

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 504.453 + 911.2

DOI: 10.15372/GIPR20220210

А.Г. ГЕОРГИАДИ\*, А.О. ДАНИЛЕНКО\*\*

\*Институт географии РАН,  
119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Россия, galex50@gmail.com

\*\*Гидрохимический институт,  
344090, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 198, Россия, a.danilenko@gidrohim.com

### ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ПЕРИОДЫ ПОВЫШЕННОГО/ПОНИЖЕННОГО ВОДНОГО И ИОННОГО СТОКА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В XIX–XXI ВЕКАХ

Проанализированы многолетние ряды годового и сезонного стока воды и главных ионов р. Северной Двины у с. Усть-Пинега, на которой гидрометрические наблюдения начались с 1882 г., а гидрохимические — с 1947 г. Выявлены долговременные фазы повышенных/пониженных значений стока и определены их основные характеристики. Установлено, что разница среднемноголетнего стока воды между долговременными фазами его повышенных и пониженных значений (относительно значений, характерных для фаз пониженного стока) составляет для годового стока 17 %, для стока половодья — 16, для зимнего — 32, а для летне-осеннего — 38 %. Сделан вывод, что изменения химического стока при переходе от фазы повышенного водного стока к пониженному менее заметны. Наибольшие различия стока ионов в контрастные фазы водного стока характерны для летне-осеннего периода и зимней межени, когда их сток в фазу повышенной водности был выше на 14–17 и на 10–11 % соответственно, тогда как в период половодья и года в целом сток ионов был выше лишь на 5–8 %. Относительное динамическое постоянство геохимической нагрузки на Белое море водами Северной Двины независимо от колебаний ее водности определяется обратным характером связи между расходом воды и концентрацией химического вещества. Кроме того, антропогенное влияние на ионный состав на водосборе реки незначительно, что позволяет поддерживать установившиеся связи в условиях меняющегося климата.

**Ключевые слова:** арктические реки, многолетние изменения, расходы воды, гидрологические сезоны, сток химических веществ, минерализация.

A.G. GEORGIADI\*, A.O. DANILENKO\*\*

\*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,  
119017, Moscow, Staromonetnyi per., 29, str. 4, Russia, galex50@gmail.com

\*\*Hydrochemical Institute,  
344090, Rostov-on-Don, prosp. Stachki, 198, Russia, a.danilenko@gidrohim.com

### LONG-TERM PERIODS OF INCREASED/DECREASED WATER AND ION DISCHARGE OF THE NORTHERN DVINA IN THE 19<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> CENTURIES

An analysis is made of the long-term data sets on the annual and seasonal water flow and the major ions flux of the Northern Dvina river at the village of Ust'-Pinega where hydrological and hydrometric observations were begun in 1882 and 1947, respectively. Long-term phases of their increased/decreased values were revealed, and their main characteristics were determined. It is established that the difference in the mean annual water flow between the long-term phases of increased and decreased values relative to the values characteristic of the lower flow were 17 % for the annual flow, 16 % for the flood flow, 32 % for the winter flow, and 38 % for the summer-autumn flow. It is concluded that changes in chemical flux during the shift from the

*phase of increased to decreased water flow was less clearly pronounced. The largest differences in the ion flux in the contrasting phases of water discharge were characteristic for the summer-autumn hydrological season and winter low-water season. During these periods the ion flux increased by 14–17 % and 10–11 %, respectively, whereas during the snow-melt flood period and the whole year, the ion flux was only 5–8 % higher. A relative dynamic constancy of the geochemical load on the White Sea by the Northern Dvina, regardless of its water discharge, is caused by the inverse relationship between water discharge and the concentration of chemicals. In addition, the anthropogenic influence on the ionic composition in the catchment area of the river is insignificant, which makes it possible to maintain established relationships under climate change.*

