

Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины

© 2022. А. О. Даниленко¹, к. б. н., зам. директора,
А. Г. Георгиади², к. г. н., в. н. с.,

¹Гидрохимический институт,

344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, просп. Стачки, д. 198,

²Институт географии РАН,

119017, Россия, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4,

e-mail: a.danilenko@gidrohim.com, galex50@gmail.com

Современное глобальное потепление привело к изменению стока воды в бассейнах арктических рек, что проявляется в чередовании относительно длительных фаз повышенной и пониженной водности и это, в свою очередь, могло изменить сток главных ионов рек региона. В связи с этим целью работы стала количественная оценка влияния современного потепления на годовой и сезонный водный и ионный сток Северной Двины в створе с. Усть-Пинега за продолжительный период 1947–2016 гг. с учётом разделения этого периода на относительно холодный (1947–1988 гг.) и относительно тёплый (1989–2016 гг.). Определение границы между климатическими периодами выполнено методом разностно-интегральных кривых. Сток главных ионов вычислен корреляционно-регрессионным методом с использованием тесных статистически значимых связей измеренных концентраций и среднесуточных расходов воды $C = f(Q)$. Показано, что в период современного потепления климата годовой и сезонный водный сток увеличился на 3–15%. Наиболее заметный рост стока происходил зимой. Масштаб изменений стока ионов менее заметен. Статистически значимое его увеличение выявлено также только в зимний период, что связано с увеличением стока сравнительно более минерализованных вод. В целом динамическое постоянство геохимической нагрузки на Белое море водами р. Северной Двины независимо от колебаний её водности определяется обратным характером связи между расходом воды и концентрацией химического вещества.

Ключевые слова: р. Северная Двина, водный сток, ионный сток, потепление климата.

The influence of modern climate warming on the water flow and major ion flux of the Northern Dvina

© 2022. A. O. Danilenko¹ ORCID: 0000-0003-0429-343X

A. G. Georgiadi² ORCID: 0000-0002-6692-0630

¹Hydrochemical Institute,

198, Stachki Avenue, Rostov-on-Don, Russia, 344090,

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,

29, Staromonetny Lane, Moscow, Russia, 119017,

e-mail: a.danilenko@gidrohim.com, galex50@gmail.com

Modern global warming has changed the water flow in the basins of the Arctic rivers. It's manifested in the alternation of relatively long phases of increased and decreased water flow. In turn, water runoff variations could change the major ions flux of rivers of this region. In this regard, the goal of the work was a quantitative assessment of the modern warming impact on the annual and seasonal water flow and ion flux of the Northern Dvina river at Ust'-Pinega vlg. during 1947–2016 years considering the separation of this period into relatively cold (1947–1988) and relatively warm (1989–2016). Climatic periods were determined by the cumulative deviation curves of annual and winter air temperature in basin. The ions flux was calculated using close statistically significant relationships between observed concentration and daily water discharges. It was shown that modern climate warming increased the annual and seasonal water flow by 3–15%. The most noticeable increase of major ions flux was observed in winter. The scale of ion flux changes is less noticeable than water flow changes. Statistically significant increase of ion flux was also revealed only in the winter, which is associated with growth of the flow of relatively more mineralized waters. In general, the homeostasis of the geochemical load on the White Sea by the Northern Dvina regardless of its water flow fluctuations, is determined by the inverse relationship between water flow and chemical concentration.

Keywords: the Northern Dvina river, water flow, ion flux, climate warming.

