

УДК 551.583.1:556.535.4

ДИНАМИКА ТЕПЛОВОГО СТОКА РЕКИ СЕВЕРНАЯ ДВИНА

К. С. Двоеглазова, В. А. Шелутко

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

По результатам численных расчетов объема теплового стока реки Северная Двина были определены два временных периода его изменения. Выявлена неоднородность изменений теплового стока во времени, согласующаяся с полученными результатами по температуре воды за период открытого русла. Рассматриваемые временные периоды изменения термического режима стока бассейна реки Северная Двина установлены по изменениям в приповерхностной температуре воздуха, а именно по данным о слабом похолодании с 1950 по 1975 г. и интенсивном потеплении с 1976 года по настоящее время. Построен график интегральной кривой значений средних годовых расходов воды в период с 1950 по 2015 г. по замыкающему створу реки Северная Двина – с. Усть-Пинега, на котором выявлен период превышения средних значений начиная с 1976 года. Установлено повышение значений температуры воды за период открытого русла по всем рассматриваемым пунктам наблюдений после 1976 года. Вычислены среднемесячные объемы теплового стока в период открытого русла (май–октябрь) за два временных интервала и показано превышение значений с 1976 года по всем пунктам в мае и по большинству пунктов в июле–октябре; в июне обнаружено уменьшение теплового стока по всем пунктам. Выделены особенности изменчивости объема теплового стока для всех рассматриваемых пунктов наблюдения. Представлены линии тренда на понижение в первый период и на повышение во второй период. Получено, что термический режим стока реки Северная Двина в некоторой степени согласуется с изменением климата, а в частности, с его потеплением в арктической и приарктической зонах России.

Ключевые слова: климат; потепление; тепловой сток; температура воды; Северная Двина.

K. S. Dvoeglazova, V. A. Shelutko. HEAT FLOW DYNAMICS OF THE NORTHERN DVINA RIVER

Based on the results of numerical calculations of the heat flow volume in the Northern Dvina River, two time periods of changes in the characteristic were identified. Changes in the thermal runoff over time proved to be heterogeneous, which is consistent with the results obtained for water temperature over the ice-free period. The two time periods in the heat flow regime of the Northern Dvina catchment were distinguished by changes in the near-surface air temperature, namely, a slight cooling from 1950 to 1975 and intense warming from 1976 to the present. The integral curve of average annual discharge through the Northern Dvina outlet gauging station at Ust-Pinega village was plotted for the period from 1950 to 2015, showing values exceeding the mean in the period starting 1976. An increase in the water temperature values over the ice-free period has been observed for all the observation sites since 1976. The average monthly volumes of heat flow during the ice-free period (May–October) were calculated for the two periods, showing

that since 1976 the values were elevated at all sites in May and at most sites in July–October, whereas June heat flow was lower at all sites. The features of heat flow volume variation at the Ust-Pinega outlet are highlighted. The trend lines were declining in the first period and rising in the second period. Hence, the thermal regime of the Northern Dvina River flow changes more or less in line with the climate change, in particular its warming in the north.

Key words: climate; warming; heat flow; water temperature; the Northern Dvina.

Введение

Одной из основных климатических переменных является приповерхностная температура воздуха с метеорологических постов и станций [Климаты..., 2010; Груза, Ранькова, 2012].

Между тем следует отметить, что в приарктической зоне России метеорологические станции и посты расположены в черте населенных пунктов или на прилегающих к ним территориях. Это в большей или меньшей степени сказывается на показаниях температуры воздуха. Кроме того, с развитием обжитых территорий эти показания увеличиваются (положительные аномалии температуры воздуха в некоторых городах арктической зоны имеют среднюю зимнюю интенсивность от 0,7 до 1,4 °С) [Константинов, Варенцов, 2018].

Может ли повышение температуры воздуха в районе этих станций достаточно точно отражать общее повышение приповерхностной температуры воздуха в приарктической зоне России? Или повышение температуры по данным метеостанций отражает повышение за счет развития городов и промышленных зон и относится только к городским и примыкающим к ним территориям?

В этой связи нас заинтересовали другие возможные показатели изменения климата, в частности, характеристики речного стока (они в какой-то степени являются показателями изменения климатических условий по всей площади водосбора).

Исходя из этого, в качестве предмета исследований были выбраны характеристики речного стока р. Северная Двина: температура воды, расход воды и тепловой сток за имеющийся период наблюдений. При этом учитывалось, что антропогенные нарушения стока этой реки сравнительно незначительны: здесь нет водохранилищ и промышленность развита меньше, чем в бассейнах других крупных рек Северо-Запада [Душкова, Евсеев, 2011; Государственный..., 2018].

Еще одной причиной выбора бассейна реки Северная Двина как основного объекта данного научного исследования является его сравни-

тельно хорошая гидрологическая изученность [Ресурсы..., 1972; Государственный..., 2019].

Ранее [Двоеглазова и др., 2020] были исследованы ряды температуры воды за период открытого русла, продолжительность ледостава и максимальная толщина льда за период с 1950 по 2016 г. для 10 створов бассейна реки Северная Двина. В данной работе предметом исследования является объем теплового стока по длине реки Северная Двина.