**Keywords:** arctic rivers, long-term changes, water discharges, hydrological seasons, chemical runoff, mineralization.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальным потеплением, начало которого приурочено к 1970–1980 гг. [1], большое внимание уделяется вопросам исследования многолетних изменений геостока арктических рек. В его состав, согласно С.Д. Муравейскому [2], входят сток воды, тепла, наносов, химических и биологических веществ, которые весьма чувствительны к происходящим климатическим изменениям [3–10]. Значительное число публикаций посвящено оценке изменений гидрологических характеристик в период глобального потепления относительно более холодного базового периода [3, 10–12]. Не меньший интерес в последнее время вызывает проблема исследования долговременных периодов (фаз) повышенных/пониженных значений характеристик составляющих геостока. Они, последовательно сменяя друг друга, представляют собой важную особенность многолетней динамики гидрологических характеристик, вызванных климатическими изменениями, а разница в стоке таких контрастных фаз чаще всего оказывается статистически значимой. Продолжительность этих периодов составляет 10–15 лет и более, а может достигать многих десятилетий [8, 12]. В этом отношении уже исследованы годовой и сезонный сток воды не только арктических рек [8, 13], но и рек других регионов мира [8, 11, 14–16].

Что касается изучения длительных контрастных фаз других составляющих геостока, то им уделяется существенно меньше внимания, хотя очевидно, что изменения стока воды вызывают соответствующий отклик. Реакция химического стока выявляется тем отчетливее, чем теснее связи между расходом воды и концентрацией растворенных в ней веществ. Помимо природно-климатических факторов изменчивость стока химических веществ может быть в разной степени связана с влиянием антропогенных воздействий, которое весьма заметно, в том числе на многих арктических реках.

Модули стока воды и ионного стока р. Северной Двины у с. Усть-Пинега одни из самых высоких для рек водосбора Северного Ледовитого океана и составляют 9 л/(с×км<sup>2</sup>) [7] и около 40 т/км<sup>2</sup> в год соответственно [17–19]. Высокий модуль ионного стока обусловлен значительной водоносностью реки, отсутствием в ее бассейне многолетнемерзлых пород, а также тем, что сам бассейн в значительной мере сложен такими легко выщелачиваемыми породами, как гипсы и известняки [18].

Основное внимание в статье уделено исследованию долговременных (продолжительностью 10–15 лет и более) периодов (фаз) повышенного/пониженного годового и сезонного стока воды и главных ионов р. Северной Двины у с. Усть-Пинега в период с 1882 по 2016 г.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Северная Двина — крупнейшая арктическая река европейской территории России, замыкающий створ бассейна которой расположен на входе в устьевую область в 137 км от морского края дельты у с. Усть-Пинега, ниже впадения р. Пинеги. Он замыкает водосбор площадью 348 000 км<sup>2</sup>, что составляет 97,5 % площади всего водосбора этой реки [20]. Это типично равнинная таежная река, в бассейне которой отсутствуют многолетнемерзлые грунты. Среднегодовая и среднезимняя температуры воздуха, осредненные для ее водосбора, составляют, соответственно, 1,4 и –12,6 °С, а годовой слой атмосферных осадков — 576 мм.

Питание реки смешанное с преобладанием снегового (50–60 %). Средние многолетние расходы воды, осредненные за весь год, составили 3305 м<sup>3</sup>/с, за половодье (апрель–июль) — 6517 м<sup>3</sup>/с, за летне-осенний период (август–ноябрь) — 2389 м<sup>3</sup>/с, за зимнюю межень (декабрь–март) — 1020 м<sup>3</sup>/с. Июль был принят в качестве окончания половодья, так как на его спаде в этом месяце формировались значительные паводки, что приводило к высокой водности, которая, в свою очередь, определяла величину ионного стока.

По ионно-солевому составу вода Северной Двины относится к гидрокарбонатному классу группы кальция ( $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ ). Генетически воды этого типа связаны с различными осадочными породами и продуктами их выветривания [21]. Суммарное содержание растворенных минеральных веществ позволяет классифицировать Северную Двину как реку с водой средней (200–500 мг/дм<sup>3</sup>) или малой (100–200 мг/дм<sup>3</sup>) минерализации в зависимости от сезона [22]. В период зимней межени суммарное содержание главных ионов достигает 292–438 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 375 мг/дм<sup>3</sup>), в летне-осенний период — находится в пределах 99–337 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 375 мг/дм<sup>3</sup>). В период, соответствующий весеннему половодью, минерализация падает до 57–144 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 94 мг/дм<sup>3</sup>).