Современное глобальное потепление, начавшееся в 1970–1980 гг., охватило различные регионы Земли, но особенно заметно оно проявилось в бассейнах арктических рек, включая Северную Двину [1, 2]. Для него характерно ощутимое повышение температуры воздуха при меньших по масштабу изменениях атмосферных осадков. При этом происходившие изменения распределялись весьма неравномерно по территории. Потепление климата привело к изменению стока воды, которое проявлялось в чередовании относительно длительных периодов (фаз) повышенной и пониженной водности [3–5]. В свою очередь, эти изменения могли существенно повлиять на гидрохимический режим рек региона, химический сток в целом и ионный сток в частности, особенно если формирование ионного состава вод обусловлено преимущественно естественными факторами. Наиболее заметных изменений следует ожидать от рек со сравнительно высокими значениями модуля ионного стока, к которым относится Северная Двина. Модуль её ионного стока составляет около 40 т/км² в год, что связано с её значительной водоносностью, отсутствием в бассейне вечной мерзлоты, а также с тем, что сам бассейн в значительной мере сложен легко выщелачиваемыми породами (гипс, известняк) [6].

К настоящему времени получены оценки отдельных компонентов химического стока Северной Двины, усреднённого за различные периоды наблюдений, например, за 1955–1980 гг., 1948–2000 гг., 1980–2006 гг. и более короткие 10–20-летние временные интервалы [7–11]. Однако наиболее полные сведения по ионному стоку, приведённые для периода до начала 2000-х гг., не учитывают влияние изменчивости климатических факторов, особенно в последние 1,5–2 десятилетия, и получены разными методами расчёта стока ионов. В связи с этим, целью данной работы стала количественная оценка влияния современного потепления климата на годовой и сезонный сток главных ионов в замыкающем створе Северной Двины и стока воды за период режимных гидрохимических наблюдений с 1947 по 2016 гг.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран бассейн Северной Двины в створе с. Усть-Пинега, расположенном на входе в устьевую область в 137 км от морского края дельты ниже

впадения р. Пинеги. Он замыкает площадь водосбора, равную 348000 км² (97,5% всей площади водосбора) [12]. Начало наблюдений за химическим составом воды в этом створе датируется 1947 г., в то время как ряды наблюдений за расходом воды имеют значительно большую продолжительность – с 1882 г. Средний за весь период наблюдений годовой расход воды составляет 3305 м³/с. Весьма близок к нему (3247 м³/с) средний многолетний годовой расход воды, рассчитанный для периода, в течение которого проводились гидрохимические наблюдения.

По классификации О.А. Алекина вода Северной Двины в замыкающем створе относится к гидрокарбонатному классу, группе кальция, II тип (C_{Ca}^{II}). Генетически воды этого типа связаны с различными осадочными породами и продуктами выветривания коренных пород, являясь преимущественно смешанными [13].

Для оценки изменений стока воды и ионного стока в условиях меняющегося климата использованы режимные гидрометрические и гидрохимические данные Государственной наблюдательной сети Росгидромета за период с 1947 по 2016 гг.

Метод определения границы начала современного потепления климата основан на использовании разностно-интегральных кривых (РИК) [3], позволяющих выявить годы смены длительных периодов пониженных/повышенных значений среднегодовой и среднезимней температуры воздуха (рис. 1, см. цв. вкладку III). Временную границу смены долговременных фаз повышенных/пониженных значений температуры воздуха определяли на основе выявления минимальных и максимальных значений ординат РИК в комбинации с критерием Стьюдента и тестом Манн-Уитни-Пети [2]. Анализ РИК показывает, что начало интенсивного потепления в этом регионе можно отнести к 1988 г.

Разница усреднённых для бассейна Северной Двины средних многолетних значений климатических характеристик относительно более холодного периода, продолжавшегося с 1930–1940-х гг. до конца 1980-х гг. и последовавшего за ним более тёплого периода довольно заметна. Так, соответствующие значения среднегодовой температуры воздуха равны 0,8 и 1,9 °С, а годовой суммы атмосферных осадков – 581 и 628 мм.

Изменения стока воды и стока главных ионов, обусловленные современным потеплением климата, оценивались на основе сравнения сред-

А. О. Даниленко, А. Г. Георгиади
«Влияние современного потепления на водный
и ионный сток Северной Двины». С. 64.