В изменениях климата, судя по литературным источникам, выделяются два основных интервала: слабое похолодание с 1946 по 1975 г. и интенсивное потепление с 1976 года [Климаты..., 2010; Груза, Ранькова, 2012; Государственный..., 2018]. Так, за период 1976–2016 гг. повышение температуры приземного слоя воздуха в Северо-Западном федеральном округе составило 2,24 °С [Доклад..., 2019]. Учитывая это обстоятельство, для оценки изменений теплового стока по реке Северная Двина проводилось сравнение данных за два периода наблюдений: с 1950 по 1975 и с 1976 по 2016 год. Так как тепловой сток реки в период открытого русла определяется расходом и температурой воды, необходимо рассмотреть отдельно эти составляющие.

Таким образом, целью работы, с одной стороны, является исследование влияния изменения климата на тепловой сток бассейна реки Северная Двина, а с другой – проверка изменчивости климата по данным о тепловом стоке.

Материалы и методы

При анализе использовались данные гидрологических ежегодников: ежедневные значения расхода на трех створах р. Северная Двина и створах двух ее притоков, а также температуры воды за период 1950–2015 гг., которые для статистической обработки были усреднены по месяцам (период открытого русла: май–октябрь) и годам (весь период наблюдений, до и после 1976 года).

В табл. 1 представлены основные используемые в анализе характеристики пунктов наблю-

Таблица 1. Характеристики пунктов наблюдений и расходов воды реки Северная Двина
Table 1. Description of the observation points and water flow rates of the Northern Dvina River

Река – створ River – target	Расстояние от устья, км Distance from the estuary, km	Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	Период наблюдений Observation period	Средний расход, м ³ /с Average flow rate, m ³ /s	Объем стока, км ³ /год Flow volume, km ³ /year	Ср. квадр. отклонение, м ³ /с Mean square deviation, m ³ /s
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	39	49200	1950–2015	436	13,7	106
р. Вычегда – д. Федяково Vychehda r. – Fedyakovo v.	73	112000	1962–2003	1080	34,1	188
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	528	220000	1950–2015	1970	62,1	335
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	276	285000	1950–2015	2580	81,2	440
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	137	348000	1950–2015	3280	103	570

дений и характеристики средних годовых расходов воды.

Месячная и годовая величины теплового стока рассчитывались по следующей формуле [Магрицкий, 2009]:

$$W_t = c_p \rho t W,$$

где c_p – удельная теплоемкость воды (изменяется от 4,174 до 4,212 кДж/(кг·°C) при t от 0 до 30 °C); ρ – плотность пресной воды (1000 кг/м³); t – средняя за месяц/год температура воды (°C); W – объем жидкого стока за месяц/год (м³).

Основным методом выявления изменения климата является статистический анализ рядов наблюдений за весь возможный период наблюдений [Груза, Ранькова, 2012].

Для выявления тесноты связи между показателями (ряды температуры воздуха и воды за весь временной ряд до и после 1976 года) был рассчитан коэффициент корреляции. Значимость связи проверялась с помощью произведения критерия Стьюдента на среднюю квадратическую погрешность коэффициента корреляции. Если полученное значение оказывалось в критической области, то связь – значима [Шелутко, 1991].

Для исходных рядов температуры воды, расхода воды и рассчитанных рядов объема теплового стока была проведена проверка однородности значений по математическому ожиданию (критерий Стьюдента) [Шелутко, 1991; Рождественский и др., 2010]. При расчете сопоставлялись значения исходных рядов до и после 1976 года. Гипотеза об однородности двух рядов считается опровергнутой при

значении критерия Стьюдента более 1,67 (для д. Федяково – 1,70).

Для рядов значений расхода воды была построена интегральная кривая, которая представляет собой нарастающую сумму среднегодовых расходов воды [Урусова, 2015].

Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха изменяется от 1,7 °C на юге до 1,1 °C на севере бассейна реки Северная Двина. При анализе периодов до и после 1976 года прослеживается тенденция на повышение температуры воздуха (увеличение на 0,7 °C за второй период для всей территории бассейна).

На рис. 1 представлена временная изменчивость температуры воздуха, осредненная за май–октябрь, по метеостанции г. Архангельска и температуры воды за период открытого русла по створу с. Усть-Пинега, а также тренды рядов за два временных периода.

Как видно из рисунка, тренды за период с 1976 по 2015 г. идут на повышение (статистически значимы). За период до 1976 года у трендов наблюдается небольшое повышение, но статистически они незначимы.

Межгодовой ход температуры воды в основном повторяет изменения температуры воздуха. В табл. 2 представлены результаты расчета коэффициента корреляции для температуры воздуха и температуры воды в устьевой зоне реки Северная Двина.