Материалом для исследования послужили данные режимных наблюдений Государственной наблюдательной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды о расходах воды [23, 24] и концентрациях растворенных химических веществ [25]. Начало наблюдений за химическим составом воды в этом пункте датируется 1947 г., в то время как ряды наблюдений за расходом воды имеют значительно большую продолжительность — с 1882 г. Гидрохимическая информация, анализируемая в данном исследовании, получена по методикам, разработанным ФГБУ «Гидрохимический институт» [26].

**Методы исследования долговременных фаз.** Подход к анализу долговременных фаз в многолетних изменениях годового и сезонного стока воды, обусловленных изменениями климата, основан на использовании разностно-интегральных кривых, критериев статистической однородности средних значений стока и оценке характеристик выявленных фаз контрастной водности.

Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений какой-либо характеристики от ее среднего многолетнего значения, рассчитанного для всего периода наблюдений [27, 28]. Они позволяют выявить долговременные периоды (фазы), в течение которых существенно чаще встречаются значения характеристики ниже или выше ее среднемноголетнего значения.

Границы гидрологических сезонов (половодье, меженные сезоны) были определены на основе гидрографов стока, построенных за весь период наблюдений. Также использовались сведения о среднемноголетних датах начала и окончания половодья и ледостава.

Временная граница смены долговременных фаз повышенных/пониженных значений стока воды определена на основе выявления минимальных и максимальных значений координат разностно-интегральных кривых и критериев однородности рядов по их средним значениям для контрастных фаз стока воды (критерии Стьюдента — параметрический и Манна–Уитни–Пети — непараметрический) [8, 29, 30]. Полученные для Северной Двины оценки показали, что периоды смены контрастных фаз годового и сезонного стока воды, определенные на основе разных методов, в подавляющем большинстве случаев совпали. В некоторых случаях они различались между собой на один-два года и только в отдельных случаях (преимущественно при использовании критерия Манна–Уитни–Пети) достигали пяти и даже семи лет. Рассчитанные значения критериев превышали их критические значения, соответствующие уровням значимости 0,01, 0,05 и 0,1. То есть средние значения стока воды сравниваемых контрастных фаз различались статистически значимо. Лишь в одном случае рассчитанное значение критерия Манна–Уитни–Пети было ниже критического значения, соответствующего уровню значимости 0,1.

Те же границы контрастных фаз использовались и для расчета ионного стока в выделенные периоды, так как его изменчивость тесно связана с гидрологическим режимом реки.

**Метод расчета стока ионов.** Корреляционно-регрессионный способ оценки химического стока основан на использовании статистической связи между среднесуточным расходом воды ( $Q$ ) и измеренными значениями концентраций ( $C$ ). При наличии полного ряда значений  $Q$  такой метод позволяет восстановить среднесуточные значения концентраций за каждый день расчетного периода. Несмотря на возможные ошибки при расчете значений за конкретный год или сезон, получаемые результаты, тем не менее, объективно характеризуют тенденции многолетних изменений ионного стока и позволяют количественно оценить их. Для перехода к корреляционно-регрессионному способу оценки ионного стока требовалось найти зависимости, наилучшим образом описывающие связь гидрохимического режима с водным.

Для замыкающего створа Северной Двины характерно быстрое падение минерализации в весенний период и нарастание — в межпаводковый. Графически это выражается кривыми зависимостей гиперболического типа между расходами воды и концентрациями. Ветви данных кривых асимптотически приближаются к координатным осям [21]. При выборе наилучшей аппроксимирующей функции исследователи ориентировались на максимальные значения индекса детерминации и минимальные — ошибки аппроксимации. Для главных ионов такому принципу удовлетворяла степенная функция вида

$C = aQ^b$ . При подборе степенных функций по данным в целом за год ошибка аппроксимации составила: для катионов кальция 15,7 % (при индексе детерминации  $R^2 = 0,88$ ), для катионов магния 27,2 % (при  $R^2 = 0,73$ ), для одновалентных катионов 97,4 % (при  $R^2 = 0,25$ ), для гидрокарбонатов 14,2 % (при  $R^2 = 0,89$ ), для сульфатов 24,8 % (при  $R^2 = 0,77$ ), для хлоридов 30,2 % (при  $R^2 = 0,66$ ). Для минерализации в целом выявлена хорошая статистически значимая связь (ошибка аппроксимации 15,1 % при  $R^2 = 0,89$ ).