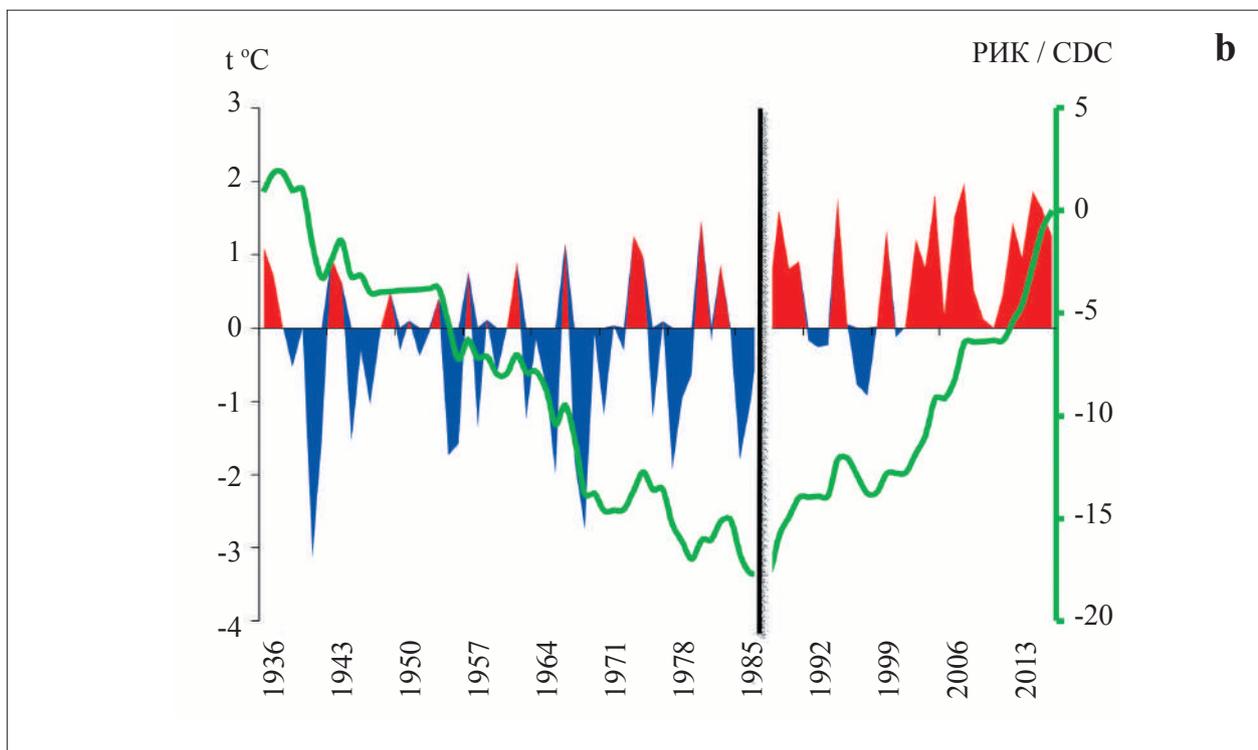
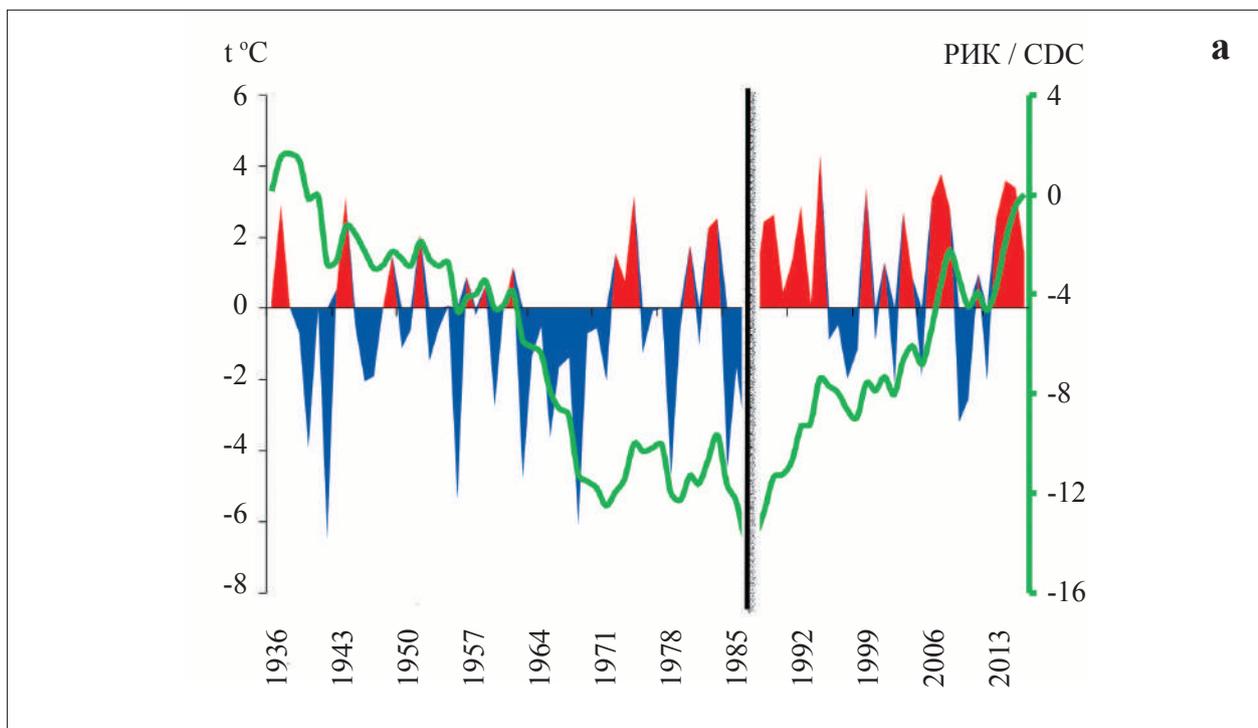