Коэффициент корреляции показал тесную связь между значениями температуры воздуха

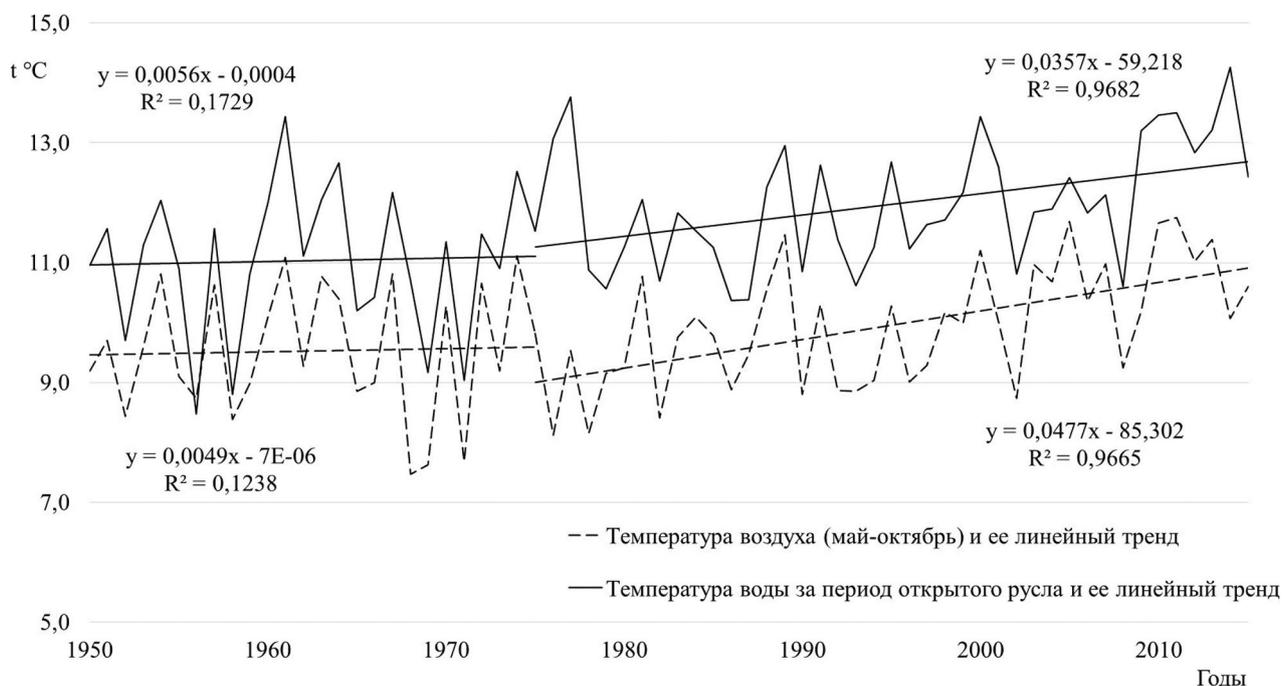


Рис. 1. Временная изменчивость температуры воздуха (г. Архангельск) и температуры воды (с. Усть-Пинега) за период открытого русла

Fig. 1. Temporal variability of air temperature (Arkhangelsk city) and water temperature (Ust-Pinega village) for the open channel period

Таблица 2. Коэффициент корреляции между температурой воздуха (г. Архангельск) и температурой воды (с. Усть-Пинега) за период открытого русла

Table 2. Correlation coefficient between air temperature (Arkhangelsk city) and water temperature (Ust-Pinega village) for the open channel period

Период Period	r	$t_a \cdot \sigma_r$	Значимость r Significance of r
1950–2015	0,74 ± 0,06	0,21	Значим Significant
1950–1975	0,85 ± 0,06	0,34	«
1976–2015	0,64 ± 0,1	0,27	«

Примечание. r – коэффициент корреляции, t_a – статистика Стьюдента, σ_r – средняя квадратическая погрешность коэффициента корреляции.

Note. r – correlation coefficient, t_a – Student's statistics, σ_r – mean square error of the correlation coefficient.

и воды в низовье реки Северная Двина. Расчеты для других пунктов наблюдений по бассейну реки показали схожий результат: за весь временной период коэффициент корреляции колебался от 0,69 (г. Великий Устюг) до 0,78 (г. Котлас).

Стоит отметить, что связь, близкая к функциональной (0,85), наблюдается для периода до интенсивного потепления, что может говорить о влиянии других метеорологических или антропогенных факторов на изменение температуры воды во второй период.

Температура воды

Река Северная Двина имеет близкие значения температуры воды по всему протяжению реки, лишь немного снижающиеся к устьевой части на 0,5–1,0 °C [Ресурсы..., 1972]. Единственным притоком, вносящим более холодные воды, является река Вычегда, что связано с климатическими условиями территории (продолжительный период с ледовыми явлениями до 220 дней) [Агафонова, Фролова, 2007].

В табл. 3 представлены значения температуры воды за период открытого русла по всему периоду наблюдений и отдельно за периоды 1950–1975 и 1976–2015 гг.

Как следует из анализа данных, представленных в таблице 3, по всем пунктам наблюдений и во все месяцы открытого русла значения температуры воды за период 1976–2015 гг. превышают значения температуры воды в первый период (в среднем на 0,77 °C), а по данным пункта наблюдений с. Усть-Пинега среднемесячная температура воды в рассмотренные месяцы возросла от 0,8 до 1,7 °C.

В табл. 4 приведена оценка однородности температуры воды за два временных периода.