Наибольшая ошибка аппроксимации наблюдается в периоды меньшей водности. При одном и том же расходе воды минерализация может сильно различаться, так как в створе реки присутствуют воды разного генезиса: в начале подъема уровня русло еще заполнено преимущественно грунтовыми водами, в то время как на спаде — водами поверхностного питания. Тем не менее, значительные величины индексов детерминации ( $R^2$ ) для многих ионов и особенно для интегрального показателя минерализации речной воды косвенно свидетельствуют о ненарушенности природных процессов формирования гидрохимического режима Северной Двины на замыкающем створе. Хозяйственная деятельность на водосборе реки не оказывает заметного влияния на минерализацию воды, поскольку при загрязнении речных вод (как и при изменении гидрологического режима реки) корреляционная связь была бы нарушена, вплоть до полного исчезновения [31].

Особого внимания заслуживает ситуация с одновалентными катионами. Из-за неудовлетворительной аппроксимации исходных гидрохимических данных степенной функцией представляется целесообразным использование прямого метода расчета ионного стока. Однако детальный анализ внутригодового распределения концентраций показывает, что этот подход также будет давать большую ошибку. Так, в зимний период и во время весеннего половодья концентрации одновалентных катионов колеблются в очень близких пределах, в то время как в водном стоке наблюдается шестикратная разница. В связи с этим было принято решение использовать для одновалентных катионов тот же подход, что и для остальных главных ионов, однако иметь в виду, что ошибка для полученных оценок изменчивости их стока достаточно велика.

Используя ежедневные данные о среднесуточном расходе воды в качестве аргумента найденных функций, мы получили ежедневные ряды гидрохимических данных для последующего расчета суточного стока растворенных химических веществ.

Расчет суточного ионного стока ( $G$ ) и его отдельных компонентов проводили по формуле