Рис. 1. Многолетние изменения среднегодовой (а) и средней зимней (б) температуры воздуха, усреднённой по бассейну Северной Двины, выраженные в координатах интегрально-разностных кривых
Fig. 1. Long-term changes of the average annual (a) and average winter (b) air temperatures in the Northern Dvina basin, expressed in the coordinates of the integral-difference curves

них годовых и сезонных значений для периодов более тёплого и более холодного климата.

Метод расчёта стока главных ионов. Очевидно, что наиболее точное значение ионного стока можно получить при наличии ежедневных данных по среднесуточному расходу воды и концентрациям вещества, однако наблюдения за химическим составом, как правило, ограничены и неоднородны по частоте и срокам отборов. В связи с этим ионный сток рассчитывали на основе статистической связи между среднесуточным расходом воды (Q) и измеренными значениями концентраций (C).

Связь гидрохимического режима с водным выражается в синхронном, но обратно противоположном изменении кривых расхода и минерализации [13], что позволяет получить устойчивые зависимости между расходом воды и концентрациями главных ионов на основе корреляционно-регрессионного анализа (табл. 1). Так для замыкающего створа р. Северной Двины характерно нарастание минерализации в межпаводковый период и быстрое падение – в весенний за счёт смещения более минерализованных грунтовых вод с менее минерализованными, стекающими с поверхности почв во время снеготаяния. Графически это выражается кривыми гиперболического типа, ветви которых асимптотически приближаются к координатным осям.