Проверка однородности температуры воды показала, что 80 % рядов значений являются неоднородными при сравнении двух времен-

Таблица 3. Температура воды (°C) за период открытого русла в различные периоды

Table 3. Water temperatures in °C for the open channel period in various periods

Река – створ River – target	V	VI	VII	VIII	IX	X
1950–2015						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	8,6	16,9	20,3	17,6	10,8	3,9
р. Вычегда – д. Федяково Vychegda r. – Fedyakovo v.	5,7	14,6	19,1	16,5	9,9	3,2
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	8,2	16,1	19,8	17,3	10,7	3,7
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	7,5	15,7	19,7	17,2	10,8	4,0
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	5,0	14,2	19,0	16,7	10,4	3,4
1950–1975						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	7,6	16,3	19,7	17,4	10,7	3,6
р. Вычегда – д. Федяково Vychegda r. – Fedyakovo v.	5,4	13,4	18,5	16,1	9,5	2,6
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	7,5	15,5	19,3	17,0	10,3	3,6
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	6,8	15,1	19,2	17,1	10,5	3,8
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	4,4	13,2	18,5	16,3	9,9	2,9
1976–2015						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	9,2	17,3	20,6	17,7	10,9	4,0
р. Вычегда – д. Федяково Vychegda r. – Fedyakovo v.	5,8	15,0	19,4	16,6	10,1	3,4
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	8,6	16,4	20,2	17,5	10,9	3,9
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	7,8	16,0	19,9	17,3	11,0	4,1
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	5,5	14,9	19,4	17,0	10,7	3,7

Таблица 4. Оценка однородности температуры воды по среднему значению (уровень значимости $\alpha = 10\%$)

Table 4. Assessment of the water temperature homogeneity by the average value (significance level $\alpha = 10\%$)

Река – створ River – target	1950–1975 гг. 1950–1975			1976–2015 гг. 1976–2015			t	Гипотеза однородности Homogeneity hypothesis
	n_1	m_1	σ_1	n_2	m_2	σ_2		
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	26	12,6	0,91	40	13,3	1,30	2,71	Опровергается Refuted
р. Вычегда – д. Федяково Vychegda r. – Fedyakovo v.	14	10,9	1,22	28	11,5	1,27	1,96	«
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	26	12,4	1,25	40	12,9	1,08	1,57	Не опровергается Not refuted
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	26	12,2	1,04	40	12,7	0,97	1,72	Опровергается Refuted
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	26	10,9	1,19	40	11,8	0,97	3,38	«

Примечание. Здесь и далее: n_1, m_1, σ_1 и n_2, m_2, σ_2 – продолжительность периода наблюдений, среднее значение и среднее квадратическое отклонение соответственно за первый и второй период, t – критерий Стьюдента.

Note. Here and further: n_1, m_1, σ_1 and n_2, m_2, σ_2 – duration of the observation period, the mean value and the mean square deviation for the first and second period, respectively, t – Student's criterion.

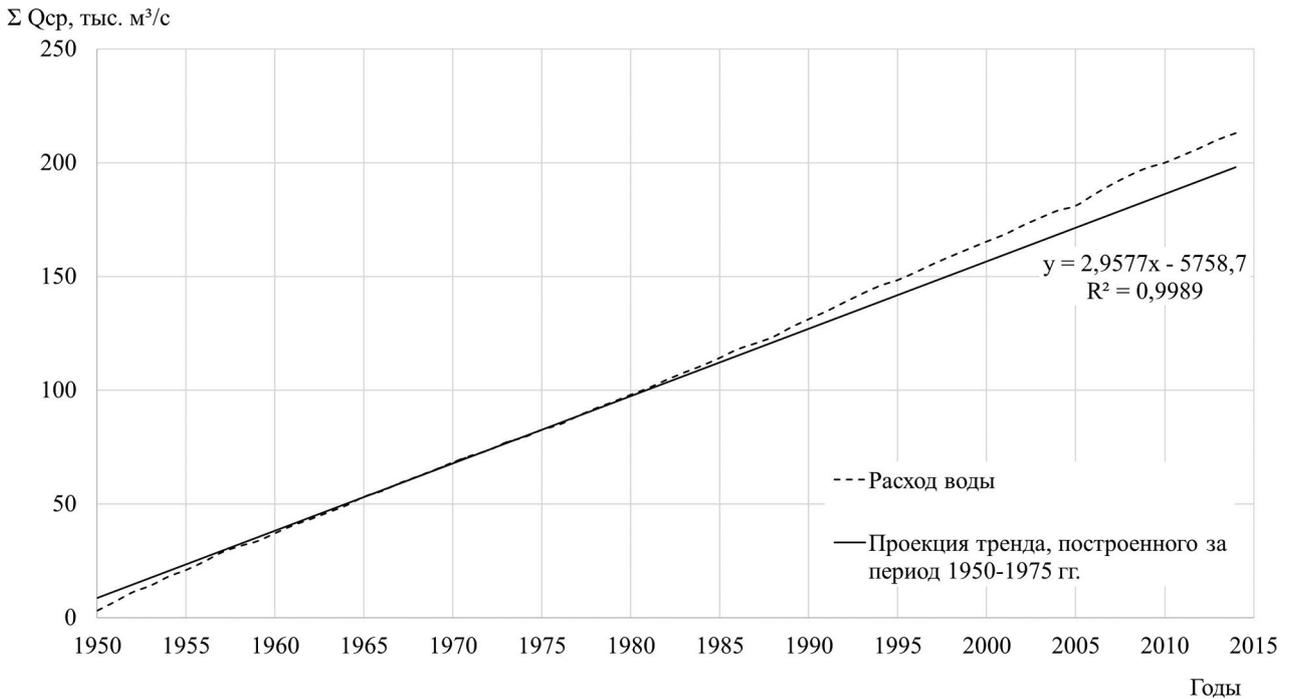


Рис. 2. Интегральная кривая ряда среднегодовых расходов воды: река Северная Двина – с. Усть-Пинега
 Fig. 2. Integral curve of a series of average annual water flow rates – the Northern Dvina River – Ust-Pinega village