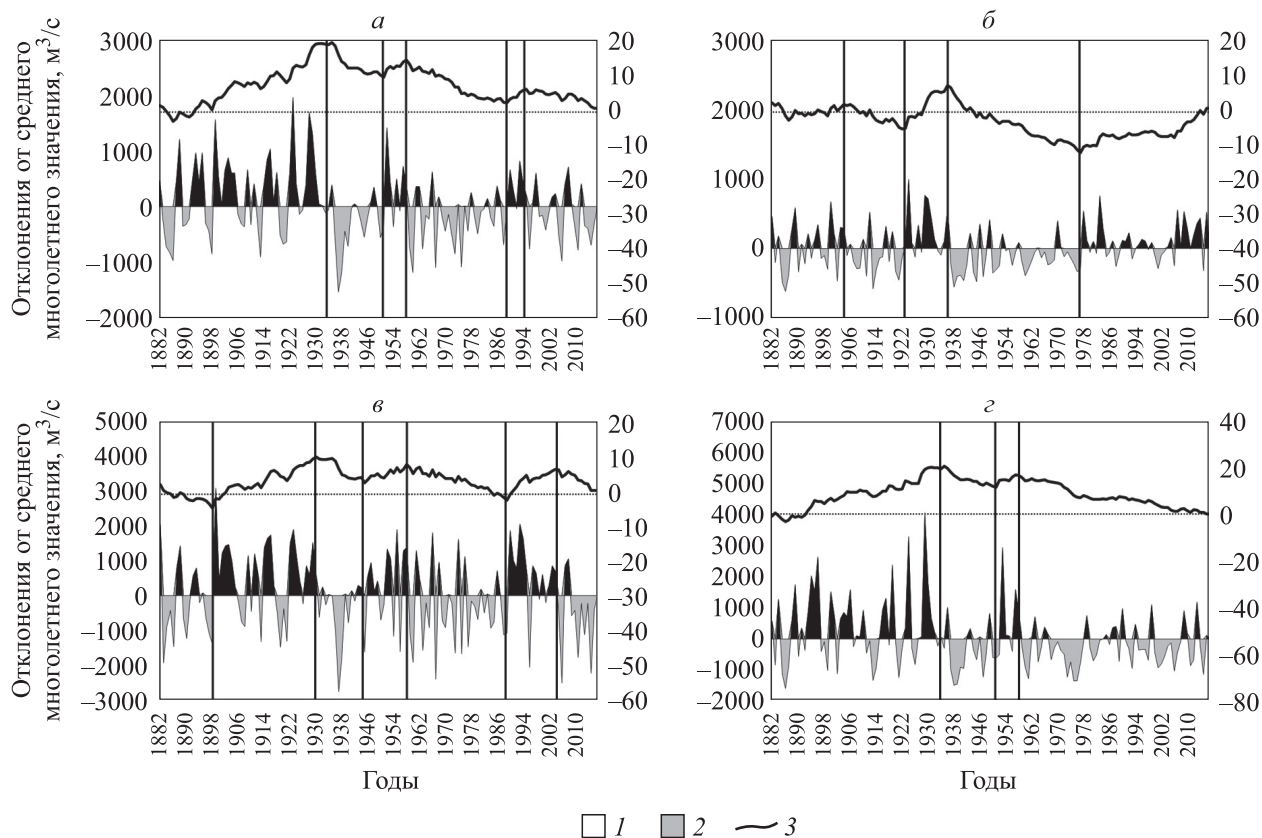
$$G = \sum_{i=1}^n W_i C_i,$$

где  $W_i$  — водный сток за сутки, км<sup>3</sup>;  $C_i$  — среднесуточная концентрация вещества, т/км<sup>3</sup>;  $n$  — множество суток в году;  $i$  — порядковый номер элемента множества  $n$ .

Для расчета ионного стока за год и за сезон суммировали значения суточного химического стока в соответствующие расчетные периоды. Сезонный ионный сток рассчитан с округлением до месяца: весенне-летний период с апреля по июль, летне-осенний с августа по ноябрь и зимний с декабря по март.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Фазы повышенного/пониженного годового и сезонного стока воды.** Последовательность смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока характеризовалась сходными чертами, тогда как их динамика для зимнего стока во многом была иной (см. рисунок; табл. 1). Для летне-осеннего и годового стока с 1880-х гг. наблюдалась продолжительная фаза их повышенного стока, а для половодья ее предвляла относительно короткая фаза пониженного стока. С 1930-х гг. чередовались контрастные фазы, последовательно сменявшие одна другую, при этом общая продолжительность фаз пониженной водности была существенно больше, особенно для летне-осеннего стока. Для зимнего стока сначала наблюдалась фаза, для которой среднее значение стока было близко к норме летне-осеннего стока для всего периода наблюдений. После чего с начала 1900-х гг. наступила относительно короткая фаза пониженного стока, а ее, в начале 1920-х гг., сменила фаза повышенного стока такой же продолжительности. Вслед за ней последовала достаточно продолжительная фаза пониженного стока, после которой в конце 1970-х гг. наступила столь же продолжительная фаза повышенного зимнего стока. Во многом асинхронный характер чередования контрастных фаз зимнего и летне-осеннего стока на Северной Двине существенно различается.



Сток Северной Двины у с. Усть-Пинега в течение года (а), зимний период (б), период половодья (в) и летне-осенний период (г) в отклонениях от среднего многолетнего значения и в координатах разностно-интегральной кривой.

Отклонения от среднего многолетнего значения: 1 — положительные, 2 — отрицательные, 3 — разностно-интегральная кривая. Вертикальные линии — границы фаз контрастной водности.

Таблица 1

**Характеристика контрастных фаз пониженного и повышенного водного стока Северной Двины у с. Усть-Пинега**

Фаза водного стока	Границы фаз (продолжительность фаз) и средний расход воды, м <sup>3</sup> /с			
	половодье	лето-осень	зима	год
<b>Фаза пониженного стока</b>				
1	1882–1898 (17 лет) 6257	1936–1951 (16 лет) 1922	1905–1922 (18 лет) 899	1936–1951 (16 лет) 2930
2	1931–1945 (15 лет) 5985	1959–2016 (48 лет) 2108	1937–1977 (41 год) 874	1959–1989 (31 год) 3085
3	1959–1989 (31 год) 6128	—	—	1996–2016 (21 год) 3146
4	2006–2016 (11 лет) 5833	—	—	—
<b>Фаза повышенного стока</b>				
1	1899–1930 (32 года) 7069	1887–1935 (49 лет) 2815	1923–1936 (14 лет) 1296	1886–1935 (50 лет) 3560
2	1946–1958 (9 лет) 6919	1952–1958 (7 лет) 3054	1978–2016 (29 лет) 1121	1952–1958 (7 лет) 3738
3	1990–2005 (16 лет) 7090	—	—	1990–1995 (6 лет) 3698

Примечание. Прочерк — фаза не выявлена.