Согласно полученным уравнениям, ошибка аппроксимации степенных функций колеблется от 14 до 27% для литогенных ионов гидрокарбонатов, кальция и магния и от 24 до 97% для ионов, более чувствительных к антропогенному воздействию – одновалентных катионов металлов, хлоридов и сульфатов. Большое значение ошибки аппроксимации функции зависимости суммы натрия и калия от расхода воды вызвано природой анализи-

руемых данных. В отличие от остальных показателей, количественно измеряемых в лабораторных условиях, сумма ионов натрия и калия является величиной расчётной. Она вычисляется по разнице между минерализацией и содержанием остальных макрокомпонентов, в связи с чем на неё падает вся сумма погрешностей определения ионов. В связи с этим выводы, сделанные относительно ионного стока одновалентных катионов, не являются достаточно надёжными. Тем не менее, значительные величины индексов детерминации (R^2) для большинства других ионов и особенно для интегрального показателя минерализации речной воды косвенно свидетельствуют о ненарушенности природных процессов формирования гидрохимического режима р. Северной Двины в замыкающем створе.

Расчёт суточного ионного стока (G) и его отдельных компонентов проводили по формуле [14]:

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

где W_i – водный сток за сутки (км^3), C_i – среднесуточная концентрация вещества ($\text{т}/\text{км}^3$), n – количество суток в году, i – порядковый номер суток.

Для расчёта ионного стока за год и за сезон суммировали значения суточного химического стока в соответствующие расчётные периоды. Сезонный ионный сток рассчитан с округлением до месяца: весенне-летний период с апреля по июль, летне-осенний период с августа по ноябрь и зимний период с декабря по март. Полученные многолетние ряды годовых и сезонных значений ионного стока были сгруппированы по климатическим периодам: период более холодного климата охватывает годы с 1947 по 1988 гг., а период более тёпло-

Таблица 1 / Table 1

Статистические характеристики зависимостей концентраций главных ионов от расхода воды в замыкающем створе Северной Двины / Statistical characteristics of the bonds between the main ions concentrations and the water discharge in the Northern Dvina outlet

Главный ион Major ion	Уравнение связи Regression equation $C = f(Q)$	Индекс детерминации Determination index R^2	Ошибка аппроксимации Approximation error $A, \%$
Ca^{2+}	$C = 2732,8 \cdot Q^{-0,566}$	0,88	15,7
Mg^{2+}	$C = 646,7 \cdot Q^{-0,567}$	0,73	27,2
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$C = 151,7 \cdot Q^{-0,446}$	0,25	97,4
HCO_3^-	$C = 7839,3 \cdot Q^{-0,562}$	0,89	14,2
SO_4^{2-}	$C = 6298,4 \cdot Q^{-0,653}$	0,77	24,8
Cl^-	$C = 529,9 \cdot Q^{-0,591}$	0,66	30,2
$\Sigma_{\text{ионов}} / \Sigma_{\text{ions}}$	$C = 15112,0 \cdot Q^{-0,558}$	0,89	15,1

Таблица 2 / Table 2

Годовой и сезонный сток воды р. Северной Двины (с. Усть-Пинега) в периоды холодного и тёплого климата / The annual and seasonal water flow of the Northern Dvina river (Ust-Pinega vlg.) during the cold and warm climatic periods

Климатические периоды Climatic periods	Средний расход воды (Q , м ³ /с) за: / Average discharge in:			
	половодье snow melt flood (IV–VII)	летне-осенний период summer and autumn period (VIII–XI)	зимнюю межень winter low water (XII–III)	год year (I–XII)
Холодный / Cold	6366	2217	968	3188
Тёплый / Warm	6538	2157	1112	3268
ΔQ , %	2,7	-2,7	14,9	2,5

Таблица 3 / Table 3

Годовой и сезонный ионный сток р. Северной Двины (с. Усть-Пинега) в периоды холодного и тёплого климата / The annual and seasonal ions flux of the Northern Dvina river (Ust-Pinega vlg.) during the cold and warm climatic periods

