2000, p. 269–280.
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost' [Resources of surface waters in the USSR. State of hydrological knowledge], vol. 2, Kareliya i Severo-Zapad. Ye.N. Tarakanova (ed.), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 700 p. (In Russian)
- Semenov E.V. Numerical modeling of White Sea dynamics and monitoring problem, *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*, 2004, vol. 40, no. 1, p. 114–126.
- Sistema Belogo morya. Prirodnaya sreda vodosbora Belogo morya [The White Sea system. Natural environment of the White Sea catchment area], Moscow, Nauchny mir Publ., 2010, vol. 1, 480 p. (In Russian)
- Tolstikov A.V., Chernov I.A. Izmenchivost' biogeokhimicheskikh protsessov v Belom more dlya raznykh klimaticheskikh usloviy po dannym modelirovaniya [Variability of biogeochemical processes in the White Sea under different climate conditions: the modeling approach], *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, no. 6, p. 92–102, DOI: 10.17076/eb95. (In Russian)
- Tolstikov A.V. Izmenchivost' temperatury poverkhnostnogo sloya Belogo morya [Temperature variability in the surface layer

of the White Sea], Moscow, GEOS Publ., 2016, 212 p. (In Russian)

Tolstikov A.V., Chernov I.A., Murzina S.A., Martynova D.M., Yakovlev N.G. Razrabotka kompleksa Green JASMINE dlya izucheniya i prognozirovaniya sostoyaniya ekosistem Belogo moraya [Design and application of the Green JASMINE complex for the study and prediction of the ecosystems state and variability of the White Sea], *Trudy KarNTS RAN*, 2017, no. 5, p. 23–32, DOI: 10.17076/eb501. (In Russian)

WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO, 2017, no. 1203, 32 p.

Yakovlev N.G. Reproduction of the large-scale state of water and sea ice in the Arctic Ocean in 1948–2002, Pt. I, Numerical model, *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*, 2009, vol. 45, no. 3, p. 357–371.

Web-sources

Arhiv PINRO, URL: <http://www.pinro.ru/labs/hid/kolsec1.htm> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Avtomatizirovannaya sistema ucheta nablyudatel'nykh podrazdeleniy Rosgidrometa, URL: http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/selviewu.jsp (access date 21.12.2020). (In Russian)

Biogeochemical Flux Model (BFM), URL: <http://bfm-community.eu> (access date 21.12.2020).

Dvinsko-Pechorskoe bassejnovoe vodnoe upravlenie, URL: <http://www.dpbvu.ru/deyatelnost/skiovo-vklyuchaya-ndv> (access date 21.12.2020). (In Russian)

FGBU "VNIIGMI-MCD", URL: <http://meteo.ru/component/content> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Vychislitel'nyy klaster KarNC RAN, URL: <http://cluster.krc.karelia.ru/> (access date 21.12.2020). (In Russian)

Received 13.08.2020

Revised 16.10.2020

Accepted 06.11.2020