Продолжительность контрастных фаз варьирует для стока половодья в пределах от 9 до 32 лет, летне-осеннего — от 16 до 49 лет, зимнего — от 14 до 41 года, а для годового — от 16 до 50 лет. Для стока половодья, зимнего и летне-осеннего стока наибольшая продолжительность контрастных фаз практически не различается. И только максимальная длительность фазы повышенного годового водного стока была заметно дольше, чем наибольшая продолжительность фазы пониженного водного стока. Суммарная продолжительность пониженного годового стока, стока зимней и летне-осенней межени была примерно равной, составляя, соответственно, 68 лет и 63 года, 59 лет и 61 год, 61 год и 56 лет. При этом для половодья фазы пониженного стока продолжались 74 года, а повышенного — 57 лет.

Разница среднемноголетнего стока долговременных фаз его повышенных и пониженных значений (относительно значений характерных для фаз пониженного стока) составляет для годового стока 17 %, стока половодья — 16, зимнего — 32, а летне-осеннего — 38 %.

Внутригодовое распределение стока воды различается в контрастные фазы весьма незначительно. Доля половодья в годовом стоке практически не различается, составляя 65–66 %, а вот доля летне-осеннего стока ниже в фазу пониженного стока на 4 % (с 26,5 % в фазу повышенного). Доля зимнего стока также понижается, но незначительно.

**Фазы повышенного/пониженного годового и сезонного стока главных ионов.** Чередование периодов повышенного и пониженного стока воды должно было сказаться как на общем объеме ионного стока, так и на стоке его отдельных составляющих по сезонам годового цикла (табл. 2).

Изменения годового химического стока при переходе от фазы повышенного к фазе пониженного годового водного стока характеризуются сравнительно менее выраженными различиями по сравнению со стоком воды. Слабая реакция ионного стока объясняется обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды. Формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборе и стока главных ионов в море даже при заметных колебаниях стока воды. С другой стороны, фаза пониженного или повышенного годового стока складывается из совокупностей этих фаз в отдельные сезоны, противоположно направленное изменение которых может нивелировать межгодовые колебания химического стока.

Таблица 2

**Ионный сток Северной Двины в створе с. Усть-Пинега в контрастные фазы пониженного и повышенного водного стока**

Фаза водного стока	Ионный сток ( $G_{cp} \pm \sigma$ ), млн т/год						
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	$\Sigma_{ионов}$
	Год						
Пониженного	2,69 ± 0,19	0,61 ± 0,04	0,71 ± 0,05	7,82 ± 0,53	3,31 ± 0,22	0,45 ± 0,03	15,84 ± 1,08
Повышенного	2,89 ± 0,23	0,66 ± 0,05	0,76 ± 0,06	8,41 ± 0,68	3,54 ± 0,28	0,48 ± 0,04	16,92 ± 1,30
Δ, %	7,1	6,5	6,8	7,5	6,8	6,5	6,8
	Половодье						
Пониженного	1,17 ± 0,08	0,26 ± 0,02	0,30 ± 0,02	3,36 ± 0,23	1,41 ± 0,09	0,19 ± 0,01	6,74 ± 0,46
Повышенного	1,24 ± 0,08	0,27 ± 0,02	0,32 ± 0,02	3,57 ± 0,24	1,50 ± 0,10	0,20 ± 0,01	7,10 ± 0,49
Δ, %	6,4	5,3	6,1	6,3	6,0	5,8	5,2
	Летне-осенний период						
Пониженного	0,78 ± 0,10	0,18 ± 0,02	0,21 ± 0,03	2,27 ± 0,30	0,96 ± 0,12	0,13 ± 0,02	4,62 ± 0,59
Повышенного	0,90 ± 0,17	0,21 ± 0,04	0,24 ± 0,04	2,66 ± 0,53	1,10 ± 0,20	0,15 ± 0,02	5,40 ± 0,95
Δ, %	15,0	13,7	14,5	17,1	14,4	13,9	16,9
	Зимняя межень						
Пониженного	0,72 ± 0,07	0,17 ± 0,01	0,19 ± 0,02	2,11 ± 0,19	0,90 ± 0,08	0,12 ± 0,01	4,29 ± 0,39
Повышенного	0,80 ± 0,08	0,19 ± 0,02	0,21 ± 0,02	2,33 ± 0,24	0,99 ± 0,10	0,14 ± 0,01	4,73 ± 0,48
Δ, %	10,8	9,9	10,4	10,6	10,3	10,0	10,4