Гидрологические сезоны Hydrological seasons	Климатические периоды Climatic periods	Химический сток ($G_{cp} \pm \sigma$), млн т / Ions flux ($G_{av} \pm \sigma$), million tons						
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	$\Sigma_{ионов} / \Sigma_{ions}$
Год Year (I–XII)	холодный cold	2,73± 0,19	0,63± 0,040	0,72± 0,05	7,9± 0,6	3,35± 0,23	0,456± 0,030	16,0± 1,1
	тёплый warm	2,79± 0,24	0,64± 0,04	0,74± 0,05	8,1± 0,5	3,44± 0,21	0,481± 0,028	16,5± 1,1
	ΔG_{cp} , %	+2,1	+2,6	+2,9	+2,7	+2,8	+5,5	+3,1
Половодье Snow melt flood (IV–VII)	холодный cold	1,19± 0,009	0,264± 0,017	0,308± 0,021	3,41± 0,24	1,43± 0,10	0,193± 0,013	6,9± 0,5
	тёплый warm	1,22± 0,11	0,268± 0,024	0,315± 0,027	3,49± 0,30	1,47± 0,12	0,197± 0,016	7,0± 0,6
	ΔG_{cp} , %	+2,4	+1,5	+2,3	+2,3	+2,4	+2,1	+2,7
Летне-осенний период / Summer and autumn period (VIII–XI)	холодный cold	0,81± 0,12	0,187± 0,025	0,212± 0,030	2,36± 0,38	0,99± 0,14	0,136± 0,019	4,8± 0,7
	тёплый warm	0,80± 0,10	0,185± 0,021	0,210± 0,025	2,32± 0,29	0,98± 0,12	0,134± 0,015	4,7± 0,6
	ΔG_{cp} , %	-1,1	-1,1	-0,9	-1,5	-1,0	-1,5	-0,8
Зимнюю межень Winter low water (XII–III)	холодный cold	0,74± 0,07	0,175± 0,015	0,196± 0,018	2,15± 0,20	0,92± 0,08	0,127± 0,011	4,4± 0,4
	тёплый warm	0,780± 0,07	0,186± 0,016	0,211± 0,019	2,32± 0,21	0,99± 0,09	0,136± 0,016	4,7± 0,4
	ΔG_{cp} , %	+8,1*	+6,3*	+7,7*	+7,4*	+7,8*	+7,1*	+8,1*

Примечание: * – отмечены статистически значимые отличия при $p < 0,05$.

Note: * – statistically significant differences at $p < 0.05$.

го – с 1989 по 2016 гг. Разница среднегодовых и среднесезонных значений ионного стока между этими периодами (G_{cp}) вычислена в процентах по отношению к базовому периоду холодного климата. Прирост G_{cp} характеризует увеличение ионного стока в период тёплого климата, а отрицательные величины G_{cp} , напротив, свидетельствуют о его снижении.

Статические оценки проводили с использованием программ Statistica и MS Excel. Выборки значений ионного стока сравнивали между собой с использованием параметрического t -критерия Стьюдента для независимых

выборок, так как в полученных группах наблюдалось симметричное распределение значений вокруг выборочного среднего.

Результаты и обсуждение

Изменения годового и сезонного стока воды и главных ионов в период современного потепления климата оценены количественно и представлены в таблицах 2, 3. Наиболее заметный рост водного стока происходил зимой. Однако на изменении годового стока воды это отразилось слабо, так как объём стока ве-

сеннего половодья и в летне-осенний период существенно превышают объёмы стока в зимнюю межень. Наблюдаемый характер различий в речном стоке для разных климатических периодов обусловлен особенностями чередования долговременных контрастных фаз годового и сезонного стока [2, 15].

В период современного потепления ионный сток в замыкающем створе Северной Двины увеличился в период половодья, зимнюю межень и год в целом, тогда как сток ионов в летне-осенний период незначительно снизился (табл. 3). При этом масштаб изменений стока ионов менее заметен, чем изменения стока воды, что обусловлено обратным характером связи между расходом воды и концентрацией химического вещества. Более того, статистически значимы тенденции роста ионного стока только в зимний период, что связано с увеличением стока сравнительно более минерализованных грунтовых вод, составляющих в этот период основу питания реки.