ных периодов до и после 1976 года. Среднее значение температуры воды за период открытого русла за второй период увеличилось для всех створов.

Расход воды и его внутригодовая динамика

Среднемноголетние расходы воды увеличиваются вниз по течению с 430 (д. Каликино) до 3280 (с. Усть-Пинега) м³/с. Объем стока в устье составляет 103 км³/год (табл. 1).

На рис. 2 в качестве примера представлен график интегральной кривой значений средних годовых расходов воды по створу Усть-Пинега. Для того чтобы увидеть переломы интегральной кривой, был дополнительно построен тренд по расходу воды с 1950 по 1975 г. и искусственно продлен на второй период наблюдений (тренд значим).

Очевидно, что резкие переломы интегральной кривой средних годовых расходов, обычно связанные с началом интенсивной хозяйственной деятельности в русле реки или на водосборе, здесь отсутствуют. С другой стороны, все-таки нельзя не отметить, что начиная примерно с конца семидесятых годов XX в. расход воды превышает значения, проецируемые по тренду.

В табл. 5 представлены результаты проверки однородности рядов средних годовых расходов бассейна реки Северная Двина.

Таким образом, проверка однородности средних годовых значений стока во всех створах за первый и второй период показала, что гипотеза об их однородности не опровергается. Однако за временной период с 1976 по 2015 г. (в этот период, как отмечалось ранее, происходит интенсивное потепление климата) значения расходов воды превышают значения расходов в прошлый период.

Поскольку вывод об однородности стока в названные выше периоды не опровергается, было проведено сопоставление внутригодового распределения месячных значений стока. В табл. 6 представлены значения среднего многолетнего месячного стока в процентах от годового стока.

Как следует из представленных данных, в период с 1950 по 1975 г. максимальный расход воды наблюдался в мае и июне при прохождении весеннего половодья (только для самого южного створа д. Каликино весеннее половодье начинается во 2 декаде апреля, и поэтому расход воды в апреле преобладает над значениями июня).

В период с 1976 по 2015 г. максимальный среднемесячный расход наблюдался также в мае и июне, но объем стока в апреле вырос, а в июне уменьшился, что связано с увеличением водности в весенний период [Шикломанов, Георгиевский, 2007].

Таблица 5. Оценка однородности речного стока по среднему значению (уровень значимости $\alpha = 10\%$)

Table 5. Assessment of the river flow homogeneity by the average value (significance level $\alpha = 10\%$)

Река – створ River – target	1950–1975 гг. 1950–1975			1976–2015 гг. 1976–2015			t	Гипотеза однородности Homogeneity hypothesis
	n_1	m_1	σ_1	n_2	m_2	σ_2		
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	26	432	115	40	439	100	0,27	Не опровергается Not refuted
р. Вычегда – д. Федяково Vychehda r. – Fedyakovo v.	14	1030	179	28	1120	187	1,59	“
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	26	1940	356	40	1990	323	0,68	“
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	26	2590	494	40	2570	408	0,11	“
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	26	3180	567	40	3340	564	1,18	“

Таблица 6. Распределение объемов стока по месяцам в % от среднего годового объема стока

Table 6. Distribution of river flow volumes by month in % of the average annual flow volume

Река – створ River – target	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<i>1950–2015</i>							
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	17,6	29,1	11,6	7,3	5,4	5,4	6,8
р. Вычегда – д. Федяково Vychehda r. – Fedyakovo v.	5,9	36,2	17,9	7,6	5,2	5,1	6,5
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	8,8	36,3	15,9	7,2	4,9	5,1	6,3
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	8,4	36,1	16,1	7,3	4,8	5,0	6,4
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	7,6	35,8	16,2	7,2	4,9	5,3	6,9
<i>1950–1975</i>							
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	15,2	31,2	12,6	7,5	5,4	5,6	7,1
р. Вычегда – д. Федяково Vychehda r. – Fedyakovo v.	5,5	35,2	19,8	7,1	5,0	4,9	6,8
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	7,3	35,8	18,0	7,0	5,0	5,2	6,7
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	6,7	36,2	18,2	7,2	4,9	5,1	6,8
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	6,1	35,6	18,4	7,1	4,9	5,3	7,2
<i>1976–2015</i>							
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	19,7	27,1	10,7	7,1	5,3	5,2	6,5
р. Вычегда – д. Федяково Vychehda r. – Fedyakovo v.	6,2	37,1	16,8	8,0	5,3	5,3	6,3
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	10,1	36,7	14,0	7,4	4,9	5,0	6,0
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	9,9	36,1	14,1	7,4	4,7	5,0	6,1
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	9,0	35,9	14,2	7,2	4,9	5,3	6,6

Тепловой сток и его объем

Анализ теплового стока осуществлялся за период открытого русла. В данном случае для бассейна реки Северная Двина

на это период с мая по октябрь, а с ноября по апрель его можно считать незначительным.