Примечание. Приведено среднемноголетнее значение  $G_{cp} \pm$  стандартное отклонение  $\sigma$  выборочных данных. Разница  $\Delta$  вычислена относительно стока в период пониженного стока воды и статистически значима при  $p < 0,05$ .

На основании проведенных расчетов дана оценка динамики стока главных ионов при переходе от одной водной фазы к другой. Наибольшее увеличение стока главных ионов в фазу повышенного водного стока (до 17 %) характерно для летне-осеннего периода из-за наиболее выраженного различия водного стока контрастных фаз. Зимой эта разница составляла около 10 %, а самые малозаметные различия (как и для стока воды, но существенно меньше их) характерны для стока половодья и годового стока в целом (в пределах 5–6 и 7–8 % соответственно).

Внутригодовое распределение объема ионного стока при переходе от фазы пониженного к фазе повышенного водного стока изменяется мало. На период весеннего снегового половодья (с учетом летних дождевых паводков в июле) приходится приблизительно 43 % годового ионного стока, что существенно меньше соответствующей доли годового стока воды (65 %). В фазу пониженной водности доля ионного стока летне-осеннего периода близка к доле зимней межени (29 и 27 %). В фазу повышенной водности эти различия более выражены: на летне-осенний период приходится 32 %, а на зимнюю межень — 28 % годового ионного стока, что в три раза выше соответствующей доли водного стока. А вот доля водного стока в летне-осенний период, которая составляет от 26,5 (для фазы повышенного стока) до 22,5 % (для фазы пониженного стока), и доля ионного стока различаются не столь значительно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа многолетних рядов годового и сезонного стока воды Северной Двины у с. Усть-Пинега, охватывающих периоды, начиная с 1882 г., выявлены долговременные фазы их повышенных/пониженных значений. Последовательность смены контрастных фаз годового стока, стока половодья и летне-осеннего стока характеризовалась сходными чертами, тогда как их динамика для зимнего стока происходила, во многом, по-другому.

Динамика изменчивости годового химического стока при переходе от фазы повышенного водного стока к пониженному менее заметна. Слабая реакция ионного стока на изменения стока воды вызвана обратным характером зависимости концентрации ионов от расхода воды, за счет чего формируется своеобразная отрицательная обратная связь, стабилизирующая интенсивность химической денудации на водосборе и стока главных ионов в море, даже при заметных колебаниях водного стока.

Наибольшие различия стока ионов в контрастные фазы водного стока характерны для летне-осеннего периода и зимней межени.

В целом можно сделать вывод, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, оказывают существенно меньшее воздействие на сток макрокомпонентов природных вод. Можно отметить некоторое относительное динамическое постоянство геохимической нагрузки на Белое море водами Северной Двины независимо от колебаний ее водности.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института географии РАН (AAAA–A19–119021990093–8 (FMGE–2019–0007)). Анализ длительных контрастных фаз повышенного/пониженного стока воды и ионов был проведен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18–05–60240).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. [Электронный ресурс]. — [http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume\\_teh.pdf](http://voeikovmgo.ru/download/2014/od/resume_teh.pdf) (дата обращения 14.04.2021).
2. **Муравейский С.Д.** Реки и озера: гидробиология, сток. — М.: Гос. изд-во геогр. лит-ры, 1960. — 387 с.
3. **Водные ресурсы России и их использование** / Под ред. И.А. Шикломанова. — СПб.: Изд-во Гос. гидролог. ин-та, 2008. — 600 с.
4. **Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милокова И.П., Кислов А.В., Анисимов О.А., Барабанова Е.А., Кашутина Е.А., Бородин О.О.** Сценарная оценка вероятных изменений речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 1: Бассейн реки Лены. — М.: Макс Пресс, 2011. — 179 с.
5. **Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies** / Ed. Ch.R. Goldman, M. Kumagai, R.D. Robarts. — Malden, USA: Wiley-Blackwell, 2013. — 496 p.
6. **Смирнов М.П.** Органические вещества и минерализация речных вод России, СНГ, Балтии. — Ростов-на-Дону: НОК, 2015. — 358 с.

7. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector // Polarforschung. — 2018. — Vol. 87 (2). — P. 177–194.
8. Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of the largest Siberian rivers // Polarforschung. — 2018. — Vol. 87 (2). — P. 167–176.
9. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences / Ed. P.Ya. Groisman, G. Gutman // Springer Environmental Science and Engineering. — 2013. — 369 p.
10. Yang D., Kane D. Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems. — New York: Springer International Publishing, 2021. — 914 p.
11. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Varabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Contribution of climatic and anthropogenic factors to changes in the flow of large rivers of the Russian Plain and Siberia // Doklady Earth Sciences. — 2019. — Vol. 488, N 2. — P. 1211–1216.
12. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Varabanova E.A., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Assessing the effect of climatic and anthropogenic factors on the annual runoff of large rivers in European Russia and Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 38. — Bristol: IOP Publishing, 2019. — P. 012027.
13. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. — 2018. — Т. 145. — С. 206–218.
14. Sharma S., Singh P.K. Long term spatiotemporal variability in rainfall trends over the State of Jharkhand, India // Climate. — 2017. — Vol. 5. — P. 2–18.
15. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Current and scenario changes in river runoff in the Don basin // Water Resources. — 2020. — Vol. 47, N 6. — P. 913–923.
16. Shi X., Qin T., Nie H., Weng B., He Sh. Changes in major global river discharges directed into the ocean // International Journ. of Environmental Research and Public Health. — 2019. — Vol. 16, Is. 8. — P. 1–19.
17. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. 2: Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология). — Ростов-на-Дону: НОК, 2010. — 200 с.
18. Даценко Ю.С., Ефимова Л.Е., Заславская М.Б., Пахомова О.М. Ионный сток в арктические моря России // Российские полярные исследования. — 2016. — № 1 (23). — С. 12–15.
19. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Ломова Д.В. Пространственно-временная изменчивость ионного состава и минерализации вод р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. — 2004. — № 10. — С. 87–99.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3: Северный край / Под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 663 с.
21. Алексин О.А. Основы гидрохимии. — Л.: Гидрометеиздат, 1953. — 296 с.
22. Никаноров А.М. Гидрохимия. — СПб.: Гидрометеиздат, 2001. — 444 с.
23. ArcticRIMS Data Server [Электронный ресурс]. — <https://rims.unh.edu/data/station/station.cgi?station=7564> (дата обращения 14.04.2021).
24. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. — <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=186> (дата обращения 14.04.2021).
25. База данных режимно-справочного банка данных «Качество поверхностных вод суши». — Ростов-на-Дону: Изд-во Гидрохим. ин-та (регистрационный номер 13251.6168000749.11.5.001/003 присвоен 30.01.20012 г.).
26. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / Под ред. Л.В. Боевой. — Ростов-на-Дону: НОК, 2009. — Ч. 1. — 1044 с.
27. Андреев Г.Г. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда. — 1959. — Т. 2. — С. 3–50.
28. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2: Бассейны рек Волги и Дона. — М.: Макс Пресс, 2014—214 с.
29. Pettit A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Journ. of Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). — 1979. — Vol. 28, N 2. — P. 126–135.
30. Rodionov S.N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31, L09204. — P. 1–4.
31. Максимова М.П. Воздействие техногенеза на гидросферу. Методика оценки антропогенного химического речного стока в моря // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. — 2012. — № 2 — С. 89–96.

*Поступила в редакцию 25.04.2021*

*После доработки 10.06.2021*

*Принята к публикации 29.12.2021*