Динамика ионного стока свидетельствует, что в зимнюю межень в период более тёплого климата увеличилась интенсивность разрушения и выноса за пределы ландшафта в бассейн Белого моря гипсовых и гидрокарбонатных пород (химическая денудация ландшафта).

Смена климатических условий слабо отразилась и на внутригодовом распределении ионного стока. Превалирующий его объём приходится на период весеннего половодья несмотря на то, что в это время происходит максимальное разбавление речных вод, и концентрации главных ионов снижаются до минимальных границ естественных интервалов колебаний. В период холодного климата на половодье приходилось 42–44% годового ионного стока, а в период тёплого климата разброс стал больше – 41–45%. Меженные периоды близки между собой по объёмам ионного стока, однако в период холодного климата разница между ними была более заметна: на сток в летне-осеннюю межень приходилось около 30% годового стока, а в зимнюю немного меньше – 27–28%. В период современного потепления климата сток ионов меженных сезонов сравнился и составил 28–29% годового стока.

Заключение

Таким образом, в период современного потепления наблюдается увеличение стока воды и стока ионов в зимнюю межень, что вызвано особенностями чередования долговременных контрастных фаз годового и сезонного стока.

Более чувствителен к изменениям климата сток ионов кальция, поступающего в речное русло при дренировании подземными водами карбонатных и сульфатных пород, сравнительно легко подвергающихся химической денудации [16]. Эти катионы в местных поверхностных водах являются доминирующими несмотря на то, что низовья Северной Двины расположены в западно-таёжных ландшафтах без многолетней мерзлоты с хорошо промытыми, обеднёнными кальцием почвами и поверхностными грунтами [17]. Даже при отсутствии многолетнемёрзлых пород в бассейне Северной Двины общий тренд потепления привёл к меньшему выхолаживанию почв в холодный период года [18], и, как следствие, к их более интенсивному участию в формировании ионно-солевого состава поверхностных вод. Согласно наблюдаемой сезонной динамике, основным источником главных ионов являются естественные процессы.

В целом следует отметить, что климатические изменения, заметно трансформирующие водный сток, слабее сказываются на стоке ионов. Динамическое постоянство геохимической нагрузки на Белое море независимо от колебаний водности Северной Двины определяется обратным характером связи между расходом воды и концентрацией растворённых химических веществ. Кроме того, антропогенное влияние на ионный состав на водосборе реки незначительно, что позволяет поддерживать установившиеся связи в условиях меняющегося климата.

Сезонная структура химического стока в период относительно тёплого климата изменилась сравнительно слабо. В период относительно холодного климата зимняя межень характеризовалась наименьшим стоком ионов в годовом цикле, однако при современном потеплении климата он сравнился со стоком летне-осеннего сезона за счёт увеличения доли более минерализованных «зимних» вод в общем речном стоке.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания Института географии РАН АААА-А19-119021990093-8 (FMGE-2019-0007). Анализ влияния современного потепления климата на ионный сток поддержан РФФИ, грант № 18-05-60240.