Объем теплового стока рассчитывался за три временных периода (весь ряд наблюдений

Таблица 7. Объем месячного теплового стока в кДж·10¹² в период открытого русла

Table 7. Volume of heat flow in kJ·10¹² for the open channel period

Река – створ River – target	V	VI	VII	VIII	IX	X
<i>1950–2015</i>						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	144	110	85,8	54,7	32,9	15,3
р. Вычегда – д. Федяково Vycheгда r. – Fedyakovo v.	278	357	203	119	67,6	25,8
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	776	651	375	225	140	61,7
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	930	847	493	287	183	87,5
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	777	957	588	353	231	102
<i>1950–1975</i>						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	140	116	85,9	55,1	34,1	14,2
р. Вычегда – д. Федяково Vycheгда r. – Fedyakovo v.	252	348	175	108	60,7	20,8
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	696	698	350	220	135	62,0
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	858	928	479	291	180	90,2
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	668	1000	560	340	218	88,8
<i>1976–2015</i>						
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	145	105	85,6	54,4	31,8	16,2
р. Вычегда – д. Федяково Vycheгда r. – Fedyakovo v.	298	364	226	127	73,1	30,7
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	847	596	400	229	143	62,7
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	975	756	507	285	184	86,8
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	869	895	617	370	240	108

до и после 1976 года). Результаты расчетов представлены в табл. 7.

По большинству пунктов наблюдений значения объема теплового стока выше для периода с 1976 по 2015 г., за исключением июня, что связано с уменьшением объема стока в этом месяце во второй период. В среднем увеличение объема теплового стока за период открытого русла произошло на 40,9 кДж·10¹².

Для д. Федяково картина более наглядная, за период с 1976 по 2003 г. для каждого месяца объем теплового стока превышает значения предыдущего периода (суммарно за май–октябрь увеличение на 16 %).

Отличающимся стал створ д. Каликино, где суммарный объем теплового стока уменьшился на 2 % за второй период (лишь в мае произошло его увеличение) за счет снижения водного стока в тот же период.

Для того чтобы увидеть временную изменчивость теплового стока реки Северная Двина, были рассчитаны объемы теплового стока за период открытого русла и построен рис. 3 для замыкающего створа с. Усть-Пинега.

Тренд объема теплового стока за период с 1976 по 2015 г. для створа с. Усть-Пинега идет на повышение, т. е. происходит увеличение стока тепла (тренд статистически значим). За период с 1950 по 1975 г. тренд идет на понижение, что согласуется с ранее приведенными данными [Климаты..., 2010; Груза, Ранькова, 2012], но тренд статистически незначим.

В табл. 8 представлены результаты проверки однородности теплового стока для всех створов.

Проверка однородности объема теплового стока за первый и второй период показала, что для 60 % рядов гипотеза об их однородности не опровергается, т. е. изменения статистиче-