References

1. Lammers R.B., Shiklomanov A.I., Vörösmarty C.J., Fekete B.M., Peterson B.J. Assessment of contemporary arctic

- river runoff based on observation discharge records // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2001. V. 106. No. D4. P. 3321–3334. doi: 10.1029/2000JD900444
2. Hinzman L.D., Bettez N.D., Bolton W.R., Chapin F.S., Dyrgerov M.B., Fastie C.L., Griffith B., Hollistr R.D., Hope A., Huntington H.P., Jensen A.M., Jia G.J., Jorgenson T., Kane D.L., Klein D.R., Kofinas G., Lynch A.H., Lloyd A.H., McGuire A.D., Nelson F.E., Oechel W.C., Osterkamp T.E., Racine C.H., Romanovsky V.E., Stone R.S., Stow D.A., Sturm M., Tweedie C.E., Vourlitis G.L., Walker M.D., Walker D.A., Webber P.J., Welker J.M., Winker K.S., Yoshikawa K. Evidence and implications of recent climate change in Northern Alaska and other Arctic Regions // *Climatic Change*. 2005. V. 72. P. 251–298. doi: 10.1007/s10584-005-5352-2
3. 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. No. 87 (2). P. 167–176. doi: 10.2312/polarforschung.87.2.167
4. Shiklomanov A., Dery S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tang W. River freshwater flux to the Arctic Ocean // *Arctic Hydrology, Permafrost and Ecosystems*. Cham: Springer, 2021. P. 703–738. doi: 10.1007/978-3-030-50930-9_24
5. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J., Gurtovaya T., McClelland J.W., Shiklomanov A.I., Spencer R.G.M., Tank S.E., Zhulidov A.V. Climate change impacts on the hydrology and biogeochemistry of Arctic Rivers // *Global Impacts of Climate Change on Inland Waters*. Wiley, 2013. P. 3–26. doi: 10.1002/9781118470596.ch1
6. Datsenko Yu.S., Efimova L.E., Zaslavskaya M.B., Pakhomova O.M. Ion flux to the Arctic seas of Russia // *Rossiyskie polyarnye issledovaniya*. 2016. No. 1 (23). P. 12–14 (in Russian).
7. Nikanorov A.M., Sokolova L.P., Resetnyak O.S., Kondakova M.Yu., Danilenko A.O. Anthropogenic load on the estuarine area of the Northern Dvina River // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2010. V. 35. No. 4. P. 281–288. doi: 10.3103/S1068373910040060
8. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A. Rivers of Russia. Part 2. Rivers of European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology). Rostov-na-Donu: NOK, 2010. 200 p. (in Russian).
9. Johnston S.E., Shorina N., Bulygina E., Vorobjeva T., Chupakova A., Klimov S.I., Kellerman A.M., Guillemette F., Shiklomanov A., Podgorski D.C., Spencer R.G.M. Flux and seasonality of dissolved organic matter from the Northern Dvina (Severnaya Dvina) River, Russia // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2018. V. 123. No. 3. P. 1041–1056. doi: 10.1002/2017JG004337
10. Shorina N., Spencer R.G.M., Klimov S.I., Bulygina E., Ladesov A., Vorobieva T. Investigation of dissolved organic substances in the Northern Dvina under different hydrological seasons // *Geophysical Research Abstracts*. 2017. V. 19. P. 6512.
11. Drake T.W., Tank S.E., Zhulidov A.V., Holmes R.M., Gurtovaya T., Spencer R.G.M. Increasing alkalinity export from large russian arctic rivers // *Environmental Science & Technology*. 2018. V. 52. No. 15. P. 8302–8308. doi: 10.1021/acs.est.8b01051
12. Surface water resources of the USSR. V. 3. Northern region / Eds. I.M. Zhila, N.M. Alyushinskaya. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972. 663 p. (in Russian).
13. Alekin O.A. The basics of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1953. 296 p. (in Russian).
14. R 52.24.867-2017 Methodology of the transfer chemicals mass with water runoff calculating within the river sections. Rostov-on-Don, 2017. 102 p. (in Russian).
15. Georgiadi A.G. Long-term periods of low/high water availability of the Severnaya Dvina and Don rivers in the XIX–XXI centuries // *Global Climate Change: Regional Effects, Models, Forecasts*. Voronezh: Tsifrovaya poligrafiya, 2019. P. 391–394 (in Russian).
16. Shariffulin A.N., Denmukhametov R.R., Kozhevnikov E.D., Mozzherin V.I. The plain chemical denudation // *Scientific Notes of Kazan State University*. 2008. V. 150. No. 4. P. 51–58 (in Russian).
17. Malov A.A. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the Northern Dvina basin (NW Russia) // *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 98. P. 1–5. doi: 10.1051/e3sconf/20199807016
18. Khudyakov O.I., Reshotkin O.V. Soil evolution in relation to modern climate warming // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 2. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-2-038-043