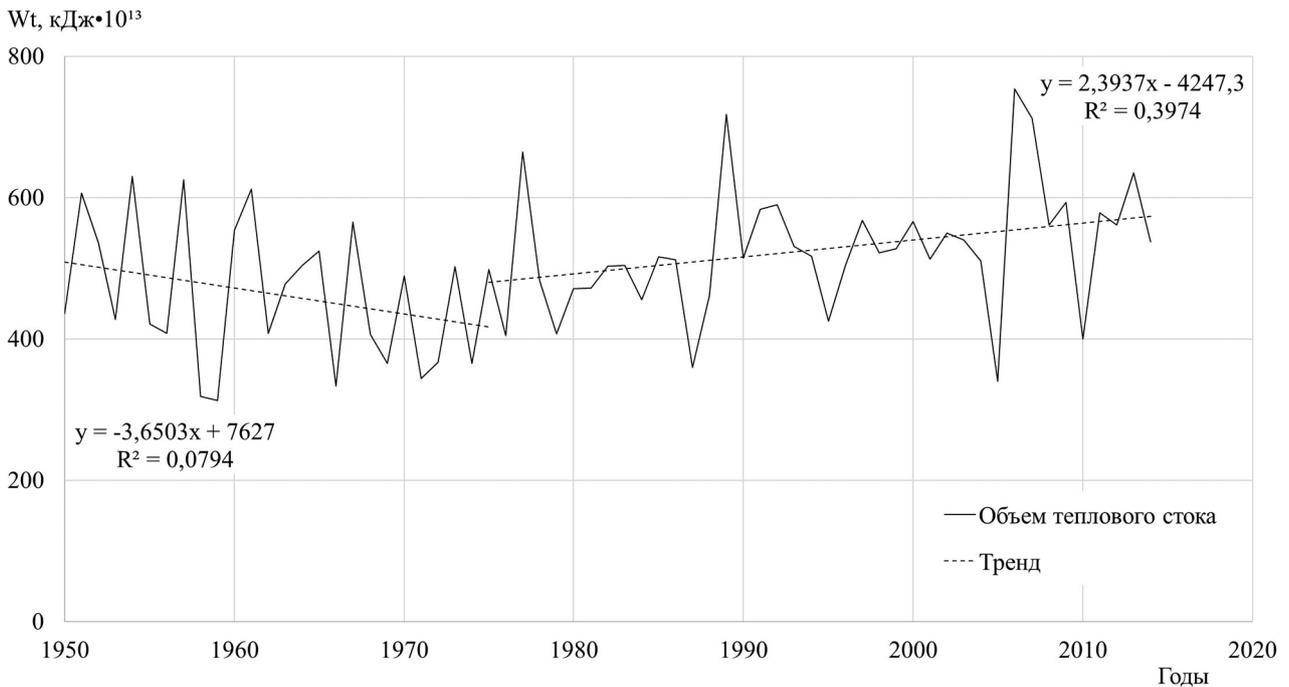


Рис. 3. Временная изменчивость объема теплового стока за период открытого русла: р. Северная Двина – с. Усть-Пинега

Fig. 3. Temporal variability of the volume of thermal runoff for the open channel period – the Northern Dvina River – Ust-Pinega village

Таблица 8. Оценка однородности объема теплового стока по среднему значению (уровень значимости $\alpha = 10\%$)

Table 8. Assessment of the homogeneity of the heat flow rate by the average value (significance level $\alpha = 10\%$)

Река – створ River – target	1950–1975 гг. 1950–1975			1976–2015 гг. 1976–2015			t	Гипотеза однородности Homogeneity hypothesis
	n_1	m_1	σ_1	n_2	m_2	σ_2		
р. Сухона – д. Каликино Sukhona r. – Kalikino v.	26	71,6	19,3	40	76,5	16,2	1,06	Не опровергается Not refuted
р. Вычегда – д. Федяково Vychegda r. – Fedyakovo v.	14	148	28,1	28	172	36,1	2,39	Опровергается Refuted
р. Северная Двина – д. Абрамково Severnaya Dvina r. – Abramkovo v.	26	317	67,3	40	338	57,4	1,28	Не опровергается Not refuted
р. Северная Двина – д. Звоз Severnaya Dvina r. – Zvoz v.	26	418	86,7	40	428	66,7	0,48	«
р. Северная Двина – с. Усть-Пинега Severnaya Dvina r. – Ust-Pinega v.	26	462	101	40	527	90	2,64	Опровергается Refuted

ски несущественны. Но стоит отметить, что для всех створов среднее значение объема теплового стока за период после 1976 года превышает значения первого периода.

Заключение

В работе проведено исследование изменений средних годовых характеристик теплового стока и его составляющих за период открытого русла по реке Северная Двина. Неоднородное изменение климата в XX веке и, в частности, его

потепление с 1976 года, выявленное по данным приповерхностной температуры воздуха [Климаты..., 2010; Груза, Ранькова, 2012; Государственный..., 2018], также прослеживается в изменении термических характеристик стока реки Северная Двина.

Гипотеза об однородности значений рядов речного стока по реке Северная Двина не опровергается. Изменения среднего годового стока в период с 1976 по 2015 г. по сравнению с периодом с 1950 по 1975 г. статистически несущественны.

Анализ температуры воды показал превышение значений в среднем на 0,77 °С для всех месяцев и всех исследованных пунктов наблюдений за период 1976–2015 гг. по сравнению с предшествующим периодом (80 % рядов по среднему значению являются неоднородными).

Исследование теплового стока выявило превышение большинства значений его объема в среднем на 40,9 кДж·10¹² за период 1976–2015 гг. по сравнению с предшествующим периодом, хотя 60 % рядов по среднему значению являются однородными (что связано с незначительным увеличением речного стока в период с 1976 по 2016 г.).

Учитывая темпы потепления климата в северном регионе в XXI веке (увеличение среднегодовой температуры воздуха на 2 °С к концу столетия [Шикломанов, Георгиевский, 2007; Магрицкий, 2009]), стоит ожидать однозначно соответствующее увеличение температуры воды за период открытого русла в бассейне реки Северная Двина.

Авторы благодарят старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный гидрологический институт» (г. Санкт-Петербург) Наталию Ивановну Горошкову за помощь в сборе данных и проведении исследования.

Литература

Агафонова С. А., Фролова Н. Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // *Водные ресурсы*. 2007. Т. 34, № 2. С. 141–149.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. 888 с.

Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Архангельской области за 2018 год / Министерство природных ресурсов и ле-

сопромышленного комплекса Архангельской области. Архангельск, 2019. 454 с.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.

Двоглазова К. С., Шелутко В. А., Горошкова Н. И. Оценка изменений термического режима рек бассейна Северной Двины // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению. СПб., 2020. С. 606–610.

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

Душкова Д. О., Евсеев А. В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России // *Арктика и Север*. 2011. № 4. С. 162–195.

Константинов П. И., Варенцов М. И. Что мы знаем о микроклимате крупнейших городов Арктической зоны РФ? // *Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф.* Архангельск, 2018. С. 25–28.

Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления // *Ретроспективный анализ и сценарии*. М.: ГЕОС, 2010. 220 с.

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

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.

Рождественский А. В., Лобанова А. Г., Лобанова В. А., Сахарюк А. В. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

Урсова Е. С. Оценка загрязненности реки Охта в пределах Санкт-Петербурга на основе применения интегральных кривых // *Общество. Среда. Развитие*. 2015. № 4. С. 171–175.

Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 238 с.

Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // *Hydrological impact of climate change: Proceed. of British-Russian Conf.* Novosibirsk, 2007. P. 143–151.

Поступила в редакцию 17.02.2021

References

Agafonova S. A., Frolova N. L. Osobennosti ledovogo rezhima rek basseina Severnoi Dviny [Features of the ice regime of the rivers of the Northern Dvina basin]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 141–149.

Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu" [State report On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2017]. Moscow: Minprirody Rossii [Ministry of Nat. Resources of Russia]; NPP Cadastre, 2018. 888 p.

Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy Arhangel'skoi oblasti za 2018

god [State report On the state and protection of the environment of the Arkhangelsk Region in 2018]. Ministerstvo prirod. resursov i lesopromyshlennogo kompleksa Arhangel'skoi oblasti [Ministry of Nat. Resources and Timber Industry of the Arkhangelsk Region]. 2019. 454 p.

Gruza G. V., Rankova E. Ya. Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukh [Observed and expected climate changes in Russia: air temperature]. Obninsk: VNIIGMI-MCD, 2012. 194 p.

Dvoeglazova K. S., Shelutko V. A., Goroshkova N. I. Otsenka izmenenii termicheskogo rezhima rek basseina

Severnoi Dviny [Assessment of changes in the thermal regime of the rivers of the Northern Dvina basin]. *Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrol. ot poznaniya k mirovozzreniyu* [The fourth Vinogradov readings. *Hydrology: from Learning to Worldview: Proceed. int. sci. conf.*]. 2020. P. 606–610.

Doklad ob osobennostyakh klimata territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god [Report on the climate peculiarities of the territory of the Russian Federation in 2018]. Moscow, 2019. 79 p.

Dushkova D. O., Evseev A. V. Analiz tekhnogenogo vozdeistviya na geosistemy Evropeiskogo Severa Rossii [Analysis of technogenic impact on geosystems of the European North of Russia]. *Arktika i Sever* [The Arctic and the North]. 2011. No. 4. P. 162–195.

Konstantinov P. I., Varentsov M. I. Chto my znaem o mikroklimате krupneishikh gorodov Arkticheskoi zony RF? [What do we know about the microclimate of the largest cities in the Arctic zone of the Russian Federation?]. *Arkticheskie issled.: ot ekstensivnogo osvoeniya k kompleksnomu razvitiyu* [Arctic research: from extensive exploration to integrated development]. 2018. P. 25–28.

Klimaty i landshafty Severnoi Evrazii v usloviyakh global'nogo potepleniya. Retrospektivnyi analiz i scenariy [Climates and landscapes of Northern Eurasia in the context of global warming. Retrospective analysis and scenarios]. Moscow: GEOS, 2010. 220 p.

Magritskii D. V. Teplovoi stok rek v morya Rossiiskoi Arktiki i ego izmeneniya [Thermal runoff of rivers in the seas of the Russian Arctic and its changes]. *Vest-*

nik Moskovskogo univ. [MSU Vestnik]. 2009. No. 5(6). P. 69–77.

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Severnyi krai [Surface water resources in the USSR. The Northern area]. Vol. 3. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 663 p.

Rozhdestvenskii A. V., Lobanova A. G., Lobanova V. A., Sakharyuk A. V. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke odnorodnosti gidrologicheskikh kharakteristik i opredeleniyu ikh raschetnykh znachenii po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values from heterogeneous data]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010. 162 p.

Urusova E. S. Otsenka zagryaznennosti reki Okhta v predelakh Sankt-Peterburga na osnove primeniya integral'nykh krivykh [Assessment of the pollution of the Okhta River within St. Petersburg based on the use of integral curves]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environ. Development]. 2015. No. 4. P. 171–175.

Shelutko V. A. Chislennyye metody v gidrologii [Numerical methods in hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 238 p.

Shiklomanov I. A., Georgievskii V. Yu. Vliyanie izmeneniya klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy rek Rossii [Influence of climate changes on the hydrological regime and water resources of Russian rivers]. *Hydrological impact of climate change: Proceed. of British-Russian Conf.* Novosibirsk, 2007. P. 143–151.

Received February 17, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Двоглазова Ксения Сергеевна

магистр кафедры прикладной и системной экологии
Российский государственный гидрометеорологический университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: Ksenia_1197@list.ru
тел.: +79522035314

Шелутко Владислав Аркадьевич

профессор кафедры прикладной и системной экологии,
д. г. н., к. т. н., проф.
Российский государственный гидрометеорологический университет
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: Shelutko@rshu.ru

CONTRIBUTORS:

Dvoeglazova, Ksenia

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: Ksenia_1197@list.ru
tel.: +79522035314

Shelutko, Vladislav

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: Shelutko@rshu.ru